



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Ανάπτυξη και Αξιολόγηση Διαδραστικών Μοντέλων
Εικονικής Πραγματικότητας για το Σχεδιασμό
Ρομποτικών Συστημάτων Παραγωγής**

Συγγραφέας:
Ηλίας Ν. Μάτσας

Επιβλέπων:
Καθ. Γ.-Χ. Βουσιάκος

Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος II. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

Ηλία Μάτσα

Διπλ. Μηχανολόγου Μηχανικού ΕΜΠ

Ανάπτυξη και Αξιολόγηση Διαδραστικών Μοντέλων Εικονικής Πραγματικότητας για το Σχεδιασμό Ρομποτικών Συστημάτων Παραγωγής

Εξεταστική Επιτροπή:

Καθ. Γ.-Χ. Βοσνιάκος (επιβλέπων, Σχολή ΜΜ ΕΜΠ)

Καθ. Ν. Μαρμαράς (Μέλος της τριμελούς επιτροπής, Σχολή ΜΜ ΕΜΠ)

Δρ. Δ. Τζοβάρας, Ερευνητής Α', Διευθυντής ΙΠΤΗΛ (Μέλος της τριμελούς επιτροπής)

Καθ. Δ.Ε. Μανωλάκος (Σχολή ΜΜ ΕΜΠ)

Καθ. Ευ. Παπαδόπουλος (Σχολή ΜΜ ΕΜΠ)

Επικ. Καθ. Αλέξανδρος-Αλβέρτος Γκίνης (Σχολή ΝΜΜ ΕΜΠ)

Λέκτορας Δ. Ναθαναήλ (Σχολή ΜΜ ΕΜΠ)

Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος ΙΙ. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.



Copyright © 2015 Ηλίας Ν. Μάτσας

Με την επιφύλαξη κάποιων δικαιωμάτων

Όροι χρήσης για αναδημοσιεύσεις:



Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση - Παρόμοια Διανομή 4.0 Διεθνές

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τις θέσεις του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν απαραίτητα τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

*Κάποιες φορές, χρειάζονται χρόνια σπουδών
για να μάθεις να αναδημιουργείς το φυσικό*

Man Ray

Ευχαριστίες

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή Γιώργο Βοσνιακό, για τη σχέση εμπιστοσύνης που έχτισε εξ αρχής και για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε, η οποία ήταν πολύ πιο ουσιαστική από τη σχέση Δάσκαλου-μαθητή. Η καθοδήγηση, η συμπαράσταση και η υποστήριξη που μου παρείχε ήταν αδιάκοπη και εξαιρετικής σημασίας, τόσο για εμένα προσωπικά, όσο και για την ολοκλήρωση της διδακτορικής διατριβής. Για τα παραπάνω και για την επιμονή του, τον ευχαριστώ ειλικρινά.

Οφείλω να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, Καθ. Ν. Μαρμαρά και Δρ. Δ. Τζοβάρια, για την αποδοχή της συνεργασίας, για την εμπιστοσύνη τους και για την υποστήριξη που επέδειξαν, όποτε τη χρειάστηκα. Ιδιαίτερα ευχαριστώ το Λέκτορα Δ. Ναθαναήλ για τις χρήσιμες συζητήσεις που κάναμε και για τις υποδείξεις του στο σχεδιασμό και τη διενέργεια των δοκιμών με χρήστες.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Simon Richir, διευθυντή του Εργαστηρίου Presence et Innovation του Πολυτεχνείου Arts et Métiers ParisTech στο Laval της Γαλλίας, για τη φιλοξενία στο εργαστήριο και για την ανιδιοτελή του υποστήριξη, κατά τη διάρκεια της επτάμηνης παραμονής μου, στο πλαίσιο του προγράμματος ανταλλαγής φοιτητών Erasmus.

Εξαιρετικά σημαντική και ανιδιοτελής ήταν η βοήθεια του Δημήτρη Μπατρά, υπ. Διδάκτορα στο Πανεπιστήμιο Paris 8, χωρίς τη βοήθεια του οποίου δε γνωρίζω εάν θα είχα καταφέρει να φέρω εις πέρας την παρούσα διδακτορική διατριβή. Η συνεισφορά του στην ανάπτυξη του Εικονικού Περιβάλλοντος υπήρξε καθοριστική, και μάλιστα στην πιο δύσκολη φάση της διατριβής, και, για αυτό, τον ευχαριστώ ειλικρινά.

Ευχαριστώ επίσης όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ, τους φίλους και καθημερινούς συνεργάτες στο ΕΜΠ τα τελευταία 5 χρόνια. Δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τον Καθ. Δ. Μανωλάκο, τον Δρ. Π. Κωστάζο και το Λέκτορα Α. Μαρκόπουλο, για το ιδιαίτερα θερμό κλίμα που υπήρχε στο Εργαστήριο και για την εμπιστοσύνη τους. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τους φίλους και συνεργάτες στο Εργαστήριο Δρ. Ξ. Γωγουβίτη, Δρ. Π. Μπενάρδο, καθώς και τους Υ/Δ κ.κ. Α. Σιάσο, Γ. Παπαζέτη, Α. Κλεφτόγιαννη, Ν. Κοντολάτη και Μ. Σταθάτο, για τη βοήθειά τους, τη φιλία τους, την άψογη συνεργασία, καθώς και για το χρόνο που περάσαμε μαζί.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου, Καλλιόπη, Μάκη και Ευγενία, για την πλήρη στήριξη που μου παρείχαν, ηθική και υλική, και γιατί μου επιτρέπουν να δρέψω τη σοδειά της θαλπωρής και της υποστήριξης που πάντα μου προσέφεραν.

Περίληψη

Στα σύγχρονα συστήματα παραγωγής, τα τελευταία χρόνια έχει εμφανιστεί η ανάγκη για συνεργασία Ανθρώπου-Βιομηχανικού Ρομπότ (A-P) σε κοινό (διαμοιραζόμενο) χώρο εργασίας, για την από κοινού εκτέλεση βιομηχανικών καθηκόντων ή κατεργασιών. Ο σκοπός της συνεργασίας και της συνύπαρξης A-P κατά την εκτέλεση καθηκόντων που συνήθως εκτελούνται χειρωνακτικά, είναι η βελτίωση της ποιότητας και η αύξηση της παραγωγικότητας, εμπλουτίζοντας τη γνώση, τις δεξιότητες και τις κιναισθητικές δυνατότητες του εργαζόμενου με τη δύναμη, την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα των ρομπότ. Στην περίπτωση που εξετάζουμε λοιπόν, αντί να έχουμε αντικατάσταση της ανθρώπινης εργασίας από ρομπότ σε επαναλαμβανόμενα, επικίνδυνα ή χαμηλής προστιθέμενης αξίας καθήκοντα, επιθυμούμε τη συνύπαρξη A-P και τη συνεργατική υποστήριξη της ανθρώπινης εργασίας και δεξιότητας από το ρομπότ, με αποτέλεσμα την πραγματοποίηση συνολικής εργασίας υψηλής προστιθέμενης αξίας.

Μέχρι και σήμερα, τα ανακύπτοντα ζητήματα ασφαλείας αντιμετωπίζονται πρωτίστως με χωρικό ή/και χρονικό διαχωρισμό ανθρώπου και ρομπότ, και, κατ' αυτό τον τρόπο, κρατούν ακόμα την εφαρμογή της συνεργασίας A-P ουσιαστικά ανεκμετάλλετη στη βιομηχανία. Επιπρόσθετα, οι υφιστάμενες τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας είναι δομημένες σε μια σειριακή λογική γεγονότων τύπου «σταμάτα-και-προχώρα» (stop-and-go), η οποία είναι αναποτελεσματική, καθώς ενδέχεται να σταματά την παραγωγή, και να ακυρώνει ουσιαστικά τα πλεονεκτήματα της συνεργασίας A-P.

Η παρούσα ερευνητική εργασία διερευνά τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας οι οποίες δεν διακόπουν -κατά το δυνατόν- την ομαλή ροή της συνεργασίας A-P. Επιπλέον, αναζητά τρόπους γνωστικής διευκόλυνσης και υποστήριξης της αντίληψης της κατάστασης του χρήστη, έτσι ώστε να είναι δυνατή η πρόβλεψη της συμπεριφοράς του ρομπότ. Τέλος, ερευνάται η αποτελεσματικότητα των διαφορετικών τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας, αλλά και τα κριτήρια ενεργοποίησης των τεχνικών αυτών, έτσι ώστε να αποφεύγονται πιθανές άσκοπες, ή πρώιμες ενεργοποιήσεις.

Προκειμένου να επιτευχθεί η παραπάνω διερεύνηση, προτείνεται η δημιουργία ενός υψηλά-αλληλεπιδραστικού Εικονικού Περιβάλλοντος (EΠε), το οποίο λειτουργεί ως πλατφόρμα δοκιμών της συνεργασίας A-P. Κατά τη διάρκεια της συνεργασίας του με το ρομπότ, ο χρήστης δέχεται ανάδραση με δυναμικά ερεθίσματα (γνωστικά βοηθήματα) σε πραγματικό χρόνο, τα οποία σκοπεύουν να εμπλουτίσουν με πληροφορία την ερευνώμενη συνεργασία. Τέλος, προτείνονται δύο στρατηγικές (τεχνικές) ασφαλούς συνεργασίας: στην πρώτη το ρομπότ επιβραδύνει όταν ανιχνεύεται επερχόμενη σύγκρουση (ανεπιθύμητη επαφή) με τη χρήστη, ενώ στη δεύτερη το ρομπότ υποχωρεί και κατευθύνεται στον τελικό προορισμό με τροποποιημένη τροχιά, έτσι ώστε να αποφύγει τον άνθρωπο.

Με βάση τα παραπάνω, στην παρούσα θεώρηση, προέκυψαν τρεις βασικές ερευνητικές προβληματικές. Η πρώτη προβληματική έχει δύο σκέλη: αναφέρεται αφενός στην ικανότητα και την αποτελεσματικότητα της μοντελοποίησης της συνεργασίας A-P από το διαδραστικό ΕΠε, και αφετέρου, στην αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη, ως εργαλείου για τη διερεύνηση αυτής της συνεργασίας και για την εκπαίδευση σε αυτήν. Η δεύτερη προβληματική αφορά στη χρήση των γνωστικών βοηθημάτων που παρέχονται στο χρήστη, αλλά και στην επίδραση που έχουν αυτά στην αντίληψη του κινδύνου (προσλαμβανόμενη/αντιληπτή ασφάλεια) και στην αντίληψη της κατάστασης. Η τρίτη προβληματική αφορά στη χρήση των διαφορετικών στρατηγικών ασφάλειας (επιβράδυνση/υποχώρηση), στην αποδοχή τους από το χρήστη και στην επίδραση που έχουν στην ασφάλεια και στην απόδοση (εύροια) της συνεργασίας A-P.

Ο *βραχυπρόθεσμος στόχος* της διδακτορικής διατριβής ήταν η δημιουργία ενός Εικονικού Περιβάλλοντος (ΕΠε) υψηλής αλληλεπίδρασης και εμπύθισης, το οποίο θα λειτουργεί ως μια πλατφόρμα πειραματισμού και δοκιμών των τεχνικών αλληλεπίδρασης A-P και της εύροιας της συνεργασίας A-P στον εικονικό κόσμο. Ο *μεσοπρόθεσμος στόχος* είναι η διερεύνηση της επαυξημένης εμπειρίας, της αντίληψης και της συμπεριφοράς του χρήστη στο ΕΠε κατά τη διάρκεια της εικονικής συνεργασίας A-P. Το διαδραστικό ΕΠε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση της αποδοχής και της ασφάλειας της συνεργασίας A-P, ενισχύοντας την αντίληψη (awareness) του χρήστη όσον αφορά την κίνηση του ρομπότ με τη χρήση πολυαισθητηριακών σημάτων και βοηθημάτων. Τελικά, ο *μακροπρόθεσμος στόχος* αυτής της έρευνας είναι η διερεύνηση τρόπων ασφαλειοκεντρικού προγραμματισμού της τροχιάς του ρομπότ, με την αξιολόγηση διαφορετικών τεχνικών αποφυγής συγκρούσεων και τη χρήση τεχνικών, μέσα στο ΕΠε, βασισμένων στην αντίληψη της κίνησης και την επικοινωνία της πρόθεσης, τόσο από τον άνθρωπο όσο και από τον ελεγκτή του βιομηχανικού ρομπότ.

Συνεπώς, η διδακτορική διατριβή περιστρέφεται γύρω από τη συνεργασία Ανθρώπου-Ρομπότ (A-P) στα ρομποτικά συστήματα παραγωγής, την αποτελεσματικότητα, την ασφάλεια και την αποδοχή αυτής της συνεργασίας και τέλος, γύρω από τη διαδραστική Εικονική Πραγματικότητα αφενός ως εργαλείο μελέτης της παραπάνω συνεργασίας, και αφετέρου, η ίδια εγγενώς, ως ερευνητικό πεδίο έρευνας το οποίο αναπαριστά και εμπλουτίζει γνωστικά την αλληλεπίδραση με τον άνθρωπο.

Προκειμένου να διερευνηθούν οι ερευνητικές προβληματικές και οι υποθέσεις επίλυσής τους, δημιουργήθηκε το ΕΠε “beWare of the Robot”. Η “beWare of the Robot” είναι μια αυτόνομη (standalone) εφαρμογή που αναπτύχθηκε και συναρμολογήθηκε στο περιβάλλον του Unity 3d™ και η οποία μπορεί να τρέξει σε έναν τυπικό προσωπικό υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα Windows™. Το δημιουργηθέν ΕΠε είναι πλήρως πρωτότυπο και έντονα διαδραστικό, ενώ στην εικονική σκηνή χρησιμοποιείται ένα ρεαλιστικό μοντέλο ανθρωποειδούς και το μοντέλο ενός βιομηχανικού ρομποτικού βραχίονα. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι

τριτοδιάστατων διεπαφών αλληλεπίδρασης: (i) κάσκες στερεοσκοπίας (HMDs), ως συσκευές εξόδου τριτοδιάστατης απεικόνισης (Z800 3DVisor και Oculus Rift DK2), αλλά και ως συσκευές εισόδου για την αναγνώριση της κίνησης του κεφαλιού και (ii) αισθητήρες αναγνώρισης κίνησης (Microsoft Kinect™) ως τριτοδιάστατες συσκευές εισόδου και κιναισθητικού ελέγχου.

Ως πεδίο εφαρμογής (υπόθεση εργασίας) επιλέχθηκε η συνεργατική χειροκίνητη στρώση ανθρακοϋφασμάτων (hand lay-up), καθώς είναι ισχυρά αλληλεπιδραστική, απαιτεί μεγάλη εγγύτητα και παράλληλη εργασία A-P, ενώ μπορούν να προσαρμοστούν σε αυτήν οι συνηθέστεροι τύποι συνεργασίας A-P (τροφοδοσία, παράδοση τεμαχίου, συγκράτηση, ταυτόχρονη και από κοινού εργασία πάνω στο ίδιο τεμάχιο).

Συνολικά αναπτύχθηκαν δύο περιπτώσεις εφαρμογής (use cases). Η πρώτη περίπτωση εφαρμογής (εκδόσεις beWare of the Robot v1.0 και v1.5) αναπαριστά τη ρομποτική τροφοδοσία (παράδοση) των ανθρακοϋφασμάτων από έναν πάγκο εναπόθεσης υφασμάτων προς τον άνθρωπο και συνιστά συγχρονισμένο τύπο συνεργασίας με χωρική σύμπτωση A-P. Η δεύτερη περίπτωση εφαρμογής, (έκδοση beWare of the Robot v2.0) αφορά συνεργατική προετοιμασία του τεμαχίου (αφαίρεση ενός αυτοκόλλητου καλύμματος) και συνεργατική και από κοινού στρώση του ανθρακοϋφάσματος σε ένα καλούπι (ταυτόχρονος και υποβοηθητικός τύπος συνεργασίας A-P).

Για την εκτέλεση των βασικών καθηκόντων της συνεργασίας A-P στο Εικονικό Περιβάλλον χρησιμοποιείται μεγάλο πλήθος τεχνικών αλληλεπίδρασης. Εξαιτίας της ανίχνευσης κίνησης (tracking) και της χρήσης του ανθρωποειδούς για την αναπαράσταση των καθηκόντων του χρήστη, επιτυγχάνεται αντίστοιχα αμεσότητα και φυσικότητα σε όλα τα γενικά καθήκοντα αλληλεπίδρασης (επιλογή, πλοήγηση, χειρισμός και έλεγχος συστήματος). Επίσης, δημιουργήθηκαν δύο πρωτότυπες μεταφορές αλληλεπίδρασης, αυτές της εικονικής συνεργατικής στρώσης (virtual lay metaphor) και αυτή της εικονικής αφαίρεσης του αυτοκόλλητου καλύμματος (virtual removal metaphor), και μία τεχνική. Η τεχνική «ακολούθησε το χέρι μου» (follow my hand) πραγματοποιείται με τη χρήση ενός εικονικού χεριού (οδηγού/πλότου) και ενός μοτίβου κίνησης, παράγοντας ένα γνωστικό βοήθημα προσομοίωσης του πραγματικού καθήκοντος στο ΕΠε.

Οι δημιουργηθείσες τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε παθητικές/προνοητικές (proactive) τεχνικές και ενεργητικές/προσαρμοστικές (adaptive) τεχνικές. Η λογική των προβλεπτικών τεχνικών βασίζεται κυρίως στη χρήση γνωστικών βοηθημάτων (οπτικών και ηχητικών ενδείξεων, νύξεων και συναγερμών) και στοχεύει στην υποστήριξη της επικοινωνίας του χρήστη με το ρομπότ, της επίγνωσης της κατάστασης και της αντίληψης του κινδύνου. Οι προσαρμοστικές (adaptive) τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας A-P που ερευνούμε είναι δύο (i-επιβράδυνση, ii-υποχώρηση), αναφέρονται στην (προσαρμοστική) κινηματική συμπεριφορά του ρομπότ και

εστιάζουν στην αποφυγή της επαφής μεταξύ A-P, χωρίς διακοπή της κίνησης του ρομπότ (αδιάκοπη συνεργασία).

Πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές χρηστών, μία για κάθε περίπτωση εφαρμογής, και χρησιμοποιήθηκαν τόσο υποκειμενικές μετρικές ικανοποίησης των χρηστών (αυτο-αξιολόγηση), όσο και μετρικές απόδοσης της συνεργασίας A-P (χρόνοι, ταχύτητα ρομπότ, αριθμός συγκρούσεων A-P). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν έπειτα από στατιστικά τεστ, δείχνουν ότι οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας (επιβράδυνση/υποχώρηση) είναι όντως αποτελεσματικές και αποδεκτές από τους χρήστες, αλλά επιβαρύνουν την απόδοση της συνεργασίας. Επίσης, συνολικώς θετικά κρίνονται τα αποτελέσματα στις θεματικές ενότητες της αποτελεσματικότητας της μοντελοποίησης της συνεργασίας A-P, της αποτελεσματικότητας και της αποδοχής του ΕΠε και της εμπλοκής, εμπύθισης και παρουσίας του χρήστη.

Το κείμενο της διδακτορικής διατριβής αποτελείται από δέκα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο επιχειρείται να γίνει μια ουσιαστική εισαγωγή, περιγράφεται το πλαίσιο και η ανάγκη για την έρευνα της συνεργασίας A-P σε ακαδημαϊκό και βιομηχανικό επίπεδο. Στο 2ο κεφάλαιο ορίζεται και κατηγοριοποιείται η συνεργασία A-P. Στο 3ο κεφάλαιο περιγράφονται τα προβλήματα ασφάλειας της συνεργασίας A-P, δίδεται η στάθμη των γνώσεων όσον αφορά τα κριτήρια και τις τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας, και την αποδοχή, αυτής της συνεργασίας από τον άνθρωπο. Στο 4ο κεφάλαιο γίνεται μια πολύ σύντομη αναφορά στη διαδραστική εικονική πραγματικότητα και σε χαρακτηριστικές έννοιες των εικονικών περιβαλλόντων. Στο 5ο κεφάλαιο διατυπώνονται η προβληματική, τα ερευνητικά ερωτήματα και οι υποθέσεις επίλυσης αυτών. Στο 6ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η υλοποίηση του ΕΠε και των συνιστωσών του, ενώ στο 7ο κεφάλαιο επιχειρείται να συστηματοποιηθεί η περιγραφή και η ανάλυση του ΕΠε με τη χρήση διαγραμμάτων UML, αλλά και η περιγραφή των χρησιμοποιούμενων τεχνικών 3D αλληλεπίδρασης. Το 8ο κεφάλαιο περιγράφει τις προτεινόμενες τεχνικές αποφυγής συγκρούσεων και τους μηχανισμούς ενεργοποίησης αυτών. Τέλος στο κεφάλαιο 9 παρουσιάζονται οι δοκιμές με τους χρήστες, τα ερωτηματολόγια, οι μετρικές συμπεριφοράς και τα αποτελέσματα, ενώ στο 10ο κεφάλαιο ανοίγει μια συζήτηση με βάση τα αποτελέσματα και την αποκτηθείσα εμπειρία, και παρατίθενται τα συμπεράσματα της ερευνητικής εργασίας όσον αφορά τη χρήση της ΕΠ, την εμπειρία του χρήστη και την αποτελεσματικότητα των τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας A-P.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή - πλαίσιο	1
1.1. Τάσεις και εξελίξεις στα ρομποτικά συστήματα παραγωγής	1
1.2. Η ανάγκη για συνεργασία Ανθρώπου-Βιομηχανικού Ρομπότ (A-P).....	3
1.3. Η Εικονική Πραγματικότητα (ΕΠ) ως εργαλείο μοντελοποίησης διαδραστικών καθηκόντων	6
1.4. Τα διαδραστικά Εικονικά Περιβάλλοντα (ΕΠε) ως εργαλεία πειραματισμού και δοκιμών της συνεργασίας A-P.....	8
1.5. Σύνθεση του πλαισίου της Δ.Δ (context) και αναφορά του ερευνητικού ερωτήματος (προβλήματος)	9
1.5.1. Σκοπός της διδακτορικής διατριβής	11
1.6. Οργάνωση της διδακτορικής διατριβής	12
2. Η Συνεργασία Ανθρώπου-Βιομηχανικού Ρομπότ (A-P)	13
2.1. Ορισμοί.....	13
2.2. Πεδία εφαρμογής και παραδείγματα συνεργασίας A-P και συνεργατικών ρομπότ	15
2.3. Τύποι και κατηγοριοποίηση της συνεργασίας Ανθρώπου-Ρομπότ (A-P)	18
2.4. Σύνθεση	23
3. Η ασφάλεια της συνεργασίας A-P	25
3.1. Κίνδυνοι και προβλήματα ασφάλειας κατά τη συνεργασία A-P	25
3.2. Κριτήρια ασφαλούς συνεργασίας A-P.....	28
3.3. Τεχνικές και στρατηγικές ασφαλούς συνεργασίας A-P	31
3.4. Ο βαθμός αποδοχής (αποδεκτότητα) της συνεργασίας A-P.....	34
3.5. Ορισμοί και χαρακτηριστικά της ομαδικής συμπεριφοράς κατά τη συνεργασία A-P	37
3.6. Σύνθεση	38
4. Εικονική Πραγματικότητα (ΕΠ).....	40
4.1. Σύντομη εισαγωγή στην ΕΠ	40
4.2. Εισαγωγή στην αλληλεπίδραση στην ΕΠ	41
4.3. Οι έννοιες της εμπύθισης και της παρουσίας στον εικονικό κόσμο	42

4.4.	Διαδραστικά Εικονικά Περιβάλλοντα (ΕΠε) για τη μελέτη συνεργατικών ρομποτικών συστημάτων παραγωγής.....	43
5.	Προβληματική, Ερευνητικά ερωτήματα και Υποθέσεις Επίλυσης	45
5.1.	Ερευνητικά ερωτήματα και υποθέσεις	45
5.1.1.	Η αποδοχή από τους χρήστες και η αποτελεσματικότητα του ΕΠε ως εργαλείου για τη διερεύνηση της συνεργασίας A-P	45
5.1.2.	Η αποτελεσματικότητα των οπτικοακουστικών γνωστικών βοηθημάτων στην αντίληψη του κινδύνου	46
5.1.3.	Η αποτελεσματικότητα και η αποδοχή των διαφορετικών τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας A-P.....	48
5.2.	Οι περιπτώσεις εφαρμογής (use cases).....	49
5.2.1.	Η 1 ^η περίπτωση εφαρμογής: συνόπαρξη και συγχρονισμένη συνεργασία εν σειρά (beWare of the Robot v1.0 & v1.5)	50
5.2.2.	Η 2 ^η περίπτωση εφαρμογής: συνόπαρξη, ταυτόχρονη συνεργασία και εργασία εν παραλλήλω με έντονη αλληλεπίδραση (beWare of the Robot v2.0)	51
6.	Υλοποίηση του Εικονικού Περιβάλλοντος (Περιγραφή)	53
6.1.	Το πεδίο εφαρμογής.....	53
6.2.	Η συγκρότηση του συστήματος (setup)	55
6.3.	Η εικονική σκηνή.....	57
6.4.	Το σενάριο συνεργασίας A-P	64
6.4.1.	Το σενάριο συνεργασίας στις εκδόσεις beWare of the Robot v1.0 και v1.5.....	66
6.4.2.	Το σενάριο συνεργασίας στις εκδόσεις beWare of the Robot v2.0.....	70
6.5.	Θεμελιώδεις έννοιες του περιβάλλοντος Unity 3d	76
6.6.	Το ανθρωποειδές (avatar) και η ανίχνευση/αναγνώρισης κίνησης (tracking)	79
6.7.	Ο ρομποτικός βραχίονας και σύντομη κινηματική του	83
6.8.	Τρισδιάστατες διεπαφές αλληλεπίδρασης με το χρήστη (3D UIs).....	88
6.8.1.	Κάσκες Στερεοσκοπίας - HMDs	88
6.8.2.	Ο Αισθητήρας Αναγνώρισης Κίνησης Kinect™	91
6.9.	Σύνθεση	93
7.	Ανάλυση και Υλοποίηση της Αλληλεπίδρασης.....	95
7.1.	Ανάλυση και περιγραφή με διαγράμματα UML.....	95

7.1.1.	Διάγραμμα Περίπτωσης Χρήσης - Use Case Diagram	95
7.1.2.	Διάγραμμα Δραστηριότητας - Activity Diagram	97
7.1.3.	Διάγραμμα Δομής/Οντοτήτων - Structure Diagram	99
7.2.	Τεχνικές αλληλεπίδρασης για την εκτέλεση των βασικών καθηκόντων της συνεργασίας A-P στο Εικονικό Περιβάλλον	100
7.3.	Ανίχνευση σύγκρουσης και Μηχανισμοί ενεργοποίησης γεγονότων αλληλεπίδρασης	106
7.3.1.	Η ανίχνευση σύγκρουσης.....	106
7.3.2.	Οι μηχανισμοί ενεργοποίησης των γεγονότων αλληλεπίδρασης.....	108
7.4.	Σύνθεση	115
8.	Οι τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας Ανθρώπου-Ρομπότ	117
8.1.	Τα κριτήρια ενεργοποίησης της τεχνικής ασφαλούς συνεργασίας	118
8.2.	Η χρήση γνωστικών βοηθημάτων και συναγεμίων	122
8.3.	Η τεχνική επιβράδυνσης του βραχίονα.....	126
8.4.	Η τεχνική υποχώρησης του βραχίονα.....	127
8.5.	Σύνθεση	130
9.	Πειραματικές Δοκιμές Χρηστών και Αποτελέσματα	131
9.1.	Δοκιμή σεναρίου συνόπαρξης και συγχρονισμένης συνεργασίας εν σειρά (beWare of the Robot v1.0)	131
9.1.1.	Περιγραφή-Εξοπλισμός.....	132
9.1.2.	Πρωτόκολλο	132
9.1.3.	Ερωτηματολόγιο.....	133
9.1.4.	Ανάλυση - Αποτελέσματα	135
9.2.	Δοκιμή σεναρίου συνόπαρξης, ταυτόχρονης συνεργασίας και εργασίας εν παραλλήλω, με έντονη συνέργεια και αλληλεπίδραση (beWare of the Robot v2.0).....	144
9.2.1.	Περιγραφή-Εξοπλισμός.....	145
9.2.2.	Πρωτόκολλο	145
9.2.3.	Ερωτηματολόγιο.....	146
9.2.4.	Αποτελέσματα.....	148
9.2.5.	Μετρικές συμπεριφοράς και απόδοσης.....	160

9.3.	Σύνθεση	168
10.	Συζήτηση – Συμπεράσματα.....	170
10.1.	Η εμπειρία του χρήστη στον εικονικό κόσμο.....	171
10.2.	Η περίπτωση συνόπαρξης και συγχρονισμένης εργασίας εν σειρά (έκδοση 1.0)	175
10.3.	Η περίπτωση συνόπαρξης, ταυτόχρονης συνεργασίας και εργασίας εν παραλλήλω, με έντονη συνέργεια και αλληλεπίδραση (έκδοση 2.0)	176
10.3.1.	Η χρήση των οπτικοακουστικών γνωστικών βοηθημάτων (ενδείξεων, νύξεων και συναγερμών).....	177
10.3.2.	Η τεχνική επιβράδυνσης και η τεχνική υποχώρησης του ρομπότ.....	178
10.4.	Επίλογος.....	179
10.4.1.	Συνεισφορά και Πρωτοτυπία της Διδακτορικής Διατριβής.....	179
10.4.2.	Μελλοντικές επεκτάσεις.....	181
11.	Βιβλιογραφία.....	184

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1-1: Παράδειγμα συνεργασίας Ανθρώπου-Ρομπότ (A-P) για συνεργατική υποβοήθηση στη συναρμολόγηση [© Fraunhofer IFF, http://goo.gl/pMhFQr].....	2
Εικόνα 1-2: Συσχέτιση του μοναδιαίου κόστους παραγωγής και του όγκου παραγωγής ανάλογα με το βαθμό αυτοματοποίησης. (Vicentini, Matthias, & Barattini, 2014).....	4
Εικόνα 1-3: Πιλοτική εφαρμογή συνεργασίας A-P στη γραμμή συναρμολόγησης θυρών αυτοκινήτων στο εργοστάσιο της BMW στο Spartanbourg [©BMW AG via Bloomberg].	5
Εικόνα 1-4: Παράδειγμα Εικονικού Περιβάλλοντος για τη μοντελοποίηση ενός ρομποτικού κυττάρου παραγωγής, ανεπτυγμένο στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ	7
Εικόνα 1-5: Στα αριστερά παράδειγμα ΕΠε για τη διερεύνηση της αποδοχής της συνεργασίας A-P (Weistroffer, 2014), και δεξιά, εφαρμογή επαυξημένης πραγματικότητας (AR) για τη διαισθητική αλληλεπίδραση A-P.....	9
Εικόνα 2-1: Άμεση συνεργασία A-P σε κοινό (διαμοιραζόμενο) χώρο εργασίας.	14
Εικόνα 2-2: Παραδείγματα ρομποτικών βοηθών ανά είδος βιομηχανικής εφαρμογής.....	17
Εικόνα 2-3: Τύποι χωρικού ή/και χρονικού διαχωρισμού μεταξύ ανθρώπου και ρομποτικού βραχίονα	19
Εικόνα 2-4: Παραστατικές τυπολογίες συνεργατικών καθηκόντων σύμφωνα με το ISO 10218/2011	19
Εικόνα 2-5: Επίπεδα χωρικού διαχωρισμού στη συνεργασία A-P	20
Εικόνα 2-6: Τύποι χρονικής συνεργασίας A-P (Helms et al., 2002; R D Schraft et al., 2004)	21
Εικόνα 2-7: Κατανομή του χρόνου μεταξύ A-P σε (1) συστήματα χωρικού διαμοιρασμού και (2) χωρικού και χρονικού διαμοιρασμού (Krüger et al., 2009).....	21
Εικόνα 2-8: Παράδειγμα εφαρμογής μέσου βαθμού συνεργασίας A-P με αυτόματη ανίχνευση της θέσης του ανθρώπου σε σχέση με αυτή του ρομπότ. (Shi et al., 2012)	23
Εικόνα 3-1: Κατανομή των τραυματισμών από ρομπότ, ανά τύπο ατυχήματος κι ανά ανθρώπινο μέλος (Sami Haddadin et al., 2011).....	26
Εικόνα 3-2: Κατηγοριοποίηση των τύπων/σεναρίων ανεπιθύμητων επαφών μεταξύ A-P (S. Haddadin et al., 2009).....	26
Εικόνα 3-3: Δενδρο-διάγραμμα της ασφάλειας της φυσικής επαφής A-P, (Sami Haddadin et al., 2011)	27
Εικόνα 3-4: Κατηγοριοποίηση των στρατηγικών ασφαλούς συνεργασίας A-P κατά (Ikuta et al., 2003)..	32
Εικόνα 3-5: Δεδνδροδιάγραμμα απόφασης για τη στρατηγική ασφαλούς ελέγχου των (Ragaglia et al., 2014b).....	33
Εικόνα 3-6: Ο βαθμός αποδοχής ενός συστήματος και οι συνιστώσες του, προσαρμογή από (Nielsen, 1993).....	35
Εικόνα 3-7: Σχέση της ανθρώπινης ομοιότητας και του βαθμού οικειότητας του ανθρώπου (Mori et al., 2012). Η ύπαρξη κίνησης καταρχήν μεγεθύνει τις κορυφές και τη μυστηριώδη κοιλάδα.....	36
Εικόνα 5-1: Οι δύο περιπτώσεις εφαρμογής (use cases) και τα κυριότερα χαρακτηριστικά που τις ξεχωρίζουν	50
Εικόνα 5-2: Στιγμιότυπα από την πρώτη περίπτωση συνεργασίας (beWare of the Robot v1.0): ο άνθρωπος παραλαμβάνει το τεμάχιο από το ρομπότ στον κοινό χώρο εργασίας	50

Εικόνα 5-3: Η δεύτερη περίπτωση συνεργασίας (beWare of the Robot v2.0): αριστερά ο άνθρωπος αφαιρεί το αυτοκόλλητο κάλυμμα από το τεμάχιο, και δεξιά στρώνει από κοινού με το ρομπότ το ύφασμα πάνω στο κόκκινο τμήμα της μήτρας.	51
Εικόνα 6-1: Χειροποίητη στρώση (hand lay-up) σύνθετων ινωδών ανθρακούφασμάτων. [© easycomposites™ website http://goo.gl/voScTv]	54
Εικόνα 6-2: Σχηματική αναπαράσταση της συγκρότησης του υλικού του συστήματος (system setup) και της ροής των δεδομένων	56
Εικόνα 6-3: Τυπική διάταξη του υλικού και των συσκευών αλληλεπίδρασης κατά τη δοκιμή της demo εφαρμογής beWare of the Robot v1.5.....	57
Εικόνα 6-4: Η εικονική σκηνή του υβριδικού ρομποτικού κυττάρου παραγωγής και οι βασικές του συνιστώσες, ιδωμένα προοπτικά από οπτική 3 ^{οο} προσώπου.....	58
Εικόνα 6-5: Αριστερά, το μεταλλικό καλούπι πάνω στον πάγκο εργασίας και δεξιά το μεταλλικό καλούπι μετά την ολοκλήρωση της πρώτης στρώσης ανθρακούφασμάτων επάνω σε αυτό.	59
Εικόνα 6-6: Τα διαφορετικά ανθρακούφασματα (prepregs) ήδη κομμένα στα επιθυμητά αναπτόγματα και παρατεταγμένα πάνω στον πάγκο εναπόθεσης υφασμάτων.....	59
Εικόνα 6-7: Οι παραστατικές ενδείξεις-γνωστικά βοηθήματα του ΕΠε: ο χώρος εργασίας του ρομπότ, η προβολή του στο δάπεδο και ο βοηθητικός όγκος κίνησης.....	60
Εικόνα 6-8: Το πλαίσιο (παράθυρο) με την υφή βίντεο στο βάθος της σκηνής, εν είδει προοπτικής προέκτασης του χώρου (χρωματισμένο στη φωτογραφία).....	61
Εικόνα 6-9: Η πρώτη περίπτωση εφαρμογής (beWare of the Robot v1.0): η αρχική σκηνή του ΕΠε από οπτική πρώτου προσώπου.	62
Εικόνα 6-10: Η δεύτερη περίπτωση εφαρμογής (beWare of the Robot v2.0): η αρχική σκηνή του ΕΠε από οπτική πρώτου προσώπου.	62
Εικόνα 6-11: Κάτοψη του ΕΠε της 1 ^{ης} περίπτωση εφαρμογής (beWare of the Robot v1.0): ο πάγκος με τα υφάσματα (Υ), το ρομπότ (Ρ), ο άνθρωπος (Α), ο πάγκος εργασίας και το καλούπι (Κ).....	63
Εικόνα 6-12: Κάτοψη του ΕΠε της 2 ^{ης} περίπτωση εφαρμογής (beWare of the Robot v2.0): ο πάγκος με τα υφάσματα (Υ), το ρομπότ (Ρ), ο πάγκος εργασίας με το καλούπι (Κ) και μπροστά ο άνθρωπος (Α).	63
Εικόνα 6-13: Ο συνεργατικός (κοινός) χώρος εργασίας του ΕΠε από οπτική τρίτου προσώπου για την πρώτη περίπτωση εφαρμογής (beWare of the Robot v1.0).....	64
Εικόνα 6-14: Ο συνεργατικός (κοινός) χώρος εργασίας του ΕΠε από οπτική τρίτου προσώπου για τη δεύτερη περίπτωση εφαρμογής (beWare of the Robot v2.0).....	64
Εικόνα 6-15: Εικονογραφημένο σενάριο (storyboard) της πρώτης περίπτωσης εφαρμογής beWare of the Robot v1.0	68
Εικόνα 6-16: Εικονογραφημένο σενάριο (storyboard) της παραλλαγής της πρώτης περίπτωσης εφαρμογής beWare of the Robot v1.5.....	69
Εικόνα 6-17: Εικονογραφημένο σενάριο (storyboard) της δεύτερης περίπτωσης εφαρμογής beWare of the Robot v2.0.....	71
Εικόνα 6-18: Παράδειγμα προσάρτησης με σχέση γονέα (parenting), χειρισμού και μεταφοράς υφάσματος από το χρήστη στην έκδοση beWare of the Robot v1.0 (επάνω) και v1.5 (κάτω).....	72
Εικόνα 6-19: Λειπομέρεια συμπεριφοράς φυσικής υφάσματος (δημιουργία πτυχώσεων κατά την ελεύθερη πτώση του αυτοκόλλητου καλύμματος).	73

Εικόνα 6-20: Σχηματική αναπαράσταση του σεναρίου συνεργασίας στην πρώτη περίπτωση εφαρμογής (έκδοση beWare of the Robot v1.0).....	74
Εικόνα 6-21: Σχηματική αναπαράσταση του σεναρίου συνεργασίας στην πρώτη περίπτωση εφαρμογής (έκδοση beWare of the Robot v1.5).....	75
Εικόνα 6-22: Σχηματική αναπαράσταση του σεναρίου συνεργασίας στη δεύτερη περίπτωση εφαρμογής (έκδοση beWare of the Robot v2.0).....	75
Εικόνα 6-23: Το GameObject του ανθρωποειδούς και τα προσαρτημένα σε αυτό στοιχεία (components)	76
Εικόνα 6-24: Επισκόπηση του περιβάλλοντος ενός Unity project: ο project browser με τα assets του project, η σκηνή, η ιεραρχία με όλα τα GameObjects της σκηνής και ο inspector, με τα components του επιλεγμένου GameObject	77
Εικόνα 6-25: Οι σημαντικότερες συναρτήσεις χρονικών γεγονότων της μητρικής κλάσης MonoBehaviour του Unity.....	78
Εικόνα 6-26: Άποψη πρώτου προσώπου του εικονικού σώματος του ανθρωποειδούς καθώς ο χρήστης κοιτάει προς τα κάτω.	80
Εικόνα 6-27: Το μοντέλο του ανθρωποειδούς στην αρχική του στάση (T) μέσα στο ΕΠε της έκδοσης beWare of the Robot v1.0.....	81
Εικόνα 6-28: Το ανθρωποειδές σε διαφορετικές στάσεις και ο ενσωματωμένος σκελετός του με γκρι χρώμα.	81
Εικόνα 6-29: Ο σκελετός, το μοντέλο του ανθρωποειδούς και τα 20 σημεία που χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση κίνησης στην έκδοση beWare of the Robot v2.0.....	82
Εικόνα 6-30: Η κύρια κάμερα (main camera) στο ύψος των ματιών του ανθρωποειδούς και η επιτογχανόμενη άποψη Α΄ προσώπου στο κάτω δεξιά πλαίσιο.	83
Εικόνα 6-31: Ο βιομηχανικός ρομποτικός βραχίονας Stäubli™ RX 90L: αριστερά, στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ και δεξιά, σε σκηνή ΕΠε, σε περιβάλλον Unity.	84
Εικόνα 6-32: Ο ρομποτικός βραχίονας: αριστερά στην έκδοση 1.0 / 1.5, με την αφαιρετικά-σχεδιασμένη πνευματική αρπάγη στο άκρο του, και δεξιά στη σκηνή της έκδοσης 2.0 με το διαφορετικό σχεδιασμό αρπάγης.....	84
Εικόνα 6-33: Συνεργασία A-P κατά τη στρώση ανθρακούφασματος στην έκδοση 2.0.....	85
Εικόνα 6-34: Το ρομπότ: (a) η ευθεία δένδροειδής κινηματική δομή των αρθρώσεων στην ιεραρχία του Unity, (b) η προσαρτηση των συστημάτων συντεταγμένων σύμφωνα με τη σύμβαση της μεθόδου Denavit – Hartenberg και (c) οι αρθρώσεις και τα μέλη (σύνδεσμοι) του.	86
Εικόνα 6-35: (a) η κάσκα στερεοσκοπίας eMagin Z800 3DVisor και (b) η κάσκα στερεοσκοπίας Oculus Rift DK2.....	89
Εικόνα 6-36: Κάτω: στα αριστερά άποψη της πλευράς του Oculus Rift με τους διπλούς φακούς και στα δεξιά η εικόνα που προβάλλεται στερεοσκοπικά στο χρήστη. Επάνω, οι γωνίες περιστροφής της κεφαλής του χρήστη κατά την αναγνώριση περιστροφής (head tracking).....	90
Εικόνα 6-37: Επάνω, άποψη του αισθητήρα αναγνώρισης κίνησης Microsoft Kinect και κάτω τα βασικά λειτουργικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται.	92

Εικόνα 6-38: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας tracking σκελετού σώματος στο χώρο (αριστερά) και τα σημεία του σκελετού τα οποία αναγνωρίζονται και παρακολουθούνται (δεξιά) [Microsoft Kinect for Windows SDK].....	93
Εικόνα 7-1: Διάγραμμα Περίπτωσης Χρήσης (Use Case Diagram) της έκδοσης beWare of the Robot v1.0 και v1.5.....	96
Εικόνα 7-2: Διάγραμμα Περίπτωσης Χρήσης (Use Case Diagram) της έκδοσης beWare of the Robot v2.0	97
Εικόνα 7-3: Διάγραμμα Δραστηριότητας (Activity Diagram) της έκδοσης beWare of the Robot v1.5	98
Εικόνα 7-4: Διάγραμμα Δραστηριότητας (Activity Diagram) της έκδοσης beWare of the Robot v2.0	99
Εικόνα 7-5: Το Διάγραμμα Δομής (οντοτήτων/διασυνδέσεων) της έκδοσης beWare of the Robot v1.0.....	100
Εικόνα 7-6: Οι παραλλαγές του καθήκοντος της στρώσης του ανθρακοϋφάσματος στις 3 εκδόσεις της εφαρμογής beWare of the Robot.....	105
Εικόνα 7-7: Τα βασικά στοιχεία ανίχνευσης σύγκρουσης (με υπερτονισμένο πράσινο χρώμα) στην εφαρμογή beWare of the Robot v2.0.	107
Εικόνα 7-8: Στοιχεία ανίχνευσης σύγκρουσης κατά το πάτημα του κουμπού έναρξης από το χρήστη (αριστερά) και στοιχεία τύπου πλέγματος επάνω στην ένδειξη του όγκου κίνησης του ρομπότ (δεξιά)	108
Εικόνα 7-9: Επάνω, το ανθρωποειδές εισέρχεται στο χώρο εργασίας του ρομπότ και πατάει το πράσινο κουμπί έναρξης. Κάτω, η υλοποίηση της μεταφοράς του πατήματος κουμπού: (a) επαφή (isTrigger), (b) πάτημα/κίνηση (c) οριακή κάτω θέση (ήχος «κλικ» και φωτεινή λάμψη), (d) επαναφορά	110
Εικόνα 7-10: Η προσάρτηση και παραλαβή του ανθρακοϋφάσματος. Για λόγους βέλτιστης παρουσίασης, διακρίνεται η ακτίνα που εκπέμπεται από την αρπάγη του ρομπότ με ιώδες χρώμα (A).	111
Εικόνα 7-11: Το ανθρακοϋφασμα, αφού έχει προσαρτηθεί ως τέκνο στη ρομποτική αρπάγη, μεταφέρεται από τον πάγκο εναπόθεσης προς το χρήστη.....	111
Εικόνα 7-12: Η υλοποίηση της μεταφοράς της αφαίρεσης του χάρτινου καλύμματος της κολλώδους πλευράς του ανθρακοϋφάσματος.	113
Εικόνα 7-13: Γραφική παράσταση των δύο συναρτήσεων με βάση τις οποίες δημιουργούνται τα μοτίβα κίνησης του βοηθήματος/οδηγού του εικονικού χεριού.	114
Εικόνα 7-14: Η υλοποίηση της μεταφοράς της στρώσης του ανθρακοϋφάσματος στο καλούπι (virtual lay metaphor).....	115
Εικόνα 8-1: Μηχανισμός γνωστικής επεξεργασίας ενός σήματος συναγερμού [προσαρμογή από (Endsley, 2011)]	118
Εικόνα 8-2: Τα διαφορετικά στοιχεία ανίχνευσης σύγκρουσης (colliders) τα οποία χρησιμοποιούνται για την ενεργοποίηση των επιμέρους τεχνικών ασφάλειας.	119
Εικόνα 8-3: Συγκεντρωτική περιγραφή των διαφορετικών τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας A-P και των κριτηρίων ενεργοποίησής τους. Η ονοματολογία των διαφορετικών colliders βασίζεται στον ορισμό της Εικ. 8-2.	121
Εικόνα 8-4: Οι μηχανισμοί ενεργοποίησης των διαφορετικών τεχνικών ασφάλειας. (A) επαφή collider κορμού χρήστη και ρομποτικού χώρου εργασίας, (B) επαφή collider χεριού και όγκου κίνησης, (C) τομή ακτίνας ταχύτητας και μεγεθυμένου collider ανθρωποειδούς, όταν η απόσταση μεταξύ του σώματος και της αρπάγης επαρκώς μικρή (1.5 m).....	122

Εικόνα 8-5: Τα 3Δ γραφικά μοντέλα του χώρου εργασίας (αριστερά) και του «όγκου κίνησης» του ρομπότ (δεξιά)	123
Εικόνα 8-6: Ενεργοποίηση των οπτικών ενδείξεων/συναγερμών (Α) στην έκδοση 1.0 με βάση το χώρο εργασίας και (Β) στην έκδοση 2.0 με βάση τον όγκο κίνησης.	124
Εικόνα 8-7: Ανίχνευση σύγκρουσης μεταξύ του ανθρώπου και του όγκου εργασίας.	125
Εικόνα 8-8: Διαδοχικά στιγμιότυπα από την ενεργοποίηση της τεχνικής. Διακρίνεται η ακτίνα η οποία εκπέμπεται από το άκρο του ρομπότ προς την κατεύθυνση της κίνησης του ΤΣΔ.	127
Εικόνα 8-9: Αναπαράσταση της ενεργοποίησης της τεχνικής <i>υποχώρησης</i> του ρομποτικού βραχίονα.	129
Εικόνα 8-10: Προβολή πληροφορίας (πράσινο μήνυμα «robot move back”) για την ενημέρωση του χρήστη κατά την ενεργοποίηση της τεχνικής της υποχώρησης του ρομπότ.	130
Εικόνα 9-1: Ραβδοδιάγραμμα (bar chart) των αποτελεσμάτων στη θεματική ενότητα «Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης της συνεργασίας A-P» (AM). Αναπαρίσταται η δειγματική μέση τιμή και η δειγματική τυπική απόκλιση ανά απάντηση.	136
Εικόνα 9-2: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων ή θηκόγραμμα (boxplot) για τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης της συνεργασίας A-P» (AM). (συμπαγής μαύρος κύκλος: διάμεσος, σταυρό εντός κύκλου: μέση τιμή, θήκη: ενδοτεταρτομοριακό εύρος).	137
Εικόνα 9-3: Ραβδοδιάγραμμα (bar chart) των αποτελεσμάτων (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) στη θεματική ενότητα «Αποτελεσματικότητα του ΕΠε» (ΑΕ).	138
Εικόνα 9-4: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων (boxplot) για τα αποτελέσματα (διάμεσος, μέση τιμή, ενδοτεταρτομοριακό εύρος, διασπορά) της θεματικής ενότητας «Αποτελεσματικότητα του ΕΠε» (ΑΕ).	139
Εικόνα 9-5: Ραβδοδιάγραμμα (bar chart) των αποτελεσμάτων (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) στη θεματική ενότητα «Εμπλοκή και Παρουσία του χρήστη στο ΕΠε» (ΕΠ).....	140
Εικόνα 9-6: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων (boxplot) για τα αποτελέσματα (διάμεσος, μέση τιμή, ενδοτεταρτομοριακό εύρος, διασπορά) της θεματικής ενότητας «Εμπλοκή και Παρουσία του χρήστη στο ΕΠε» (ΕΠ).....	140
Εικόνα 9-7: Ραβδοδιάγραμμα (bar chart) των αποτελεσμάτων (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) στη θεματική ενότητα «Χρήση Οπτικοακουστικών Βοηθημάτων» (ΟΒ).....	141
Εικόνα 9-8: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων (boxplot) για τα αποτελέσματα (διάμεσος, μέση τιμή, ενδοτεταρτομοριακό εύρος, διασπορά) της θεματικής ενότητας «Χρήση Οπτικοακουστικών Βοηθημάτων» (ΟΒ).....	142
Εικόνα 9-9: Ραβδοδιάγραμμα (bar chart) των αποτελεσμάτων (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) στη θεματική ενότητα «Αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη» (ΑΧ).....	143
Εικόνα 9-10: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων (boxplot) για τα αποτελέσματα (διάμεσος, μέση τιμή, ενδοτεταρτομοριακό εύρος, διασπορά) της θεματικής ενότητας «Αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη» (ΑΧ).....	144
Εικόνα 9-11: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων (1/2) ή θηκόγραμμα (boxplot) για τα μισά αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης της συνεργασίας A-P» (AM) (συμπαγής μαύρος κύκλος : διάμεσος, σταυρός εντός κύκλου: μέση τιμή, θήκη: ενδοτεταρτομοριακό εύρος).....	150

Εικόνα 9-12: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων (2/2) για τα υπόλοιπα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης της συνεργασίας A-P» (AM).	151
Εικόνα 9-13: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων ή θηκόγραμμα (boxplot) για τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποτελεσματικότητα του ΕΠε (ΑΕ)»	152
Εικόνα 9-14: Κυκλικό διάγραμμα (διάγραμμα πίτας-pie chart) που παρουσιάζει τις απαντήσεις μεταξύ των χρηστών που αισθάνθηκαν τροποποιημένη τη συμπεριφορά τους (ΑΕ4).	153
Εικόνα 9-15: Κυκλικό διάγραμμα απαντήσεων για την απώλεια συγκέντρωσης του χρήστη (ΕΠ1).	154
Εικόνα 9-16: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων ή θηκόγραμμα (boxplot) για τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Εμπλοκή και Παρουσία του Χρήστη (ΕΠ)»	155
Εικόνα 9-17: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων ή θηκόγραμμα (boxplot) για τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Χρήση Οπτικοακουστικών Βοηθημάτων (ΟΒ)»	156
Εικόνα 9-18: Κυκλικά διαγράμματα των απαντήσεων επί της ευκολίας αντίληψης των διαφορετικών γνωστικών βοηθημάτων από τους χρήστες (ΟΒ1, ΟΒ2, ΟΒ4).	156
Εικόνα 9-19: Κυκλικό διάγραμμα αξιολόγησης των διαφορετικών γνωστικών βοηθημάτων σε σχέση με τη συνεισφορά τους στην αποφυγή σύγκρουσης A-P.	157
Εικόνα 9-20: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων ή θηκόγραμμα (boxplot) για τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη» (ΑΕ)	158
Εικόνα 9-21: Υποκειμενική αξιολόγηση της επάρκειας του χρόνου αντίδρασης του χρήστη, έπειτα από την ενεργοποίηση της κάθε τεχνικής (ΧΤ1) και (ΧΤ2) και της ανάγκης μετακίνησης του χρήστη έπειτα από την ενεργοποίηση της τεχνικής υποχώρησης (ΧΤ3).	159
Εικόνα 9-22: Υποκειμενική (προσλαμβανόμενη) αποτελεσματικότητα των δύο τεχνικών ως προς την αποφυγή σύγκρουσης (ΧΤ4) και ως προς την εύροια και την απόδοση της συνεργασίας (ΧΤ5)	159
Εικόνα 9-23: Διάγραμμα μέσης τιμής και τοπικής απόκλισης για τον αριθμό των συγκρούσεων A-P ανά εξεταζόμενη τεχνική ασφαλούς συνεργασίας.	162
Εικόνα 9-24: Αποτελέσματα του Τεστ Tukey για τον αριθμό συγκρούσεων μεταξύ των επιμέρους ομάδων (ανά ζεύγη τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας A-P).	164
Εικόνα 9-25: Διάγραμμα μέσης τιμής και τοπικής απόκλισης για τον καθαρό χρόνο κίνησης κατά τη συνεργασία A-P, ανά εξεταζόμενη τεχνική ασφαλούς συνεργασίας	165
Εικόνα 9-26: Διάγραμμα μέσης τιμής και τοπικής απόκλισης για τη μέση ταχύτητα κίνησης του ρομπότ, ανά εξεταζόμενη τεχνική ασφαλούς συνεργασίας.	166
Εικόνα 9-27: Αποτελέσματα του Τεστ Tukey για τον καθαρό χρόνο κίνησης του ρομπότ, μεταξύ των επιμέρους ομάδων (ανά ζεύγη τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας A-P).	167
Εικόνα 9-28: Αποτελέσματα του Τεστ Tukey για τη μέση ταχύτητα του ρομπότ μεταξύ των επιμέρους ομάδων (ανά ζεύγη τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας A-P).	168

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1-1: Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα και περιορισμοί της εργασίας Ανθρώπου και Ρομπότ στα συστήματα παραγωγής.	6
Πίνακας 3-1: ISO 10218/2011 - Κριτήρια τα οποία πρέπει να ικανοποιούνται κατά τη συνεργασία A-P29	
Πίνακας 6-1: Πίνακας παραμέτρων D - H για το Staubli RX90L.....	87
Πίνακας 7-1: Οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές 3Δ αλληλεπίδρασης για την εκτέλεση των βασικών καθηκόντων και η υλοποίηση της εκάστοτε τεχνικής μέσω του ανθρωποειδούς.....	102
Πίνακας 9-1: Επισκόπηση των σημαντικότερων ερωτήσεων και απαντήσεων (συχνότητα εμφάνισης %) του ερωτηματολογίου της έκδοσης 1.0. Κλίμακα Likert: 1 (καθόλου/απαράδεκτο) 2 (λίγο) 3 (ουδέτερο) 4 (αρκετά) 5 (απόλυτη κατάφαση/εξαιρετικό).....	135
Πίνακας 9-2: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης (AM) της συνεργασίας A-P». (+/-): ανηγμένες θετικές και αρνητικές απαντήσεις, ΜΤ: η δειγματική μέση τιμή, ΤΑ: δειγματική τυπική απόκλιση.	136
Πίνακας 9-3: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποτελεσματικότητα του ΕΠε (ΑΕ)»	138
Πίνακας 9-4: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Εμπλοκή και Παρουσία του χρήστη στο ΕΠε» (ΕΠ).....	140
Πίνακας 9-5: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Χρήση Οπτικοακουστικών Βοηθημάτων» (ΟΒ)	141
Πίνακας 9-6: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη» (ΑΧ)	143
Πίνακας 9-7: Επισκόπηση των σημαντικότερων ερωτήσεων του ερωτηματολογίου της έκδοσης 2.0, ταξινομημένες σε 6 βασικές κατηγορίες (AM-ΑΕ-ΕΠ-ΟΒ-ΑΧ-ΧΤ).....	148
Πίνακας 9-8: Τα αποτελέσματα (συχνότητα εμφάνισης [ποσοστό %]) της θεματικής ενότητας «Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης (AM) της συνεργασίας A-P». Κλίμακα Likert: 1 (καθόλου/απαράδεκτο) 2 (λίγο) 3 (ουδέτερο) 4 (αρκετά) 5 (απόλυτη κατάφαση/εξαιρετικό)	149
Πίνακας 9-9: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποτελεσματικότητα του ΕΠε (ΑΕ)»	152
Πίνακας 9-10: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Εμπλοκή και Παρουσία του Χρήστη (ΕΠ)»	154
Πίνακας 9-11: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Χρήση Οπτικοακουστικών Βοηθημάτων (ΟΒ)»	155
Πίνακας 9-12: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη (ΑΕ)»	157
Πίνακας 9-13: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Παρατηρήσεις επί της Χρήσης των Τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας (ΧΤ)»	159
Πίνακας 9-14: Τα αποτελέσματα της ανάλυσης διασποράς ANOVA επαναλαμβανόμενων μετρήσεων στο Minitab.	163
Πίνακας 9-15: Τα αποτελέσματα της ανάλυσης διασποράς ANOVA επαναλαμβανόμενων μετρήσεων στο Minitab	166

Μέρος 1^ο: Εισαγωγή και Περιγραφή του Ερευνητικού Ερωτήματος

1. Εισαγωγή - πλαίσιο

1.1. Τάσεις και εξελίξεις στα ρομποτικά συστήματα παραγωγής

Τα βιομηχανικά ρομπότ έχουν καθιερωθεί στα βιομηχανικά συστήματα παραγωγής τα τελευταία 35 περίπου χρόνια, χρησιμοποιούμενα κυρίως για καθήκοντα όπως: τοποθέτηση, μεταφορά, βαφή, συγκόλληση, συναρμολόγηση, κόλληση, χύτευση, ταξινόμηση, έλεγχο ποιότητας, αλλά και σε πολλές άλλες κύριες ή επικουρικές βιομηχανικές εργασίες. Οι ρομποτικοί βραχίονες είναι σχεδιασμένοι για να εκτελούν καθήκοντα με ταχύτητα, επαναληψιμότητα και ακρίβεια, συνεπώς η χρήση τους στοχεύει στη βελτίωση της ποιότητας και στη μείωση του κόστους παραγωγής. Στις περισσότερες περιπτώσεις προγραμματίζονταν για λειτουργία σε ένα στατικό περιβάλλον εργασίας χωρίς να αναμένεται μεγάλο εύρος αλλαγών στον προγραμματισμό τους και στα αντικείμενα με τα οποία αλληλεπιδρούν, ή για εργασία σε κότταρα παραγωγής απομονωμένα από τον άνθρωπο ή άλλες δυνητικές παρεμβολές (Heyer, 2010). Έτσι, τα βιομηχανικά ρομπότ προσέφεραν για χρόνια τα πλεονεκτήματα που απέρρεαν από τη χρήση τους, παραμένοντας όμως απομονωμένα τόσο με φυσική (χωρική) όσο και με αισθητηριακή (sensorial) έννοια.

Στα σύγχρονα συστήματα παραγωγής, τα τελευταία χρόνια έχει εμφανιστεί η ανάγκη για συνεργασία Ανθρώπου-Βιομηχανικού Ρομπότ ¹ (A-P) σε κοινό (διαμοιραζόμενο) χώρο εργασίας, για την από κοινού εκτέλεση βιομηχανικών καθηκόντων ή κατεργασιών. Ο σκοπός της συνεργασίας και της συνύπαρξης A-P κατά την εκτέλεση καθηκόντων που συνήθως εκτελούνται χειρωνακτικά, είναι η βελτίωση της ποιότητας και η αύξηση της παραγωγικότητας, εμπλουτίζοντας τη γνώση, τις δεξιότητες και τις κιναισθητικές δυνατότητες του εργαζόμενου με τη δύναμη, την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα των ρομπότ. Στην περίπτωση που εξετάζουμε λοιπόν, αντί να έχουμε αντικατάσταση της ανθρώπινης εργασίας από ρομπότ σε επαναλαμβανόμενα, επικίνδυνα ή αλλοτριωτικά καθήκοντα, επιθυμούμε τη συνύπαρξη A-P και τη συνεργατική υποστήριξη της ανθρώπινης εργασίας και δεξιότητας από το ρομπότ (βλ. Εικόνα 1-1), με αποτέλεσμα την πραγματοποίηση «εργασίας υψηλής προστιθέμενης αξίας» (Unhelkar, Siu, & Shah, 2014).

Καθώς εμφανίζονται νέες ανάγκες για υβριδικά ρομποτικά συστήματα παραγωγής (με συνεργασία A-P) και η τεχνολογία και οι κανονισμοί εξελίσσονται, η φυσική περιήφραξη και η χωρική απομόνωση που είθισται σήμερα μεταξύ A-P, έρχεται να δώσει τη θέση της σε διαφορετικά συστήματα και τεχνικές ασφαλείας, τα οποία θα επιτρέψουν στους εργαζόμενους να αλληλεπιδρούν και να συνεργάζονται

¹ Ο συνηθέστερος αγγλικός όρος είναι Human-Robot Collaboration ή Cooperation, ενώ συχνά συναντάται ο όρος Human-Robot Interaction, ο οποίος είναι όμως πιο ευρύς και λιγότερο δόκιμος όταν αναφέρεται στη βιομηχανική συνεργασία και αλληλεπίδραση.

με τα βιομηχανικά ρομπότ. Εν τούτοις, παρά το ότι η συνεργασία A-P φαίνεται να είναι μια ισορροπημένη λύση μεταξύ παραγωγικότητας, ποιότητας, ευελιξίας και κόστους (αρχικού και λειτουργικού), τα ανακόπτοντα ζητήματα ασφαλείας κρατούν ακόμα την εφαρμογή της συνεργασίας A-P ουσιαστικά ανεκμετάλλευτη στη βιομηχανία.



Εικόνα 1-1: Παράδειγμα συνεργασίας Ανθρώπου-Ρομπότ (A-P) για συνεργατική υποβοήθηση στη συναρμολόγηση [© Fraunhofer IFF, <http://goo.gl/pMhFQr>]

Μέχρι σήμερα η ασφάλεια κατά τη συνεργασία A-P αντιμετωπίζεται πρωτίστως με διαχωρισμό ανθρώπου και ρομπότ, χωρικό ή/και χρονικό. Η εγγύτητα και ο διαμοιρασμός του κοινού χώρου εργασίας μεταξύ του ανθρώπου και του κινούμενου ρομπότ είναι η γενεσιουργός αιτία των περισσότερων ζητημάτων ασφαλείας κατά τη μεταξύ τους συνεργασία. Τα κρισιμότερα ζητήματα από πλευράς κινδύνου, είναι αφενός ο κινούμενος ρομποτικός βραχίονας και αφετέρου η αντίληψη και η διαίσθηση των κινήσεων του βραχίονα από τον άνθρωπο (Helander, 1990). Οι τρέχουσες τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας A-P συνδυάζουν φράκτες υπέρυθρων ακτίνων, αισθητήρες, σαρωτές λέιζερ (laser scanners), ρομποτική όραση με κάμερες, κουμπιά πανικού (emergency stop) και συναγερμούς, δομημένα είτε με μια σειριακή λογική γεγονότων τύπου «σταμάτα - και - προχώρα» (stop-and-go), ή με μια λογική επιβράδυνσης των κινήσεων του ρομπότ μέχρι μια ασφαλή ταχύτητα. Παρά ταύτα, πιθανή ενεργοποίηση κάποιας από τις παραπάνω stop-and-go τεχνικές μπορεί να σταματήσει ολόκληρη την παραγωγή, όταν βέβαια πρόκειται για γραμμή παραγωγής, ή να ακυρώσει την ουσιαστική συνεργασία και να εγκαταστήσει ένα μοτίβο καθυστέρησης του τύπου «περιμένω τη σειρά μου», σε ένα μικρότερο κύτταρο παραγωγής.

Συνεπώς, η παρούσα Διδακτορική Διατριβή διερευνά ενεργητικές τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας οι οποίες υπερβαίνουν τη λογική stop-and-go στην αλληλεπίδραση A-P και δεν διακόπτουν -κατά το δυνατόν- την ομαλή ροή (flow) της συνεργασίας. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η εύροια (fluency) στη συνεργασία A-P απαιτείται επίγνωση της κατάστασης² (situation awareness) και πρόβλεψη της πρόθεσης (anticipation of intention), τόσο από τον άνθρωπο όσο και από το ρομπότ (Hoffman & Breazeal, 2007). Στην ίδια λογική, και προκειμένου να διατηρείται η εύροια στη συνεργασία A-P, διερευνώνται κριτήρια αποφυγής πιθανών άσκοπων, υπερβολικά συχνών, ή πρώιμων ενεργοποιήσεων των τεχνικών ασφαλείας και των συναγερμών, ώστε να μην καθίστανται στην πράξη επουσιώδεις για τον χρήστη και ώστε να μην καταλήγουν να αγνοούνται, όπως πολύ συχνά συμβαίνει στη βιομηχανία όταν έχουμε κακοσχεδιασμένα μέτρα ασφαλείας.

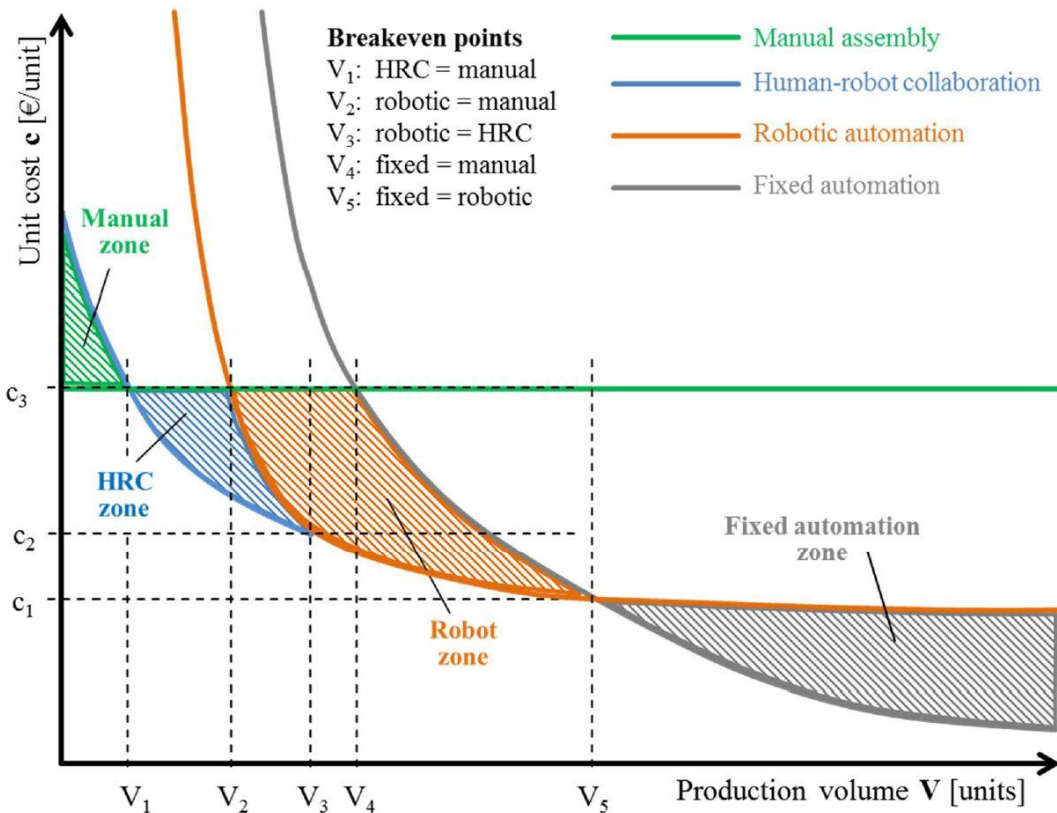
Αναδύονται λοιπόν δύο πολύ ενδιαφέροντα ερευνητικά προβλήματα και μια πρόκληση: το πρώτο ερευνητικό πρόβλημα αφορά το σχεδιασμό εκείνων των τεχνικών ασφαλείας κατά την κίνηση του ρομπότ (τεχνικές αποφυγής συγκρούσεων) οι οποίες δεν θα δυσχεραίνουν τη ροή, την επικοινωνία και την άνεση της συνεργασίας. Το δεύτερο ερευνητικό πρόβλημα αφορά τη γνωστική διευκόλυνση της επίγνωσης της κατάστασης (situation awareness), της πρόβλεψης της πρόθεσης και της συμπεριφοράς, αμφίδρομα, τόσο από τον άνθρωπο όσο και από τον ελεγκτή του βιομηχανικού ρομπότ. Σε κάθε περίπτωση ο άνθρωπος θα πρέπει να είναι ενήμερος και να επαγρυπνεί για τον εν δυνάμει κίνδυνο, αλλά ταυτόχρονα να αποδέχεται τη συνύπαρξη με το ρομποτικό του συνεργάτη. Τέλος, η πρόκληση είναι η προσπάθεια συγκερασμού και εξισορρόπησης αφενός της ασφαλείας, χωρίς καμία απολύτως έκπτωση, και αφετέρου της αποδοτικότητας, της άνεσης και της εύροιας της συνεργασίας ανθρώπου-ρομπότ.

1.2. Η ανάγκη για συνεργασία Ανθρώπου-Βιομηχανικού Ρομπότ (A-P)

Η ιδέα της συνύπαρξης και συνεργατικής εργασίας μεταξύ ανθρώπου και ρομπότ είναι μείζονος ενδιαφέροντος τόσο για την ακαδημαϊκή κοινότητα όσο και για τη ρομποτική βιομηχανία. Στις βιομηχανίες παραγωγής μεγάλης κλίμακας και όπου το εύρος των παραγόμενων προϊόντων δε μεταβάλλεται σημαντικά, τα βιομηχανικά ρομπότ χρησιμοποιούνται ευρύτατα. Για παράδειγμα, σχεδόν το πενήντα τοις εκατό των εργασιών μιας τυπικής γραμμής συναρμολόγησης αμαξώματος στην αυτοκινητοβιομηχανία πραγματοποιείται με βιομηχανικά ρομπότ και χρήση αυτοματοποίησης (Unhelkar et al., 2014). Αντίθετα, πολλές βιομηχανίες χαμηλού ή σύνθετου όγκου παραγωγής αντιμετωπίζουν ακόμα προβλήματα αυτοματοποίησης και ευελιξίας, καθώς και αδυναμία εισαγωγής της ρομποτικής. Στην Εικόνα 1-2

² Η επίγνωση της κατάστασης (situation awareness) στο πλαίσιο της παρούσας χρησιμοποιείται με την έννοια της «αντίληψης των στοιχείων ενός περιβάλλοντος μέσα σε ένα χωρικό και χρονικό πλαίσιο, τη κατανόησης των στοιχείων αυτών και των χαρακτηριστικών τους και, τέλος, της προβολή της κατάστασής τους στο κοντινό μέλλον» (Wickens, 2008)

φαίνεται ότι σε ένα σχετικά χαμηλό εύρος όγκου παραγωγής (μεταξύ V_1 και V_2 στο διάγραμμα, όπου η πλήρης αυτοματοποίηση είναι ασύμφορη ή αδύνατη) η συνεργασία A-P είναι ελκυστική τόσο από άποψη κόστους όσο και ευελιξίας. Στην αεροπορική βιομηχανία το εβδομήντα τοις εκατό της διαδικασίας κτισίματος των μεγάλων εμπορικών αεροπλάνων γίνεται ακόμα κυρίως χειρωνακτικά (Unhelkar et al., 2014). Στην Airbus για παράδειγμα, παράγεται 1.5 αεροπλάνο την ημέρα, οπότε υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για συνεργατική εργασία ανθρώπου-ρομπότ κυρίως σε σύνθετα καθήκοντα τα οποία διαρκούν πολλές ώρες και απ' όπου θα μπορούσαν να προκύψουν τα περισσότερα πλεονεκτήματα από τη συνεργασία (Adams, 2015). Μάλιστα η ανάγκη αυτή συνοψίζεται στο ότι «χρειάζονται κινούμενα συνεργατικά ρομπότ και έναν απλό και αποτελεσματικό τρόπο εκπαίδευσης και προγραμματισμού τους». Στην αυτοκινητοβιομηχανία πάλι, η τελική συναρμολόγηση των αυτοκινήτων (βλ. Εικόνα 1-3), η οποία απαιτεί υψηλή επιδεξιότητα στους χειρισμούς, πραγματοποιείται επίσης σε μεγάλο βαθμό χειρωνακτικά (συμβατικά) και ενδείκνυται για την εισαγωγή σε αυτή συνεργατικών βιομηχανικών ρομπότ, τα οποία θα υποβοηθούν την ανθρώπινη εργασία.



Εικόνα 1-2: Συσχέτιση του μοναδιαίου κόστους παραγωγής και του όγκου παραγωγής ανάλογα με το βαθμό αυτοματοποίησης. (Vicentini, Matthias, & Barattini, 2014).

Όσο η τιμή των συνεργατικών ρομπότ μειώνεται και οι τεχνικές ασφαλείας εξελίσσονται, η ενσωμάτωσή τους στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροπορική βιομηχανία, αλλά και σε πολλές μικρομεσαίες βιομηχανίες θα αυξάνεται. Οι πιέσεις της ευελιξίας, της παραγωγικότητας και του εργατικού κόστους που ασκούνται στις μικρομεσαίες βιομηχανίες του Δυτικού κόσμου ως επί το πλείστον, οδηγούν

αναπόφευκτα στην περαιτέρω αυτοματοποίηση καθηκόντων που παραδοσιακά εκτελούνταν από τον άνθρωπο επειδή απαιτούν την ανθρώπινη επιδεξιότητα, οπότε και στην εισαγωγή συνεργατικών βιομηχανικών ρομπότ και υβριδικών κυττάρων παραγωγής με συνεργασία A-P. Από την άλλη πλευρά, οι πλήρως αυτοματοποιημένες γραμμές παραγωγής μεγάλης κλίμακας δεν προσφέρουν καμία ευελιξία για την παραγωγή μικρότερων παρτίδων ή πρωτοτύπων και είναι μη-αποδοτικές από άποψης κόστους όταν αντιμετωπίζονται ιδιαίτερα σύνθετα καθήκοντα.



Εικόνα 1-3: Πιλοτική εφαρμογή συνεργασίας A-P στη γραμμή συναρμολόγησης θυρών αυτοκινήτων στο εργοστάσιο της BMW στο Spartanbourg [©BMW AG via Bloomberg].

Ο ουσιαστικός στόχος λοιπόν για την εισαγωγή συνεργασίας A-P στη βιομηχανία είναι η αύξηση της παραγωγικότητας και της ευελιξίας, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των ρομπότ (ακρίβεια, επαναληψιμότητα, δύναμη, αντοχή) και του ανθρώπου (επιδεξιότητα, ευελιξία, ευφυΐα, γνωστικές και κιναισθητικές ικανότητες, βλ. Πίνακας 1-1) (Lenz & Knoll, 2014). Έτσι, η συνεργασία A-P γεφυρώνει το κενό μεταξύ της πλήρους αυτοματοποιημένης παραγωγής και των πλήρως συμβατικών-χειρωνακτικών συστημάτων. Το μεγαλύτερο πεδίο εφαρμογής της βιομηχανικής συνεργασίας A-P είναι η υποστήριξη και υποβοήθηση του ανθρώπου κατά την εκτέλεση ενός καθήκοντος, το οποίο πραγματοποιείται μέχρι σήμερα χειρωνακτικά (δημιουργία υβριδικών κυττάρων παραγωγής με συνεργασία A-P). Το ρομπότ απαλλάσσει τον άνθρωπο από μια επαναλαμβανόμενη ή επικίνδυνη εργασία χαμηλής προστιθέμενης αξίας (π.χ. συγκράτηση, τοποθέτηση, μεταφορά, στοιβαγма) και του «αφήνει» εργασίες και καθήκοντα τα οποία απαιτούν επιδεξιότητα, ευφυΐα και γνωστικές ικανότητες (κρίση, απόφαση, εκπαίδευση). Αυτού του είδους η συνεργασία οδηγεί σε συνολική εργασία πολύ υψηλής προστιθέμενης αξίας, με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των νεκρών χρόνων και αύξηση της παραγωγικότητας.

	Άνθρωπος	Ρομπότ
Πλεονεκτήματα	Γνωστικές ικανότητες Κινησιασθητικές ικανότητες Επιδεξιότητα Ευφυΐα Ευελιξία Προσαρμοστικότητα	Ακρίβεια Επαναληψιμότητα Δύναμη Αντοχή Ταχύτητα Σταθερή ποιότητα
Περιορισμοί	Μέτρια ταχύτητα Μέτρια δύναμη Χαμηλή επαναληψιμότητα Ασταθής ποιότητα	Όχι γνωστικές ικανότητες Μη αυτόνομη προσαρμοστικότητα Μέτριος χώρος εργασίας

Πίνακας 1-1: Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα και περιορισμοί της εργασίας Ανθρώπου και Ρομπότ στα συστήματα παραγωγής.

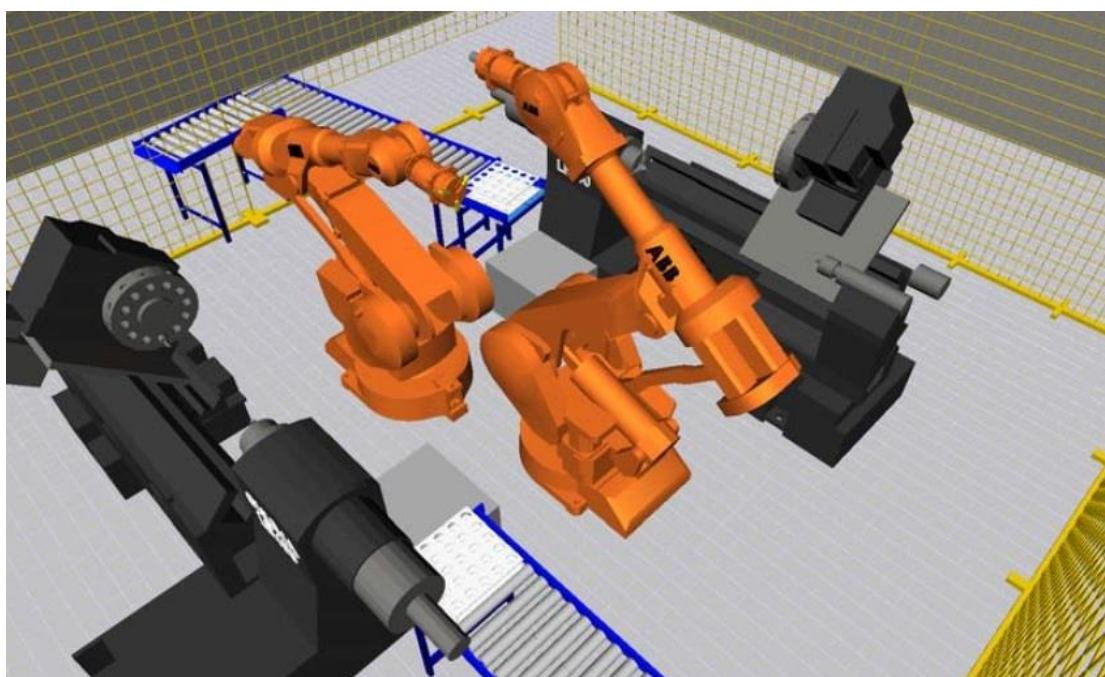
1.3. Η Εικονική Πραγματικότητα (ΕΠ) ως εργαλείο μοντελοποίησης διαδραστικών καθηκόντων

Σκοπός της Εικονικής Πραγματικότητας (ΕΠ) είναι να επιτρέψει στον χρήστη να εμβυθιστεί σε ένα Εικονικό Περιβάλλον (ΕΠε) και να αλληλεπιδρά με αυτό με τρόπο ψευδο-φυσικό, προσφέροντάς του μια γνωστική και κινησιασθητική δραστηριότητα στο εικονικό περιβάλλον (Fuchs, Moreau, Burkhardt, & Coquillart, 2006). Η εμπειρία της εμβύθισης (immersion) και της αλληλεπίδρασης (interaction) στον εικονικό κόσμο επιτυγχάνεται με τη χρήση κινησιασθητικών διεπιφανειών (sensory-motor interfaces) όπως: συστήματα προβολής με οθόνες ή κάσκες στερεοσκοπίας για την οπτική ανάδραση και συστήματα ανίχνευσης και καταγραφής κίνησης (motion capture) για την αλληλεπίδραση. Επιπλέον, ο χρήστης έχει την εντύπωση ότι τόσο η κίνησή του, όσο και η εξέλιξη του σεναρίου πραγματοποιούνται σε πραγματική κλίμακα στο ΕΠε. Η αλληλεπιδραστική³ ΕΠ βρίσκει εφαρμογή σε πληθώρα κλάδων από την αεροναυπηγική μέχρι την ιατρική εκπαίδευση και από τα στάδια του σχεδιασμού μέχρι τη δοκιμή και την εκπαίδευση ενός συστήματος (βλ. Εικόνα 1-4). Στη βιβλιογραφία, παραδείγματα εφαρμογών ΕΠ σε όλους τους κλάδους περιγράφονται αναλυτικά στο (Fuchs, Moreau, Arnaldi, & Guitton, 2006), ενώ εφαρμογές στα συστήματα παραγωγής και στις κατεργασίες στα (Choi, Jung, & Noh, 2015) και (Khan, Raouf, & Cheng, 2011).

Η διαδραστική ΕΠ αναπαριστά πιστά περιβάλλοντα, εμπειρίες και συμπεριφορές και αποτελεί ένα πανίσχυρο εργαλείο για την έρευνα αλληλεπιδραστικών καθηκόντων, ενώ ταυτόχρονα είναι και η ίδια αντικείμενο έρευνας αυτής της αλληλεπίδρασης, αφού παρέχει στο χρήστη πρωτότυπες γνωστικές και αντιληπτικές καταστάσεις (Burkhardt, Bardy, & Lourdeaux, 2003). Στα διαδραστικά Εικονικά Περιβάλλοντα (ΕΠε) παρέχονται στο χρήστη σημαντικά αντιληπτικά σήματα (perceptual cues) και πολυμορφική ανάδραση (λ.χ. οπτική, ακουστική, ή ανάδρασης δύναμης), με αποτέλεσμα να μεταφέρεται αποτελεσματικά η εικονικά αποκτηθείσα

³ Οι όροι «αλληλεπιδραστική ΕΠε» και «διαδραστική ΕΠε» χρησιμοποιούνται ισοδύναμα στο κείμενο, για την απόδοση του Αγγλικού όρου “interactive Virtual Environment”.

γνώση στον πραγματικό κόσμο (Lin, Ye, Duffy, & Su, 2002). Διαδραστικά καθήκοντα όπως η αλληλεπίδραση μεταξύ ανθρώπου-μηχανής μπορούν να μοντελοποιηθούν και να αναπαραχθούν αποτελεσματικά στο διαδραστικό ΕΠε, τόσο με άμεση σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής αλληλεπίδρασης, όσο και με τη χρήση αλληγορικών μεταφορών, όταν δεν είναι δυνατή η σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής αυτής. Καθήκοντα όπως η μεταφορά, το πιάσιμο, η στόχευση, το άγγιγμα ή το πάτημα ενός κουμπιού, ή ο χειρισμός μιας μηχανής είναι εύκολο να ανιχνευθούν από τις διεπιφάνειες εισόδου του διαδραστικού ΕΠε και να αναπαραχθούν με τη χρήση των κατάλληλων τεχνικών αλληλεπίδρασης. Ο χρήστης με τη σειρά του, μπορεί να λάβει την αντίστοιχη ανάδραση (αντιληπτική ή/και φυσική), από τις διαδραστικές συσκευές εξόδου. Βέβαια, υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί στη χρήση ΕΠε για την επιτυχή μεταφορά της γνώσης που αποκτήθηκε στον εικονικό κόσμο προς την πραγματικότητα. Σε εφαρμογές με καθήκοντα που χαρακτηρίζονται από σημαντικές αντιληπτικές ή/και κινητικές συνιστώσες, τα διαδραστικά ΕΠε πρέπει να παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό ρεαλισμού και φυσικής πιστότητας προκειμένου να είναι αποτελεσματικά στη μεταφορά της γνώσης στον πραγματικό κόσμο (Nathanael, Vosniakos, & Mosialos, 2010) και (Crison et al., 2005).



Εικόνα 1-4: Παράδειγμα Εικονικού Περιβάλλοντος για τη μοντελοποίηση ενός ρομποτικού κυττάρου παραγωγής, ανεπτυγμένο στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ (Vosniakos & Gogouvitis, 2014)

Συνοψίζοντας, σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους στο πραγματικό περιβάλλον, τα διαδραστικά ΕΠε παρέχουν τη δυνατότητα της αναπαράστασης και της δοκιμής ενός αλληλεπιδραστικού καθήκοντος μεταξύ ανθρώπου-μηχανής, πριν ακόμη από την εγκατάσταση του φυσικού εξοπλισμού, με σχετικά μεγάλη λειτουργική ελευθερία, μικρότερο κόστος και χωρίς πραγματικό κίνδυνο δυσλειτουργίας ή φυσικού τραυματισμού.

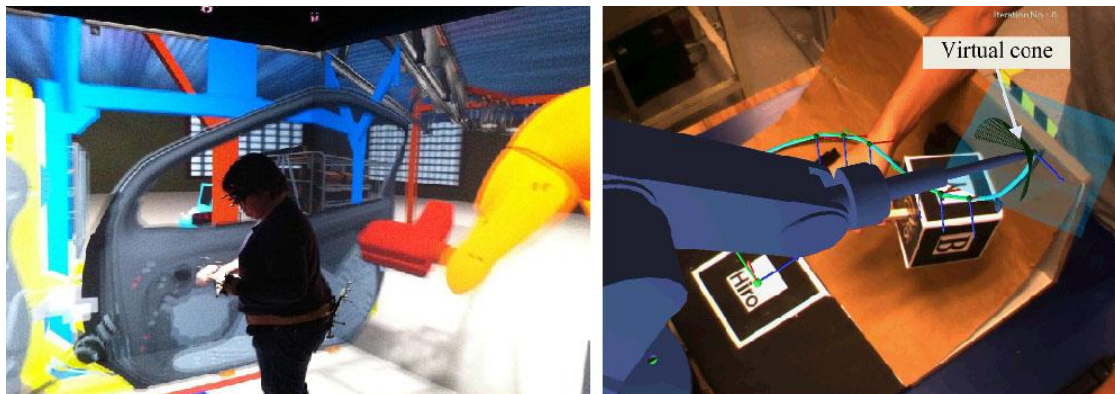
1.4. Τα διαδραστικά Εικονικά Περιβάλλοντα (ΕΠε) ως εργαλεία πειραματισμού και δοκιμών της συνεργασίας A-P

Στην περίπτωση της ασφαλούς φυσικής συνεργασίας A-P, παρά το γεγονός ότι ήδη έχουν συνταχθεί διεθνή πρότυπα (όπως τα (ISO 10218-1:2011, 2011), (ISO 10218-2:2011, 2011) και (ANSI/RIA R15.06-2012, 2012), ή το υπό διαμόρφωση πρόχειρο πρότυπο draft ISO/TS 15066) τα οποία επιχειρούν να τυποποιήσουν κριτήρια, μεθόδους και εξοπλισμό δοκιμών για ασφαλή συνεργασία A-P με έμφαση στις συγκρούσεις, εξακολουθεί να εκκρεμεί η επίλυση πολλών ζητημάτων που δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν από τα πρότυπα, όπως λ.χ.: (i) ο ορισμός των σημείων ελέγχου των δοκιμών όταν η κίνηση του ανθρώπου ή/και του ρομπότ είναι περίπλοκη και δεν μπορούν να προβλεφθούν εύκολα τα κρίσιμα σημεία συγκρούσεων, ή (ii) ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να προβλεφθούν και να αντιμετωπισθούν τα ανθρώπινα σφάλματα κατά τη συνεργασία, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν ατύχημα ή άλλη δυσλειτουργία, (iii) η δοκιμή διαφορετικών «αποδεκτών» προφίλ ταχύτητας ανάλογα με το καθήκον και τη μορφή του ρομπότ, πριν ακόμα από την εκτέλεση των δοκιμών, (iv) η κατανόηση και η αντίδραση του ανθρώπου έναντι των εφαρμοζόμενων τεχνικών ασφαλείας και αποφυγής σύγκρουσης, ή τέλος, (v) η πρόβλεψη της συμπεριφοράς του ανθρώπου σε μη-προγραμματισμένες και μη-αναμενόμενες γενικότερα κινήσεις του βιομηχανικού ρομπότ. Τα παραπάνω εκκρεμή ζητήματα μπορούν να εξετασθούν και εν μέρει να επιλυθούν με τη χρήση της εικονικής πραγματικότητας και των διαδραστικών ΕΠε (βλ. Εικόνα 1-5).

Τα διαδραστικά ΕΠε αποτελούν ένα ισχυρό και φθηνό εργαλείο για τη μελέτη ανθρωποκεντρικών και αλληλεπιδραστικών συστημάτων, καθώς μπορούν να προσφέρουν αντιληπτική και αισθητηριακή αντιστάθμιση, διόρθωση ή αντικατάσταση, όπου αυτό απαιτείται. Σε εφαρμογές σαν αυτήν της συνεργασίας A-P, η ΕΠ δίνει τη δυνατότητα αναδημιουργίας της χαμένης ή δυσνόητης πληροφορίας, της απομόνωσης ανεπιθύμητων παρεμβολών, της επαύξησης αντιληπτικών σημάτων και τη δυνατότητα εναλλαγής μεταξύ των αισθήσεων. Για παράδειγμα, μια εποπτική πληροφορία μπορεί να μεταφερθεί στο χρήστη με ένα απτικό ερέθισμα/νύξη (R. Chellali, 2009). Έτσι, με τον κατάλληλο σχεδιασμό της αλληλεπίδρασης και με τη χρήση πληθώρας διεπαφών, τα ΕΠε υψηλής διάδρασης μπορούν να θεωρηθούν ιδιαίτερα ευέλικτα και αποτελεσματικά ως προς την παραγωγή σημάτων και νύξεων, αφού απευθύνονται στα αισθητηριακά κανάλια του χρήστη με πολύ μεγάλο εύρος ερεθισμάτων.

Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 1.1, από μελέτες της αλληλεπίδρασης A-P προκύπτει το ότι η στρωτή και χωρίς διακοπές συνεργασία A-P απαιτεί επίγνωση της κατάστασης (situation awareness) και πρόβλεψη της πρόθεσης (anticipation of intention), τόσο από τον άνθρωπο όσο και από το ρομπότ (Hoffman & Breazeal, 2007). Προκειμένου να διευκολυνθεί αυτή η επίγνωση της κατάστασης και η πρόβλεψη της πρόθεσης, είναι σημαντικό τόσο ο άνθρωπος όσο και το ρομπότ να επικοινωνούν την κατάσταση, τη θέση και την πρόθεσή τους, είτε ρητά μέσω νύξεων

και σημάτων (π.χ. οπτικών ή ακουστικών νύξεων), ή υπονοώντας τες με τις πράξεις και τα μοτίβα κίνησης (Unhelkar et al., 2014). Σε τέτοιες περιπτώσεις συνιστάται κατά προτίμηση η ανάπτυξη εκπαιδευτικών διαδραστικών εφαρμογών Εικονικής, Επαυξημένης ή Μεικτής Πραγματικότητας, ή ακόμα αλληλεπιδραστικών σοβαρών παιχνιδιών (serious games). Αυτό γίνεται διότι οι εφαρμογές αυτές μπορούν να εμπλουτίσουν την εμπειρία και την εκπαίδευση του χρήστη με γνωστικά ερεθίσματα και στα τρία επίπεδα της επίγνωσης της κατάστασης (αντίληψη των στοιχείων του περιβάλλοντος, κατανόηση των στοιχείων αυτών και προβολή της κατάστασής τους στο κοντινό μέλλον).



Εικόνα 1-5: Στα αριστερά παράδειγμα ΕΠε για τη διερεύνηση της αποδοχής της συνεργασίας A-P (Weistroffer, 2014), και δεξιά, εφαρμογή επαυξημένης πραγματικότητας (AR) για τη διαισθητική αλληλεπίδραση A-P (Fang, Ong, & Nee, 2014).

Οι δοκιμές με τη χρήση Εικονικής Πραγματικότητας και τα διαδραστικά ΕΠε προσφέρουν κάποια σημαντικά προτερήματα έναντι των δοκιμών σε πραγματικές συνθήκες κατά τη διερεύνηση της συνεργασίας A-P, γιατί είναι ανεξάρτητα από το χρησιμοποιούμενο ρομπότ και το περιβάλλον προγραμματισμού του, και επιτρέπουν τη γρήγορη και εύκολη τροποποίηση μεγάλου αριθμού παραμέτρων οι οποίες επηρεάζουν τη συνεργασία, τη διερεύνηση μεγαλύτερου αριθμού ερευνητικών υποθέσεων, καθώς και τη δυνατότητα επανάληψης όσες φορές χρειαστεί. Το διαδραστικό ΕΠε είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τη μελέτη της συνεργασίας ανθρώπου-ρομπότ, αφού παρέχει το βίωμα της παρουσίας επιτρέποντας την εμπύθιση του χρήστη στον εικονικό κόσμο, αλλά και την αλληλεπίδρασή του τόσο με το περιβάλλον, όσο και με το ρομπότ. Επιπρόσθετα, ο σχεδιασμός και η εκτέλεση ενός πειράματος στον πραγματικό χώρο με διαφορετικά ρομπότ μπορεί να είναι χρονοβόρα και με μεγάλο κόστος, να επιφέρουν επιπλέον τεχνολογικούς περιορισμούς ως προς την υλοποίηση της συνεργασίας, και να πρέπει να υπόκειται σε περιοριστικούς κανονισμούς ασφάλειας, με μέσα τα οποία αντιβαίνουν στη συνεργασία και στην συνύπαρξη ανθρώπου-ρομπότ στο χώρο εργασίας.

1.5. Σύνθεση του πλαισίου της Δ.Δ (context) και αναφορά του ερευνητικού ερωτήματος (προβλήματος)

Σύμφωνα με την περιγραφή των Ενοτήτων 1.1 και 1.2, η συνεργασία A-P στα ρομποτικά συστήματα παραγωγής, σκοπεύει αφενός στην αύξηση της

παραγωγικότητας (Krüger, Lien, & Verl, 2009) και αφετέρου στην υποστήριξη του ανθρώπου, προκειμένου αυτός να χρησιμοποιήσει τις ικανότητες και τις δεξιότητές του ώστε να πραγματοποιήσει εργασία υψηλής προστιθέμενης αξίας πιο αποδοτικά (Unhelkar et al., 2014). Μάλιστα το όραμα της στενής συνεργασίας A-P διατυπώθηκε από τους (Tan et al., 2009) ως εξής: «η συνεργασία ανθρώπου-βιομηχανικού ρομπότ είναι ένας ιδανικός συνδυασμός («dream combination») της ανθρώπινης ευελιξίας και της αποδοτικότητας της μηχανής». Στη φράση αυτή, επισημαίνεται η χρήση του οραματικού όρου «dream» για να περιγράψει τόσο τα πλεονεκτήματα της συνεργασίας A-P, όσο και το ανεφάρμοστο, ακόμα, της κατάστασης (status) αυτής της συνεργασίας σε μεγαλύτερο βαθμό (Ore, 2015). Αυτό οφείλεται στους ισχύοντες κανονισμούς, αλλά και στη μη-πλήρη -ακόμη- επίλυση των ζητημάτων ασφάλειας μεταξύ των ανθρώπων και των συμβατικών βιομηχανικών ρομπότ.

Ωστόσο, ακόμα και όταν εκδοθεί το σύνολο των απαιτούμενων προτύπων και κανονισμών τα οποία θα καλύπτουν όλο το εύρος της ασφάλειας της φυσικής συνεργασίας και της εγγύτητας A-P και ακόμα κι αν έχουν επιλυθεί όλα τα ζητήματα φυσικής ασφάλειας της συνεργασίας, τα βιομηχανικά ρομπότ μπορεί να μην είναι τόσο ευπρόσδεκτα από τον άνθρωπο. Προκειμένου να διασφαλισθεί η αποδοχή της μεταξύ τους εγγύτητας και συνεργασίας, εκτός από τα ζητήματα φυσικής ασφάλειας, πρέπει να αντιμετωπισθούν επιτυχώς και τα ανακόπτοντα ζητήματα της «διανοητικής» (mental) ασφάλειας⁴. Έπειτα από τη διασφάλιση της αποδοχής της συνεργασίας A-P από τον άνθρωπο, ζητούμενο είναι επίσης να διασφαλιστεί η ομαλή ροή (flow) και η εύροια (fluency) στη συνεργασία A-P, όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 1.1. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η εύροια στη συνεργασία A-P απαιτείται επίγνωση της κατάστασης (situation awareness) και πρόβλεψη της πρόθεσης (anticipation of intention), τόσο από τον άνθρωπο όσο και από το ρομπότ. Η επίγνωση της κατάστασης και η πρόβλεψη της πρόθεσης μπορεί να διευκολυνθούν όταν ο άνθρωπος εκπαιδευθεί και εξοικειωθεί σε μια αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ αυτού και του ρομπότ, όσον αφορά την κατάσταση, τη θέση και την πρόθεσή τους, με τη χρήση ενός διαδραστικού (εικονικού) περιβάλλοντος.

Με βάση τα προηγούμενα, η πρώτη ερευνητική προβληματική της Διδακτορικής Διατριβής αφορά το σχεδιασμό τεχνικών ασφαλείας κατά τη συνεργασία A-P (τεχνικές αποφυγής συγκρούσεων, συναγερμοί) οι οποίες δεν θα δυσχεραίνουν τη ροή, την επικοινωνία και την άνεση της συνεργασίας. Η δεύτερη ερευνητική προβληματική αφορά τη γνωστική διευκόλυνση και υποστήριξη της αντίληψης της κατάστασης (situation awareness), της πρόβλεψης της πρόθεσης και της συμπεριφοράς, κατά το δυνατόν αμφίδρομα, τόσο από τον άνθρωπο όσο και από τον ελεγκτή του βιομηχανικού ρομπότ. Στην ίδια λογική, και προκειμένου να διατηρείται η εύροια στη συνεργασία A-P, στην τρίτη ερευνητική προβληματική

⁴ Με τον όρο «φυσική ασφάλεια» εννοούμε ότι το ρομπότ δεν θα πρέπει να τραυματίσει φυσικώς τον άνθρωπο. Με τον όρο «διανοητική ασφάλεια» (mental safety) εννοούμε την αυξημένη επαγρύπνηση και επίγνωση του χρήστη σε σχέση με την κίνηση του βιομηχανικού ρομπότ, η οποία θα αποτρέψει τη δημιουργία ανεπιθύμητων φαινομένων, όπως φόβος, έκπληξη ή σοκ (Ogorodnikova, 2010) & (R Alami et al., 2006).

διερευνώνται κριτήρια ενεργοποίησης και κλήσης των τεχνικών ασφάλειας, έτσι ώστε να αποφεύγονται πιθανές άσκοπες, υπερβολικά συχνές και πρόωμες ενεργοποιήσεις.

Προκειμένου να απαντήσουμε στις ερευνητικές προβληματικές προτείνεται η δημιουργία ενός υψηλά-αλληλεπιδραστικού ΕΠε, το οποίο θα είναι το εργαλείο για τη μοντελοποίηση της συνεργασίας A-P, τον προγραμματισμό του κυττάρου και την πραγματοποίηση δοκιμών με χρήστες σε ένα αλληλεπιδραστικό υβριδικό ρομποτικό σύστημα παραγωγής. Κατά τη διάρκεια της εικονικής συνεργασίας του με το ρομπότ, ο χρήστης δέχεται ανάδραση με αντιληπτικά ερεθίσματα (stimuli) και νύξεις σε πραγματικό χρόνο, τα οποία σκοπεύουν να εμπλουτίσουν με πληροφορία την ερευνώμενη συνεργασία. Το αλληλεπιδραστικό ΕΠε λειτουργεί ως ένα πανίσχυρο εργαλείο για την έρευνα των αλληλεπιδραστικών καθηκόντων στη συνεργασία A-P, αφού μπορεί να αναπαριστά πιστά το περιβάλλον, το χρήστη και τη μεταξύ τους αλληλεπίδραση και συμπεριφορά. Ταυτόχρονα η διαδραστική ΕΠ είναι και η ίδια αντικείμενο έρευνας αυτής της αλληλεπίδρασης, αφού παρέχει στο χρήστη πολυαισθητηριακές γνωστικές και αντιληπτικές καταστάσεις και εμπειρίες, οι οποίες είναι προϊόντα της συνεργασίας A-P. Η ουσιαστική συνεισφορά ενός επιτυχημένου διαδραστικού ΕΠε είναι η αποτελεσματική μεταφορά στην πραγματικότητα της γνώσης, της εμπειρίας και ιδανικά και των δεξιοτήτων που αποκτήθηκαν στον εικονικό κόσμο.

1.5.1. Σκοπός της διδακτορικής διατριβής

Ο πρώτος στόχος της διδακτορικής διατριβής είναι η δημιουργία ενός διαδραστικού Εικονικού Περιβάλλοντος (ΕΠε) υψηλής αλληλεπίδρασης και εμπύθισης, το οποίο θα λειτουργήσει ως μια πλατφόρμα πειραματισμού και δοκιμών των τεχνικών αλληλεπίδρασης A-P και της εύροιας της συνεργασίας A-P στον εικονικό κόσμο.

Ο δεύτερος στόχος της παρούσας έρευνας είναι η διερεύνηση της επαυξημένης εμπειρίας, της αντίληψης και της συμπεριφοράς του χρήστη στο ΕΠε κατά τη διάρκεια της εικονικής συνεργασίας A-P. Το διαδραστικό ΕΠε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση της αποδοχής και της ασφάλειας της συνεργασίας A-P, ενισχύοντας την αντίληψη (awareness) του χρήστη όσον αφορά την κίνηση του ρομπότ με τη χρήση πολυαισθητηριακών σημάτων και ερεθισμάτων.

Τελικά, ο τρίτος στόχος αυτής της έρευνας είναι η διερεύνηση τρόπων ασφαλειοκεντρικού προγραμματισμού⁵ της τροχιάς του ρομπότ, με την αξιολόγηση διαφορετικών τεχνικών αποφυγής συγκρούσεων και τη χρήση τεχνικών, μέσα στο ΕΠε, βασισμένων στην αντίληψη της κίνησης και την επικοινωνία της πρόθεσης, τόσο από τον άνθρωπο όσο και από τον ελεγκτή του βιομηχανικού ρομπότ.

⁵ Safety-based robot programming

1.6. Οργάνωση της διδακτορικής διατριβής

Το κείμενο της διδακτορικής διατριβής χωρίζεται σε τρία κύρια μέρη-θεματικές ενότητες:

- Στο **πρώτο μέρος**, στο οποίο επιχειρήθηκε μια ουσιαστική εισαγωγή, περιγράφεται το πλαίσιο και η ανάγκη για την έρευνα της συνεργασίας A-P σε ακαδημαϊκό και βιομηχανικό επίπεδο. Επίσης, εξηγείται η ερευνητική προβληματική.
- Στο **δεύτερο μέρος**, αναλύονται τα επιμέρους επίπεδα της ερευνητικής προβληματικής. Στο 2^ο κεφάλαιο ορίζεται και κατηγοριοποιείται η συνεργασία A-P. Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφονται τα προβλήματα ασφάλειας της συνεργασίας A-P, δίδεται η στάθμη των γνώσεων όσον αφορά τα κριτήρια και τις τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας, και την αποδοχή, αυτής της συνεργασίας από τον άνθρωπο. Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά στη διαδραστική εικονική πραγματικότητα, τα εικονικά περιβάλλοντα και τις εφαρμογές τους στα ρομποτικά συστήματα παραγωγής. Τέλος, αφού έχει ήδη περιγραφεί το πλαίσιο και η στάθμη των γνώσεων, στο 5^ο κεφάλαιο διατυπώνονται τα ερευνητικά ερωτήματα και οι υποθέσεις επίλυσης αυτών.
- Το **τρίτο μέρος** αναφέρεται στο κυρίως παραγωγικό τμήμα της διδακτορικής διατριβής, δηλαδή στην υλοποίηση, την ανάλυση των δοκιμών και των αποτελεσμάτων. Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η υλοποίηση του ΕΠε και των συνιστωσών του, ενώ στο 7^ο κεφάλαιο επιχειρείται να συστηματοποιηθεί η περιγραφή και η ανάλυση του ΕΠε με τη χρήση διαγραμμάτων UML. Το 8^ο κεφάλαιο περιγράφει τις προτεινόμενες τεχνικές αποφυγής συγκρούσεων και τους μηχανισμούς ενεργοποίησης αυτών. Τέλος στο κεφάλαιο 9 παρουσιάζονται οι δοκιμές με τους χρήστες, τα ερωτηματολόγια, οι μετρικές συμπεριφοράς και τα αποτελέσματα, ενώ στο 10^ο κεφάλαιο γίνεται συζήτηση των αποτελεσμάτων και παρατίθενται τα συμπεράσματα της ερευνητικής εργασίας όσον αφορά τη χρήση της ΕΠ, την εμπειρία του χρήστη και την αποτελεσματικότητα των τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας A-P.

Μέρος 2ο: Τα επίπεδα της ερευνητικής προβληματικής

2. Η Συνεργασία Ανθρώπου-Βιομηχανικού Ρομπότ (A-P)

Στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται να παρουσιαστεί συνοπτικά η βιβλιογραφική ανασκόπηση και η στάθμη των γνώσεων που αφορούν στη συνεργασία A-P, καθώς και να οριστούν βασικοί όροι αυτής της συνεργασίας και οι οποίοι είναι θεμελιώδεις για την παρούσα έρευνα. Επίσης, παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παραδείγματα συνεργασίας A-P τόσο από τη βιομηχανική πρακτική όσο και από την ακαδημαϊκή έρευνα, ενώ γίνεται και μια βασική κατηγοριοποίηση των διαφόρων τύπων συνεργασίας A-P.

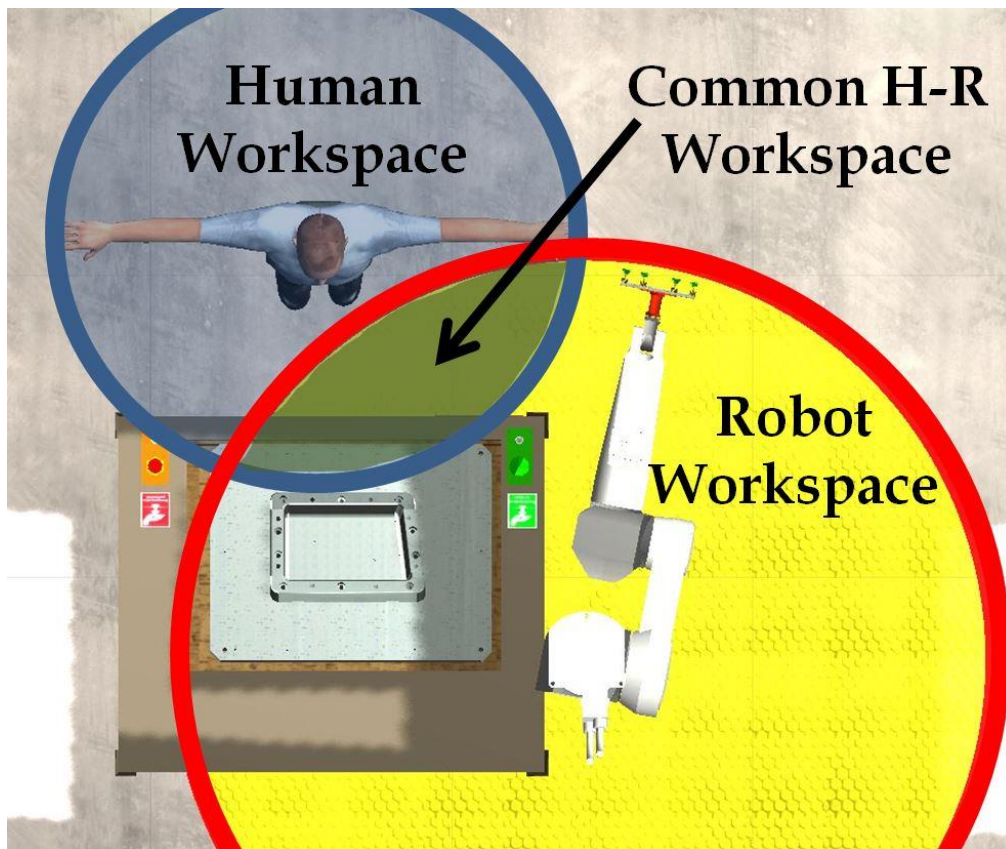
2.1. Ορισμοί

Στο ISO 10218-1:2011 το βιομηχανικό ρομπότ (industrial robot) ορίζεται ως «ο αυτόματα ελεγχόμενος, αναπρογραμματιζόμενος βραχίονας πολλαπλού σκοπού, ο οποίος μπορεί να προγραμματισθεί για κίνηση σε τρεις ή περισσότερους άξονες και ο οποίος μπορεί να είναι είτε σταθερός στο χώρο, ή κινούμενος όταν χρησιμοποιείται σε εφαρμογές βιομηχανικής αυτοματοποίησης». Το συνεργατικό ρομπότ είναι μια μηχανή η οποία αισθάνεται, σκέπτεται και επενεργεί (sense, think, act) και γι' αυτό το λόγο διαθέτει αισθητήρες, επενεργητές και δυνατότητες επεξεργασίας.

Σύμφωνα με το ANSI/RIA R15.06-2012, το συνεργατικό ρομπότ είναι «το (βιομηχανικό) ρομπότ το οποίο είναι σχεδιασμένο για άμεση αλληλεπίδραση με τον άνθρωπο, μέσα σε έναν ορισμένο συνεργατικό χώρο εργασίας». Ως συνεργατικός χώρος εργασίας ορίζεται ο χώρος εργασίας εντός ενός ευρύτερα προστατευμένου χώρου, μέσα στον οποίο το ρομπότ και ο άνθρωπος πραγματοποιούν καθήκοντα ταυτόχρονα, κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας (βλ. Εικόνα 2-1). Στο ISO 10218-1:2011 ορίζεται η συνεργατική λειτουργία (collaborative operation) ως η κατάσταση κατά την οποία ειδικά σχεδιασμένα ρομπότ εργάζονται σε άμεση συνεργασία με τον άνθρωπο, μέσα σε έναν ορισμένο χώρο εργασίας. Ο χώρος εργασίας του ρομπότ (robot workspace ή workspace envelope) ορίζεται ως το σύνολο των σημείων στο χώρο τα οποία μπορεί να προσεγγίσει το τελικό σημείο δράσης (end-effector) του ρομπότ. Ο χώρος επιδεξιότητας είναι το υποσύνολο των παραπάνω σημείων, τα οποία μπορεί να προσεγγίσει το τελικό σημείο δράσης του ρομπότ με όλους τους δυνατούς προσανατολισμούς.

Στη βιβλιογραφία, συναντάται πολλές φορές σε συνεργατικές εφαρμογές Ανθρώπου-Ρομπότ (A-P) ο όρος «αλληλεπίδραση A-P» (Human-Robot Interaction) αντί του συνεργασία A-P (Human-Robot Collaboration ή Human-Robot Cooperation). Στην Ελληνική γλώσσα, δυστυχώς, οι όροι cooperation και collaboration μεταφράζονται αμφότεροι ως συνεργασία και δεν υπάρχει άλλη δόκιμη Ελληνική λέξη για να περιγράψει τη μεταξύ τους εννοιολογική διαφορά. Ο όρος cooperation περιγράφει μια κατάσταση η οποία εμπλέκει περισσότερα

συνεργαζόμενα μέρη, με σκοπό την επίτευξη ενός καθήκοντος, ή ενός κοινού στόχου και στην οποία το κάθε μέρος αναλαμβάνει να διεκπεραιώσει διαφορετικά (υπο-)καθήκοντα, με κάποιου είδους αλληλεξάρτηση. Ο όρος collaboration προσθέτει την αλληλεπίδραση και τις ενέργειες οι οποίες δημιουργούν μια επικοινωνία και μια κοινή κατανόηση μεταξύ των συνεργαζόμενων μερών, ώστε το καθήκον να εκτελεστεί από κοινού (Barcellini, 2015). Α priori λοιπόν, η βασική συνεργασία A-P είναι μια κατάσταση που χαρακτηρίζεται ορθότερα με τον όρο cooperative, αλλά η συνεργασία A-P η οποία επιδιώκεται στην παρούσα έρευνα προϋποθέτει την επικοινωνία της κατάστασης και της πρόθεσης μεταξύ των δύο μερών, οπότε είναι μια κατάσταση η οποία χαρακτηρίζεται καλύτερα από τον όρο collaborative. Ο όρος «αλληλεπίδραση A-P» είναι πιο ευρύς, καθώς αναφέρεται κυρίως στη μεταξύ τους σχέση και αλληλεπίδραση, ενώ ο όρος «συνεργασία A-P» είναι υποσύνολο της «αλληλεπίδρασης A-P» και αναφέρεται στην από-κοινού εργασία A-P, με σκοπό την επίτευξη κάποιου στόχου.



Εικόνα 2-1: Άμεση συνεργασία A-P σε κοινό (διαμοιραζόμενο) χώρο εργασίας.

Σε αντίθεση με την αλληλεπίδραση ανθρώπου-μηχανής, η συνεργασία A-P δεν περιορίζεται μόνο στο επίπεδο της επικοινωνίας· τα βιομηχανικά ρομπότ μπορούν να μετακινούνται στο χώρο, να επικοινωνούν με το χρήστη μέσω παραστατικών σημάτων (π.χ. χειρονομίες ή εκφράσεις στα ανθρωπομορφικά ρομπότ), να αλληλεπιδρούν με αντικείμενα του φυσικού περιβάλλοντος και προφανώς να ακουμπούν και, ακόμη, να τραυματίσουν και τον άνθρωπο.

2.2. Πεδία εφαρμογής και παραδείγματα συνεργασίας A-P και συνεργατικών ρομπότ

Έχει περάσει πάνω από μισός αιώνας από τότε που προβλέφθηκε για πρώτη φορά ότι τα ρομπότ θα αλληλεπιδρούν και θα δουλεύουν πλάι στους ανθρώπους, υποστηρίζοντάς τους τόσο στη βιομηχανική εργασία, όσο και στην καθημερινότητά τους (Sami Haddadin, 2011). Μάλιστα οι σύγχρονες εξελίξεις στο σχεδιασμό, στον έλεγχο, το σχεδιασμό τροχιάς και των τεχνικών ασφαλείας, μπορούν να αποτελέσουν ισχυρό υπόβαθρο για τη φυσική συνεργασία A-P σε τομείς όπως:

- η υποστήριξη του ανθρώπου σε βαριές βιομηχανικές εργασίες
- η συνεργασία με τον εργαζόμενο για μερική αυτοματοποίηση καθηκόντων
- η αυτοματοποίηση καθημερινών καθηκόντων
- η φροντίδα των ηλικιωμένων στις γηραιο-κρατούμενες κοινωνίες
- η τηλε-παρουσία σε απομακρυσμένα συστήματα
- η ιατρική ή νοσοκομειακή φροντίδα και η αποκατάσταση

Τα διαφορετικά είδη ρομπότ τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι αυτή τη στιγμή σε συνεργατικά ρομποτικά συστήματα A-P είναι τα εξής:

- τα cobots ήτοι ρομπότ συνεργασίας (collaborative robots), βλ. (Colgate, Edward, Peshkin, & Wannasuphprasit, 1996)
- οι ρομποτικοί χειριστές (robot manipulators) ή Intelligent Assist Devices (IADs), βλ. (Akella et al., 1999; Krüger et al., 2009)
- οι ρομποτικοί εξωσκελετοί υποστήριξης της ανθρώπινης κίνησης (Kazerooni, 1996), (Santos, Garcia, Sarria, Ponticelli, & Reviejo, 2010)
- τα τηλεχειριζόμενα ρομπότ (telemanipulators), βλ. (Draper, 1995)
- τα αυτοκινούμενα ρομπότ υποβοήθησης/συγχειρισμού (Mobile Robot Helper), βλ. (Kosuge, Sato, & Kazamura, 2000)
- τα ρομπότ παροχής υπηρεσιών και τα ρομπότ συντροφιάς (Cavallo et al., 2011; Coradeschi et al., 2013)
- τα βιομηχανικά ρομπότ-βοηθοί ή ρομπότ συνεργάτες (Helms, Schraft, & Hagele, 2002), (Weistroffer et al., 2014).

Τα τελευταία, δηλαδή τα βιομηχανικά ρομπότ-βοηθοί (robot assistants), είναι αυτά στα οποία αναφερόμαστε κυρίως στην παρούσα έρευνα, καθότι πρόκειται για ρομπότ που παρουσιάζουν χαρακτηριστικά αυτονομίας, ευελιξίας και πιο ολοκληρωμένη αλληλεπίδραση με τον άνθρωπο (Weistroffer, 2014). Σε αντίθεση με τα cobots και τους ρομποτικούς χειριστές τα οποία είναι παθητικά και μπορεί να μη χρησιμοποιούν αισθητήρες και επενεργητές κατά τη συνεργασία A-P, τα βιομηχανικά ρομπότ-βοηθοί ορίζονται ως «ευέλικτες συσκευές άμεσης αλληλεπίδρασης, οι οποίες παρέχουν βοήθεια με τη χρήση αισθητήρων, επενεργητών και επεξεργασίας δεδομένων» (Helms et al., 2002).

Το ινστιτούτο IPA (Institute for Manufacturing Engineering and Automation) του Fraunhofer (Helms et al., 2002) και (R D Schraft, Helms, Hans, & Thiemermann,

2004) παρουσίασε το ρομπότ-βοηθό *rob@work* (βλ. Εικόνα 2-2) για τη συναρμολόγηση υδραυλικών αντλιών και για την υποβοήθηση της συγκόλλησης τόξου μεγάλων τεμαχίων. Επίσης παρουσίασαν το κινούμενο ρομπότ-βοηθό *Care-O-bot® II*, αρχικά για τη βοήθεια του ανθρώπου σε καθημερινές εργασίες και σε εργασίες συντήρησης, και το συνεργατικό ρομποτικό κύτταρο συναρμολόγησης *team@work*, αποτελούμενο από δύο σταθμούς εργασίας, ένα ρομπότ-βοηθό και το χειριστή (R D Schraft et al., 2004). Το *PowerMate* (R.D. Schraft, Meyer, Parlitz, & Helms, 2005) αποτελεί τη μετεξέλιξη του *rob@work*, εναρμονισμένο σύμφωνα με το DIN ISO 954 για βιομηχανική χρήση σε συνεργατικές εφαρμογές μεταφοράς και συναρμολόγησης. Με τη βοήθεια του χειριστή και αισθητήρων δύναμης και ροπής, το *PowerMate* μπορεί να οδηγηθεί και να τοποθετήσει βαριά φορτία. Οι (Kosuge et al., 2000) παρουσίασαν το πρωτότυπο κινούμενο ρομπότ «*MR Helper*» το οποίο αποτελείται από δύο βραχίονες πάνω σε μια κινούμενη βάση για το συνεργατικό χειρισμό αντικειμένων. Ο άνθρωπος οδηγεί την κίνηση του ρομπότ ασκώντας δύναμη πάνω στο τεμάχιο. Αντίστοιχα, οι (Hamner, Koterba, Shi, Simmons, & Singh, 2010) παρουσιάζουν έναν αυτόνομο κινούμενο ρομποτικό βραχίονα και στρατηγικές ελέγχου για εφαρμογές συναρμολόγησης στην αυτοκινητοβιομηχανία. Ο (Khatib, 1999) προτείνει στρατηγικές υποστήριξης του ανθρώπου σε συνεργατικές εφαρμογές χειρισμού. Το αυτόνομο ανθρωπομορφικό ρομπότ-βοηθός 7 βαθμών ελευθερίας *CoRA* αποτελείται από επιμέρους διασυνδεδεμένα τμήματα και χρησιμοποιεί αναγνώριση ομιλίας, αντικειμένων και χειρονομιών, για τη συνεργατική υποβοήθηση καθηκόντων συναρμολόγησης (Iossifidis et al., 2002). Το *SIMERO* (Gecks & Henrich, 2004) είναι ένας σταθερός συνεργατικός ρομποτικός βραχίονας, ο οποίος βρίσκεται μέσα σε έναν χώρο εργασίας επιτηρούμενο από κάμερες βάθους. Με βάση τα στοιχεία της αναγνώρισης εμποδίων από τις κάμερες, το *SIMERO* προσαρμόζει την ταχύτητά του ανάλογα με την απόστασή του σε σχέση με τον άνθρωπο. Οι (Schrempf, Hanebeck, Schmid, & Worn, 2005) εισάγουν την έννοια της «προνοητικής» (proactive) εκτέλεσης καθηκόντων σε περιβάλλον συνεργασίας A-P, όταν οι προθέσεις του ανθρώπου είναι αβέβαιες. Η αρχιτεκτονική του συστήματος χρησιμοποιεί δυναμικά πιθανοτικά δίκτυα (δίκτυα Bayes) για την πρόβλεψη της πρόθεσης του ανθρώπου και την προσαρμογή του αντίστοιχου προνοητικού καθήκοντος. Οι (Lenz & Knoll, 2014) παρουσίασαν μια πλατφόρμα συνεργασίας άνθρωπου-ρομπότ βοηθού, στην οποία ο χώρος εργασίας εμπλουτίζεται με οθόνες που μεταδίδουν την κατάσταση του συστήματος και οδηγίες στο χρήστη, και αισθητήρες Microsoft Kinect™ προκειμένου να παράσχουν στο σύστημα δυνατότητες αντίληψης, αναγνώρισης, προσαρμοστικής κίνησης και επικοινωνίας. Οι (Su, Qiao, Xu, & Wang, 2015) παρουσιάζουν στρατηγικές αποφυγής σύγκρουσης στη συνεργασία A-P κατά τη λείανση τεμαχίων, με ανίχνευση του χρήστη και τη χρήση σημείων ελέγχου επιφανειών NURBS, με τη χρήση των οποίων μεταβάλλεται η τροχιά του ρομπότ. Η προσέγγιση των (Rickert et al., 2007) περιγράφει το σενάριο συνεργασίας με το ρομπότ *JAST* (ένα ρομπότ με δύο βραχίονες σε ανθρωπομορφική διάταξη) για την από κοινού κατασκευή ενός ξύλινου μοντέλου αεροσκάφους. Το ενδιαφέρον του συστήματος *JAST* είναι η ικανότητά του να αναγνωρίζει τα προς εκτέλεση καθήκοντα και να επιδεικνύει οδηγίες στον ανθρώπινο συνεργάτη του.

Από τα διάφορα πρωτότυπα συνεργατικών ρομπότ-βοηθών τα οποία έχουν παρουσιάσει οι μεγάλοι κατασκευαστές βιομηχανικών ρομπότ (ABB dual-arm Frida, KAWADA NextAge, KUKA LWR, FANUC CR-35iA, Universal UR5, κ.ά., βλ Εικόνα 2-2), το KUKA LWR - IIWA είναι εμπορικά διαθέσιμο και πιο διαδεδομένο σε εφαρμογές συνεργασίας A-P. Το KUKA LWR (Light Weight Robot) ξεχωρίζει για την απόδοση και την ασφάλειά του λόγω του συστήματος ενεργητικής ενδοτικότητας (active compliance) που διαθέτει, ενώ έχει χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα ερευνητικών και βιομηχανικών ερευνητικών έργων⁶ για την ασφαλή συνεργασία A-P (Bischoff et al., 2010; De Luca & Flacco, 2012; S. Haddadin, Albu-Schaffer, & Hirzinger, 2009; Ogrinc, Likar, Petri, Gams, & Ude, 2011). Τέλος, το ρομπότ Baxter (Rethink Robotics, 2013) είναι επίσης εμπορικά διαθέσιμο, μεταξύ άλλων, και για συνεργατικές βιομηχανικές εφαρμογές και διαθέτει πληθώρα αισθητήρων όρασης και laser, προσφέρει διαισθητικό τρόπο εκμάθησης (προγραμματισμού) , ενώ διαθέτει απλή διεπιφάνεια χρήσης και ελέγχου.



Εικόνα 2-2: Παραδείγματα ρομποτικών βοηθών ανά είδος βιομηχανικής εφαρμογής (Bischoff et al., 2010; Gecks & Henrich, 2004; Helms et al., 2002; Iossifidis et al., 2002; Rethink Robotics, 2013; R.D. Schraft et al., 2005; Vicentini et al., 2014)

Οι (Krüger et al., 2009) παραθέτουν μια ευρεία ανασκόπηση των εφαρμογών συνεργασίας A-P σε γραμμές συναρμολόγησης. Τέλος, οι (Shi, Jimmerson, Pearson, &

⁶ Ενδεικτικά αναφέρεται το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα SMERobot με πολύ μεγάλο εύρος συνεργατικών εφαρμογών (http://www.smerobot.org/04_demonstrations/)

Menassa, 2012) παρουσιάζουν εφαρμογές συναρμολόγησης και εργασίες στην αυτοκινητοβιομηχανία, στις οποίες υπάρχει μεγάλη δυνατότητα εισαγωγής μερικής αυτοματοποίησης και συστημάτων συνεργασίας A-P. Ενδεικτικά αναφέρονται: η τοποθέτηση των μπροστινών τζαμιών, των εσωτερικών επενδύσεων, των καθισμάτων των πινάκων των οργάνων (ταμπλό) και κάθε άλλης εργασίας κατά την οποία το ρομπότ μπορεί να χειρίζεται και να συγκρατεί τεμάχια σε μια θέση, ενώ ο άνθρωπος ρυθμίζει, συνδέει, ασφαλίζει, ή διαμορφώνει κάποιο εξάρτημα.

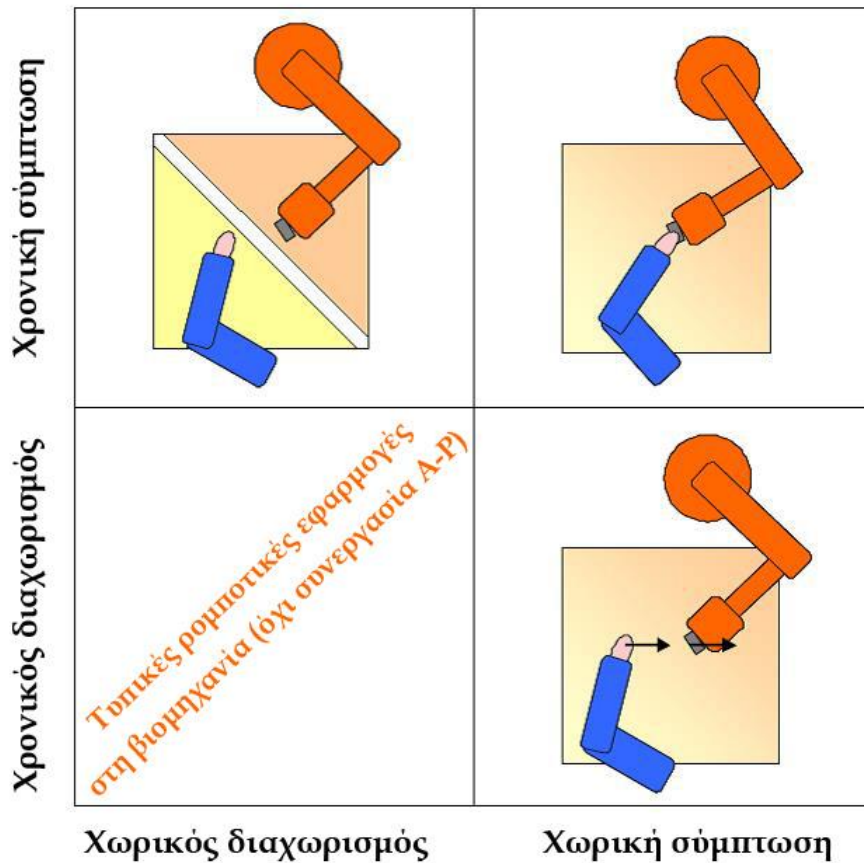
2.3. Τύποι και κατηγοριοποίηση της συνεργασίας Ανθρώπου-Ρομπότ (A-P)

Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής, τα συνεργατικά ρομπότ κατηγοριοποιούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: (i) βιομηχανικά ρομπότ χειριστές (industrial robot manipulators) και (ii) ρομπότ παροχής υπηρεσιών (service robots). Τα ρομπότ χειριστές αναφέρονται στη βιομηχανική συνεργασία A-P, ενώ τα ρομπότ παροχής υπηρεσιών αναφέρονται κυρίως στην υποστήριξη του ανθρώπου στην καθημερινότητά του και δεν αποτελούν αντικείμενο μελέτης της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα και τη φύση της συνεργασίας, οι συνεργατικές καταστάσεις A-P κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με (Weistroffer, 2014), (M.-E.-A. Chellali, 2009) & (Vicentini et al., 2014): (i) τον καταμερισμό της εργασίας, (ii) την κατανομή στο χώρο, και, (iii) τον επιμερισμό στο χρόνο (βλ. Εικόνα 2-3).

- **Ο καταμερισμός της εργασίας**

Ο καταμερισμός της εργασίας αναφέρεται στη διανομή των ρόλων μεταξύ ανθρώπου και ρομπότ και μπορεί να είναι είτε συλλογικός, όταν οι ρόλοι είναι συμμετρικοί και εναλλάξιμοι, ή διαμοιρασμένος, όταν οι ρόλοι είναι σαφώς καθορισμένοι και ανεξάρτητοι. Κατά τη συνεργασία A-P, η ανάθεση των ρόλων μεταξύ του ανθρώπου και του ρομπότ δεν είναι σχεδόν ποτέ συμμετρική, καθώς επιδιώκεται συμπληρωματικότητα στη χρήση των επιμέρους δεξιοτήτων τους (Weistroffer, 2014). Έτσι, καθήκοντα τα οποία απαιτούν γνωστικές ικανότητες πραγματοποιούνται από τον άνθρωπο, ενώ επαναλαμβανόμενα, επικίνδυνα και εξαντλητικά καθήκοντα ανατίθενται στο ρομπότ. Ακόμα, παρότι τα ρομπότ τείνουν να αποκτούν όλο και μεγαλύτερη αυτονομία, στα πιο σύνθετα καθήκοντα απαιτείται η επίβλεψη του ανθρώπου για τη λήψη απόφασης. Για παράδειγμα, κατά τη συνεργατική μεταφορά φορτίων, παρότι άνθρωπος και ρομπότ εργάζονται από κοινού στο ίδιο καθήκον (μεταφορά), ο άνθρωπος είναι αυτός που οδηγεί και καθορίζει την τροχιά, ενώ το ρομπότ υποστηρίζει και σηκώνει το βάρος (συνεργασία τύπου “master/slave”).



Εικόνα 2-3: Τύποι χωρικού ή/και χρονικού διαχωρισμού μεταξύ ανθρώπου και ρομποτικού βραχίονα (Vicentini et al., 2014)

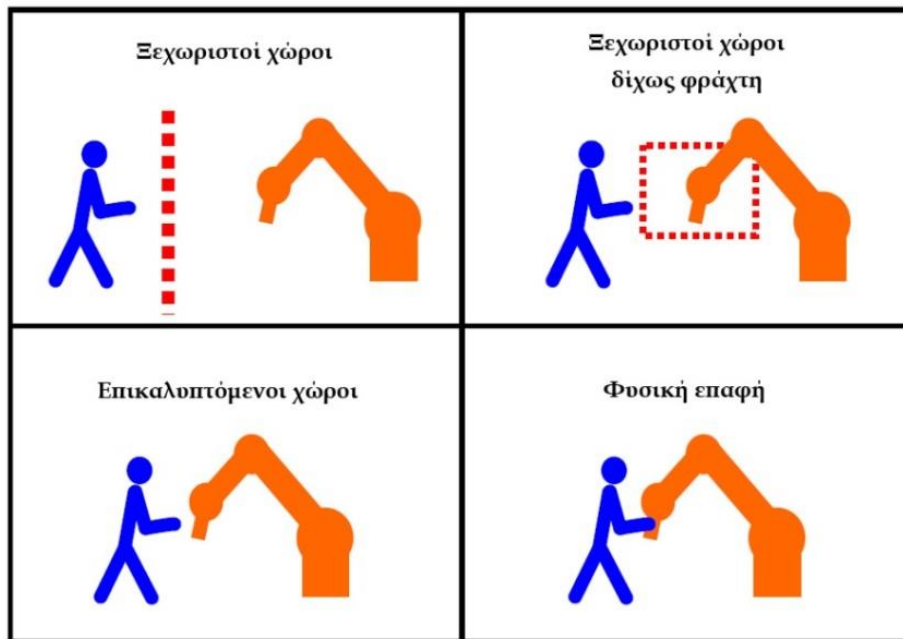


Εικόνα 2-4: Παραστατικές τοπολογίες συνεργατικών καθηκόντων σύμφωνα με το ISO 10218/2011

- **Η κατανομή στο χώρο (χωρικός διαχωρισμός)**

Η κατανομή/διαχωρισμός στο χώρο (spatial distribution) εξαρτάται από τη θέση ανθρώπου και ρομπότ στο χώρο: η φυσική συνεργασία A-P απαιτεί τη συνύπαρξη A-P σε κοινό χώρο εργασίας (βλ. Εικόνα 2-3 & Εικόνα 2-4), ενώ ο χωρικός διαχωρισμός συναντάται κυρίως σε συνεργατικές εφαρμογές τηλερομποτικής. Στα πρότυπα ISO 10218-1&2/2011 και draft ISO/TS 15066 (Matthias, 2015; Michalos et al., 2015) ορίστηκαν κριτήρια και συνθήκες (ταχύτητες, αποστάσεις, ζώνες), έτσι ώστε από την πλήρη απομόνωση A-P, σταδιακά η τάση στα ρομποτικά συστήματα παραγωγής να τείνει προς την υπό προϋποθέσεις μερική χωρική συνύπαρξη A-P, χωρίς προστατευτικό φράχτη ανάμεσά τους, μέχρι την περίπτωση πλήρους χωρικής

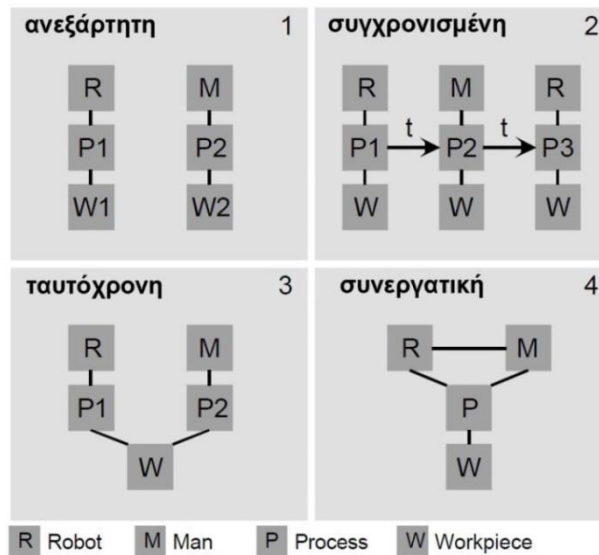
σύμπτωσης, όπου δεν υπάρχει καμία χωρική ζώνη ασφαλείας και μπορεί να υπάρχει φυσική επαφή A-P (βλ. Εικόνα 2-5).



Εικόνα 2-5: Επίπεδα χωρικού διαχωρισμού στη συνεργασία A-P (R D Schraft et al., 2004; Weistroffer, 2014)

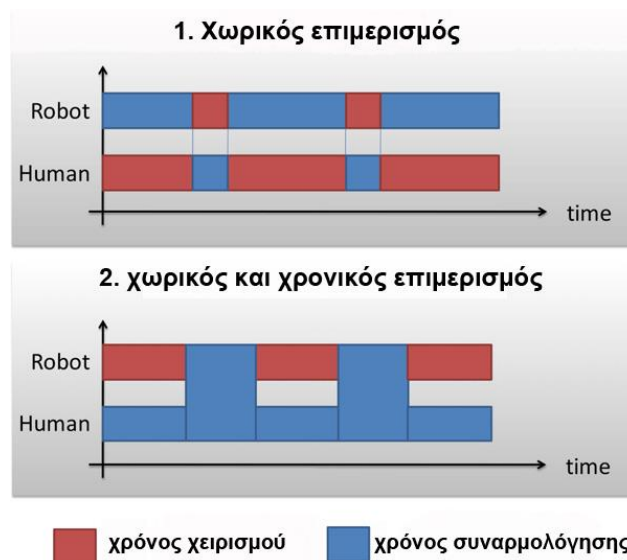
- **Ο επιμερισμός στο χρόνο (χρονικός διαχωρισμός)**

Ο χρονικός επιμερισμός της συνεργασίας A-P αναφέρεται στη χρονική σύμπτωση ή διαχωρισμό της εκτέλεσης των καθηκόντων και στον τρόπο με τον οποίο δρουν άνθρωπος και ρομπότ στη διάρκεια του χρόνου και σύμφωνα με τους (R D Schraft et al., 2004) κατηγοριοποιείται σε τέσσερις τύπους (βλ. Εικόνα 2-6). Όταν ο άνθρωπος και το ρομπότ εργάζονται στον ίδιο χώρο με τρόπο εντελώς ανεξάρτητο (διαφορετικά καθήκοντα και τεμάχια), τότε πρόκειται περισσότερο για συνέργεια και συνύπαρξη παρά για συνεργασία (συμβατική χρήση ρομπότ στη βιομηχανία). Όταν ο άνθρωπος και το ρομπότ εργάζονται διαδοχικά με μια χρονική μετάβαση πάνω στο ίδιο τεμάχιο, τότε πρόκειται για συγχρονισμένη συνεργασία. Ο τρίτος τύπος χρονικού επιμερισμού αφορά ταυτόχρονη συνεργασία A-P πάνω στο ίδιο τεμάχιο, με εκτέλεση όμως διαφορετικών καθηκόντων από τον καθένα και χωρίς μεταξύ τους φυσική επαφή. Ο υποβοηθούμενος (συνεργατικός) χρονικός επιμερισμός περιγράφει τη συνεργατική, από κοινού εκτέλεση του ίδιου καθήκοντος πάνω στο ίδιο τεμάχιο, με φυσική επαφή, όταν, δηλαδή, το ρομπότ υποβοηθά τον άνθρωπο στην πραγματοποίηση μιας εργασίας.



Εικόνα 2-6: Τύποι χρονικής συνεργασίας A-P (Helms et al., 2002; R D Schraft et al., 2004)

Στο ίδιο πνεύμα, οι (Krüger et al., 2009) προτείνουν το διαχωρισμό των συνεργατικών ρομποτικών συστημάτων σε δύο κατηγορίες (βλ. Εικόνα 2-7): τα συστήματα στα οποία μοιράζεται ο χώρος μεταξύ A-P (χωρικός επιμερισμός) και στα συστήματα στα οποία μοιράζεται τόσο ο χώρος όσο και χρόνος (χωρικός και χρονικός επιμερισμός). Στο χωρικό επιμερισμό ο χειριστής και το ρομπότ μοιράζονται τον ίδιο χώρο εργασίας, αλλά πραγματοποιούν διαφορετικά καθήκοντα (κατάσταση ασύγχρονης συνεργασίας). Στο χωρικό και χρονικό επιμερισμό αντίθετα, ο χειριστής και το ρομπότ μοιράζονται τον ίδιο χώρο εργασίας και πραγματοποιούν από κοινού το ίδιο καθήκον (κατάσταση σύγχρονης συνεργασίας).



Εικόνα 2-7: Κατανομή του χρόνου μεταξύ A-P σε (1) συστήματα χωρικού διαμοιρασμού και (2) χωρικού και χρονικού διαμοιρασμού (Krüger et al., 2009)

Ανάλογα με το βαθμό της συνεργασίας A-P, οι (Shi et al., 2012) προτείνουν την κατηγοριοποίηση των συνεργατικών συστημάτων παραγωγής βασιζόμενοι σε

εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, η οποία είναι ο βασικότερος τομέας υλοποίησης της συνεργασίας A-P αυτή τη στιγμή. Τα συνεργατικά ρομποτικά συστήματα παραγωγής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με το βαθμό της συνεργασίας A-P: χαμηλού, μέσου και υψηλού βαθμού συνεργασίας.

- **Χαμηλός βαθμός συνεργασίας A-P**

Τα τρία χαρακτηριστικά του χαμηλού βαθμού συνεργασίας A-P είναι:

- Ο άνθρωπος δεν αλληλεπιδρά άμεσα με το ρομπότ ή το Τελικό Σημείο Δράσης (ΤΣΔ), παρά μόνο μέσω ενδιάμεσων συσκευών
- Κατά την τροφοδοσία/φόρτωση του ρομπότ με τεμάχια, ο χειριστής τα φορτώνει έμμεσα, είτε σε ανεξάρτητη συσκευή συγκράτησης, είτε σε περιστροφικό τραπέζι, ή σε άλλη ενδιάμεση συσκευή μεταφοράς.
- Ο άνθρωπος δεν εισέρχεται στην περιοχή που ορίζεται από το εύρος εργασίας του ρομπότ, ή του ΤΣΔ, ή του τεμαχίου κατά το χειρισμό του από το ρομπότ. Δεν υπάρχει πλέγμα ή φυσικός φράκτης ασφαλείας μεταξύ A-P.

Η συνεργασία σε αυτή την περίπτωση είναι έμμεση και τυπικό παράδειγμα είναι η ρομποτική συγκόλληση τεμαχίων σε περιστροφικό τραπέζι: όσο το ρομπότ πραγματοποιεί τη συγκόλληση, ο χειριστής τοποθετεί σε άλλη πλευρά του τραπεζιού το επόμενο τεμάχιο στη συσκευή συγκράτησης. Μόλις τελειώσει η συγκόλληση το τραπέζι περιστρέφεται ώστε το επόμενο τεμάχιο να έρθει στη θέση συγκόλλησης.

- **Μέσος βαθμός συνεργασίας A-P**

Στην περίπτωση αυτή, ένας ή περισσότεροι χειριστές τροφοδοτούν/φορτώνουν την αρπάγη του ρομπότ με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Το ρομπότ βρίσκεται στον αυτόματο τρόπο λειτουργίας
- Τα συστήματα οδήγησης των σερβοκινητήρων είναι ενεργοποιημένα
- Το ρομπότ μπορεί να βρίσκεται οπουδήποτε στο χώρο εργασίας του
- Το ρομπότ επαναλαμβάνει/συνεχίζει τον αυτόματο κύκλο εργασίας του στο επόμενο τεμάχιο, χωρίς να χρειάζεται να δοθεί κάποιο σήμα εισόδου από τον χειριστή (η διαδικασία είναι αυτοματοποιημένη με τη χρήση αισθητήρων και ανίχνευση της θέσης του χειριστή).
- Μπορεί να πραγματοποιηθεί κίνηση του ρομπότ ή του ΤΣΔ ενόσω ο άνθρωπος βρίσκεται εντός του χώρου εργασίας, αλλά εκτός από μια απαγορευμένη ζώνη (ενδεικτικά βλ. παράδειγμα στην Εικόνα 2-8).

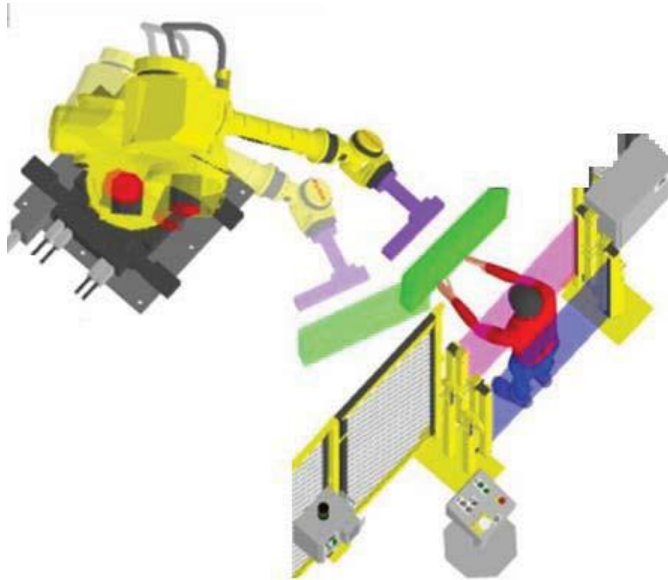
- **Υψηλός βαθμός συνεργασίας A-P**

Στην περίπτωση αυτή, το ρομπότ κι ένας ή περισσότεροι χειριστές πραγματοποιούν καθήκοντα ταυτόχρονα ή συνεργατικά, εντός του χώρου εργασίας του ρομπότ, με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Το ρομπότ βρίσκεται στον αυτόματο τρόπο λειτουργίας
- Τα συστήματα οδήγησης των σερβοκινητήρων είναι ενεργοποιημένα

- Μπορεί να πραγματοποιηθεί κίνηση του ρομπότ ή του ΤΣΔ ενόσω ο άνθρωπος βρίσκεται εντός οποιουδήποτε σημείο του χώρου εργασίας
- Το ρομπότ κινείται στον αυτόματο (προγραμματισμένο) τρόπο λειτουργίας και η ταχύτητα και οι κινήσεις του πρέπει να συγχρονίζονται με αυτές του ανθρώπου, με έναν συνεργατικό τρόπο λειτουργίας για την εκτέλεση του ίδιου καθήκοντος-στόχου.

Στον υψηλό βαθμό συνεργασίας A-P, ο οποίος είναι ο πιο αλληλεπιδραστικός και στον οποίο εστιάζει η παρούσα έρευνα, απαιτούνται τεχνολογίες οι οποίες θα υποστηρίζουν τα εξής: (i) το ρομπότ πρέπει να έχει ικανότητες αντίληψης της κατάστασης (Endsley, 2011), (ii) πρέπει να υπάρχει αμοιβαία κατανόηση του προς εκτέλεση καθήκοντος και πρόβλεψη των επόμενων βημάτων τόσο από τον άνθρωπο όσο και από το ρομπότ (Hoffman & Breazeal, 2007), (iii) το ρομπότ πρέπει να μπορεί να εκπαιδευτεί ώστε να προσαρμόζεται σε δυναμικές καταστάσεις χρησιμοποιώντας μηχανισμούς της φυσικής ανθρώπινης επικοινωνίας (S. Green, Billingham, Chen, & Geoffrey, 2008).



Εικόνα 2-8: Παράδειγμα εφαρμογής μέσου βαθμού συνεργασίας A-P με αυτόματη ανίχνευση της θέσης του ανθρώπου σε σχέση με αυτή του ρομπότ. (Shi et al., 2012)

2.4. Σύνθεση

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε η προσπάθεια ορισμού της συνεργασίας Ανθρώπου-Ρομπότ (A-P) και περιγραφής των βασικών εννοιών αυτής, στο πλαίσιο μέσα στο οποίο ερευνάται στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Η ερευνούμενη συνεργασία ανθρώπου-βιομηχανικού ρομπότ αναφέρεται στην άμεση αλληλεπίδραση μεταξύ A-P, μέσα σε έναν ορισμένο συνεργατικό χώρο εργασίας και προϋποθέτει τη χρήση ενός ρομπότ το οποίο παρέχει τη δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας της κατάστασης και της πρόθεσης μεταξύ των δύο μερών.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν τα διαφορετικά είδη συνεργατικών ρομπότ και έγινε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στις κυριότερες δημοσιευμένες βιομηχανικές εφαρμογές συνεργασίας A-P, οι οποίες αφορούν κυρίως στοιχειώδη συνεργασία σε απλά καθήκοντα όπως απλές μορφές συναρμολόγησης, το χειρισμό και τη μεταφορά τεμαχίων. Μεταξύ των αναφερθέντων τύπων βιομηχανικών ρομπότ συνεργασίας, στην παρούσα έρευνα εστιάζουμε στα βιομηχανικά ρομπότ-βοηθούς (robot assistants), καθότι αντίθετα από τα cobots και τους ρομποτικούς εξωσκελετούς πρόκειται για ρομπότ που παρουσιάζουν χαρακτηριστικά αυτονομίας, ευελιξίας και πιο ουσιαστική αλληλεπίδραση κατά τη συνεργασία με τον άνθρωπο.

Τέλος, έγινε μια προσπάθεια κατηγοριοποίησης των τύπων συνεργασίας A-P: με βάση τον καταμερισμό της εργασίας, με βάση το χωρικό και χρονικό διαχωρισμό και με βάση το βαθμό (ένταση) της συνεργασίας. Σύμφωνα με την παραπάνω κατηγοριοποίηση, στην παρούσα έρευνα θα εξετάσουμε σενάρια με υψηλό βαθμό συνεργασίας, με πλήρη διαμοιρασμό του χώρου εργασίας χωρίς φράκτη, με δυνατότητα άμεσης φυσικής επαφής με το ρομπότ ενώ αυτό κινείται και συλλογική διανομή των ρόλων στο σενάριο της συνεργασίας. Ακόμα, τα προς διερεύνηση σενάρια θα παρουσιάζουν χωρική και χρονική σύμπτωση και ταυτόχρονο ή/και συνεργατικό τύπο χρονικού επιμερισμού (βλ. Εικόνα 2-6 & Εικόνα 2-7).

3. Η ασφάλεια της συνεργασίας A-P

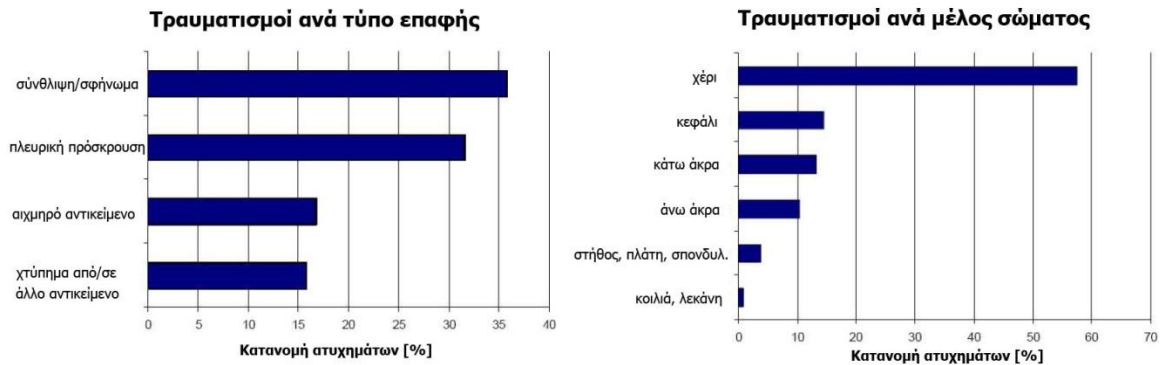
Ενώ η εξέλιξη των συνεργατικών βιομηχανικών ρομπότ είναι ταχεία, η εισαγωγή της συνεργασίας ανθρώπου-ρομπότ (A-P) σε ρομποτικά συστήματα παραγωγής είναι αντιστρόφως ανάλογη της παραπάνω εξέλιξης και παραμένει ακόμα αμελητέα σε μη-ακαδημαϊκό επίπεδο. Επιπλέον, τα διεθνή βιομηχανικά πρότυπα που αφορούν στη συνεργασία A-P καθυστερούν στην έκδοσή τους και αδυνατούν να προλάβουν τις εξελίξεις στα συνεργατικά ρομποτικά συστήματα. Η παραπάνω ανακολουθία και οι περιορισμοί στην εισαγωγή των συνεργατικών ρομπότ-βοηθών στη βιομηχανία οφείλονται πρωτίστως στα προβλήματα ασφάλειας που προκύπτουν από την εγγύτητα και τη φύση της συνεργασίας A-P, και παραμένουν άλυτα, τόσο σε επίπεδο προτύπων όσο και κριτηρίων και τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας. Η ασφάλεια της συνεργασίας A-P σχετίζεται με πολλές παραμέτρους του συστήματος: από παθητικά συστήματα στην κατασκευή του ρομπότ και την πρόληψη του ηλεκτρικού κινδύνου, μέχρι την πρόβλεψη των ανθρώπινων λαθών. Στην παρούσα θεώρηση ασχολούμαστε μόνο με την αποφυγή του κινδύνου σωματικής επαφής και την αποδοχή και την αξιοπιστία της συνεργασίας A-P.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα βασικότερα προβλήματα ασφάλειας της συνεργασίας A-P, τα ισχύοντα πρότυπα, και τα κριτήρια και οι τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας, τόσο σε πρακτικό (φυσικό) όσο και σε διανοητικό επίπεδο. Τέλος, παρουσιάζονται οι έννοιες της αποδοχής και της αξιοπιστίας της συνεργασίας A-P και γίνεται μία προσπάθεια να αναδειχθούν οι παράμετροι της αποδοχής και της εύροιας της συνεργασίας.

3.1. Κίνδυνοι και προβλήματα ασφάλειας κατά τη συνεργασία A-P

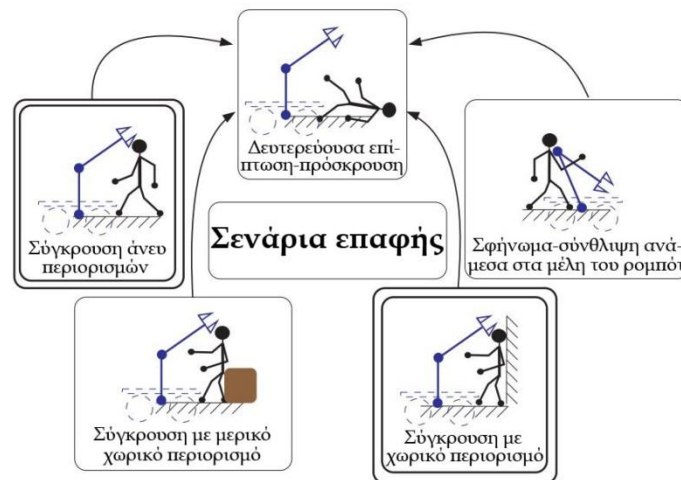
Σε αντίθεση με τις περισσότερες παραγωγικές μηχανές, τα βιομηχανικά ρομπότ σχεδιάζονται με σκοπό να προσφέρουν ευελιξία και όχι για ένα συγκεκριμένο και σαφώς ορισμένο καθήκον, έτσι ώστε να συνοδεύονται από τα αντίστοιχα ενσωματωμένα μέτρα ασφάλειας. Τα βιομηχανικά ρομπότ μπορούν να κινηθούν σε περισσότερους από έναν άξονες ταυτόχρονα, και να προγραμματισθούν με μεγάλη κινηματική ελευθερία σε διαφορετικές ταχύτητες και με διαφορετικούς συνδυασμούς κίνησης των αρθρώσεών τους. Στην περίπτωση της συνεργασίας A-P, ο χώρος εργασίας του ρομπότ μπορεί να επικαλύπτεται με αυτόν του ανθρώπου και άλλων μηχανών. Όταν, δε, έχουμε κινούμενα ή/και αυτόνομα ρομπότ, ο κίνδυνος ατυχήματος αυξάνεται, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου το ρίσκο ήταν αμελητέο για σταθερά ρομπότ. Οι κίνδυνοι που σχετίζονται με τα συνεργατικά ρομπότ είναι γνωστοί, αλλά οι αιτίες του κινδύνου είναι πολλές φορές μοναδικές για το εκάστοτε σύστημα. Έτσι, οι αναγνωρισμένοι κίνδυνοι δε μπορούν να συσχετισθούν με όλα τα ρομπότ, αλλά και οι επικίνδυνες καταστάσεις δεν έχουν την ίδια επίπτωση μεταξύ διαφορετικών ρομποτικών συστημάτων. Σε κάθε περίπτωση όμως, η γνώση των μηχανισμών του τραυματισμού και των διαφορετικών τρόπων με τους οποίους το ρομπότ μπορεί να τραυματίσει τον άνθρωπο, θα οδηγήσει σε ουσιαστική βελτίωση των τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας A-P. Μολονότι δεν υπάρχουν ακόμα στατιστικά ατυχημάτων στα συνεργατικά ρομποτικά συστήματα, μπορούμε να

αντλήσουμε πολύτιμη πρωτογενή πληροφορία από ατυχήματα σε συμβατικά βιομηχανικά ρομποτικά συστήματα (βλ. Εικόνα 3-1).



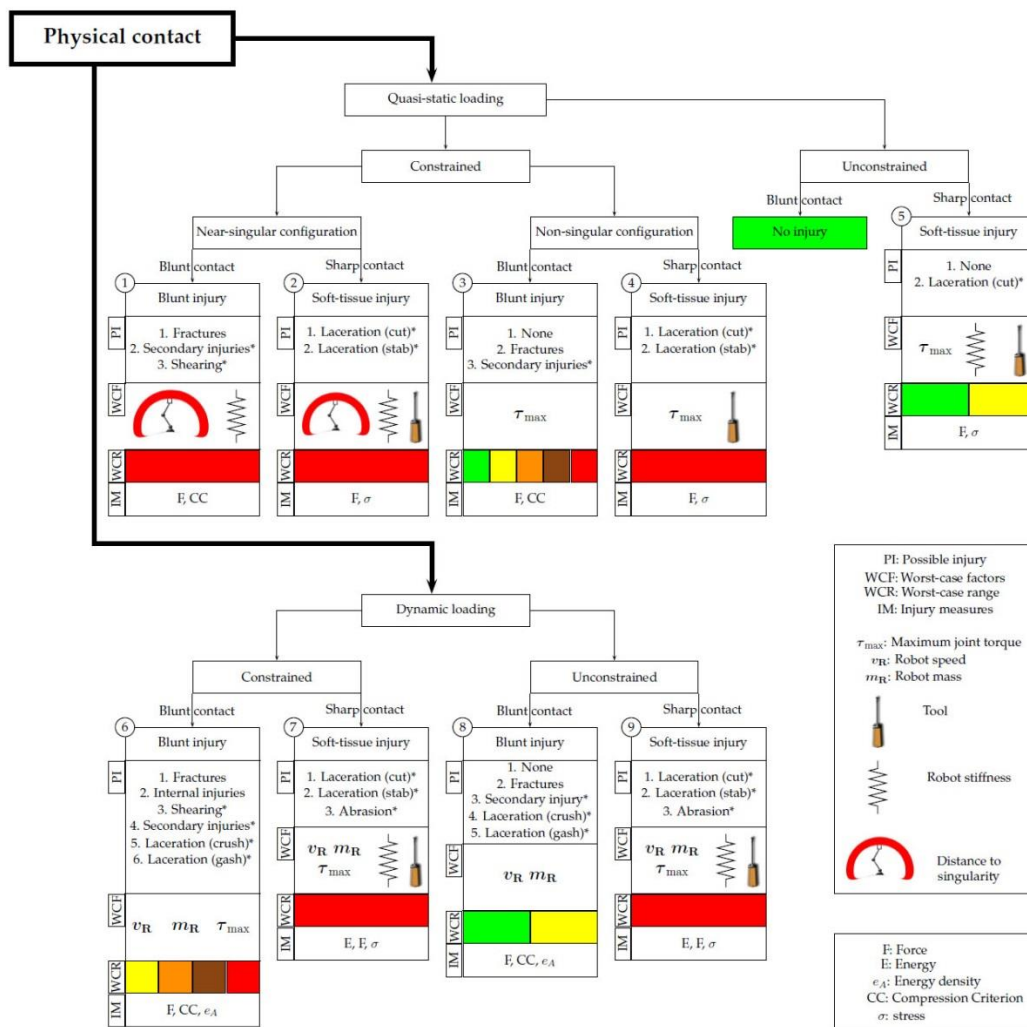
Εικόνα 3-1: Κατανομή των τραυματισμών από ρομπότ, ανά τύπο ατυχήματος και ανά ανθρώπινο μέλος (Sami Haddadin et al., 2011)

Οι συνέπειες των ατυχημάτων κυμαίνονται από το μη-τραυματισμό μέχρι το θάνατο και κατατάσσονται στην κλίμακα Abbreviated Injury Scale (AIS) ανάλογα με το βαθμό σοβαρότητας από το 0 μέχρι το 6 (Sami Haddadin, 2015). Τα ατυχήματα μπορούν να χωρισθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες (Ogorodnikova, 2010): το σφήνωμα/σύνθλιψη (ανάμεσα σε δύο μέλη του ρομπότ, ή μεταξύ του ρομπότ κι ενός άλλου αντικειμένου) και τη σύγκρουση (επαφή), με τα περιστατικά της πρώτης κατηγορίας να είναι πιο σοβαρά και πιο συχνά εμφανιζόμενα. Στατιστικά στοιχεία ατυχημάτων (τραυματισμοί και θάνατοι) σε συμβατικά ρομποτικά βιομηχανικά συστήματα και κατηγοριοποίηση των καταγεγραμμένων ατυχημάτων ανάλογα με τον τύπο του ρομπότ και της εφαρμογής, παρουσιάζονται στα (Helander, 1990), (S. Haddadin et al., 2009), (Vasic & Billard, 2013), (Malm et al., 2010). Στην Εικόνα 3-2 παρουσιάζεται μια κατηγοριοποίηση των διαφορετικών σεναρίων επαφής (σύγκρουσης) A-P, τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε τραυματισμό (S. Haddadin et al., 2009).



Εικόνα 3-2: Κατηγοριοποίηση των τύπων/σεναρίων ανεπιθύμητων επαφών μεταξύ A-P (S. Haddadin et al., 2009)

Τα αίτια πρόκλησης ατυχημάτων μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες: (i) κατασκευαστικές αστοχίες (ηλεκτρολογικές, μηχανολογικές, δομικές, αισθητήρων, λογισμικού), (ii) ανθρώπινη συμπεριφορά και (iii) συνθήκες περιβάλλοντος (Ogorodnikov, 2010). Οι κατασκευαστικές αστοχίες μπορεί να προκαλέσουν απότομες και απρόβλεπτες κινήσεις, ανεπιθύμητη ταχύτητα, ξαφνική επιτάχυνση κλπ. Η ανθρώπινη συμπεριφορά περιλαμβάνει το ανθρώπινο λάθος, το οποίο μπορεί να οφείλεται σε ανεπαρκή εκπαίδευση, υψηλό γνωστικό φορτίο, κόπωση, λανθασμένη κατανομή καθηκόντων κ.ά., και να προκαλέσει: (ii-i) απώλεια της αντίληψης της κατάστασης, της προσοχής και της αίσθησης του κινδύνου, (ii-ii) είσοδο σε μη προβλεπόμενο χώρο και (ii-iii) λανθασμένο χειρισμό. Οι συνθήκες περιβάλλοντος μπορεί να είναι αιτία πρόκλησης ατυχήματος αν παρεκκλίνουν από τις συνθήκες σχεδιασμού του ρομποτικού κυττάρου (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία, επίπεδα φωτισμού και θορύβου κλπ.). Στην Εικόνα 3-3 παρουσιάζονται οι πιθανοί τραυματισμοί (PI), οι μηχανισμοί τους, οι παράγοντες του χειρότερου δυνατού σεναρίου (WCF) και το εύρος του χειρότερου δυνατού τραυματισμού (WCR) (Sami Haddadin et al., 2011).



Εικόνα 3-3: Δενδρο-διάγραμμα της ασφάλειας της φυσικής επαφής A-P, (Sami Haddadin et al., 2011)

3.2. Κριτήρια ασφαλούς συνεργασίας A-P

Στα συμβατικά (μη-συνεργατικά) βιομηχανικά ρομποτικά συστήματα, η ασφάλεια του ανθρώπου αντιμετωπίζεται σε γενικές γραμμές με πλήρη απομόνωση ανθρώπου και ρομπότ, με φράκτες, αισθητήρες και κουμπιά κινδύνου. Η συνεργασία A-P απαιτεί ένα τελείως διαφορετικό πλαίσιο ασφάλειας, καθώς αφενός προϋποθέτει χωρική συνύπαρξη A-P, αλληλεπίδραση και δυνατότητα επαφής, αφετέρου, η συνεχής απενεργοποίηση του ρομπότ δεν είναι αποδεκτή ως τεχνική, αφού ακυρώνει ουσιαστικά τα πλεονεκτήματα της συνεργασίας και εγκαθιστά μια σειριακή λογική μη-συνεργασίας τύπου «περιμένω τη σειρά μου». Επιπρόσθετα, στις μη-συνεργατικές εφαρμογές με βιομηχανικά ρομπότ, συνήθως απαιτείται ταχύτητα και απόλυτη ακρίβεια, χωρίς να χρησιμοποιούνται εξωτερικοί αισθητήρες, με δεδομένο ότι το περιβάλλον εργασίας είναι σαφώς καθορισμένο, σταθερό και γνωστό. Αντιθέτως, στα συνεργατικά περιβάλλοντα A-P επιδιώκεται αποτελεσματική και αξιόπιστη συνεργασία με τον άνθρωπο (ροή, επικοινωνία, επίγνωση της κατάστασης) και φυσική (σωματική) ασφάλεια του ανθρώπου. Στο παραπάνω πλαίσιο, απόπειρες παράλληλης διατήρησης των παραδοσιακών ρομποτικών χαρακτηριστικών απόδοσης (ταχύτητα, ακρίβεια) και χρήσης τεχνικών ασφάλειας, στις οποίες το ρομπότ και ο ελεγκτής του αντιμετωπίζεται απλά ως μια ευφυής μηχανή η οποία δεν θα βλάψει τον άνθρωπο, είναι ακατάλληλες (R Alami et al., 2006). Τα πιο σημαντικά κριτήρια για την άμεση συνεργασία A-P είναι (i) η ασφάλεια (safety) και (ii) η αξιοπιστία (dependability) (R Alami et al., 2006; De Santis & Siciliano, 2008; Kulić & Croft, 2007).

Σε καταστάσεις συνεργασίας A-P η ασφάλεια μπορεί να οριστεί ως «η απουσία σωματικού τραυματισμού του ανθρώπου, εντός του συνεργατικού χώρου εργασίας A-P» (R Alami et al., 2006). Μάλιστα, η ασφάλεια πρέπει να διασφαλίζεται τόσο κατά την κανονική λειτουργία του συνεργατικού ρομπότ, όσο και κατά την περίπτωση ελαττωματικής λειτουργίας. Η ασφάλεια μπορεί να διαχωριστεί σε «φυσική» και «διανοητική» ασφάλεια και η διανοητική πρέπει πάντα να συμπληρώνει τη φυσική. Με τον όρο φυσική ασφάλεια εννοούμε ότι το ρομπότ δεν θα πρέπει να τραυματίσει φυσικώς (σωματικώς) τον άνθρωπο. Με τον όρο «διανοητική ασφάλεια» (mental safety) εννοούμε την αυξημένη επαγρύπνηση και επίγνωση του χρήστη σε σχέση με την κίνηση του βιομηχανικού ρομπότ, και την κατάσταση απουσίας απροσδόκητων και απότομων κινήσεων, οι οποίες θα αποτρέψουν τη δημιουργία ανεπιθύμητων φαινομένων στο χρήστη, όπως φόβος, έκπληξη ή σοκ (Nonaka, Inoue, Arai, & Mae, 2004; Ogorodnikova, 2010).

Προσαρμόζοντας τη θεωρία των (Avizienis, Laprie, Randell, & Landwehr, 2004) για τα αξιόπιστα υπολογιστικά συστήματα, η αξιοπιστία ενός συνεργατικού ρομποτικού συστήματος μπορεί να οριστεί ως η ικανότητα του ρομποτικού συστήματος να παρέχει συνεργασία και υπηρεσίες τις οποίες ο άνθρωπος μπορεί να εμπιστευθεί και να προβλέψει. Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, η αξιοπιστία στη συνεργασία A-P συνοψίζεται στην κατάσταση απουσίας «γνωστικού φόβου» (“cognitive fear”) εξαιτίας της επίγνωσης για την ύπαρξη ικανών συστημάτων

ασφάλειας, τα οποία ο χρήστης μπορεί να εμπιστευθεί (R Alami et al., 2006). Η αξιοπιστία ως έννοια περιλαμβάνει τα παρακάτω χαρακτηριστικά: ασφάλεια, διαθεσιμότητα, εμπιστοσύνη, ακεραιότητα και συντηρησιμότητα (Avizienis et al., 2004). Χάριν οικονομίας κειμένου, η βιβλιογραφική αναφορά σε θέματα αξιοπιστίας παραλείπεται και παρατίθενται ενδεικτικά οι ακόλουθες αναφορές (R Alami et al., 2006; Avizienis et al., 2004; De Santis, Siciliano, De Luca, & Bicchi, 2008)

Στο πλαίσιο της ασφάλειας και της αξιοπιστίας της συνεργασίας A-P, και μέχρι την οριστικοποίηση του ISO/TS 15066 το οποίο είναι υπό έκδοση, το εν ισχύ ISO 10218/2011 ορίζει ότι για να επιτρέπεται η συνεργασία A-P πρέπει να ικανοποιείται μία από τις συνθήκες του Πίνακας 3-1. Οι συνθήκες αυτές, βέβαια, είναι αμφισβητούμενες, διότι δε λαμβάνουν υπόψη ούτε το μέγεθος και τη μορφή του ρομπότ, ούτε τη σχετική απόσταση A-P, ούτε και τις στρατηγικές ελέγχου: για παράδειγμα το όριο της δύναμης των 150 N έχει τελείως διαφορετική επίπτωση αν το εργαλείο του ρομπότ έχει μια λεπίδα, ή αν έχει ένα ελαφρύ πλαστικό εργαλείο χωρίς αιχμηρές ακμές (Sami Haddadin et al., 2011). Επίσης, ακόμα και αν τηρείται ο περιορισμός στην ταχύτητα του εργαλείου, η εγγύτητα του ανθρώπου ως προς το ρομπότ παραμένει επικίνδυνη εάν αυτό βρίσκεται κοντά σε σημεία ιδιομορφίας. Στο Αμερικανικό ANSI/RIA R15.06-2012 ορίζεται ότι η τροχιά ενός συνεργατικού ρομπότ πρέπει να υπακούει στον εξής κανόνα:

$$(απόσταση A - P) \leq ταχύτητα \times t_{\phi}$$

όπου t_{ϕ} είναι ο χρόνος που απαιτείται για να φρενάρει το ρομπότ, ανάλογα με το ωφέλιμο φορτίο του. Δεδομένου ότι τηρούνται όλα τα υπόλοιπα μέτρα ασφάλειας (αισθητήρες, δυνατότητες αντιδραστικού προγραμματισμού τροχιάς), από την παραπάνω ανισότητα προκύπτει η ταχύτητα του συνεργατικού ρομπότ ως ένας συμβιβασμός μεταξύ παραγωγικότητας και ασφάλειας. Βέβαια και πάλι, το παραπάνω κριτήριο απόστασης μπορεί να έρχεται σε αντίθεση με ένα σενάριο ταυτόχρονης ή πλήρους συνεργατικής συνεργασίας.

Συνθήκες επιτρεπόμενης συνεργασίας A-P κατά ISO 10218/2011

Ταχύτητα ΤΣΔ/εργαλείου $\leq 0,25$ m/s

Μέγιστη δυναμική ισχύς ≤ 80 W

Μέγιστη στατική δύναμη ≤ 150 N

Πίνακας 3-1: ISO 10218/2011 - Κριτήρια τα οποία πρέπει να ικανοποιούνται κατά τη συνεργασία A-P

Το ενδιαφέρον για τη θέσπιση νέων, πιο αποτελεσματικών προδιαγραφών ασφάλειας στα συνεργατικά ρομπότ αποτυπώνεται και στο πλήθος των σχετικών Ευρωπαϊκών ερευνητικών προγραμμάτων που πραγματοποιούνται τα τελευταία χρόνια, ενδεικτικά αναφέρουμε τα *PHRIENDS*, *SMERobot*, *ICARO* και *SAPHARI*⁷.

Η πρώτη προσπάθεια ποσοτικοποίησης της φυσικής ασφάλειας του ανθρώπου αξιολογούσε το όριο του ανθρώπινου πόνου ως κριτήριο ασφάλειας έναντι της

⁷ PHRIENDS: <http://www.phriends.eu>, SMERobot: <http://www.smerobot.org>, ICARO: <http://goo.gl/QLggV7> και SAPHARI: <http://www.saphari.eu/>

φυσικής επαφής (Yamada, Hirasawa, Huang, & Umetani, 1996). Οι (Ikuta, Ishii, & Nokata, 2003) πρότειναν μια γενικευμένη μέθοδο ασφάλειας, με διαφορετικές στρατηγικές και ποσοτικούς δείκτες ασφάλειας (με μετρικές οι οποίες αφορούν τις δυνάμεις σύγκρουσης A-P) ανάλογα με τις ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου ρομπότ. Μία ευρεία ανασκόπηση και προσαρμογή των δεικτών σοβαρότητας ατυχημάτων σε ελαφρά συνεργατικά ρομπότ (για το κεφάλι: Head Injury Criterion (HIC), Gadd Severity Index (GSI), Maximum Power Index (MPI), Effective Displacement Index (EDI), Revised Brain Model (RBM), Vienna Institute Index (JTI), και Maximum Mean Strain Criterion (MSC) και για το στήθος: (Acceleration Criterion (AC), Compression Criterion (CC), και Viscous Criterion (VC)) παρουσιάζεται στα (S Haddadin, Schaffer, & Hirzinger, 2007; S. Haddadin et al., 2009). Στο (Ogorodnikova, 2010) παρουσιάζονται αναλυτικά κριτήρια ασφαλούς συνεργασίας βασισμένα στην προσέγγιση των Δεικτών Κινδύνου (Robot Danger Index - DI). Οι δείκτες κινδύνου αποτελούν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση και συνδυάζουν: (i) τη σχετική απόσταση A-P, (ii) τη δύναμη επαφής και (iii) την επιτάχυνση της κεφαλής του χρήστη. Η ίδια συγγραφέας παρουσιάζει κριτήρια και μετρικές ασφάλειας σχετιζόμενα με τη δυναμική του ρομπότ και με τον υπολογισμό και την αξιολόγηση σε περιβάλλον προσομοίωσης των ελλειψοειδών δρώσας μάζας των ρομποτικών βραχιόνων. Οι (Meguenani et al., 2015) προτείνουν ένα πιο ολοκληρωμένο πλαίσιο ελέγχου βασισμένο στο φρενάρισμα του ρομπότ και στην αποφυγή σύγκρουσης, ελέγχοντας σε πραγματικό χρόνο ένα κριτήριο (κινητικής) ενέργειας. Μάλιστα, η οριακή ασφαλή τιμή του κριτηρίου ενέργειας αναπροσαρμόζεται σε κάθε χρονικό βήμα αναλόγως της σχετικής απόστασης A-P. Στο (Zanchettin, Ceriani, Rocco, Ding, & Matthias, 2015) προτείνονται στρατηγικές αυτόνομης συμπεριφοράς κι ελέγχου της ταχύτητας του ρομπότ πάνω σε μια προκαθορισμένη τροχιά, βασισμένες σε μετρικές ελάχιστης ασφαλούς απόστασης A-P.

Τέλος, από την ανάλυση ρομποτικών ατυχημάτων προκύπτει ότι είναι πολύ σύνθητες να αιφνιδιάζεται και να συλλαμβάνεται εξ απροόπτου ο χρήστης από τη θέση στην οποία βρίσκεται το κινούμενο ρομπότ, μολονότι έχει πλήρη επίγνωση του κοινού χώρου εργασίας και της κίνησης του ρομπότ (Malm et al., 2010). Υπάρχει, δηλαδή, δυσκολία στην αντίληψη της τρέχουσας θέσης του ρομπότ σε σχέση με το χρήστη κι αυτό μπορεί να οδηγήσει σε απρόβλεπτη συμπεριφορά ή ατύχημα. Για να αντιμετωπιστεί η κατάσταση αιφνιδιασμού από την πλευρά του ανθρώπου, απαιτούνται εργαλεία και τεχνικές διασφάλισης της αυξημένης επαγρύπνησης/εγρήγορης του χρήστη και «καλλιέργειας» μιας συμπεριφοράς διανοητικής ασφάλειας. Εφόσον, λοιπόν, έχει εξασφαλισθεί ότι το συνεργατικό ρομπότ πληροί τα κριτήρια ασφαλούς φυσικής συνεργασίας (δομικά, αισθητήρων, σχεδιασμού τροχιάς και ταχύτητας), η ζητούμενη αξιοπιστία της συνεργασίας προϋποθέτει να αντιμετωπιστούν τα ζητήματα διανοητικής ασφάλειας αλλά και της αποδοχής του συνεργατικού ρομπότ από τον άνθρωπο. Επίσης, από τη μία πλευρά απαιτείται μια σχετικά αυτόνομη και ευφυής συμπεριφορά από το ρομπότ, από την άλλη όμως είναι αδύνατο να μοντελοποιηθούν όλες οι πιθανές ενέργειες του

ανθρώπου σε ένα μη-αυστηρά δομημένο και υποκείμενο σε αλλαγές περιβάλλον συνεργασίας. Εκτός από φυσικώς ασφαλής, η συνεργασία A-P πρέπει να έχει χαρακτηριστικά σαφούς επικοινωνίας και αντίληψης της κατάστασης, και να είναι ψυχολογικά άνετη και αποδεκτή από τον άνθρωπο (De Santis et al., 2008), τόσο σε κατάσταση κανονικής, όσο και ελαττωματικής λειτουργίας. Οι προσεγγίσεις που άπτονται των θεμάτων αυτών (τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας, αποδοχή και διανοητική ασφάλεια) αντιμετωπίζονται στα αμέσως επόμενα κεφάλαια.

3.3. Τεχνικές και στρατηγικές ασφαλούς συνεργασίας A-P

Το πρόβλημα της εξισορρόπησης μεταξύ της ασφάλειας της συνεργασίας και της διατήρησης της απόδοσης σε υψηλά επίπεδα, παραμένει ακόμα μια πρόκληση κατά το σχεδιασμό ενός υβριδικού συστήματος συνεργασίας A-P. Από μόνες τους η χρήση μετρικών ασφαλούς δύναμης ή ταχύτητας και η θεώρηση του ρομπότ ως μιας ευφυούς μηχανής, είναι ανεπαρκείς στην περίπτωση ενός ταυτόχρονου ή παράλληλου δυναμικού σεναρίου συνεργασίας A-P. Τα τελευταία χρόνια, έχει γίνει μια αξιολογή ερευνητική προσπάθεια επίλυσης προβλημάτων ασφάλειας της συνεργασίας A-P και ειδικότερα τόσο στο σχεδιασμό του ίδιου του ρομπότ, όσο και σε τεχνικές ασφαλούς σχεδιασμού τροχιάς. Για παράδειγμα, έχει διερευνηθεί η σύγκρουση μεταξύ A-P κι έχουν προκύψει τα χαρακτηριστικά και τα αποτελέσματα της πρόσκρουσης. Έτσι, οι προκύπτουσες δυνάμεις πρόσκρουσης μπορούν να μειωθούν σημαντικά με ένα ρομπότ ελαφρού τύπου (lightweight robot, π.χ. (Bischoff et al., 2010)), ή με την προσθήκη ενός καλύμματος ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς στα μέλη του ρομπότ, ή τέλος, με την εισαγωγή ενδοτικότητας στο μηχανισμό οδήγησης. Όσον αφορά τη δημιουργία τεχνικών κανονισμών και προτύπων (π.χ. draft ISO/TS 15066), έχει πραγματοποιηθεί η προκαταρκτική έρευνα και έχουν προκύψει οι γενικές κατευθύνσεις ως προς τα ασφαλή όρια δύναμης τα οποία μπορεί να ασκήσει το ρομπότ στον άνθρωπο, βασισμένα στην τυποποιημένη κλίμακα αξιολόγησης του τραυματισμού AIS (Abbreviated Injury Scale) (S Haddadin et al., 2007; S. Haddadin et al., 2009; Sami Haddadin, Albu-Schäffer, & Hirzinger, 2010). Όμως, η αποδοχή ή μη του ρομποτικού συνεργάτη από τον άνθρωπο δε μπορεί να περιορίζεται στον ορισμό ασφαλών τιμών δύναμης και ταχύτητας για τις πιθανές συγκρούσεις. Για παράδειγμα, ποια όρια τραυματισμού είναι αποδεκτά για μια δεδομένη συχνότητα συγκρούσεων; Κι εδώ τίθεται το ερώτημα: είναι αποδεκτή μια αμυχή ή ένας μώλωπας την ημέρα και επί έναν χρόνο συνεχόμενα; Ο παραπάνω προβληματισμός μας οδηγεί στη διαπίστωση ότι είναι προτιμότερη η χρήση τεχνικών αποφυγής σύγκρουσης (pre-collision), ή τεχνικών εμπλουτισμού της επικοινωνίας μεταξύ A-P με σκοπό την αποφυγή της σύγκρουσης, παρά η προσπάθεια προσαρμογής των ασκούμενων δυνάμεων μέσα σε ανεκτά όρια και η χρήση post-collision τεχνικών γενικότερα. Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρατίθενται επιλεγμένα ενδεικτικά παραδείγματα τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας, τα οποία είναι στην ίδια κατεύθυνση με τη δική μας προσέγγιση.

Η υλοποίηση της ασφάλειας κατά την εκτέλεση ταυτόχρονων συνεργατικών καθηκόντων A-P είναι πολυδιάστατη και κατά τους (De Santis & Siciliano, 2008)

μπορεί να περιγραφεί με τα εξής επίπεδα: ενδοτικότητα (compliance) του ρομπότ έναντι επαφών, επιτήρηση της σκηνής (συνεργατικού χώρου εργασίας) και ακριβείς έλεγχοι συγκρούσεων με ενεργοποίηση τεχνικών αποφυγής της σύγκρουσης ή/και αποσόβησης του κινδύνου. Προκύπτουν, κατά συνέπεια, τρεις κατευθύνσεις για την τακτική της ασφάλειας, οι οποίες είναι κατά σειρά: (i) αυτές που σχετίζονται με την εγγενή (intrinsic) ασφάλεια του ρομπότ, (ii) αυτές που σχετίζονται με την αποτροπή της σύγκρουσης (pre-collision) και (iii) αυτές που ενεργοποιούνται κατά τη σύγκρουση (post-collision). Στη βιβλιογραφία, οι κατευθύνσεις (ii) και (iii) συναντώνται συχνά ομαδοποιημένες, υπό τον όρο «ασφάλεια μέσω του ελέγχου» (“safety by mean of control”) (βλ. Εικόνα 3-4). Όσον αφορά το ρομποτικό έλεγχο, ο αμιγής έλεγχος θέσης είναι ανεπαρκής στις εφαρμογές συνεργασίας A-P, διότι ενδέχεται να προκαλέσει ανεπιθύμητη αύξηση των δυνάμεων επαφής (Vosniakos & Matsas, 2006). Αντιθέτως, στη συνεργασία A-P απαιτείται δυνατότητα αίσθησης και ελέγχου των ανταλλασσόμενων δυνάμεων, αλλά και φυσική συμπεριφορά συμμόρφωσης, οπότε είναι εξαιρετικά σημαντικός ο έλεγχος αλληλεπίδρασης (δύναμης-εμπέδησης).

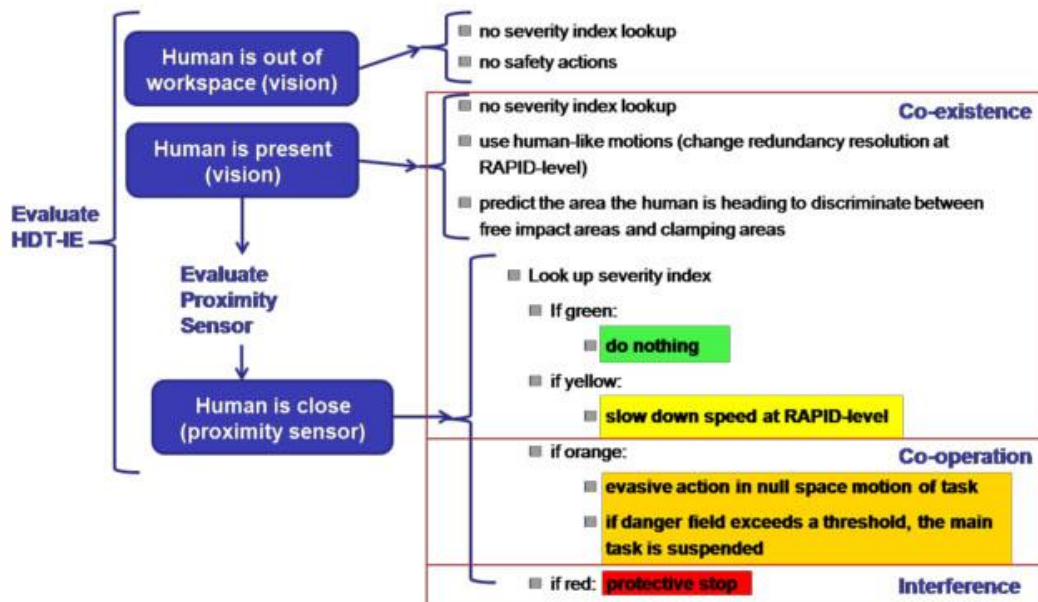
		control strategy	design strategy	
before collision	avoid collision	distance		
	minimize impact force	speed posture moment of inertia	weight	
after collision	attenuation diffusion	stiffness	cover	joint compliance
			surface	shape

Εικόνα 3-4: Κατηγοριοποίηση των στρατηγικών ασφαλούς συνεργασίας A-P κατά (Ikuta et al., 2003)

Οι στρατηγικές του ελέγχου αλληλεπίδρασης (δύναμης-εμπέδησης) είναι δύο: (i) αυτές που εκτελούν έμμεσο έλεγχο δύναμης, και (ii) αυτές που εκτελούν άμεσο έλεγχο δύναμης (De Santis & Siciliano, 2008). Στην πρώτη στρατηγική, ο έλεγχος δύναμης επιτυγχάνεται έμμεσα (π.χ. έλεγχος εμπέδησης), μέσω ενός βρόχου ελέγχου κίνησης, ενώ στη δεύτερη (άμεσου ελέγχου) δίνεται η δυνατότητα ελέγχου των δυνάμεων επαφής σε μια επιθυμητή τιμή μέσω ενός κλειστού βρόχου ανάδρασης δύναμης. Ο άμεσος έλεγχος δύναμης εφαρμόζεται σε περιπτώσεις στις οποίες διατίθενται αισθητήρες μέτρησης δύναμης, π.χ. αισθητήρες μέτρησης ροπής στις αρθρώσεις.

Όσον αφορά τη στρατηγική πίσω από τις τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας A-P, ο πρώτος από τους «τρεις νόμους της ρομποτικής» του Asimov, ο οποίος ορίζει ότι το ρομπότ δεν πρέπει να τραυματίσει τον άνθρωπο, ούτε να τον αφήσει να τραυματισθεί δια της απραξίας του, θα παραμένει επιστημονική φαντασία όσο οι προτροπές του νόμου δεν μπορούν να αντιστοιχισθούν άμεσα σε συμπεριφορές κίνησης μη-τραυματισμού, οπότε είναι εξαιρετικά δύσκολο το ρομπότ να αντιλαμβάνεται τις πιθανές ζημιές που μπορεί να προκαλέσει, ή το μέγεθος του εν δυνάμει κινδύνου. Προκύπτει, λοιπόν, μια πολύ σημαντική κατεύθυνση για την

έρευνα όσον αφορά τις χρησιμοποιούμενες τεχνικές ασφάλειας: η δυνατότητα του ρομπότ να αντιλαμβάνεται όχι απλά τη θέση του ανθρώπου, αλλά το αν, πότε και υπό ποιες προϋποθέσεις θα του προκαλέσει κάποια ζημιά με βάση το σενάριο της συνεργασίας τους. Σε αυτή την κατεύθυνση οι (S. Haddadin et al., 2012) αποπειρώνται να κάνουν το ρομπότ να αντιλαμβάνεται την ασφάλεια, ενσωματώνοντας στον έλεγχο πληροφορία για τον πιθανό τραυματισμό. Αφού πραγματοποιούν ανάλυση των τραυματισμών, διατυπώνουν καμπύλες και βάσεις δεδομένων που ποσοτικοποιούν τον τραυματισμό με ιατρικούς όρους και τον συσχετίζουν με τη μάζα, την ταχύτητα και τη διάταξη του ρομπότ. Στη συνέχεια προτείνουν ένα σχήμα ασφαλούς ελέγχου του ρομπότ σε πραγματικό χρόνο, με τη χρήση ενός αλγορίθμου ο οποίος περιορίζει την ταχύτητα του άκρου του ρομπότ λαμβάνοντας υπόψη του την πληροφορία για τον τραυματισμό, το αδρανειακό φορτίο (απαιτούμενη ροπή) στους κινητήρες του ρομπότ και τη διάταξη του τελικού σημείου δράσης. Στην ίδια λογική, οι (Ragaglia, Bascetta, Rocco, & Zanchettin, 2014a, 2014b) επιχειρούν να επαυξήσουν τις δυνατότητες αντίληψης ενός βιομηχανικού ρομπότ με τη χρήση ενός αισθητήρα Kinect™. Παρουσιάζεται μια στρατηγική ασφαλούς ελέγχου βασισμένη σε μια μέθοδο αξιολόγησης της σοβαρότητας της πιθανής/επερχόμενης επαφής A-P σε πραγματικό χρόνο. Οι δείκτες σοβαρότητας του κινδύνου προκύπτουν από πληροφορία για την κινηματική/δυναμική διάταξη τόσο του ανθρώπου όσο και του ρομπότ κι αποτυπώνονται σε χρωματική κλίμακα πράσινο-κίτρινο-πορτοκαλί-κόκκινο (βλ. Εικόνα 3-5). Όταν το χρώμα γίνει κίτρινο έχουμε περιορισμό της ταχύτητας στο μισό, όταν γίνει πορτοκαλί έχουμε μια απόπειρα του ρομπότ να συνεχίσει το καθήκον με απομάκρυνση από τον άνθρωπο, ενώ όταν γίνει κόκκινο, διακόπτεται πλήρως η κίνηση στο ρομπότ.



Εικόνα 3-5: Δεδνδροδιάγραμμα απόφασης για τη στρατηγική ασφαλούς ελέγχου των (Ragaglia et al., 2014b)

Οι (Ikuta et al., 2003) παρουσιάζουν μια πολύ συστηματική κατηγοριοποίηση των στρατηγικών ασφάλειας A-P, ανάλογα με τις διαφορές τους σε: (i) στρατηγικές ασφαλούς σχεδιασμού και (ii) ασφαλούς ελέγχου (βλ. Εικόνα 3-4). Οι ίδιοι προτείνουν μια κλίμακα κινδύνου και στρατηγικές βασισμένες σε κριτήρια δύναμης και τάσης επαφής, ενώ παρουσιάζουν ένα τρισδιάστατο γραφικό περιβάλλον προσομοίωσης για την αξιολόγηση του κινδύνου,. Στο περιβάλλον αυτό, το οποίο δεν είναι πραγματικού-χρόνου, δίνεται η δυνατότητα αξιολόγησης με τροποποίηση τόσο του σχεδιασμού ασφαλείας του ρομπότ, όσο και του σχήματος ελέγχου.

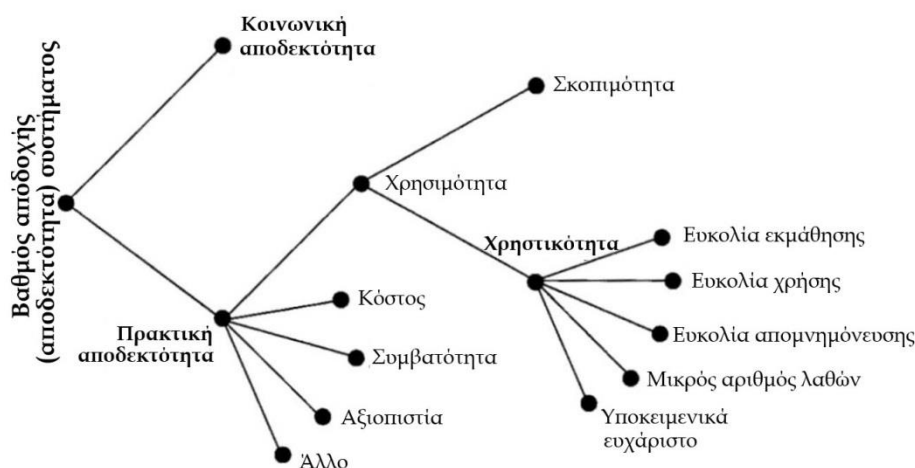
Τέλος, εξαιρετικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η ερευνητική δουλειά των (Rachid Alami, Gharbi, Vadant, Lallement, & Suarez, 2014), οι οποίοι προσπαθούν να εφοδιάσουν το συνεργατικό ρομπότ με δυνατότητες σαφούς επικοινωνίας και αιτιολόγησης της ικανότητάς του να πραγματοποιήσει τα καθήκοντά του από κοινού με τον ανθρώπινο συνεργάτη του. Για το σκοπό αυτό προτείνουν τη δημιουργία τριών σχεδιαστών τροχιάς οι οποίοι ενσωματώνουν την ικανότητα αντίληψης του ανθρώπου (human-aware motion planners) και σκοπεύουν στη δημιουργία προνοητικής (proactive) συμπεριφοράς στο συνεργατικό ρομπότ. Οι τρεις σχεδιαστές είναι οι εξής: (i) ο σχεδιαστής παράδοσης και τοποθέτησης (handover/placement planner), ο οποίος υπολογίζει το πού θα πραγματοποιηθεί η παράδοση/ανταλλαγή του τεμαχίου μεταξύ A-P, (ii) ο «έχων την επίγνωση του ανθρώπου» σχεδιαστής τροχιάς (human-aware motion planner), ο οποίος μπορεί να παραγάγει ασφαλή και φιλική προς τον άνθρωπο τροχιά και κίνηση, και, (iii) ο υψηλού-επιπέδου σχεδιαστής του καθήκοντος (high-level task planner), ο οποίος «προικίζει» το ρομπότ με την ικανότητα να σχεδιάσει αυτόνομα και να προγραμματίσει την επόμενη εργασία, η οποία θα πραγματοποιηθεί από κοινού με τον άνθρωπο. Η δυνατότητα αυτή βασίζεται στην από κοινού εργασία (joint action) μεταξύ αντιπροσώπων (agents) με βάση συγκεκριμένους κανόνες κοινωνικής συμπεριφοράς. Δίνεται δηλαδή η δυνατότητα στο ρομπότ να σχεδιάσει και να ορίσει δράσεις και καθήκοντα, τόσο για το ίδιο όσο και για τον άνθρωπο ως συνεργάτη του.

3.4. Ο βαθμός αποδοχής (αποδεκτότητα) της συνεργασίας A-P

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, επιχειρείται να ερευνηθεί ο βαθμός αποδοχής⁸ της συνεργασίας A-P με τη χρήση της διαδραστικής εικονικής πραγματικότητας και δοκιμών χρηστών, σε εφαρμογές και σενάρια τα οποία δεν είναι ακόμα υλοποιήσιμα σε βιομηχανικό επίπεδο. Η υιοθέτηση και η αποδοχή μιας νέας τεχνολογίας από τους δυνητικούς χρήστες δεν είναι πάντα εύκολα επιτεύξιμη, πολλώ δε μάλλον όταν πρόκειται για την εισαγωγή ενός βιομηχανικού ρομποτικού συνεργάτη στην καθημερινότητα του εργαζόμενου. Έτσι, στην παρούσα θεώρηση, ο βαθμός αποδοχής αντικατοπτρίζει όλα τα κριτήρια τα οποία περιλαμβάνουν την πρόθεση χρήσης, συμμετοχής και συμπόρευσης με τη νέα τεχνολογία, ήτοι τη συνεργασία A-P.

⁸ Ο Αγγλικός όρος είναι acceptability και όχι acceptance και στην Ελληνική γλώσσα μεταφέρεται κατά προτίμηση με τον όρο βαθμός αποδοχής, ως πιο δόκιμος, έναντι του όρου αποδεκτότητα κι όχι αποδεκτικότητα (εκ του αποδεκτικός), ή αποδοχή.

Στην κλασική θεώρηση της χρησιμότητας των συστημάτων του (Nielsen, 1993), ο βαθμός αποδοχής ενός συστήματος διαχωρίζεται στον κοινωνικό και στον πρακτικό βαθμό αποδοχής. Η κοινωνική αποδεκτότητα είναι εκτός του πλαισίου της παρούσας έρευνας, σε αντίθεση με τον πρακτικό βαθμό αποδοχής, στον οποίο υπάγονται το κόστος, η αξιοπιστία, η ασφάλεια και η χρησιμότητα (ευχρηστία) του συστήματος. Για περισσότερα στοιχεία επί της έννοιας του βαθμού αποδοχής (αποδεκτότητας) ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στα (André et al., 2003; Weistroffer, Paljic, Callebert, & Fuchs, 2013; Weistroffer, 2014).



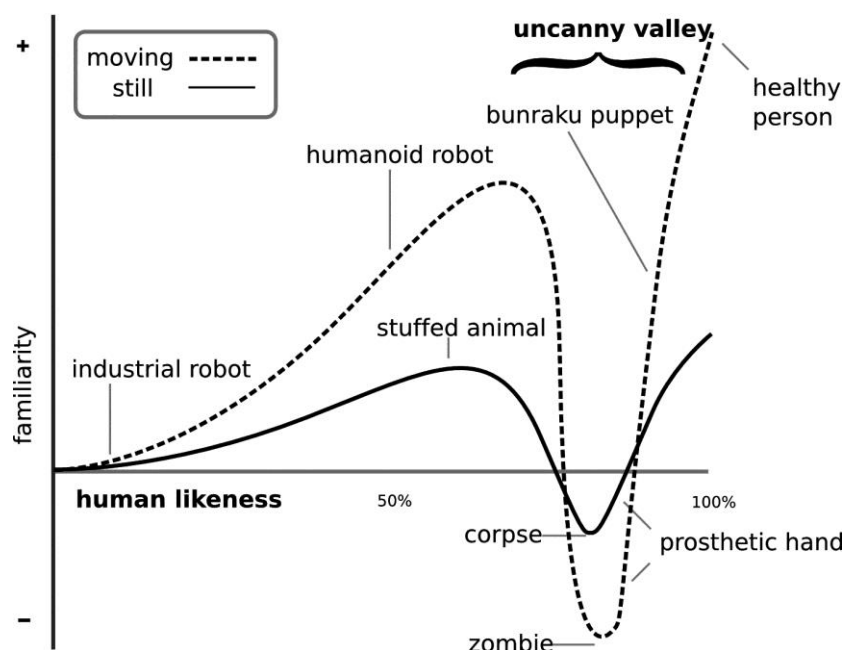
Εικόνα 3-6: Ο βαθμός αποδοχής ενός συστήματος και οι συνιστώσες του, προσαρμογή από (Nielsen, 1993)

Το 1970 ο Masahiro Mori παρουσίασε τη θεωρία της μυστηριώδους κοιλάδας (uncanny valley) για να περιγράψει την αποδοχή των ρομπότ κατά την αλληλεπίδρασή τους με τον άνθρωπο και να συσχετίσει την εμφάνιση (μορφή) του ρομπότ με την οικειότητα που αισθάνεται ο άνθρωπος απέναντί του (Mori, MacDorman, & Kageki, 2012). Παρότι η θεωρία του είναι μάλλον διαισθητική καθώς ποτέ δεν παρουσίασε τα επιστημονικά δεδομένα τα οποία θα έπρεπε να τη συνοδεύουν, το γράφημα της μυστηριώδους κοιλάδας (βλ.

Εικόνα 3-7) έχει χρησιμοποιηθεί σε εξαιρετικά μεγάλο πλήθος δημοσιεύσεων⁹ και μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την αποτύπωση του βαθμού αποδοχής της συνεργασίας A-P, συσχετίζοντας την εξοικείωση του ανθρώπου με την κίνηση αφενός, και τον ανθρωπομορφισμό (εμφάνιση και ιδιότητες) αφετέρου, του συνεργαζόμενου ρομπότ. Σύμφωνα με τη θεωρία του Mori, για να αποφευχθεί το φαινόμενο της μυστηριώδους κοιλάδας στη συνεργασία A-P, εκτός από τον ανθρωπομορφισμό, πρέπει να ελαχιστοποιείται και κάθε γνωστική παραφωνία όπως μη-ρεαλιστική κίνηση ή ταχύτητα, ανακολουθία στη συμπεριφορά και ασύμβατες μεταξύ τους αντιληπτικές ενδείξεις ή νύξεις (perceptual cues). Για παράδειγμα, όταν

⁹ Η μεταφρασμένη Αγγλική έκδοση του 2012 έχει άνω των 1400 ετεροαναφορών σε δημοσιεύσεις ρομποτικής και γραφικών υπολογιστών μέσα σε διάστημα τριών ετών (μέχρι τον Αύγουστο του 2015).

ένας βιομηχανικός βραχίονας ανοιγοκλείνει την αρπάγη του όπως το ανθρώπινο χέρι, ή όταν κινείται με ταχύτητα και τροχιά που δεν απέχουν πολύ από αυτές της ανθρώπινης κίνησης του χεριού, τότε ο άνθρωπος αισθάνεται ένα βαθμό συγγένειας και άνεσης απέναντι στο βραχίονα. Από τη θεωρία του Mori προκύπτει ένα πρώτο και σημαντικό κριτήριο αποδοχής, το οποίο είναι η φυσικότητα και η ταχύτητα της κίνησης του βιομηχανικού ρομπότ.



Εικόνα 3-7: Σχέση της ανθρώπινης ομοιότητας και του βαθμού οικειότητας του ανθρώπου (Mori et al., 2012). Η ύπαρξη κίνησης καταρχήν μεγεθύνει τις κορυφές και τη μυστηριώδη κοιλάδα.

Οι (Zanchettin, Bascetta, & Rocco, 2013) επεκτείνουν τη θεωρία του Mori στα συνεργατικά βιομηχανικά ρομπότ, υποστηρίζοντας ότι η ανθρωπομορφική¹⁰ κίνηση, συμπεριφορά κι εργασία, μειώνουν το προσλαμβανόμενο στρες του ανθρώπου, το οποίο οφείλεται στη συνύπαρξη και στη συνεργασία με το ρομπότ και ενισχύουν τον κοινωνικό βαθμό αποδοχής. Οι (Duffy, Or, & Lau, 2006) διεξάγουν δοκιμές χρηστών προκειμένου να ποσοτικοποιήσουν την προσλαμβανόμενη ασφάλεια και την προσλαμβανόμενη αποδεκτότητα και συσχετίζουν τον προσλαμβανόμενο (αντιληπτό) βαθμό αποδοχής με την ταχύτητα και το μέγεθος του ρομπότ. Πέραν των παραπάνω κριτηρίων (μορφή, φυσικότητα, κίνηση), προκειμένου να επιτευχθεί αποδεκτή και φυσική συνεργασία A-P, πρέπει ο άνθρωπος να είναι βέβαιος για τις προθέσεις του ρομπότ σε κάθε στιγμή και το βιομηχανικό ρομπότ να εκτελεί τα καθήκοντά του με προφίλ και ταχύτητες κίνησης τα οποία θα εκλαμβάνονται ως ασφαλή από τον άνθρωπο (Kulic & Croft, 2007).

Ένα πολύ σημαντικό ζήτημα το οποίο επηρεάζει το βαθμό αποδοχής του ρομπότ από τον άνθρωπο είναι αυτό της εμπιστοσύνης. Σε επαναλαμβανόμενα κιναισθητικά καθήκοντα, ενώ η απόδοση του εργαζόμενου μεταβάλλεται στη διάρκεια του χρόνου, αυτή του ρομποτικού του συνεργάτη παραμένει σταθερή. Αποτέλεσμα αυτής της

¹⁰ προσομοιάζουσα στην ανθρώπινη, παραπλήσια της ανθρώπινης, human-like

ανακολουθίας είναι ο άνθρωπος να αισθάνεται ότι το ρομπότ εργάζεται πιο γρήγορα/αργά απ' ό,τι περιμένει και να έχουμε πώση της εμπιστοσύνης. Οι (Sadrfaridpour, Saeidi, Wang, & Burke, 2014) προτείνουν ένα δυναμικό μοντέλο της εμπιστοσύνης κι έναν ευφυή αλγόριθμο ελέγχου της απόδοσης του ρομπότ με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων, ενώ καταλήγουν στην επιλογή ενός συνδυαστικού τρόπου ελέγχου της απόδοσης του ρομπότ: αυτόνομου ως προεπιλεγμένου τρόπου και με δυνατότητα μετάπτωσης σε χειροκίνητο, εάν το επιλέξει ο χρήστης.

Όσον αφορά την αποδοχή της συνεργασίας αυτής καθαυτής σε βιομηχανικό περιβάλλον, κατά τους (Strassmair, Taylor, & Aylett, 2014) απαιτείται ευελιξία (προσαρμοστική συμπεριφορά) από το ρομπότ και αποδοτικότητα, χωρίς νεκρούς χρόνους. Οι (Vicentini et al., 2014) ξεχωρίζουν ως κομβικά σημεία για την αποδοχή ενός μικτού (υβριδικού) συνεργατικού ρομποτικού κυττάρου την ευχρηστία στην αλληλεπίδραση και την ευκρινή διανομή των ρόλων και των καθηκόντων μεταξύ A-P. Οι (Lenz & Knoll, 2014), προσθέτουν ως απαραίτητα στοιχεία τις ικανότητες αντίληψης, αναγνώρισης, προσαρμοστικής κινητικής συμπεριφοράς κι επικοινωνίας μεταξύ A-P. Τέλος, οι (Bartneck, Kulić, Croft, & Zoghbi, 2009) συνεισφέρουν με τη σειρά τους με τις έννοιες του βαθμού συμπάθειας (likeability) και της προσλαμβανόμενης ασφάλειας (perceived safety).

3.5. Ορισμοί και χαρακτηριστικά της ομαδικής συμπεριφοράς κατά τη συνεργασία A-P

Στην Ενότητα 3.2 περιγράφηκε η διανοητική ασφάλεια (mental safety) ως η κατάσταση αυξημένης επαγρύπνησης και επίγνωσης του χρήστη σε σχέση με την κίνηση του βιομηχανικού ρομπότ. Επίσης ορίστηκε η αξιοπιστία στη συνεργασία A-P, η οποία συνοψίζεται στην κατάσταση απουσίας «γνωστικού φόβου» εξαιτίας της επίγνωσης και της εμπιστοσύνης στην ασφάλεια του συστήματος. Εκτός από την ασφάλεια και την αξιοπιστία της συνεργασίας A-P, είναι επιθυμητή η ικανοποιητική απόδοση της συνεργασίας και η δυναμική της συμπεριφοράς ως ομάδας, η οποία εκτός από τα ποσοτικά χαρακτηριστικά (π.χ. χρόνος, κόστος, άλλα συγκριτικά μεγέθη), διέπεται και από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της ροής, της εύρωιας, της επίγνωσης της κατάστασης και της άνεσης (Lasota & Shah, 2015).

Η *ροή* (flow) κατά τη συνεργασία A-P είναι ένα από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της διανοητικής δραστηριότητας του ανθρώπου διότι χαρακτηρίζει το βαθμό εμπλοκής, εστίασης και συγκέντρωσης του κατά την εκτέλεση ενός καθήκοντος (Takatalo, Kawai, Kaistinen, Nyman, & Häkkinen, 2011). Σύμφωνα με το θεμελιωτή της θεωρίας της ροής (Nakamura & Csikszentmihalyi, 2002), η εμπειρία ροής έχει θετικό πρόσημο στη συνεργασία και χαρακτηρίζεται από τα εξής χαρακτηριστικά: έντονη κι εστιασμένη συγκέντρωση στο παρόν, συνένωση της επίγνωσης και της δράσης, αποβολή της αμηχανίας, έλεγχος της κατάστασης, παραμόρφωση της χρονικής εμπειρίας και βίωση της εμπειρίας ως θετικά ανταποδοτικής. Όταν δεν αναφέρεται στη διανοητική δραστηριότητα, αλλά στην

ίδια τη συνεργασία A-P, η ροή αφορά κυρίως στην αδιάκοπη και με ομαλότητα συνεργασία, καθώς και στην εύροια της συνεργασίας.

Η *εύροια* της ομάδας (*team fluency*) είναι μία έννοια η οποία αναφέρεται στο συντονισμό της από κοινού εργασίας και χαρακτηρίζει την αποτελεσματικότητα και την απόδοση της συνεργασίας (Hoffman & Breazeal, 2007). Ποσοτικά μεγέθη και μετρικές τα οποία χαρακτηρίζουν την εύροια κατά τη συνεργασία A-P είναι: η μείωση του χρόνου εκτέλεσης του καθήκοντος, η κατά το δυνατόν παράλληλη κίνηση, η αποφυγή των νεκρών (ενδιάμεσων) χρόνων ανθρώπου και ρομπότ, η κατανομή του γνωστικού φόρτου στο χρόνο, η μέση απόσταση μεταξύ A-P και η μείωση της αλληλεξάρτησης μεταξύ δύο πράξεων (Lasota & Shah, 2015) και (Dehais, Sisbot, Alami, & Causse, 2011).

Η *επίγνωση της κατάστασης* (*situation awareness*) ορίζεται ως «η αντίληψη των στοιχείων ενός περιβάλλοντος μέσα σε ένα χωρικό και χρονικό πλαίσιο, η κατανόηση των στοιχείων αυτών και των χαρακτηριστικών τους και, τέλος, της προβολή της κατάστασής τους στο κοντινό μέλλον» (Wickens, 2008). Στη συνεργασία A-P η επίγνωση της κατάστασης είναι καθοριστική για την ασφάλεια του ανθρώπου και της εύροια της συνεργασίας, διότι αφορά την κατανόηση της τρέχουσας κατάστασης του ρομπότ, την παρακολούθηση της πληροφορίας και των ενδείξεων, και γενικότερα μια συμπεριφορά επαγρύπνησης και ετοιμότητας έναντι του συνεργατικού ρομπότ (Ogorodnikova, 2010). Οι (Drury, Scholtz, & Yanco, 2003) ορίζουν την επίγνωση στη συνεργασία A-P ως: την κατανόηση από τον άνθρωπο της θέσης, της δραστηριότητας, της κατάστασης και του περιβάλλοντος του ρομπότ, και τη γνώση, από το ρομπότ, της πρόθεσης του ανθρώπου, των εντολών του που κατευθύνουν τη συνεργασία και των περιορισμών, βάσει των οποίων πρέπει να λειτουργήσει.

Η *άνεση* του χρήστη ως προς το ρομπότ και την αλληλεπίδραση, είναι ένα υποκειμενικό κριτήριο, το οποίο όμως έχει ιδιαίτερη σημασία σε συνεργατικά ρομποτικά καθήκοντα τροφοδοσίας παράδοσης-παραλαβής (*human-robot handovers*). Στη βιβλιογραφία παρατηρείται ότι οι χρήστες εκφράζουν το υποκειμενικό αίσθημα άνεσης κατά τη συνεργασία με το ρομπότ, όταν αυτό συμπεριφέρεται με φυσικά και ανθρωπομορφικά χαρακτηριστικά (κίνηση, τροχιά κλπ) (Huber et al., 2009). Αντιθέτως, η φυσική άνεση στη συνεργασία A-P είναι μετρήσιμη και συνήθως περιγράφεται από την κατάσταση στην οποία ο άνθρωπος δε χρειάζεται να καταβάλει υπερβολική προσπάθεια στη μετακίνηση, στη στάση και στην αλληλεπίδραση (π.χ. η βέλτιστη θέση παράδοσης ή εργασίας με βάση τα ανθρωπίνα κινηματικά χαρακτηριστικά απαιτεί λιγότερο κόπο και προσπάθεια από τον άνθρωπο) (Dehais et al., 2011).

3.6. Σύνθεση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν τα σημαντικότερα προβλήματα ασφάλειας της συνεργασίας A-P, τα ισχύοντα πρότυπα, τα κριτήρια και οι τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας, τόσο σε φυσικό, όσο και σε διανοητικό επίπεδο. Τέλος,

παρουσιάστηκαν τα χαρακτηριστικά της αποδοχής της συνεργασίας A-P και βασικές έννοιες της ομαδικής συμπεριφοράς (π.χ. εύροια και άνεση της συνεργασίας A-P).

Συνοψίζοντας, μπορούμε να ξεχωρίσουμε ότι τα διεθνή πρότυπα και κανονισμοί δεν έχουν προλάβει να ακολουθήσουν τις εξελίξεις στην άμεση συνεργασία A-P. Το ισχύον ISO-10218/2011 ορίζει περιορισμούς στην ταχύτητα, την ισχύ και τη δύναμη επαφής του ρομπότ. Μολαταύτα, εξηγήθηκε αναλυτικά ότι αυτοί οι περιορισμοί είναι συντηρητικοί και αρκετά προβληματικοί και ότι είναι προτιμότερη μια συνδυαστική προσέγγιση ασφάλειας της συνεργασίας A-P ανάλογα με το σενάριο συνεργασίας, η οποία θα περιλαμβάνει: (i) εγγενή φυσικά χαρακτηριστικά ασφάλειας στην κατασκευή ρομπότ (π.χ. ελαφρύ ρομπότ με μαλακή επικάλυψη), (ii) ποσοτικούς δείκτες σοβαρότητας του δυνητικά προκαλούμενου τραυματισμού, (iii) τεχνικές και στρατηγικές ανίχνευσης του ανθρώπου κι αποφυγής της σύγκρουσης, και (iv) εκπαίδευση του χρήστη ως προς τη συνεργασία με σύγχρονα μέσα και «καλλιέργεια» της διανοητικής ασφάλειας. Η οριστικοποίηση του ISO/TS 15066, το οποίο θα αφορά αποκλειστικά στα συνεργατικά ρομπότ και στη χρήση τους, θα καλύψει αρκετά κενά στους κανονισμούς, αλλά απέχει ακόμα αρκετά, καθώς θα είναι σε επίπεδο τεχνικού κανονισμού και θα απαιτηθεί μεγάλος όγκος δοκιμών και δεδομένων από πραγματικές εφαρμογές μέχρι την έκδοση του οριστικού προτύπου. Τέλος, αναδείχθηκε η σημασία της επίγνωσης της κατάστασης και της εύροιας της συνεργασίας A-P και η σημασία της χρήσης μεθόδων και τεχνικών εμπλουτισμού της πληροφορίας και της επικοινωνίας μεταξύ A-P, με σκοπό την εγκαθίδρυση μιας «αμοιβαίας» εμπιστοσύνης.

4. Εικονική Πραγματικότητα (ΕΠ)

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, η Εικονική Πραγματικότητα (ΕΠ) και το Εικονικό Περιβάλλον (ΕΠε) χρησιμοποιούνται ως εργαλεία μοντελοποίησης, μελέτης και δοκιμών της συνεργασίας A-P και των ρομποτικών συστημάτων παραγωγής. Συνεπώς, η ΕΠ δεν αποτελεί η ίδια αντικείμενο έρευνας και για το λόγο αυτό η αναφορά σε αυτή θα είναι εξαιρετικά σύντομη.

Στο κεφάλαιο αυτό, ορίζεται η έννοια της ΕΠ και περιγράφονται συνοπτικά ορισμένα θεμελιώδη χαρακτηριστικά αυτής (αλληλεπίδραση, παρουσία, εμπύθιση), ώστε να είναι κατανοητή οποιαδήποτε αναφορά σε αυτά στο κείμενο της διατριβής.

4.1. Σύντομη εισαγωγή στην ΕΠ

Καταρχάς, κρίνεται αναγκαίο να ορισθεί σωστά η έννοια της Εικονικής Πραγματικότητας (ΕΠ) και του Εικονικού Περιβάλλοντος (ΕΠε). Ο όρος «Εικονική Πραγματικότητα» (“Virtual Reality”-Δυνητική Πραγματικότητα, Οιονεί Πραγματικότητα) αναφέρεται στην ψευδαισθηση συμμετοχής –και όχι απλής παρατήρησης- σε ένα συνθετικό περιβάλλον πραγματικού χρόνου, ως μια εμπειρία εμπύθισης και αλληλεπίδρασης που χρησιμοποιεί όλες τις αισθήσεις (Mazuryk & Gervautz, 1996). Ο όρος «Εικονικό Περιβάλλον» (ΕΠε) αναφέρεται στα συστήματα και στις εφαρμογές της ΕΠ. Σκοπός της εικονικής πραγματικότητας είναι να επιτρέψει σε έναν ή περισσότερους χρήστες μια γνωστική και κιναισθητική δραστηριότητα, σε έναν τεχνητό και υπολογιστικά-δημιουργηθέντα κόσμο, ο οποίος μπορεί να είναι φανταστικός, συμβολικός, ή μια προσομοίωση ορισμένων τμημάτων του πραγματικού κόσμου (Fuchs, Moreau, Burkhardt, et al., 2006).

Η ουσιαστικότερη και πληρέστερη περιγραφή της ΕΠ δίνεται από τους Fuchs et al. στο (Fuchs, Moreau, Arnaldi, et al., 2006). Ο όρος «Εικονική Πραγματικότητα» προσδιορίζεται συνολικά με την ταυτόχρονη χρήση δύο ορισμών, ενός λειτουργικού και ενός τεχνικού αντίστοιχα:

- Η ΕΠ επιτρέπει στο χρήστη την εξαγωγή του από τη φυσική πραγματικότητα προκειμένου να αλλάξει χρόνο, τόπο ή/και τόπο αλληλεπίδρασης: αλληλεπίδραση είτε με ένα περιβάλλον που προσομοιώνει την πραγματικότητα, ή με έναν φανταστικό ή συμβολικό κόσμο (λειτουργικός ορισμός).
- Η ΕΠ είναι ο επιστημονικός κλάδος ο οποίος εκμεταλλεύεται την πληροφορική και τις διεπιφάνειες συμπεριφοράς (αλληλεπίδρασης), προκειμένου να προσομοιώσει σ' έναν εικονικό κόσμο τη συμπεριφορά τρισδιάστατων οντοτήτων, οι οποίες αλληλεπιδρούν σε πραγματικό χρόνο τόσο μεταξύ τους, όσο και με έναν ή περισσότερους χρήστες του συστήματος. Παράλληλα, οι χρήστες αισθάνονται ψευδο-φυσική εμπύθιση στον εικονικό κόσμο, δια μέσω κιναισθητικών καναλιών (τεχνικός ορισμός).

Μάλιστα, η Ε.Π. μπορεί –και πρέπει- να εκμεταλλεύεται όλες τις ανθρώπινες αισθήσεις, οι οποίες είναι περισσότερες από τις γνωστές πέντε, καθώς υπάρχουν και

οι «ξεχασμένες» αισθήσεις της κιναισθητικής αντίληψης και της ιδιοδεκτικότητας (Fuchs, Moreau, Burkhardt, et al., 2006).

4.2. Εισαγωγή στην αλληλεπίδραση στην ΕΠ

Η τρισδιάστατη (3Δ) αλληλεπίδραση (3D Interaction) είναι η αλληλεπίδραση ανθρώπου-υπολογιστή κατά την οποία τα καθήκοντα του χρήστη πραγματοποιούνται απευθείας σε ένα τρισδιάστατο χωρικό πλαίσιο (Bowman, Kruijff, LaViola, & Rourygen, 2004). Τα καθήκοντα αλληλεπίδρασης (interaction tasks) σε ένα ΕΠε είναι οι ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιήσει ο χρήστης σε σχέση με κάποιο άλλο αντικείμενο ή στοιχείο του εικονικού κόσμου (π.χ. μετακίνηση και περιστροφή ενός αντικειμένου στο χώρο). Η τεχνική αλληλεπίδρασης (interaction technique) είναι ο τρόπος, ή η μέθοδος, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η εκτέλεση ενός καθήκοντος αλληλεπίδρασης (π.χ. χρήση ενός βέλους στην οθόνη για τη μετακίνηση ενός αντικειμένου στην αντίστοιχη κατεύθυνση) (Kettner, 1995). Κάθε τεχνική αλληλεπίδρασης περιλαμβάνει μια συνιστώσα που σχετίζεται με το χρησιμοποιούμενο υλικό (συσκευές εισόδου/εξόδου) και μία συνιστώσα λογισμικού. Η συνιστώσα λογισμικού αντιστοιχίζει την πληροφορία από τη συσκευή εισόδου σε κάποια ενέργεια μέσα στο ΕΠε και φροντίζει κατόπιν να μετατρέψει το αποτέλεσμα αυτής της ενέργειας (π.χ. γεγονός, συμπεριφορά, κίνηση, ανάδραση) σε κάποια μορφή που μπορεί να προβληθεί από τη συσκευή εξόδου.

Στις περισσότερες περιπτώσεις και εφόσον είναι δυνατό με τις διαθέσιμες διεπαφές χρήστη, προτιμώνται οι άμεσες τεχνικές, οι οποίες πηγάζουν από τον πραγματικό κόσμο και τον προσομοιώνουν, οπότε μιλάμε για φυσικά σχήματα συμπεριφοράς (real behavioral schemes). Για παράδειγμα, εάν η διάταξη του συστήματος επιτρέπει τη δυνατότητα βαδίσματος στον πραγματικό χώρο για την πραγματοποίηση της αντίστοιχης κίνησης βαδίσματος στον εικονικό κόσμο, τότε έχουμε ένα άμεσο φυσικό σχήμα συμπεριφοράς, ήτοι την τεχνική πραγματικού βαδίσματος (real walking technique).

Εάν η υλοποίηση ενός άμεσου, φυσικού σχήματος συμπεριφοράς είναι δύσκολη ή αδύνατη, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν 3Δ μεταφορές αλληλεπίδρασης (3D interaction metaphors), οι οποίες, με το σωστό σχεδιασμό, μπορεί να αποδειχθούν εξίσου αποτελεσματικές με τα άμεσα σχήματα συμπεριφοράς (Bowman et al., 2004; Fuchs, Moreau, Burkhardt, et al., 2006). Οι μεταφορές αλληλεπίδρασης ή συνδυασμός αυτών, σχηματίζουν το θεμελιώδες γνωστικό μοντέλο μιας τεχνικής, μία συμβολική εικόνα και μια εκδήλωση της αντίληψης του τι μπορεί να κάνει ο χρήστης με τη χρήση αυτών των τεχνικών. Στις τεχνικές αλληλεπίδρασης με μεταφορές η γνωστική αντιστοιχία του τρόπου αλληλεπίδρασης με το πραγματικό καθήκον δεν είναι άμεση, αλλά μπορεί να υπονοείται ή να χρησιμοποιείται κάποια αλληγορία και να παραπέμπεται ο χρήστης σε κάποια άλλη γνωστική προσλαμβάνουσα, από το παρελθόν του ή από πρότερη εκπαίδευση (Matsas & Vosniakos, 2015). Πολύ συχνά, οι 3Δ μεταφορές αναφέρονται στο χειρισμό μιας 3Δ λειτουργίας από μία 2Δ διεπαφή χρήστη και αποτελούνται από δύο τμήματα: (i) το αλληγορικό μοντέλο, το οποίο περιγράφει την αντιστοιχία από το διανοητικό μοντέλο στη διεπαφή χρήστη και (ii)

την υλοποίηση της σχέσης, η οποία αντιστοιχίζει τα δεδομένα εισόδου από τη διεπαφή χρήστη σε 3D αλληλεπίδραση στο ΕΠε.

Η κλασική κατηγοριοποίηση των τυπικών γενικών καθηκόντων αλληλεπίδρασης (interaction tasks) σε ένα ΕΠε (Bowman et al., 2004) είναι η εξής: (i) *επιλογή* (selection), (ii) *χειρισμός* (manipulation), (iii) *πλοήγηση* (navigation), και, (iv) *έλεγχος του συστήματος* (system control). Οι (Fuchs, Moreau, Burkhardt, et al., 2006), προτείνουν την προσθήκη ως βασικών καθηκόντων των: (i) της *παρατήρησης* (observation), (ii) της *μετακίνησης* (displacement) του χρήστη και (iii) της *εισαγωγής συμβόλων* (symbolic input), καθώς και την ομαδοποίηση των καθηκόντων της επιλογής και του χειρισμού σε ένα ευρύτερο καθήκον υπό τον όρο *δράση* (action), αφού ο χειρισμός και η εκτέλεση κάποιας ενέργειας με ένα αντικείμενο στον εικονικό κόσμο, απαιτεί συνήθως πρώτα την επιλογή του και έπειτα τη μετακίνηση και την τοποθέτησή του.

Οι τεχνικές 3D αλληλεπίδρασης συνήθως κατηγοριοποιούνται με βάση το καθήκον το οποίο υποστηρίζουν. Ενδελεχής παρουσίαση των διαφορετικών τεχνικών 3D αλληλεπίδρασης με πληθώρα παραδειγμάτων γίνεται στα (Bowman et al., 2004; Burdea & Coiffet, 2003; Fuchs, Moreau, Burkhardt, et al., 2006; Kettner, 1995).

Οι τεχνικές της τρισδιάστατης αλληλεπίδρασης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα για την εκτέλεση των βασικών καθηκόντων της συνεργασίας A-P περιγράφονται στην Ενότητα 7.2. Οι χρησιμοποιούμενες 3D διεπαφές χρήστη (συσκευές αλληλεπίδρασης) και, συγκεκριμένα, οι κάσκες στερεοσκοπίας και ο αισθητήρας αναγνώρισης κίνησης Microsoft Kinect παρουσιάζονται στην Ενότητα 6.8. Τέλος, το ανθρωποειδές (avatar) το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση άμεσων και φυσικών τεχνικών 3D αλληλεπίδρασης παρουσιάζεται στην Ενότητα 6.6.

4.3. Οι έννοιες της εμπύθισης και της παρουσίας στον εικονικό κόσμο

Η έρευνα στις έννοιες της *παρουσίας* (presence) και της *εμπύθισης* (immersion) είναι εξαιρετικά ευρεία και υπερβαίνει τα ερευνητικά ενδιαφέροντα της διδακτορικής διατριβής. Μάλιστα, στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές αντικρουόμενες θεωρίες, οπότε η αναφορά μας στις δύο αυτές έννοιες γίνεται για να προσδιορίσουμε τη χρήση των δύο όρων στην περιγραφή του ΕΠε και της εμπειρίας του χρήστη.

Οι Witmer & Singer (Witmer & Singer, 1998) συσχετίζουν άμεσα την αποδοτικότητα ενός ΕΠε με την επιτυγχανόμενη *παρουσία* του χρήστη, την οποία ορίζουν ως την υποκειμενική εμπειρία κάποιου να βρίσκεται (εκεί/μέσα) σε έναν τόπο ή περιβάλλον, ακόμα κι αν βρίσκεται φυσικώς κάπου αλλού. Για την επίτευξη της αίσθησης της παρουσίας σε ένα ΕΠε, είναι απαραίτητες δύο συνθήκες: η εμπύθιση (immersion) και η εμπλοκή (involvement) (Schuemie, van der Straaten, Krijn, & van der Mast, 2001). Η *εμπλοκή* του χρήστη σε ένα ΕΠε είναι η ψυχολογική κατάσταση η οποία περιγράφει την αδιάσπαστη προσοχή που επιδεικνύει ο χρήστης σε ένα σύνολο συγκροτημένων ερεθισμένων που του παρέχει στο ΕΠε (γνωστική

απορρόφηση/cognitive absorption (Lackey, Maraj, & Barber, 2014)). Η *εμβύθιση*, χαρακτηρίζει την ψυχολογική κατάσταση κατά την οποία ο χρήστης περιβάλλεται και περιλαμβάνεται στο ΕΠε, αλληλεπιδρά με αυτό, και αντιλαμβάνεται τον εαυτό του ως τμήμα της ροής ερεθισμάτων (stimuli stream) που του παρέχονται (Jennett et al., 2008; Witmer & Singer, 1998). Ο Slater (Slater, Usoh, & Steed, 1994; Slater & Wilbur, 1997; Slater, 1999; Usoh, Catena, Arman, & Slater, 2000) αμφισβητεί την παραπάνω θεώρηση της εμβύθισης ως ψυχολογικής κατάστασης, αντιθέτως, τη συσχετίζει με τις τεχνολογικές δυνατότητες του ΕΠε και ορίζει την εμβύθιση ως την ικανότητα του συστήματος να απομονώσει το χρήστη από τον πραγματικό κόσμο και να του παράσχει πλούσια, πολύ-αισθητηριακή και «σύμφωνη» (coherent) πληροφορία.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, η παρουσία νοείται μέσω της έντονης εμπλοκής του χρήστη (“presence by involvement”) στο εικονικό του καθήκον. Μάλιστα, αποδεχόμαστε την παραδοχή ότι οι έννοιες της εμβύθισης και της παρουσίας στο ΕΠε είναι αλληλοσχετιζόμενες και ότι η εμβύθιση είναι ικανή συνθήκη για να προκαλέσει την αίσθηση της παρουσίας στο χρήστη.

Η επίτευξη της αίσθησης της παρουσίας θεωρείται ο πιο σημαντικός παράγοντας για την επίγνωση της κατάστασης σε ένα διαδραστικό ΕΠε (Vora et al., 2002) (Endsley, 2011), αλλά και ως θετική ένδειξη για τη δυνατότητα μεταφοράς της γνώσης, που αποκτήθηκε στο ΕΠε, στον πραγματικό κόσμο (D. Mestre, Ewald, & Maiano, 2011; Slater et al., 1994). Η σημασία της παρουσίας αναδεικνύεται ακόμα εντονότερα σε περιπτώσεις όπως αυτή της συνεργασίας A-P σε ΕΠε, κατά την οποία διερευνάται μια εν δυνάμει (εικονικά) επικίνδυνη κατάσταση, στην οποία, όμως, ο χρήστης γνωρίζει ότι δεν αντιμετωπίζει κάποιον πραγματικό κίνδυνο. Σε αυτή την περίπτωση, η αίσθηση αφενός της παρουσίας και αφετέρου του ρεαλισμού, είναι καθοριστικές για να εξασφαλίσουν την αποτελεσματική μεταφορά της γνώσης, από το εικονικό, στο πραγματικό καθήκον (D. R. Mestre, 2015).

4.4. Διαδραστικά Εικονικά Περιβάλλοντα (ΕΠε) για τη μελέτη συνεργατικών ρομποτικών συστημάτων παραγωγής

Η ΕΠ παρέχει τη δυνατότητα αναπαραγωγής των βασικότερων χαρακτηριστικών της συνεργασίας A-P σε ένα διαδραστικό ΕΠε και μάλιστα μπορεί να αναδείξει ή να υπερτονίσει συγκεκριμένες πλευρές της συνεργασίας, να προσφέρει γνωστικά βοηθήματα που είναι ιδιαίτερα δύσκολο να αναπαραχθούν στον πραγματικό κόσμο, και φυσικά να υποβαθμίσει ή να εξαφανίσει πλήρως πτυχές της συνεργασίας ή του καθήκοντος που είναι ανεπιθύμητες.

Η ΕΠ μπορεί να προσφέρει αυξημένη αντίληψη και επίγνωση κατάστασης σε τομείς της συνεργασίας A-P, συμβάλλοντας κατ’ αυτό τον τρόπο όχι μόνο στην ασφάλεια της συνεργασίας, αλλά και στην αύξηση της απόδοσης της συνεργασίας. Επίσης, η ΕΠ δίνει τη δυνατότητα ασφαλούς μοντελοποίησης της δυσλειτουργίας του συστήματος, ή, ακόμα, τη δυνατότητα ελεγχόμενης εισαγωγής προσχεδιασμένων σφαλμάτων για τον έλεγχο υποθέσεων σε συνθήκες μη κανονικής λειτουργίας, κάτι

που είναι συνήθως αδύνατο σε πραγματικές συνθήκες, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος για τους χρήστες. Στην ίδια λογική, η ΕΠε προσφέρει τη δυνατότητα ανάδειξης και μελέτης του ανθρώπινου λάθους και της μετέπειτα συμπεριφοράς τόσο του ανθρώπου όσο και του διαδραστικού συστήματος.

Στη μελέτη της συνεργασίας A-P, η χρήση της ΕΠ επιτρέπει την εύκολη ρύθμιση των παραμέτρων του συστήματος, ή ακόμα και του σεναρίου της συνεργασίας. Για παράδειγμα είναι εξαιρετικά αποτελεσματική η δοκιμή σε ΕΠε διαφορετικών ρομπότ, διαφορετικών προφίλ ταχύτητας ή τροχιών (De Santis & Siciliano, 2008). Η ΕΠ μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της προσλαμβανόμενης (αντιληπτής) ασφάλειας διαφορετικών σεναρίων συνεργασίας A-P. Στην παρούσα έρευνα, το ΕΠε χρησιμοποιείται για την καταρχήν δοκιμή διαφορετικών προσαρμοστικών και προβλεπτικών τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας.

Στη βιβλιογραφία, οι περισσότερες συναφείς εργασίες για τη μελέτη της συνεργασίας A-P αφορούν εφαρμογές Επαυξημένης Πραγματικότητας (ενδεικτικά αναφέρονται τα: (Charoenseang & Tonggoed, 2011; Fang et al., 2014; Giesler, Steinhaus, Walther, & Dillmann, 2004; S. A. Green, Chase, Chen, & Billingham, 2008; S. Green et al., 2008; Neuhoefer, Bernhard, & Schlick, 2009)). Όσον αφορά τη συνεργασία ανθρώπου-βιομηχανικού ρομπότ σε αμιγώς εικονικό περιβάλλον, η πιο ουσιαστική δουλειά έχει γίνει από τον Weistroffer (Weistroffer, 2014) και αναφέρεται στην αποδοχή της συνεργασίας A-P από την πλευρά του χρήστη.

5. Προβληματική, Ερευνητικά ερωτήματα και Υποθέσεις Επίλυσης

Τα προηγούμενα κεφάλαια μας επέτρεψαν να περιγράψουμε το πλαίσιο εντός του οποίου ερευνούμε τη συνεργασία ανθρώπου-βιομηχανικού ρομπότ, να ορίσουμε και να αναλύσουμε τη συνεργασία A-P, να επισημάνουμε τους βασικότερους κινδύνους που απορρέουν από αυτή τη συνεργασία και να κάνουμε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στα κριτήρια και στις τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας. Στα ανωτέρω, έγινε μια πολύ συνοπτική και στοχευμένη ανάπτυξη βασικών εννοιών της Εικονικής Πραγματικότητας και των μεθόδων αξιολόγησης και δοκιμών σε εικονικό περιβάλλον. Με βάση τα παραπάνω, αναπτύσσονται τα ερευνητικά μας ερωτήματα και οι προβληματικές. Στη συνέχεια, για να απαντήσουμε στις ως άνω εκπεφρασθείσες προβληματικές, παρουσιάζουμε τις υποθέσεις επίλυσης και τις διαφορετικές περιπτώσεις εφαρμογής (use cases).

5.1. Ερευνητικά ερωτήματα και υποθέσεις

Στο Κεφάλαιο 3 αναδείχθηκε η ανεπάρκεια της μονόπλευρης αντιμετώπισης του ζητήματος της ασφάλειας της συνεργασίας A-P από τα ισχύοντα πρότυπα και από τη χρήση μη-ανθρωποκεντρικών τεχνικών. Στα κεφάλαια 1 και 4 παρουσιάστηκαν οι δυνατότητες των διαδραστικών ΕΠε για τη μοντελοποίηση ρομποτικών συστημάτων παραγωγής γενικά και για τη μεταφορά της εικονικώς αποκτηθείσας γνώσης στο πραγματικό περιβάλλον. Αναδύθηκε δε η ανάγκη χρήσης εικονικών εργαλείων εμπλουτισμού της πληροφορίας και της επικοινωνίας μεταξύ A-P, με σκοπό την επαύξηση της αντίληψης του ανθρώπου, την εγκαθίδρυση μιας «αμοιβαίας» εμπιστοσύνης και τη διερεύνηση της εμπειρίας του χρήστη σε διαφορετικά σενάρια συνεργασίας A-P.

5.1.1. Η αποδοχή από τους χρήστες και η αποτελεσματικότητα του ΕΠε ως εργαλείου για τη διερεύνηση της συνεργασίας A-P

Εκτός των γνωστών ορίων και περιορισμών στη χρήση της ΕΠ (R. Chellali, 2009), οι δοκιμές με τη χρήση ΕΠ και τα διαδραστικά ΕΠε προσφέρουν και ορισμένα σημαντικά προτερήματα έναντι των δοκιμών σε πραγματικές συνθήκες κατά τη διερεύνηση αυτής της συνεργασίας, γιατί παρέχουν ευελιξία, παρακάμπτουν τους περιορισμούς των ελεγκτών και των διεπαφών προγραμματισμού των χρησιμοποιούμενων ρομπότ, επιτρέπουν τη γρήγορη και εύκολη τροποποίηση μεγάλου αριθμού παραμέτρων οι οποίες επηρεάζουν τη συνεργασία (κριτήρια ασφαλείας, ταχύτητα, τροχιά κλπ), την εξέταση μεγαλύτερου αριθμού ερευνητικών υποθέσεων, καθώς και τη δυνατότητα επανάληψης μιας δοκιμής χωρίς δέσμευση πόρων, σε περισσότερους του ενός παράλληλους χώρους και, μάλιστα, όσες φορές χρειαστεί. Επιπρόσθετα ο σχεδιασμός και η εκτέλεση ενός πειράματος στον πραγματικό χώρο με χρήση διαφορετικών ρομπότ μπορεί να είναι χρονοβόρα και με ασύμφορα μεγάλο κόστος, να ενέχουν κίνδυνο ατυχήματος και να επιφέρουν επιπρόσθετους χωρικούς ή τεχνολογικούς περιορισμούς ως προς την υλοποίηση της συνεργασίας.

Βέβαια, παρά το γεγονός ότι στα σύγχρονα ΕΠε παρέχεται στο χρήστη μια έντονη εμπειρία εμπύθισης και φυσική -κατά το δυνατόν- αλληλεπίδραση, εξακολουθούν να εμφανίζονται σε αυτά κιναισθητικές αναντιστοιχίες, οι οποίες μπορεί να αποσυντονίσουν ή να τροποποιήσουν τη συμπεριφορά του ανθρώπου. Επομένως, πρέπει να εξασφαλισθεί ότι αυτές οι κιναισθητικές ανακολουθίες δεν είναι ικανές να επισκιάσουν την εικονική εμπειρία με τέτοιο τρόπο, ώστε η εμπειρία και η συμπεριφορά του χρήστη στο ΕΠε να αποκλίνουν σε σχέση με αυτές στον πραγματικό κόσμο.

Συνεπώς, η πρώτη ερευνητική προβληματική αφορά στη χρήση του ΕΠε, στην αποδοχή του ΕΠε ως εργαλείου και στην παραγόμενη εικονική εμπειρία του χρήστη:

1^η ερευνητική προβληματική

Είναι δυνατόν να μοντελοποιηθεί η κατάσταση της συνεργασίας A-P και να αναπαραχθούν τα χαρακτηριστικά αυτής σε ένα διαδραστικό εικονικό περιβάλλον; Από την πλευρά του χρήστη, μπορεί το διαδραστικό ΕΠε να γίνει αποδεκτό ως ένα αποτελεσματικό και χρηστικό εργαλείο για τη διερεύνηση αυτής της συνεργασίας; Και αν ναι, ποια είναι τα όρια της χρήσης αυτού του ΕΠε;

Για να απαντήσουμε στην παραπάνω προβληματική προτείνουμε τη δημιουργία ενός διαδραστικού Εικονικού Περιβάλλοντος (ΕΠε) υψηλής αλληλεπίδρασης και εμπύθισης, το οποίο θα λειτουργήσει ως μια πολυμορφική πλατφόρμα πειραματισμού και δοκιμών των τεχνικών αλληλεπίδρασης A-P και της εύρωιας της συνεργασίας A-P στον εικονικό κόσμο.

Δεδομένων, λοιπόν, αφενός ότι δεν πραγματοποιούμε δοκιμές σε πραγματικό περιβάλλον με πραγματικούς ρομποτικούς βραχίονες και με δυνατότητα χρήσης μετρικών φυσιολογίας, και, εφετέρου, της παραδοχής ότι το ΕΠε είναι ένα εργαλείο το οποίο μπορεί να παρέχει το βίωμα της παρουσίας επιτρέποντας την εμπύθιση, εμπλοκή κι αλληλεπίδραση του χρήστη στον εικονικό κόσμο, θα χρησιμοποιήσουμε υποκειμενικές μετρικές τόσο για τη μέτρηση της αποδοχής του ΕΠε ως χρηστικού εργαλείου, όσο και της αποτελεσματικότητας της εικονικής εμπειρίας συνεργασίας A-P. Για την εξαγωγή των παραπάνω δεδομένων, πραγματοποιείται δοκιμή από ομάδα χρηστών και συλλέγονται δεδομένα από ερωτηματολόγια, αλλά και καταγραφή- παρατήρηση των χρηστών.

5.1.2. Η αποτελεσματικότητα των οπτικοακουστικών γνωστικών βοηθημάτων στην αντίληψη του κινδύνου

Στο πλαίσιο της μελέτης ασφάλειας και της εύρωιας της συνεργασίας ανθρώπου-ρομποτικού βραχίονα σε διαδραστικό Εικονικό Περιβάλλον (ΕΠε) παρέχονται στο χρήστη διαφορετικά δυναμικά οπτικά και ηχητικά ερεθίσματα/νύξεις (stimuli/cues) παρέχοντάς του πληροφορία για τη σχετική μεταξύ A-P θέση και απόσταση και τελικά για τον εν δυνάμει κίνδυνο τραυματισμού του ανθρώπου από το ρομπότ. Ο μακροπρόθεσμος σκοπός της παραπάνω προσέγγισης είναι η εκπαίδευση του χρήστη μέσα σε ένα ασφαλές περιβάλλον και η δυνατότητα επαύξησης της αντίληψης αυτού

όσον αφορά χαρακτηριστικά μεγέθη της συνεργασίας A-P αλλά και τον εν δυνάμει κίνδυνο.

Τα γνωστικά βοηθήματα (εποπτικές, ηχητικές ενδείξεις και «συναγερμοί»), παρέχονται στο χρήστη σε διάφορα στάδια της συνεργασίας και σε διαφορετικά επίπεδα, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην Ενότητα 8.2. Ο στόχος της χρήσης των βοηθημάτων αυτών είναι πολλαπλός: η κατανόηση του χώρου εργασίας του ρομπότ, η αντίληψη της εκκίνησης και της κίνησης του ρομπότ, η ενημέρωση του χρήστη για την είσοδό του στο χώρο εργασίας του ρομπότ, η προειδοποίηση του χρήστη όταν το ρομπότ πλησιάζει πέραν ενός ορίου και με μη-ασφαλή ταχύτητα, η εποπτική αναπαράσταση του πιο επικίνδυνου τμήματος (νοητού όγκου) πέριξ του πήχη του κινούμενου ρομπότ, και τέλος, η ενίσχυση της ετοιμότητας και της επαγρύπνησής του χρήστη έναντι του ρομπότ. Εύλογα προκύπτουν τα παρακάτω ερωτήματα: ποια η συνδρομή (αποτελεσματικότητα) αυτών των ερεθισμάτων (γνωστικών βοηθημάτων) στην αντίληψη του κινούμενου βραχίονα από το χρήστη (situation awareness); Ποια, ή ποιος συνδυασμός γνωστικών βοηθημάτων συνεισφέρουν περισσότερο στην αυξημένη επαγρύπνηση και ετοιμότητα του χρήστη; Ποιες είναι οι αντιδράσεις του χρήστη στα διαφορετικά ερεθίσματα; Είναι όλα κατανοητά κι εύκολα αντιστοιχίσιμα στην κατάσταση στην οποία αναφέρονται; Ποια ερεθίσματα ευνοούν την αδιάκοπη και στρωτή συνεργασία και ποια αποσιπών υπερβολικά την προσοχή του χρήστη και δυσχεραίνουν την ομαλότητα της συνεργασίας; Μήπως με το συνδυασμό περισσότερων βοηθημάτων αυξάνεται υπερβολικά το γνωστικό φορτίο (cognitive load) που καλείται να διαχειριστεί ο χρήστης και συνεπώς επηρεάζεται αρνητικά η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής; Πώς βαθμολογεί ο χρήστης τον προσλαμβανόμενο βαθμό ασφάλειας τον οποίο έχει αποκτήσει στο ΕΠε;

Συνεπώς, η δεύτερη ερευνητική προβληματική αφορά στη χρήση και την επίδραση των γνωστικών βοηθημάτων που παρέχονται στο χρήστη και συνοψίζεται ως εξής:

2^η ερευνητική προβληματική

Έχουν τα γνωστικά βοηθήματα επίδραση στην αντίληψη του κινδύνου (προσλαμβανόμενη ασφάλεια) και στην αντίληψη της κατάστασης; Και αν ναι, ποια και σε τι βαθμό;

Προκειμένου να απαντήσουμε στην παραπάνω προβληματική προτείνουμε συγκριτικές δοκιμές με χρήστες κι εκτέλεση στατιστικών τεστ για την ανάδειξη της επίδρασης του κάθε βοηθήματος στα υπό διερεύνηση μεγέθη. Δεδομένου δε, ότι δεν θα πραγματοποιηθούν δοκιμές σε πραγματικό περιβάλλον, με πραγματικά ρομπότ και δεν υπάρχει δυνατότητα χρήσης μετρικών φυσιολογίας, προτείνεται: (i) η χρήση υποκειμενικών μετρήσεων με τη χρήση ειδικών ερωτηματολογίων, (ii) η χρήση μετρικών απόδοσης κι εμπλοκής του χρήστη.

5.1.3. Η αποτελεσματικότητα και η αποδοχή των διαφορετικών τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας A-P

Όπως διατυπώθηκε στην Ενότητα 3.3, μια πολύ σημαντική κατεύθυνση στις χρησιμοποιούμενες τεχνικές ασφάλειας της συνεργασίας A-P είναι η δυνατότητα του ρομπότ να αντιλαμβάνεται όχι απλώς τη θέση του ανθρώπου, αλλά το αν, πότε και υπό ποιες προϋποθέσεις θα του προκαλέσει κάποια βλάβη με βάση το σενάριο της συνεργασίας τους. Σε αυτή την κατεύθυνση, λοιπόν, δημιουργήθηκαν δύο τεχνικές ασφαλούς ελέγχου, βασισμένες σε έναν αλγόριθμο αξιολόγησης σε πραγματικό χρόνο, της πιθανότητας να υπάρξει ανεπιθύμητη επαφή A-P. Ο αλγόριθμος αυτός παρουσιάζεται αναλυτικά στην Ενότητα 8.1 και υπολογίζει την πιθανότητα να υπάρξει επαφή A-P με μη-ασφαλή ταχύτητα, δεδομένης της θέσης του ανθρώπου, της κατεύθυνσης κίνησης του άκρου του ρομπότ κι ενός χρονικού κριτηρίου. Εφόσον ο αλγόριθμος υπολογίσει ότι επέρχεται σύγκρουση A-P, ενεργοποιείται μία από τις δύο τεχνικές αποφυγής της, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 8 και είναι: (i) η τεχνική επιβράδυνσης του ρομπότ μέχρι μια ασφαλή ταχύτητα και (ii) η τεχνική «υποχώρησης» του ρομπότ μακριά από το χρήστη και υπολογισμού νέας τροχιάς, κρατώντας όμως σταθερό το σημείο τελικού προορισμού.

Όπως ήδη διατυπώθηκε στην Ενότητα 1.5, στην παρούσα διδακτορική διατριβή επιθυμούμε μια απολύτως ασφαλή συνεργασία A-P, χωρίς συγκρούσεις, η οποία ταυτόχρονα θα διατηρεί τη μέγιστη δυνατή απόδοση και ροή, χωρίς συνεχείς διακοπές (αλληλεπίδραση η οποία ξεπερνά το μοτίβο συνεργασίας stop-and-go). Προκύπτουν, λοιπόν, τα παρακάτω ερωτήματα: ποια τεχνική ασφαλούς συνεργασίας (επιβράδυνση ή υποχώρηση ρομποτικού βραχίονα) είναι πιο ασφαλής και ποια επιτρέπει τη μεγαλύτερη απόδοση;

Συνεπώς, η τρίτη ερευνητική προβληματική αφορά στη χρήση και την επίδραση των δύο διαφορετικών τεχνικών (στρατηγικών) ασφάλειας οι οποίες χρησιμοποιούνται και συνοψίζεται ως εξής:

3^η ερευνητική προβληματική

Ποιες τεχνικές κρίνονται πιο αποτελεσματικές (i) για την ασφαλή και (ii) για την αποδοτική και με εύροια συνεργασία ανθρώπου-ρομπότ;

Προκειμένου να απαντήσουμε στην τρίτη προβληματική προτείνουμε συγκριτικές δοκιμές με χρήστες κι εκτέλεση στατιστικών τεστ προκειμένου να βρούμε την επίδραση της κάθε τεχνικής στην ασφάλεια και την απόδοση. Προτείνονται δε μετρικές για την ασφάλεια (π.χ. αριθμός συγκρούσεων) και για την απόδοση της συνεργασίας (π.χ. καθαρός χρόνος συνεργασίας, συνολικός χρόνος εκτέλεσης καθήκοντος, μέση ταχύτητα ρομπότ, αριθμός ενεργοποίησης τεχνικών κλπ), οι οποίες καταγράφονται σε log αρχεία. Επικουρικά προς τις παραπάνω μετρικές, προτείνεται και η χρήση ερωτηματολογίων και η καταγραφή των χρηστών, για την αποτύπωση της προσλαμβανόμενης ασφάλειας και ροής, τις οποίες βιώνει ο χρήστης.

5.2. Οι περιπτώσεις εφαρμογής (use cases)

Για να διερευνήσουμε τις ερευνητικές προβληματικές και τις υποθέσεις της Ενότητας 5.1, σχεδιάστηκαν κι αναπτύχθηκαν δύο περιπτώσεις εφαρμογής (use cases). Οι περιπτώσεις εφαρμογής αναφέρονται σε δύο σενάρια συνεργασίας ανθρώπου-βιομηχανικού ρομπότ, διαφορετικού βαθμού αλληλεπίδρασης και τύπου συνεργασίας A-P, όπως φαίνεται συνοπτικά στην Εικόνα 5-1, και επιτρέπουν τη δοκιμή ενός μεγάλου αριθμού παραμέτρων, οι οποίες επηρεάζουν τη συνεργασία. Και οι δύο εφαρμογές επίδειξης προσομοιώνουν καθήκοντα ρομποτικής υποβοήθησης για τη συνεργατική στρώση υφασμάτων ανθρακονημάτων κατά την κατασκευή σύνθετων αεροπορικών τεμαχίων.

Η πρώτη περίπτωση εφαρμογής είναι η ρομποτική τροφοδοσία (παράδοση) των ανθρακούφασμάτων από έναν πάγκο εναπόθεσης υφασμάτων προς τον άνθρωπο και συνιστά συγχρονισμένο τύπο συνεργασίας με χωρική σύμπτωση A-P. Η δεύτερη περίπτωση εφαρμογής αφορά συνεργατική προετοιμασία του ανθρακούφασματος (αφαίρεση του αυτοκόλλητου) και συνεργατική και από κοινού στρώση του ανθρακούφασματος στο καλούπι. Στην περίπτωση αυτή έχουμε τόσο ταυτόχρονο όσο και υποβοηθητικό τύπο συνεργασίας.

1η περίπτωση εφαρμογής Συνεργατική τροφοδοσία ανθρακούφασμάτων	2η περίπτωση εφαρμογής Συνεργατική προετοιμασία και από κοινού εφαρμογή ανθρακούφασματος
<i>"beWare of the Robot" v1.0 & v1.5</i>	<i>"beWare of the Robot" v2.0</i>
<div data-bbox="239 1187 782 1411" data-label="Diagram"> </div> <p data-bbox="239 1456 782 1568">Σενάριο: το ρομπότ τροφοδοτεί τον άνθρωπο με το ανθρακούφασμα και στη συνέχεια αυτός το απλώνει στο καλούπι.</p> <div data-bbox="231 1590 766 2027" data-label="Image"> </div>	<div data-bbox="798 1120 1340 1433" data-label="Diagram"> </div> <p data-bbox="798 1444 1340 1590">Σενάριο: το ρομπότ φέρνει το ανθρακούφασμα προς τον άνθρωπο, αυτός αφαιρεί το αυτοκόλλητο και από κοινού, A & P, το απλώνουν στο καλούπι.</p> <div data-bbox="798 1590 1356 2027" data-label="Image"> </div>

Τύπος συνεργασίας: χωρική σύμπτωση,
συγχρονισμένη συνεργασία

Τύπος συνεργασίας: χωρική σύμπτωση,
ταυτόχρονη και υποβοηθούμενη συνεργασία

Εικόνα 5-1: Οι δύο περιπτώσεις εφαρμογής (use cases) και τα κυριότερα χαρακτηριστικά που τις ξεχωρίζουν

5.2.1. Η 1^η περίπτωση εφαρμογής: συνύπαρξη και συγχρονισμένη συνεργασία εν σειρά (beWare of the Robot v1.0 & v1.5)

Η πρώτη περίπτωση εφαρμογής αποτελεί το πρώτο βήμα για τη διερεύνηση του πρώτου ερευνητικού ερωτήματος, δηλαδή: (i) να μοντελοποιηθεί η κατάσταση της συνεργασίας A-P και να αναπαραχθούν τα χαρακτηριστικά αυτής σε ένα διαδραστικό εικονικό περιβάλλον, (ii) να διερευνηθεί η αποδοχή κι η αποτελεσματικότητα του διαδραστικού ΕΠε ως εργαλείου μοντελοποίησης αυτής της συνεργασίας, και, (iii) να λειτουργήσει ως μια πολυμορφική πλατφόρμα πειραματισμού και δοκιμών της συνεργασίας A-P.

Το σενάριο εργασίας στην πρώτη περίπτωση εφαρμογής συνίσταται στη ρομποτική τροφοδοσία προεμποτισμένων τεμαχίων ανθρακοϋφασμάτων (“prepregs”), από έναν πάγκο εναπόθεσης υφασμάτων στον άνθρωπο. Ο άνθρωπος παραλαμβάνει το ύφασμα από το ρομπότ (βλ. Εικόνα 5-2) και το απλώνει στο ενδεικνυόμενο κάθε φορά τμήμα της μεταλλικής μήτρας. Αφού τοποθετήσει ο άνθρωπος το κάθε ύφασμα, το ρομπότ του φέρνει το επόμενο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την τελική στρώση. Ο πάγκος εργασίας πάνω στον οποίο ο άνθρωπος στρώνει το ύφασμα, βρίσκεται εκτός του χώρου εργασίας του ρομπότ. Συνεπώς, η χωρική σύμπτωση και ο διαμοιρασμός του χώρου εργασίας αφορά μόνο το συνεργατικό καθήκον παράδοσης κι όχι το επόμενο καθήκον του στρωσίματος, το οποίο πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου από τον άνθρωπο.

Με βάση την κατηγοριοποίηση της Ενότητας 2.3, το σενάριο αυτό είναι πλήρους χωρικής σύμπτωσης, επειδή δεν υπάρχει καμία διαχωριστική ζώνη ασφαλείας και μπορεί να υπάρχει φυσική επαφή A-P. Ο άνθρωπος και το ρομπότ εργάζονται διαδοχικά, με μια σειριακού-τύπου χρονική μετάβαση πάνω στο ίδιο τεμάχιο, οπότε πρόκειται για συγχρονισμένη συνεργασία με χωρική σύμπτωση A-P.



Εικόνα 5-2: Στιγμιότυπα από την πρώτη περίπτωση συνεργασίας (beWare of the Robot v1.0): ο άνθρωπος παραλαμβάνει το τεμάχιο από το ρομπότ στον κοινό χώρο εργασίας

Οι δοκιμές με χρήστες, οι οποίες πραγματοποιούνται στην πρώτη περίπτωση εφαρμογής παρουσιάζονται αναλυτικά στην Ενότητα 9.1. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα ερωτηματολόγια, αλλά, κυρίως, από τις παρατηρήσεις της συμπεριφοράς των χρηστών, βοήθησαν πολύ στο σχεδιασμό του συνεργατικού καθήκοντος της δεύτερης, πιο έντονα αλληλεπιδραστικής περίπτωσης εφαρμογής.

5.2.2. Η 2^η περίπτωση εφαρμογής: συνύπαρξη, ταυτόχρονη συνεργασία και εργασία εν παραλλήλω με έντονη αλληλεπίδραση (beWare of the Robot v2.0)

Βάσει των παρατηρήσεων των δοκιμών της πρώτης περίπτωσης εφαρμογής, προέκυψε ότι για τον έλεγχο του δεύτερου και τρίτου ερευνητικού ερωτήματος απαιτείται από κοινού εκτέλεση καθήκοντος με μεγαλύτερη εγγύτητα και πιο έντονη συνεργασία μεταξύ A-P. Μάλιστα, για τη διερεύνηση της τρίτης προβληματικής, ήτοι της αποτελεσματικότητας των τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας, είναι επιθυμητό ένα σενάριο συνεργασίας το οποίο προϋποθέτει από τη φύση του έντονη συνεργασία εκ του σύνεγγυς.



Εικόνα 5-3: Η δεύτερη περίπτωση συνεργασίας (beWare of the Robot v2.0): αριστερά ο άνθρωπος αφαιρεί το αυτοκόλλητο κάλυμμα από το τεμάχιο, και δεξιά στρώνει από κοινού με το ρομπότ το ύφασμα πάνω στο κόκκινο τμήμα της μήτρας.

Το σενάριο εργασίας, στη δεύτερη περίπτωση εφαρμογής, περιλαμβάνει: (i) τη ρομποτική παραλαβή προεμποτισμένων αυτοκόλλητων τεμαχίων ανθρακοϋφασμάτων (“prepregs”) από τον πάγκο εναπόθεσης υφασμάτων, (ii) τη συγκράτηση και συνεργατική προετοιμασία του τεμαχίου (αφαίρεση του αυτοκόλλητου από τον άνθρωπο όσο το ρομπότ συγκρατεί το ύφασμα μπροστά του) και, τέλος, (iii) τη συνεργατική και από κοινού στρώση του ανθρακοϋφάσματος πάνω στο καλούπι. Στην από κοινού στρώση, το ρομπότ τοποθετεί με κατάλληλο προσανατολισμό τη μία ακμή του υφάσματος πάνω στο καλούπι και ο άνθρωπος πρέπει να εφαρμόσει τις άλλες ακμές στις ενδεικνυόμενες θέσεις και να στρώσει το ύφασμα (βλ. Εικόνα 5-3). Αφού τοποθετήσει ο άνθρωπος το κάθε ύφασμα, το ρομπότ απομακρύνεται και πηγαίνει να παραλάβει το επόμενο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την τελική στρώση. Σε αυτή την περίπτωση εφαρμογής, ο πάγκος εργασίας πάνω στον οποίο ο άνθρωπος στρώνει το ύφασμα, βρίσκεται εντός

του χώρου εργασίας του ρομπότ. Έτσι, η χωρική σύμπτωση και ο διαμοιρασμός του χώρου εργασίας αφορούν το συνεργατικό σενάριο στο σύνολό του.

Συνεπώς, και με βάση την κατηγοριοποίηση της Ενότητας 2.3, το σενάριο αυτό είναι πλήρους χωρικής σύμπτωσης, επειδή δεν υπάρχει καμία διαχωριστική ζώνη ασφαλείας και μπορεί να υπάρχει φυσική επαφή A-P. Όσον αφορά το χρονικό επιμερισμό, κατά την προετοιμασία του τεμαχίου (αφαίρεση αυτοκόλλητου), έχουμε ταυτόχρονη συνεργασία A-P πάνω στο ίδιο τεμάχιο, όπου το ρομπότ συγκρατεί το τεμάχιο κι έτσι υποβοηθά τον άνθρωπο ώστε αυτός να ασχοληθεί μόνο με την αφαίρεση του αυτοκόλλητου καλύμματος. Κατά τη συνεργατική στρώση, ο άνθρωπος και το ρομπότ εργάζονται από κοινού στο ίδιο τεμάχιο για το ίδιο καθήκον και με δυνατότητα φυσικής επαφής (στρώσιμο υφάσματος σε δεδομένη θέση και με συγκεκριμένο προσανατολισμό).

Μέρος 3ο: Υλοποίηση, Ανάλυση, Δοκιμές και Αποτελέσματα

6. Υλοποίηση του Εικονικού Περιβάλλοντος (Περιγραφή)

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το Εικονικό Περιβάλλον (ΕΠε) και τα σημαντικότερα στοιχεία τα οποία το αποτελούν. Αρχικά, περιγράφεται συνοπτικά το πεδίο εφαρμογής (χειροποίητη στρώση σύνθετων υλικών), η συγκρότηση του υλικού του συστήματος (system setup) και η εικονική σκηνή, έτσι ώστε να είναι δυνατή η κατανόηση του ΕΠε. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το σενάριο της συνεργασίας A-P μέσα στο ΕΠε και η αλληλεπίδραση η οποία απαιτείται μεταξύ χρήστη και συστήματος. Τέλος, γίνεται μια πολύ συνοπτική περιγραφή των βασικών μοντέλων (μοντέλο ανθρωποειδούς και μοντέλο βιομηχανικού ρομποτικού βραχίονα) και των συσκευών αλληλεπίδρασης (κάσκα στερεοσκοπίας, αισθητήρας αναγνώρισης κίνησης) οι οποίες απαιτούνται για τη διαδραστική εικονική εμπειρία του χρήστη στο ΕΠε.

Όπως περιγράφηκε ήδη στην Ενότητα 5.2, αναπτύχθηκαν δύο περιπτώσεις εφαρμογής, οι οποίες θα αναφέρονται από εδώ και στο εξής ως: (i) πρώτη περίπτωση εφαρμογής, ή beWare of the Robot v1.0 και v1.5, και (ii) δεύτερη περίπτωση εφαρμογής, ή beWare of the Robot v2.0.

6.1. Το πεδίο εφαρμογής

Τόσο η πρώτη όσο και η δεύτερη περίπτωση εφαρμογής αναπαριστούν στο ΕΠε σενάρια συνεργατικής παραγωγής σύνθετων αεροπορικών τεμαχίων από ανθρακονήματα. Συνεπώς, το πεδίο εφαρμογής είναι η χειροποίητη στρώση (hand lay-up) σύνθετων ινωδών ανθρακοϋφασμάτων. Η χειροποίητη στρώση είναι πολύ διαδεδομένη μέθοδος μορφοποίησης σύνθετων υλικών, ενώ στην αεροπορική βιομηχανία, συνήθως η στρώση πραγματοποιείται στο κάτω τμήμα ενός καλουπιού και στο επάνω έχουμε είτε ένα μέσο πίεσης, π.χ. μεμβράνη σε κενό αέρα, ή το συμπληρωματικό/άνω τμήμα του καλουπιού, οπότε έχουμε χύτευση θαλάμου πίεσης με αέριο πιεστικό μέσο (pressure bag) και χύτευση σε διαιρετό/διμερές καλούπι (match die molding) αντίστοιχα.

Κατά τη συμβατική χειροποίητη στρώση (hand lay-up) σύνθετων ινωδών ανθρακοϋφασμάτων, ο άνθρωπος αρχικά παίρνει το επιθυμητό κομμάτι του προεμποτισμένου υφάσματος (prepreg¹¹) και αφαιρεί με τα χέρια του ή με ένα οξύ εργαλείο την αυτοκόλλητη ταινία (σλικονούχο χαρτί), η οποία αποτρέπει το ύφασμα από το να κολλήσει στον εαυτό του (Εικόνα 6-1a). Θεωρείται, για λόγους συντόμευσης, ότι τα prepregs είναι ήδη κομμένα στα επιθυμητά αναπτόγματα, τα οποία έχουν μελετηθεί ως προς το σχήμα τους, τον προσανατολισμό των ινών και την

¹¹ Ο όρος prepreg είναι συντομογραφία του pre-impregnated, δηλαδή ανθρακοϋφάσματα προεμποτισμένα με μη σκληρυμένη εποξειδική ρητίνη, έτοιμα για στρώση.

αντοχή τους. Στη συνέχεια ο άνθρωπος τοποθετεί/απλώνει το κομμάτι ανθρακούφασματος (carbon patch/cloth) στην επιθυμητή θέση και με κατάλληλο προσανατολισμό πάνω στο καλούπι (Εικόνα 6-1b,c), με την κολλώδη πλευρά προς τα κάτω. Σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας με πολύ σύνθετη γεωμετρία, ή όταν έχουμε ένθετα, αλλά και γενικότερα για την αύξηση της παραγωγικότητας, συχνά χρησιμοποιούνται συστήματα laser τα οποία προβάλλουν πάνω στην επιφάνεια του καλουπιού την αλληλουχία και την ακριβή θέση του κάθε υφάσματος (Εικόνα 6-1 d). Έπειτα ο άνθρωπος εφαρμόζει/συμπιέζει το ύφασμα πάνω στο καλούπι με τα χέρια του, με ένα ρολό, ή μ' ένα οξύ εργαλείο, φροντίζοντας να αφαιρέσει εναπομείναντες θύλακες αέρα (πορώδες) και να εξασφαλίσει καλή συνάφεια ινών-μήτρας (Εικόνα 6-1e). Τέλος, τοποθετεί τη μεμβράνη αεροστεγώς (pressure bag) και αφαιρεί τον αέρα με χρήση αντλίας κενού. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται όσες φορές χρειαστεί, μέχρι την επίτευξη της τελικής στρώσης και ακολουθεί σκλήρυνση (curing).



Εικόνα 6-1: Χειροποίητη στρώση (hand lay-up) σύνθετων ινωδών ανθρακούφασμάτων. [© easycomposites™ website <http://goo.gl/v0ScTv>]

Στη συνέχεια θα γίνει μια σύντομη αιτιολόγηση της επιλογής της χειροποίητης στρώσης ανθρακούφασμάτων ως πεδίου εφαρμογής (use case) και διερεύνησης της συνεργασίας A-P. Η χειροποίητη στρώση ανθρακούφασμάτων είναι μια μέθοδος μορφοποίησης σύνθετων τεμαχίων πολύ υψηλής προστιθέμενης αξίας, η οποία, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της, πραγματοποιείται ακόμα και σήμερα σχεδόν εξ ολοκλήρου χειροκίνητα και χειρωνακτικά. Η χειροποίητη στρώση, ενώ είναι φαινομενικά απλή τεχνική, είναι αργή κι επίπονη, ενώ απαιτεί μεγάλη επιδεξιότητα από τον άνθρωπο. Τα συστήματα παραγωγής χειροποίητης στρώσης στην αεροναυπηγική είναι συνήθως έντασης εργασίας, χαμηλού όγκου παραγωγής, μικρού εύρους διαφορετικών τεμαχίων, μηδενικής αυτοματοποίησης (εξαιρουμένης της κοπής υφασμάτων- nesting) και μικρής ευελιξίας (απαιτούνται νέα καλούπια και ιδιοσκευές, υπολογισμός και προγραμματισμός κοπής αναπτυγμάτων). Η υπόθεσή

μας είναι ότι η εισαγωγή μερικού αυτοματισμού με την εισαγωγή ενός συνεργατικού βιομηχανικού ρομπότ μπορεί να αυξήσει την παραγωγικότητα και να αυξήσει την ευελιξία του συστήματος. Στο υβριδικό ρομποτικό σύστημα παραγωγής το οποίο εξετάζεται, το ρομπότ εκτελεί τα δευτερεύοντα/επικουρικά καθήκοντα και ο χειριστής τα πιο επιδέξια: το ρομπότ αναγνωρίζει τα υφάσματα και τα μεταφέρει προς το χειριστή, τα συγκρατεί προκειμένου ο άνθρωπος να πρέπει μόνο να αφαιρέσει την αυτοκόλλητη ταινία και, τέλος, τα τοποθετεί με τη μία ακμή τους να εφάπτεται στην επιθυμητή θέση και προσανατολισμό, έτσι ώστε ο χειριστής να πρέπει να τοποθετήσει τις υπόλοιπες ακμές στο καλούπι και να συμπέσει το ανθρακοϋφασμα.

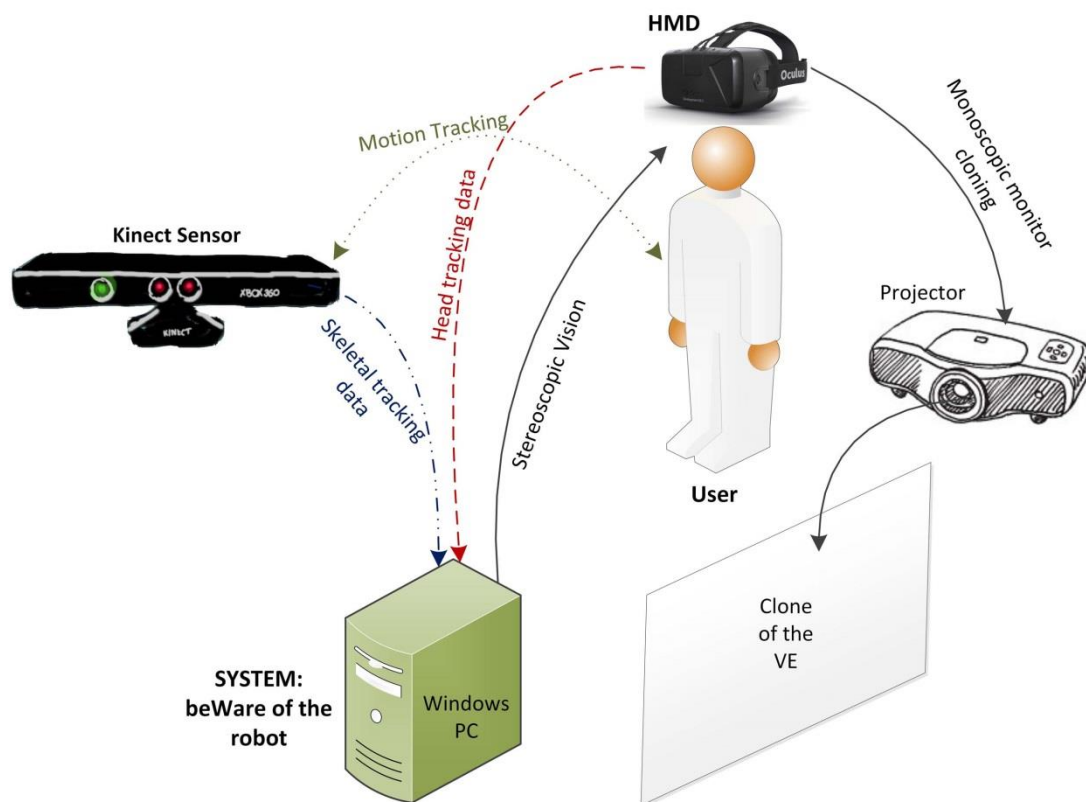
Η παραπάνω υπόθεση βασίστηκε σε in-situ παρατήρηση και σε στοιχειώδη μελέτη εργασίας κατά τη χειροκίνητη στρώση δομικών στοιχείων αεροσκαφών στο Τμήμα Σύνθετων Υλικών της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας ([EAB](#)). Από τις παρατηρήσεις προέκυψαν καθυστερήσεις και δυστοκίες στα εξής καθήκοντα: (i) αναζήτηση υφασμάτων και αναγνώριση σωστού αρχικού προσανατολισμού, ιδιαίτερα σε ορθογωνικά υφάσματα τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν ποικιλοτρόπως, (ii) αφαίρεση αυτοκόλλητης ταινίας από το χειριστή, (iii) ακριβής τοποθέτηση του υφάσματος στο καλούπι χωρίς τη δημιουργία πτυχώσεων, και (iv) συνεχείς μετακινήσεις του χειριστή προκειμένου να προμηθευτεί υφάσματα και να πληκτρολογήσει στοιχεία στον Η/Υ του συστήματος προβολής θέσης με laser. Επομένως, η εισαγωγή του συνεργατικού ρομποτικού βραχίονα στοχεύει στην αντιμετώπιση των ανωτέρω παρατηρήσεων, ώστε η εκτέλεση του καθήκοντος να πραγματοποιείται από κοινού, ταχύτερα και με λιγότερη φυσική καταπόνηση για τον άνθρωπο.

Το σενάριο εργασίας της συνεργατικής στρώσης, όπως περιγράφηκε παραπάνω, μπορεί να αποτελέσει ιδανικό πεδίο διερεύνησης της συνεργασίας A-P, επειδή είναι ισχυρά αλληλεπιδραστικό και μπορούν να προσαρμοστούν σε αυτό όλοι οι τύποι συνεργασίας A-P (χωρικοί, χρονικοί, διαφορετικού βαθμού συνεργασίας). Μολονότι τα συνεργατικά καθήκοντα διατηρούνται σχετικά απλά, αυτά είναι άμεσα, ευδιάκριτα και απαιτούν μεγάλη εγγύτητα και παράλληλη εργασία (συγχρονισμένη ή ταυτόχρονη) μεταξύ A-P. Μάλιστα τα επλεχθέντα συνεργατικά καθήκοντα (παράδοση τεμαχίου τύπου χέρι-με-χέρι, ρομποτική συγκράτηση και ταυτόχρονη ανθρώπινη εργασία πάνω στο ίδιο τεμάχιο) είναι χαρακτηριστικά συνεργατικά καθήκοντα στα συστήματα βιομηχανικής παραγωγής και κατεργασιών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω στο μέλλον.

6.2. Η συγκρότηση του συστήματος (setup)

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 5.2, αναπτύχθηκαν δύο περιπτώσεις εφαρμογής και συγκεκριμένα οι εφαρμογές (demo applications) “beWare of the Robot” v1.0 και v2.0 (βλ. Ενότητες 5.2.1 και 5.2.2), με διαφοροποιήσεις τόσο ως προς το σενάριο συνεργασίας και την αλληλεπίδραση, όσο και ως προς το χρησιμοποιούμενο υλικό (hardware). Η beWare of the Robot είναι μια αυτόνομη (standalone) εφαρμογή η οποία αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του [Unity 3d™](#) και η οποία μπορεί να

εκτελεσθεί σε έναν τυπικό προσωπικό υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα Windows™. Η πλατφόρμα του συστήματος αποτελείται από έναν Η/Υ, έναν αισθητήρα Microsoft Kinect™ και μια κάσκα στερεοσκοπίας με δυνατότητα ανίχνευσης κίνησης της κεφαλής και ενσωματωμένα στερεοφωνικά ακουστικά. Στην πρώτη περίπτωση εφαρμογής (beWare of the Robot v1.0), χρησιμοποιήθηκε Η/Υ με λειτουργικό σύστημα Windows XP™ 32-bit και κάρτα γραφικών nVidia Quadro™ FX1700, ενώ ως κάσκα στερεοσκοπίας χρησιμοποιήθηκε η eMagin Z800 3DVisor™. Στη δεύτερη περίπτωση εφαρμογής (beWare of the Robot v2.0), χρησιμοποιήθηκε Η/Υ με λειτουργικό σύστημα Windows 7™ 64-bit και κάρτα γραφικών AMD Radeon R9 280, ενώ ως κάσκα στερεοσκοπίας χρησιμοποιήθηκε η Oculus Rift DK2™.



Εικόνα 6-2: Σχηματική αναπαράσταση της συγκρότησης του υλικού του συστήματος (system setup) και της ροής των δεδομένων

Επιπλέον, κατά τη διάρκεια δοκιμών με χρήστες, χρησιμοποιείται ένας βιντεοπροβολέας (προτζέκτορας) ο οποίος αναπαράγει μονοσκοπικά σε μία λευκή επιφάνεια (τοιχο), πίσω από το χρήστη, την εικόνα που αυτός βλέπει μέσα από την κάσκα στερεοσκοπίας, προκειμένου να είναι δυνατή η καταγραφή και η βιντεοσκόπηση της εμπειρίας του χρήστη. Τα δεδομένα εισόδου από τον αισθητήρα Kinect και από τον αισθητήρα ανίχνευσης θέσης της κεφαλής του χρήστη, μεταφέρονται στον Η/Υ μέσω καλωδίων και θυρών USB. Η έξοδος (στερεοσκοπική εικόνα) μεταφέρεται μέσω καλωδίου VGA στην κάσκα Z800 και μέσω καλωδίου HDMI στην Oculus Rift. Η επικοινωνία με τον αισθητήρα Kinect στο περιβάλλον του Unity υλοποιήθηκε αρχικά με το ανοικτό πλαίσιο OpenNI και στη συνέχεια με το MS Kinect SDK v1.8 της Microsoft. Η συνολική συγκρότηση του συστήματος και η ροή

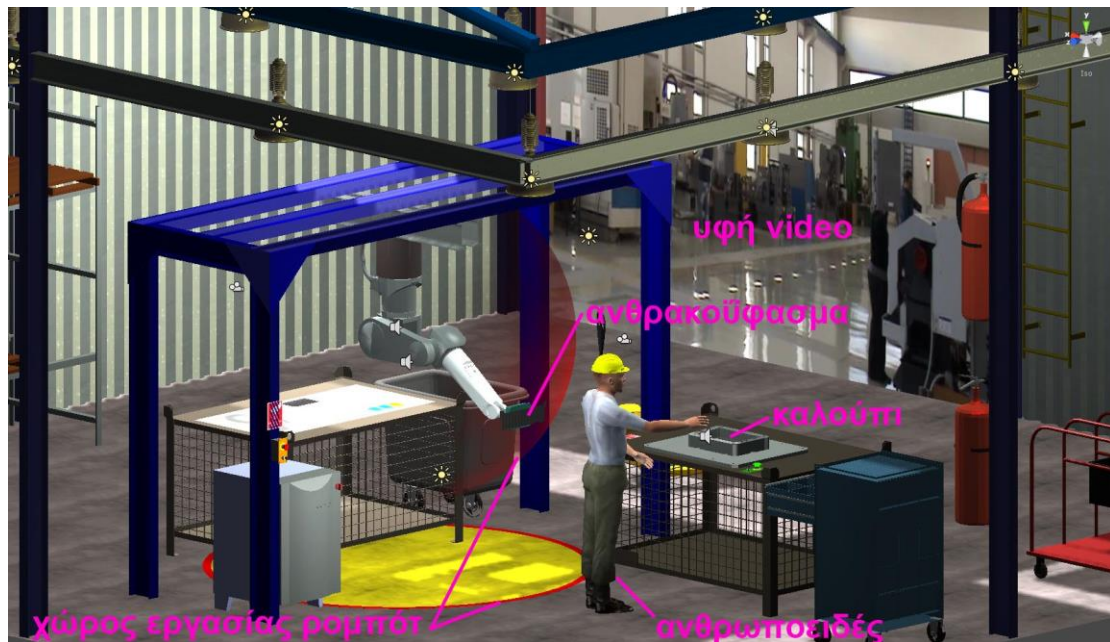
των δεδομένων μεταξύ των συνιστωσών του, παρουσιάζονται σχηματικά στην Εικόνα 6-2. Στην Εικόνα 6-3 παρουσιάζεται η διάταξη του υλικού κατά την τυπική δοκιμή της εφαρμογής: ο χρήστης φορά την κάσκα Oculus Rift και πραγματοποιεί καθήκοντα όντας εμβυθισμένος στο ΕΠε, ενώ διακρίνονται ο αισθητήρας Kinect για την αναγνώριση κίνησης του σώματος και ο αισθητήρας ανίχνευσης κίνησης κεφαλής του Oculus Rift.



Εικόνα 6-3: Τυπική διάταξη του υλικού και των συσκευών αλληλεπίδρασης κατά τη δοκιμή της demo εφαρμογής beWare of the Robot v1.5.

6.3. Η εικονική σκηνή

Η εικονική σκηνή (βλ. Εικόνα 6-4) του ΕΠε είναι πρωτότυπη και σχεδιάστηκε από το μηδέν προκειμένου να απαντήσει στις ερευνητικές προβληματικές και υποθέσεις της Ενότητας 5.1. Το σενάριο εργασίας και πολλά τμήματα του ΕΠε βασίστηκαν σε στοιχεία και παρατηρήσεις από την κατασκευή δομικών τμημάτων ελικοπτέρων στο Τμήμα Σύνθετων Υλικών της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας (ΕΑΒ). Ο χώρος εργασίας της εικονικής σκηνής μπορεί να προσαρμόζεται και να τροποποιείται εύκολα, έτσι ώστε να εξετάζονται διαφορετικά συνεργατικά σενάρια και διαμορφώσεις στο ΕΠε.

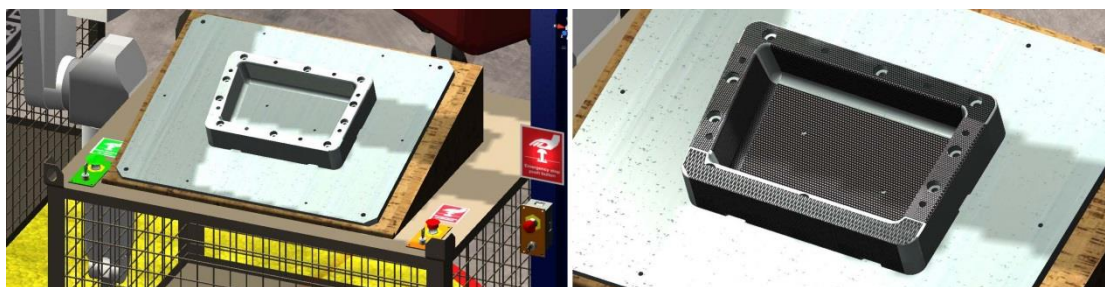


Εικόνα 6-4: Η εικονική σκηνή του υβριδικού ρομπωτικού κυττάρου παραγωγής και οι βασικές του συνιστώσες, ιδωμένα προοπτικά από οπτική 3^ο προσώπου.

Το ΕΠε ενσωματώνει: (i) τη συναρμολόγηση πρωτότυπων τρισδιάστατων μοντέλων τα οποία συνθέτουν το εικονικό μοντέλο ενός κυττάρου συνεργατικής στρώσης ανθρακούφασμάτων (βλ. Εικόνα 6-4), (ii) το μοντέλο ενός ρομπωτικού βιομηχανικού βραχίονα Stäubli™ RX90L, (iii) το πρωτότυπο, κινηματικά-λειτουργικό μοντέλο ενός ανθρωποειδούς (avatar), με ένα σκελετό διπόδου (biped) και υφή δέρματος προσαρμοσμένα σε αυτό, (iv) ανταλλαγή δεδομένων με τις συσκευές tracking σε πραγματικό χρόνο, (v) κώδικες συμπεριφοράς και αλληλεπίδρασης σε C# και στη JavaScript του Unity, (vi) δυναμικό φωτισμό, δημιουργία σκιάσεων και φωτορεαλιστική απόδοση σε πραγματικό χρόνο και (vii) υφές εικόνας, ήχου και βίντεο από πραγματικούς χώρους εργασίας. Στο Unity παρέχεται η δυνατότητα ενσωμάτωσης κώδικα στα αντικείμενα για την προσθήκη σε αυτά συμπεριφοράς, κίνησης, φυσικών ιδιοτήτων και αλληλεπίδρασης, την ανίχνευση σύγκρουσης, την εκπομπή ακτίνων, τη δημιουργία σχέσεων εξάρτησης παιδιού/γονέα μεταξύ αντικειμένων, τη δημιουργία στιγμιότυπων κλάσεων, την αναγνώριση κίνησης (tracking) και, φυσικά, την υλοποίηση των τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας. Τα τρισδιάστατα μοντέλα δημιουργήθηκαν ως επί το πλείστον με το σχεδιαστικό πρόγραμμα [Rhinoceros™](#) και η μετα-επεξεργασία τους όσον αφορά στοιχεία του πλέγματος, των υλικών και των υφών έγινε στο [3ds Max®](#). Το μοντέλο του ρομπωτικού βραχίονα ελήφθη έτοιμο σε μορφή .stp από την κατασκευάστρια εταιρεία (Stäubli) και τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να είναι κινηματικά λειτουργικό. Το μοντέλο του ανθρωποειδούς δημιουργήθηκε με το online εργαλείο Evolver ("Evolver 3D digital avatar website," 2012) και στη συνέχεια εισήχθη στο 3ds Max όπου προσαρμόστηκε σε αυτό κινηματικός σκελετός διπόδου (biped) και κάποιες βασικές στάσεις (στάση τύπου «T» και «Y»). Ένας μικρός αριθμός συνήθων βοηθητικών αντικειμένων μηχανουργείου (πάγκος εργαλείων, καρότσι, παλετοφόρο) ελήφθη από έτοιμη βιβλιοθήκη μοντέλων με άδεια αναπαραγωγής. Όλα τα μοντέλα

εισήχθησαν στο Unity ως πλέγματα (meshes) με τα υλικά τους σε μορφή «.fbx» προκειμένου να εξασφαλισθεί η μέγιστη δυνατή συμβατότητα. Όπου δεν είχε ήδη πραγματοποιηθεί η εισαγωγή υλικών και υφών στα αντικείμενα, αυτό έγινε μέσα στο περιβάλλον του Unity.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η εφαρμογή beWare of the Robot v2.0 έχει συνολικό μέγεθος 390 MB, εκ των οποίων τα 100 MB είναι αρχεία υφών (εικόνες, video και ήχοι). Για την επίτευξη της λειτουργικότητας και της αλληλεπίδρασης της εφαρμογής, αναπτύχθηκαν 41 πρωτότυπα αρχεία κώδικα σε C#, τα οποία περιλαμβάνουν 7281 γραμμές κώδικα. Τέλος, η εικονική σκηνή, εκτός από τα μοντέλα του χώρου, του ανθρωποειδούς και του ρομπότ, αποτελείται από 41 επιμέρους τρισδιάστατα μοντέλα σε μορφή πλέγματος.



Εικόνα 6-5: Αριστερά, το μεταλλικό καλούπι πάνω στον πάγκο εργασίας και δεξιά το μεταλλικό καλούπι μετά την ολοκλήρωση της πρώτης στρώσης ανθρακούφασμάτων επάνω σε αυτό.

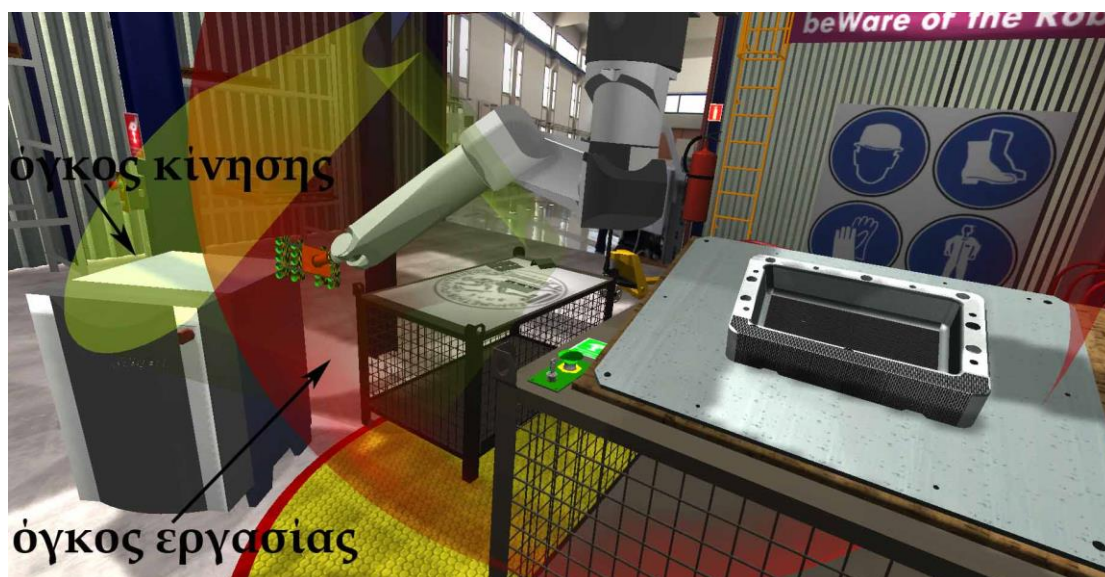
Το καλούπι που σχεδιάστηκε αποτελεί παραλλαγή ενός πραγματικού καλουπιού της EAB και παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-5, πριν και μετά τη στρώση των ανθρακούφασμάτων. Τα επιμέρους ανθρακούφασματα είναι επίσης πρωτότυπα, προκύπτουν ως αναπτύγματα της επιφάνειας πάνω στην οποία τοποθετούνται και φαίνονται στην Εικόνα 6-6. Και στις δύο περιπτώσεις εφαρμογής, θεωρείται ότι τα ανθρακούφασματα είναι ήδη κομμένα στις επιθυμητές διαστάσεις και είναι στοιβαγμένα πάνω σε έναν πάγκο ο οποίος βρίσκεται κοντά στον πάγκο εργασίας και το χρήστη, και φυσικά μέσα στο χώρο εργασίας του ρομποτικού βραχίονα. Το ρομπότ αναγνωρίζει κάθε φορά το κατάλληλο ύφασμα και το συγκρατεί στην αρπάγη του με πνευματικό σύστημα κενού.



Εικόνα 6-6: Τα διαφορετικά ανθρακούφασματα (prepregs) ήδη κομμένα στα επιθυμητά αναπτύγματα και παρατεταγμένα πάνω στον πάγκο εναπόθεσης υφασμάτων

Το βιομηχανικό ρομπότ είναι ανηρητημένο ανάποδα από μια μεταλλική κατασκευή έτσι ώστε να μπορεί να εξυπηρετήσει και τους δύο πάγκους (ανθρακούφασμάτων και εργασίας), αλλά και να τροφοδοτήσει τον άνθρωπο, όπως προβλέπεται και στις δύο περιπτώσεις εφαρμογής (βλ. Εικόνα 6-7, Εικόνα 6-13, Εικόνα 6-14). Με αυτού του είδους τη διάταξη είναι εξαιρετικά εύκολη η τροποποίηση του ρομποτικού κυττάρου στο ΕΠε, τροποποιώντας τα στοιχεία που βρίσκονται κάτω και πέριξ του ρομπότ.

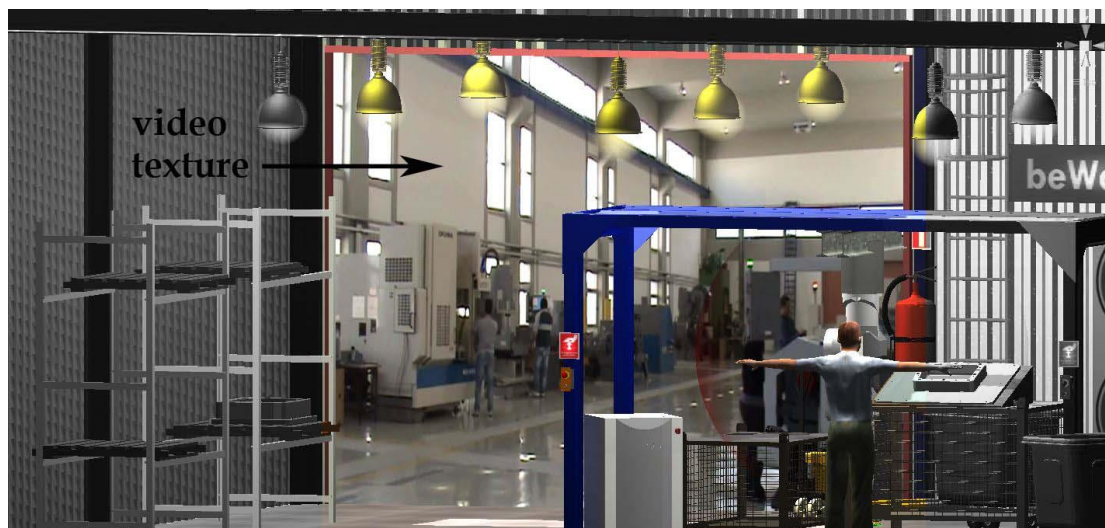
Στο ΕΠε όταν το ρομπότ κινείται, ο χρήστης μπορεί να το δει στερεοσκοπικά και να το ακούσει στερεοφωνικά, ενώ ο χώρος εργασίας του ρομπότ είναι συνέχεια ορατός με τη μορφή μιας κόκκινης ημιδιαφανούς επιφάνειας τορσειδούς μορφής, εν είδει εποπτικού βοηθήματος/ένδειξης (βλ. Εικόνα 6-7). Η ένδειξη αυτή υποβοηθά το χρήστη αφενός να αντιληφθεί το χώρο εργασίας και αφετέρου να είναι σε θέση να αντιλαμβάνεται σε κάθε χρονική στιγμή εάν βρίσκεται ο ίδιος εντός αυτού του χώρου. Επίσης, με την ίδια λογική, απεικονίζεται η προβολή του χώρου εργασίας στο δάπεδο, με έναν κύκλο και κόκκινο περίγραμμα (βλ. Εικόνα 6-7 και Εικόνα 6-11).



Εικόνα 6-7: Οι παραστατικές ενδείξεις-γνωστικά βοηθήματα του ΕΠε: ο χώρος εργασίας του ρομπότ, η προβολή του στο δάπεδο και ο βοηθητικός όγκος κίνησης.

Στη δεύτερη περίπτωση εφαρμογής (beWare of the Robot v2.0), εκτός από το χώρο εργασίας έχει δημιουργηθεί και ένα επιπλέον παραστατικό βοήθημα, ο όγκος κίνησης (βλ. Εικόνα 6-7), ο οποίος είναι μια κίτρινη ημιδιαφανής μορφή τύπου σφήνας, προσαρτημένη στον πήχη του ρομποτικού βραχίονα. Ο όγκος κίνησης καταλήγει σε ένα τμήμα κυλινδρικού τομέα ακτίνας R0.5 m, με κέντρο το άκρο του ρομπότ. Η ένδειξη αυτή ακολουθεί το ρομπότ από την 4^η άρθρωση και μετά (κινείται μαζί του), ενώ είναι ορατή μόνον όσο το ρομπότ κινείται. Όταν έλθει σε επαφή με το χρήστη, το χρώμα του γίνεται κόκκινο και ξεκινά ένας ηχητικός συναγερμός. Αποτελεί, δε, ένα επιπλέον βοήθημα για την ευκολότερη αντίληψη του βραχίονα στο χώρο και υποβοηθά το χρήστη να αποφύγει μια πιθανή σύγκρουση.

Στο βάθος της εικονικής σκηνής και προκειμένου να δώσει την εντύπωση της συνέχειας του χώρου, έχει δημιουργηθεί ένα πλαίσιο (άνοιγμα) με υφή βίντεο αντί για εικόνα, πάνω στο οποίο αναπαράγονται σκηνές από ένα πραγματικό εργοστάσιο παραγωγής (βλ. Εικόνα 6-8). Στην οροφή του χώρου εργασίας έχουν τοποθετηθεί μοντέλα βιομηχανικών φωτιστικών, ενώ στη στέγη υπάρχουν ημιδιαφανή ανοίγματα προκειμένου να επιτρέπουν στο φυσικό φως να εισέρχεται και να δημιουργούνται σκιάσεις σε πραγματικό χρόνο (ενδεικτικά βλ. το δάπεδο στις Εικόνα 6-11 και Εικόνα 6-12).



Εικόνα 6-8: Το πλαίσιο (παράθυρο) με την υφή βίντεο στο βάθος της σκηνής, εν είδει προοπτικής προέκτασης του χώρου (χρωματισμένο στη φωτογραφία).

Οι δύο περιπτώσεις εφαρμογής, beWare of the Robot v1.0 και beWare of the Robot v2.0, εκτός από τις προαναφερθείσες διαφορές στις χρησιμοποιούμενες συσκευές και στο σενάριο συνεργασίας, παρουσιάζουν διαφορές και στη διάταξη του συνεργατικού χώρου. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-9 και στην Εικόνα 6-13, στην πρώτη περίπτωση εφαρμογής, ο πάγκος με τα ανθρακοϋφάσματα και η κατασκευή με το ρομπότ βρίσκονται στα αριστερά του χρήστη, ενώ ο πάγκος εργασίας με το καλούπι βρίσκεται μπροστά του. Μάλιστα, το ρομπότ δεν μπορεί να εξυπηρετήσει τον πάγκο εργασίας, καθώς αυτός βρίσκεται εκτός του ρομποτικού χώρου εργασίας (βλ. Εικόνα 6-11). Το ρομπότ απλώς τροφοδοτεί με υφάσματα τον άνθρωπο και στη συνέχεια αυτός τα τοποθετεί στο καλούπι. Αντιθέτως, στη δεύτερη περίπτωση εφαρμογής, ο πάγκος με τα ανθρακοϋφάσματα και ο πάγκος εργασίας με το καλούπι βρίσκονται ο ένας δίπλα στον άλλο και κάτω από την κατασκευή με το ρομπότ, οπότε και εντός του χώρου εργασίας του (βλ. Εικόνα 6-12). Το ρομπότ μπορεί να εξυπηρετήσει και τους δύο πάγκους και τελικά να τοποθετήσει υφάσματα στο καλούπι. Σε αυτή την περίπτωση, το ρομπότ συγκρατεί τα υφάσματα μπροστά από το καλούπι προκειμένου να αφαιρέσει ο άνθρωπος το αυτοκόλλητο και στη συνέχεια συγκρατεί το ύφασμα στο σωστό τμήμα του καλουπιού, έτσι ώστε να ολοκληρώσει ο άνθρωπος τη συνεργατική στρώση. Πέραν των παραπάνω, ουσιαστικών διαφορών στη διάταξη του χώρου εργασίας, υπάρχουν διαφορές στο ρομποτικό άκρο (αρπάγη), το οποίο στην πρώτη περίπτωση εφαρμογής είναι αφαιρετικά σχεδιασμένο. Ακόμα,

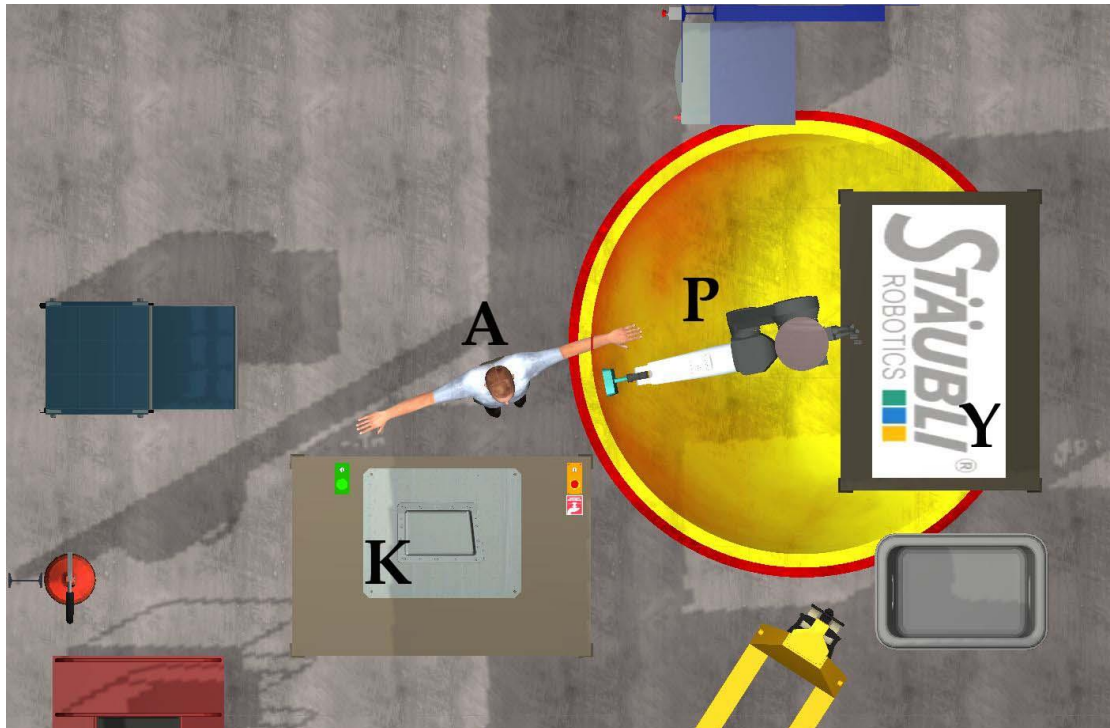
στη δεύτερη περίπτωση εφαρμογής, το μεταλλικό καλούπι είναι τοποθετημένο υπό κλίση πάνω σε μια ξύλινη βάση για λόγους εργονομίας (βλ. Εικόνα 6-14). Από τα παραπάνω, προκύπτει ότι και οι τροχιές του ρομποτικού βραχίονα θα είναι τελείως διαφορετικές στις δύο περιπτώσεις εφαρμογής (λόγω των διαφορών στη διάταξη και στο σενάριο εργασίας).



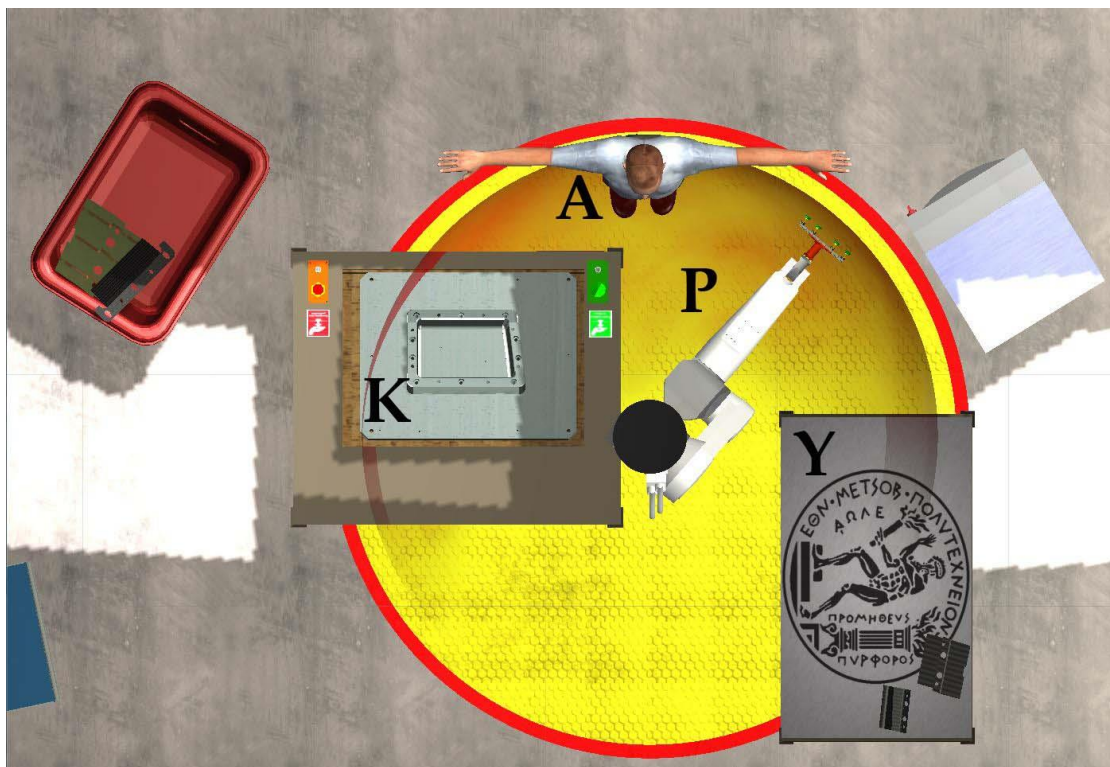
Εικόνα 6-9: Η πρώτη περίπτωση εφαρμογής (beWare of the Robot v1.0): η αρχική σκηνή του ΕΠε από οπτική πρώτου προσώπου.



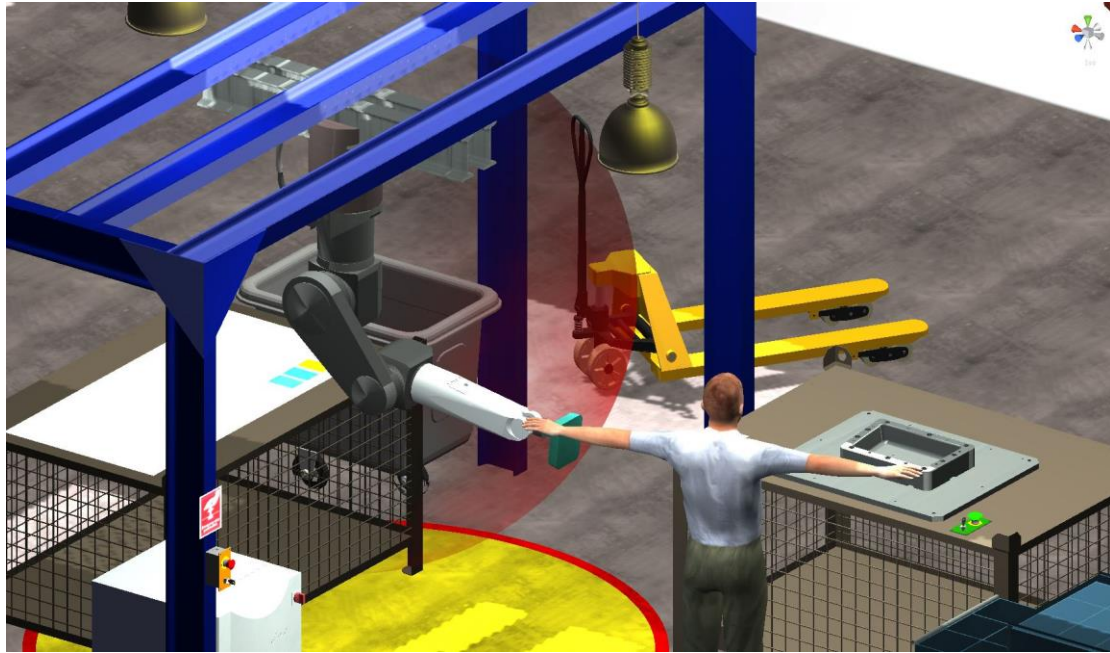
Εικόνα 6-10: Η δεύτερη περίπτωση εφαρμογής (beWare of the Robot v2.0): η αρχική σκηνή του ΕΠε από οπτική πρώτου προσώπου.



Εικόνα 6-11: Κάτοψη του ΕΠε της 1^{ης} περίπτωση εφαρμογής (beWare of the Robot v1.0): ο πάγκος με τα υφάσματα (Y), το ρομπότ (P), ο άνθρωπος (A), ο πάγκος εργασίας και το καλούπι (K)



Εικόνα 6-12: Κάτοψη του ΕΠε της 2^{ης} περίπτωση εφαρμογής (beWare of the Robot v2.0): ο πάγκος με τα υφάσματα (Y), το ρομπότ (P), ο πάγκος εργασίας με το καλούπι (K) και μπροστά ο άνθρωπος (A).



Εικόνα 6-13: Ο συνεργατικός (κοινός) χώρος εργασίας του ΕΠε από οπτική τρίτου προσώπου για την πρώτη περίπτωση εφαρμογής (beWare of the Robot v1.0)



Εικόνα 6-14: Ο συνεργατικός (κοινός) χώρος εργασίας του ΕΠε από οπτική τρίτου προσώπου για τη δεύτερη περίπτωση εφαρμογής (beWare of the Robot v2.0)

6.4. Το σενάριο συνεργασίας A-P

Στην Ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί το σενάριο συνεργασίας (αλληλουχία καθηκόντων κινήσεων και ενεργειών), καθώς και οι διαφορές σε αυτό μεταξύ των demo εφαρμογών beWare of the Robot v1.0, beWare of the Robot v1.5 και beWare of the Robot v2.0. Όσον αφορά τον τελικό στόχο του σεναρίου, και οι τρεις demo εφαρμογές προσομοιώνουν τη συνεργατική στρώση ανθρακοϋφασμάτων πάνω σε ένα μεταλλικό καλούπι, από έναν άνθρωπο ο οποίος υποβοηθείται/συνεργάζεται από ένα βιομηχανικό ρομπότ. Από τη στιγμή εκκίνησης μέχρι το σημείο όπου το ρομπότ φέρνει το ύφασμα στο χρήστη, το σενάριο είναι σχεδόν παρεμφερές και στις τρεις εκδόσεις της εφαρμογής. Μεταξύ των εκδόσεων 1.0 και 1.5 υπάρχουν μικρές

διαφορές στη σκηνή και στον τρόπο στρώσης του υφάσματος, ενώ έχουμε συγχρονισμένη (εν σειρά) συνεργασία A-P. Στην έκδοση 2.0 (δεύτερη περίπτωση εφαρμογής) το σενάριο συνεργασίας τροποποιείται και είναι πιο αλληλεπιδραστικό, οπότε επιτυγχάνεται ταυτόχρονη ή υποβοηθούμενη (εν παραλλήλω) συνεργασία A-P. Οι διαφορές μεταξύ των εκδόσεων θα παρουσιαστούν στη συνέχεια αναλυτικά, με τη βοήθεια εικονογραφημένων σεναρίων (storyboards, βλ. Εικόνα 6-15, Εικόνα 6-16 και Εικόνα 6-17), ενώ μία σχηματική αναπαράσταση των διαφορετικών σεναρίων συνεργασίας απεικονίζεται στις Εικόνα 6-20 έως Εικόνα 6-22 και, τέλος, μια αναλυτική χρονική προσέγγιση με διαγράμματα δραστηριότητας UML παρουσιάζεται στην Ενότητα 7.1.2.

Πριν την εκκίνηση της δοκιμής της εφαρμογής beWare of the robot, ζητείται από το χρήστη να φορέσει την κάσκα στερεοσκοπίας και να σταθεί όρθιος απέναντι από τον αισθητήρα Kinect™ σε μία ενδεδειγμένη θέση, σε απόσταση 2-3m από αυτόν. Ο χρήστης βλέπει την αρχική σκηνή του ΕΠε (βλ. Εικόνα 6-9 και Εικόνα 6-10), το οποίο προβάλλεται στερεοσκοπικά από την κάσκα στερεοσκοπίας. Στην πρώτη περίπτωση εφαρμογής (εκδόσεις 1.0 και 1.5 όπου χρησιμοποιείται το OpenNI και όχι το MS Kinect SDK για το tracking), απαιτείται αναγνώριση και βαθμονόμηση (calibration) του σώματος του χρήστη έναντι του σκελετού του ανθρωποειδούς. Έτσι, ο χρήστης στέκεται με σηκωμένα τα χέρια του και με τους αγκώνες του να εμφανίζουν γωνία 90°, σχηματίζοντας κατ' αυτό τον τρόπο στάση σώματος τύπου «Ψ» έναντι του αισθητήρα Kinect (βλ. Εικόνα 6-15α και Εικόνα 6-16α). Άπαξ και έχει ολοκληρωθεί η βαθμονόμηση, ζητείται από το χρήστη να εξοικειωθεί με το εικονικό του σώμα, τις δυνατότητες κίνησης μέσω της αναγνώρισης κίνησης (tracking) και με την εικονική σκηνή (βλ. Εικόνα 6-17.1). Πλέον, οι κινήσεις του χρήστη στον πραγματικό χώρο αναπαράγονται και μεταφέρονται στον εικονικό: όταν ο χρήστης μεταφέρεται ή περιστρέφεται, η κίνηση και η περιστροφή αυτή αναπαράγεται και από το σώμα του ανθρωποειδούς. Όταν ο χρήστης περπατήσει στον πραγματικό χώρο, το ανθρωποειδές πραγματοποιεί την ίδια τροχιά στο ΕΠε, πάντα όμως με τους χωρικούς περιορισμούς που προκύπτουν: (i) πρωτίστως από το μήκος των καλωδίων σύνδεσης της κάσκας στερεοσκοπίας που φορά ο χρήστης, και, (ii) δευτερευόντως από το εύρος του αισθητήρα αναγνώρισης κίνησης (για τον αισθητήρα Kinect το εύρος αυτό είναι τέσσερα μέτρα). Στην ίδια λογική, όταν ο χρήστης περιστρέψει το κεφάλι του, περιστρέφεται αντιστοίχως και το κεφάλι του ανθρωποειδούς, το οποίο έχει προσαρτημένη στο ύψος των ματιών του την κύρια κάμερα, δημιουργώντας έτσι οπτική πρώτου προσώπου («εγωκεντρική οπτική»). Εκτός από την αναγνώριση κίνησης και την πλοήγηση στο χώρο, το ΕΠε δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη (μέσω του ανθρωποειδούς) να λυγίσει το σώμα του σε κάθε κατεύθυνση, να ακουμπήσει, να συγκρουστεί και να αλληλεπιδράσει με τα άλλα αντικείμενα της εικονικής σκηνής, να τα θέσει υπό τον έλεγχό του (προσαρτώντας τα στα χέρια του ως τέκνα) και να τα μετακινήσει (βλ. Εικόνα 6-18).

Η οπτική πρώτου προσώπου έχει επιλεγεί έναντι της οπτικής τρίτου προσώπου, προκειμένου να δοθεί έμφαση στην αίσθηση της εμπύθισης, του ρεαλισμού και της εμπλοκής του χρήστη στο ΕΠε μέσω της κάσκας στερεοσκοπίας. Η αίσθηση της

εμβύθισης και κατ' επέκταση η αίσθηση της παρουσίας, επιτυγχάνεται κυρίως με τη στερεοσκοπική όραση, την αναγνώριση κίνησης και τη δυνατότητα του χρήστη να δει και να «υιοθετήσει» το νέο, εικονικό του σώμα. Στην αίσθηση του ρεαλισμού και της παρουσίας συμβάλλουν, επίσης, οι τρισδιάστατες πηγές ήχου, οι σκιάσεις σε πραγματικό χρόνο και η προβολή του βίντεο από πραγματικό κύτταρο παραγωγής στο βάθος της σκηνής.

Μετά την εμβύθιση του χρήστη στον εικονικό κόσμο και την αρχική εξοικείωσή του με το ΕΠε, ο χρήστης πρέπει να πατήσει το πράσινο κουμπί έναρξης που βρίσκεται μπροστά του, επάνω στον πάγκο εργασίας, προκειμένου να ξεκινήσει το συνεργατικό σενάριο και η κίνηση του ρομπότ (βλ. Εικόνα 6-15b, Εικόνα 6-16b και Εικόνα 6-17.2). Εκτός από το πράσινο κουμπί, υπάρχουν και (κόκκινα) κουμπιά πανικού σε διαφορετικά σημεία της σκηνής, εντός του εύρους κίνησης του ανθρώπου, τα οποία σταματούν την κίνηση του ρομπότ, εφόσον αυτό κινείται. Η λειτουργία των κουμπιών βασίζεται σε ανίχνευση σύγκρουσης μεταξύ του χεριού του ανθρωποειδούς και μιας σφαιρικής επιφάνειας η οποία περικλείει το κουμπί, οπότε ενεργοποιείται η επιθυμητή συνθήκη ελέγχου (λεπτομερέστερη περιγραφή της λειτουργίας ανίχνευσης σύγκρουσης γίνεται στην Ενότητα 7.3). Λόγω της απουσίας συσκευών ανάδρασης δύναμης και προκειμένου να μπορεί να αντιληφθεί σαφώς ο χρήστης το ότι έχει πατήσει το κουμπί, στην έκδοση beWare of the Robot v2.0, ενεργοποιείται ένας χαρακτηριστικός ήχος και φωτίζεται στιγμιαία το περίγραμμα του κουμπιού κατά το πάτημά του (βλ. Εικόνα 6-17.2).

Με το πάτημα του πράσινου κουμπιού, ακούγεται ένας προειδοποιητικός ήχος διάρκειας δύο δευτερολέπτων και το ρομπότ κινείται από την αρχική του, όρθια στάση, προς τον πάγκο στον οποίο είναι στοιβαγμένα τα ανθρακούφασμα με την επιθυμητή σειρά (βλ. Εικόνα 6-17.3). Εκεί, αφού εντοπίσει το διαθέσιμο ύφασμα με χρήση τεχνικής ανίχνευσης σύγκρουσης με εκπομπή ακτίνων (ray casting), το προσαρτά με σχέση εξάρτησης γονέα/ τέκνου και με τον κατάλληλο προσανατολισμό στο άκρο του (βλ. Εικόνα 6-17.4). Στη συνέχεια, το ρομπότ κινείται προς το χρήστη (βλ. Εικόνα 6-17.5, Εικόνα 6-17.6) προκειμένου να συνεχιστεί το συνεργατικό σενάριο. Από το σημείο αυτό και πέρα, το σενάριο συνεργασίας τροποποιείται μεταξύ των εκδόσεων 1.0 και 1.5 αφενός, και 2.0 αφετέρου, οπότε και θα περιγραφούν ξεχωριστά.

6.4.1. Το σενάριο συνεργασίας στις εκδόσεις beWare of the Robot v1.0 και v1.5

Στις εκδόσεις 1.0 και 1.5 το ρομπότ τροφοδοτεί τον άνθρωπο με το ανθρακούφασμα, φέρνοντάς το προς αυτόν με κατάλληλο προσανατολισμό, ενώ ο άνθρωπος πλησιάζει το ρομπότ, απλώνει το χέρι του και παίρνει στα χέρια του το ύφασμα από το ρομπότ (βλ. Εικόνα 6-15c και Εικόνα 6-16c). Το ανθρακούφασμα είναι πλέον παιδί του χεριού του χρήστη και ακολουθεί επακριβώς τις κινήσεις του, όπως ακριβώς θα γινόταν εάν ο χρήστης το κρατούσε με τα πραγματικά του χέρια (βλ. Εικόνα 6-15e και Εικόνα 6-18). Η μεταβίβαση του υφάσματος πραγματοποιείται με τη χρήση ακτίνων (ray-casting), οι οποίες εκπέμπονται από τα ακροδάκτυλα του

χρήστη, και μόλις χτυπήσουν πάνω στο ανθρακοϋφασμα, το ελευθερώνουν από το άκρο του ρομπότ και του θέτουν ως νέο γονέα του το δάκτυλο του χρήστη.

Εν τω μεταξύ, αφού λάβει ο χρήστης το ανθρακοϋφασμα στα χέρια του, το τμήμα του καλουπιού πάνω στο οποίο πρέπει να τοποθετηθεί το ύφασμα υπερτονίζεται (αποκτά έντονο κόκκινο χρώμα), προκειμένου να γνωρίζει ο χρήστης το ακριβές περίγραμμα τοποθέτησης και στρώσης (βλ. Εικόνα 6-15e και Εικόνα 6-16e). Ο παραπάνω υπερτονισμός (highlighting) του ενδεδειγμένου τμήματος της επιφάνειας στρώσης του ανθρακοϋφάσματος με κόκκινο χρώμα, προσομοιώνει την προβολή με laser του περιγράμματος του τμήματος τοποθέτησης στο πραγματικό καλούπι, όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 6.1. Κατόπιν, ο χρήστης κινείται προς τον πάγκο εργασίας πάνω στον οποίο βρίσκεται το μεταλλικό καλούπι και τοποθετεί με το χέρι του το ύφασμα στην ενδεδειγμένη (ερυθρά υπερτονισμένη) θέση.

Στην έκδοση 1.0, αρκεί να ακουμπήσει το ύφασμα στη θέση αυτή (μέσω ανίχνευσης σύγκρουσης) και αμέσως το ύφασμα απελευθερώνεται από το χρήστη και εμφανίζεται στρωμένο (παίρνοντας την τελική του μορφή) πάνω στο καλούπι. Αντιθέτως, το ύφασμα εξακολουθεί να παραμένει στο χέρι του χρήστη όσο αυτός δεν ακουμπά το ύφασμα στην ενδεδειγμένη/υπερτονισμένη θέση, ή όταν ακουμπάει οποιοδήποτε άλλο τμήμα του καλουπιού. Η εμφάνιση του υφάσματος ως στρωμένου υλοποιείται στο ΕΠε με την ταυτόχρονη καταστροφή του στιγμιότυπου του υφάσματος το οποίο βρίσκεται ενεργό στη σκηνή, στο χέρι του ανθρώπου και την ενεργοποίηση της γραφικής απεικόνισης του μοντέλου του στρωμένου υφάσματος. Μετά το στρώσιμο του υφάσματος και χωρίς κάποια άλλη ενέργεια του χρήστη, το ρομπότ απομακρύνεται προς τον πάγκο με τα υφάσματα προκειμένου να φέρει στο χρήστη το επόμενο ύφασμα. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τα υπόλοιπα υφάσματα μέχρι τη στρώση όλων των προβλεπόμενων υφασμάτων στο καλούπι (βλ. Εικόνα 6-15f μέχρι Εικόνα 6-15o) και η τυπική της διάρκεια είναι συνολικά 5-8 λεπτά.

Στην έκδοση 1.5 υπάρχει διαφοροποίηση στο καθήκον της στρώσης, με τη χρήση μίας κινούμενης ένδειξης εν είδει «οδηγού», την οποία πρέπει να ακολουθήσει ο χρήστης. Συγκεκριμένα, όταν ο χρήστης πάρει το ύφασμα στα χέρια του από το ρομπότ, κινείται προς το καλούπι προκειμένου να τοποθετήσει το ύφασμα στην ενδεδειγμένη θέση. Ταυτόχρονα, μία παραστατική ένδειξη σε μορφή φωτεινής ημιδιαφανούς ανθρώπινης παλάμης, μετακινείται παλινδρομικά στη θέση στρώσης πάνω στο καλούπι, δημιουργώντας ένα μοτίβο γραμμικής κίνησης (με ημιτονοειδές προφίλ ταχύτητας), το οποίο προσομοιάζει σε αυτό της χειροποίητης στρώσης (βλ. Εικόνα 6-16e και Εικόνα 6-16g). Ο χρήστης, προκειμένου να στρώσει το ανθρακοϋφασμα στην εκάστοτε ενδεδειγμένη θέση, πρέπει να ακολουθήσει αυτό το μοτίβο κίνησης με το χέρι με το οποίο χειρίζεται το ύφασμα, για μια χρονική διάρκεια η οποία αναγράφεται κάθε φορά μπροστά του και η οποία λαμβάνει τυχαίες ακέραιες τιμές εντός ενός εύρους χρόνου στρώσης (5-12s). Εφόσον, λοιπόν, ακολουθήσει με το χέρι του το μοτίβο κίνησης το οποίο δημιουργεί η γαλάζια φωτεινή ένδειξη της παλάμης για το αναγραφόμενο χρονικό διάστημα, το ύφασμα

απελευθερώνεται και εμφανίζεται στρωμένο, στη θέση τοποθέτησης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τα υπόλοιπα ανθρακούφασματα μέχρι τη στρώση όλων των διαθέσιμων υφασμάτων (βλ. Εικόνα 6-16ε έως Εικόνα 6-16ο).

Και στις δύο εκδόσεις, όταν ο χρήστης εισέρχεται στο χώρο εργασίας του ρομπότ, η κόκκινη ένδειξη του όγκου εργασίας αρχίζει να αναβοσβήνει προειδοποιητικά και συνοδεύεται από έναν ηχητικό συναγερμό, παρακινώντας το χρήστη να είναι σε εγρήγορση και υπενθυμίζοντάς του έτσι τον εν δυνάμει κίνδυνο.



Εικόνα 6-15: Εικονογραφημένο σενάριο (storyboard) της πρώτης περίπτωσης εφαρμογής beWare of the Robot v1.0



Εικόνα 6-16: Εικονογραφημένο σενάριο (storyboard) της παραλλαγής της πρώτης περίπτωσης εφαρμογής beWare of the Robot v1.5

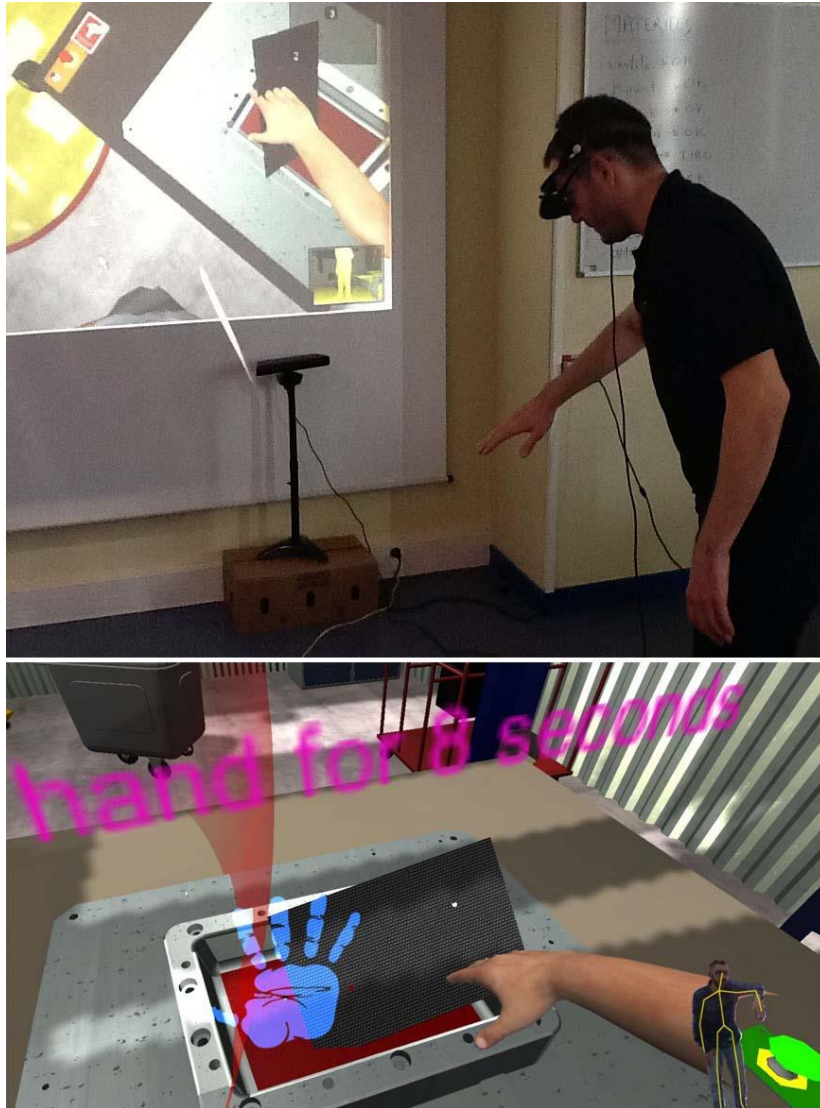
6.4.2. Το σενάριο συνεργασίας στις εκδόσεις beWare of the Robot v2.0

Στην έκδοση 2.0, το ρομπότ φέρνει το ανθρακοϋφασμα προς τον άνθρωπο, με κατάλληλο προσανατολισμό έτσι ώστε ο άνθρωπος να αφαιρέσει την προστατευτική ταινία που καλύπτει την κολλώδη πλευρά (βλ. Εικόνα 6-17.8 έως Εικόνα 6-17.10). Παράλληλα, πάνω στην προστατευτική ταινία εμφανίζεται μια κινούμενη ένδειξη (παραστατικό βοήθημα-οδηγός) με μορφή ημιδιαφανούς παλάμης ιώδους χρώματος, η οποία αναπαριστά την κίνηση την οποία πρέπει να κάνει ο χρήστης προκειμένου να αφαιρέσει την ταινία αυτή (βλ. Εικόνα 6-17.11 και Εικόνα 6-17.17). Ο άνθρωπος πλησιάζει το ρομπότ, απλώνει το χέρι του και ακολουθώντας το μοτίβο κίνησης της ιώδους παλάμης αφαιρεί το αυτοκόλλητο, το οποίο απελευθερώνεται και πέφτει στο δάπεδο υπό την επίδραση της βαρύτητας (βλ. Εικόνα 6-17.12 και Εικόνα 6-19). Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη συμπεριφοράς φυσικής υφάσματος στο αυτοκόλλητο, η οποία, εκτός από το εφέ της πτώσης ελαφρού αντικειμένου, δημιουργεί και πτυχώσεις στο χάρτινο αυτοκόλλητο.

Σύμφωνα με το σενάριο της έκδοσης 2.0, μετά την αφαίρεση της αυτοκόλλητης προστατευτικής ταινίας, το τεμάχιο ανθρακοϋφάσματος είναι έτοιμο για στρώση στο καλούπι, οπότε, σε αντίθεση με τις εκδόσεις 1.0 και 1.5, το ρομπότ δεν το παραδίδει στον άνθρωπο, αλλά συνεχίζει την κίνησή του προς το καλούπι με το ανθρακοϋφασμα προσαρτημένο στο άκρο του (βλ. Εικόνα 6-17.13). Συγκεκριμένα, το ρομπότ, συγκρατώντας το ανθρακοϋφασμα, το τοποθετεί με τον κατάλληλο προσανατολισμό επάνω από την επιθυμητή θέση στο καλούπι και με τη μία από τις ακμές του υφάσματος να ακουμπάει στην αντίστοιχη ακμή του καλουπιού, οπότε ο χρήστης διευκολύνεται ώστε να τοποθετήσει και το υπόλοιπο ύφασμα στην επιθυμητή θέση (βλ. Εικόνα 6-17.15, Εικόνα 6-17.18, Εικόνα 6-17.23, Εικόνα 6-17.28). Στην ουσία, κι επειδή η επιφάνεια του υφάσματος είναι κολλώδης, το ρομπότ «κάνει την αρχή» στην τοποθέτηση (θέση πρώτης ακμής και προσανατολισμός) και κρατάει ένα σταθερό σημείο, οπότε ο άνθρωπος διευκολύνεται σημαντικά στην εφαρμογή του υφάσματος με ακρίβεια και χωρίς να χρειάζονται πολλές μικρο-μετακινήσεις οι οποίες δημιουργούν θύλακες αέρα. Η στρώση του υφάσματος στο ΕΠε είναι ίδια με αυτή της έκδοσης 1.5, με τη μόνη διαφορά ότι το ύφασμα τώρα το συγκρατεί το ρομπότ και όχι ο άνθρωπος. Πάλι έχουμε τη χρήση μίας παλινδρομικά-κινούμενης ένδειξης εν είδει «οδηγού» (γαλάζια φωτεινή ημιδιαφανής παλάμη χεριού), την οποία πρέπει να ακολουθήσει ο χρήστης για ένα χρονικό διάστημα (βλ. Εικόνα 6-17.14, Εικόνα 6-17.15, Εικόνα 6-17.18, Εικόνα 6-17.19, Εικόνα 6-17.23). Η παραπάνω κίνηση του χρήστη στο ΕΠε είναι μια μεταφορά του μοτίβου κίνησης που πραγματοποιείται στο πραγματικό στρώσιμο. Εφόσον λοιπόν ο χρήστης ακολουθήσει με το χέρι του το μοτίβο κίνησης, το οποίο δημιουργεί η γαλάζια φωτεινή ένδειξη της παλάμης, για το αναγραφόμενο χρονικό διάστημα, το ύφασμα απελευθερώνεται ακαριαία από το ρομπότ και εμφανίζεται στρωμένο, στη θέση τοποθέτησης (βλ. Εικόνα 6-17.20). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τα υπόλοιπα ανθρακοϋφάσματα μέχρι την επιτυχή στρώση όλων των διαθέσιμων υφασμάτων (βλ. Εικόνα 6-17.11, έως Εικόνα 6-17.29).



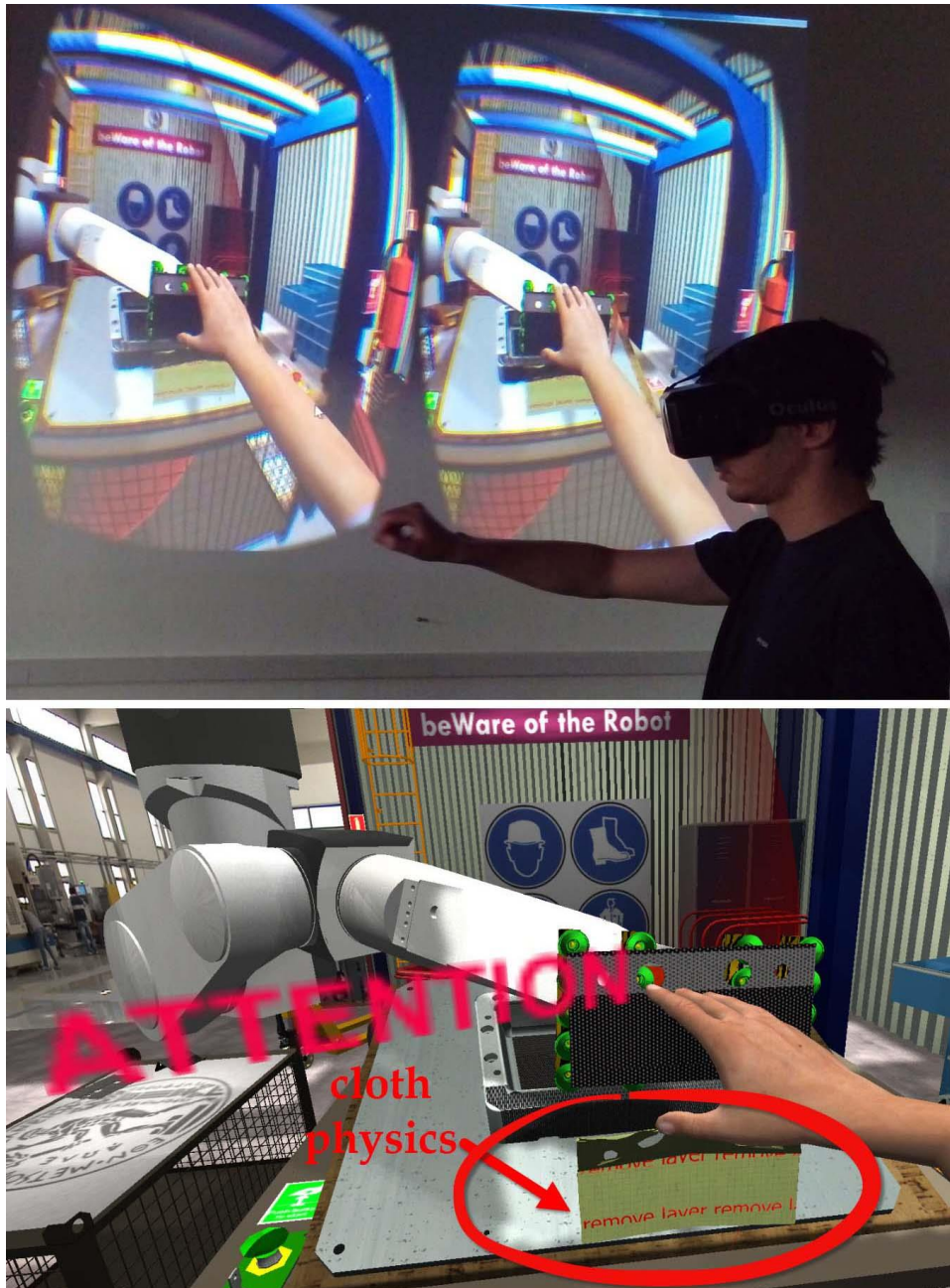
Εικόνα 6-17: Εικονογραφημένο σενάριο (storyboard) της δεύτερης περίπτωσης εφαρμογής beWare of the Robot v2.0



Εικόνα 6-18: Παράδειγμα προσάρτησης με σχέση γονέα (parenting), χειρισμού και μεταφοράς υφάσματος από το χρήστη στην έκδοση beWare of the Robot v1.0 (επάνω) και v1.5 (κάτω)

Όσον αφορά τα γνωστικά βοηθήματα/οπτικοακουστικές ενδείξεις/ συναγερμούς, και στις τρεις εκδόσεις της demo εφαρμογής, ο χώρος εργασίας του ρομπότ είναι συνέχεια ορατός με τη μορφή μιας κόκκινης ημιδιαφανούς επιφάνειας τοροειδούς μορφής, όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 6.3. Η ένδειξη αυτή υποβοηθά το χρήστη αφενός να αντιληφθεί το χώρο εργασίας και αφετέρου να είναι σε θέση να αντιλαμβάνεται σε κάθε χρονική στιγμή εάν βρίσκεται ο ίδιος εντός αυτού του χώρου. Στην πρώτη περίπτωση εφαρμογής (εκδόσεις 1.0 και 1.5), όταν ο χρήστης εισέρχεται σε αυτόν και για όσο διάστημα βρίσκεται εντός αυτού, η κόκκινη ένδειξη του όγκου εργασίας αναβοσβήνει προειδοποιητικά (παλμικό εφέ/οπτικός συναγερμός) και συνοδεύεται από έναν ηχητικό συναγερμό, υπενθυμίζοντας έτσι συνεχώς στο χρήστη τον εν δυνάμει κίνδυνο. Στη δεύτερη περίπτωση εφαρμογής (έκδοση beWare of the Robot v2.0), η ένδειξη του χώρου εργασίας παραμένει στη σκηνή αλλά αφαιρέθηκε από αυτόν ο ηχητικός συναγερμός και προσαρμόστηκε η συνθήκη έναρξης του αναβοσβήσιματος ώστε να ικανοποιείται όταν ισχύουν ταυτόχρονα οι εξής δύο συνθήκες: ο άνθρωπος να βρίσκεται εντός του και

ταυτόχρονα το ρομπότ να κινείται. Με την τροποποίηση αυτή, ο κόκκινος όγκος εργασίας μετατράπηκε σε ένα πρώτου βαθμού παραστατικό βοήθημα αντίληψης της κίνησης και της θέσης του βραχίονα, μόνο όταν υπάρχει ουσιαστικός κίνδυνος λόγω κίνησης του ρομπότ, καθώς το σενάριο εργασίας απαιτεί την παρουσία του ανθρώπου μέσα στο χώρο εργασίας του ρομπότ για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα κατά το οποίο το ρομπότ δεν κινείται (π.χ. καθήκον στρώσης πάνω στο καλούπι). Η παραπάνω τροποποίηση της έκδοσης 2.0 έγινε για την αποφυγή επανειλημμένων ή αχρείαστων ενεργοποιήσεων του παραστατικού αυτού συναγερμού κατά την από κοινού εκτέλεση καθήκοντος.

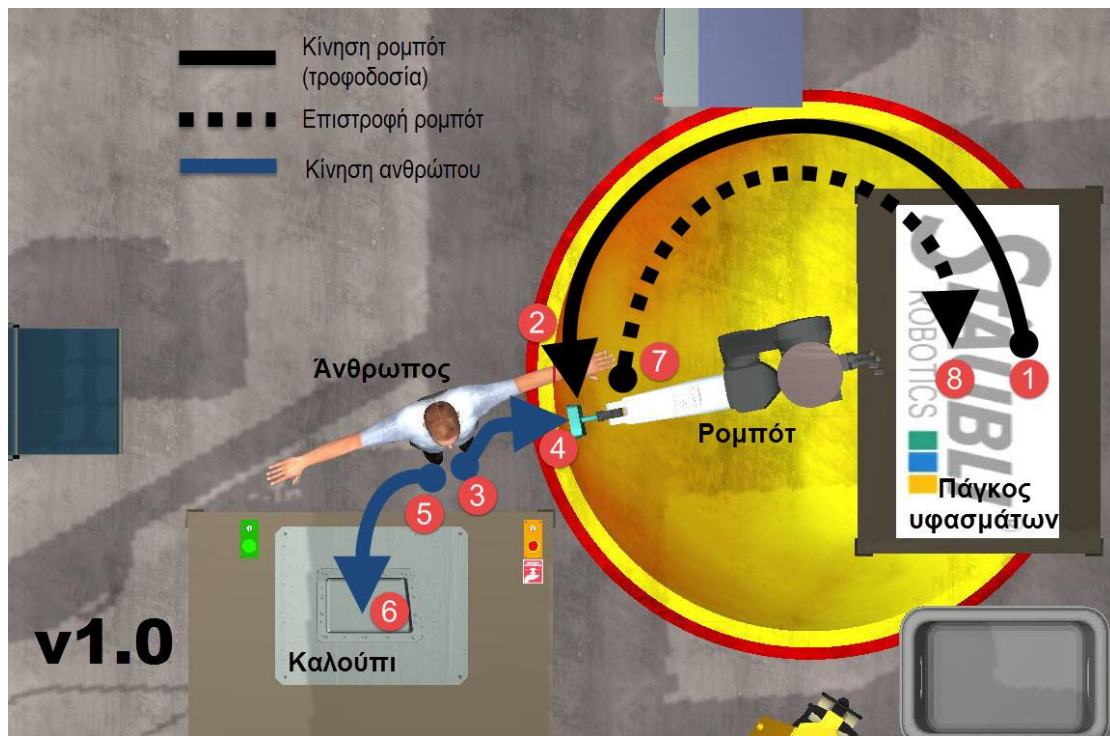


Εικόνα 6-19: Λεπτομέρεια συμπεριφοράς φυσικής υφάσματος (δημιουργία πτυχώσεων κατά την ελεύθερη πτώση του αυτοκόλλητου καλύμματος).

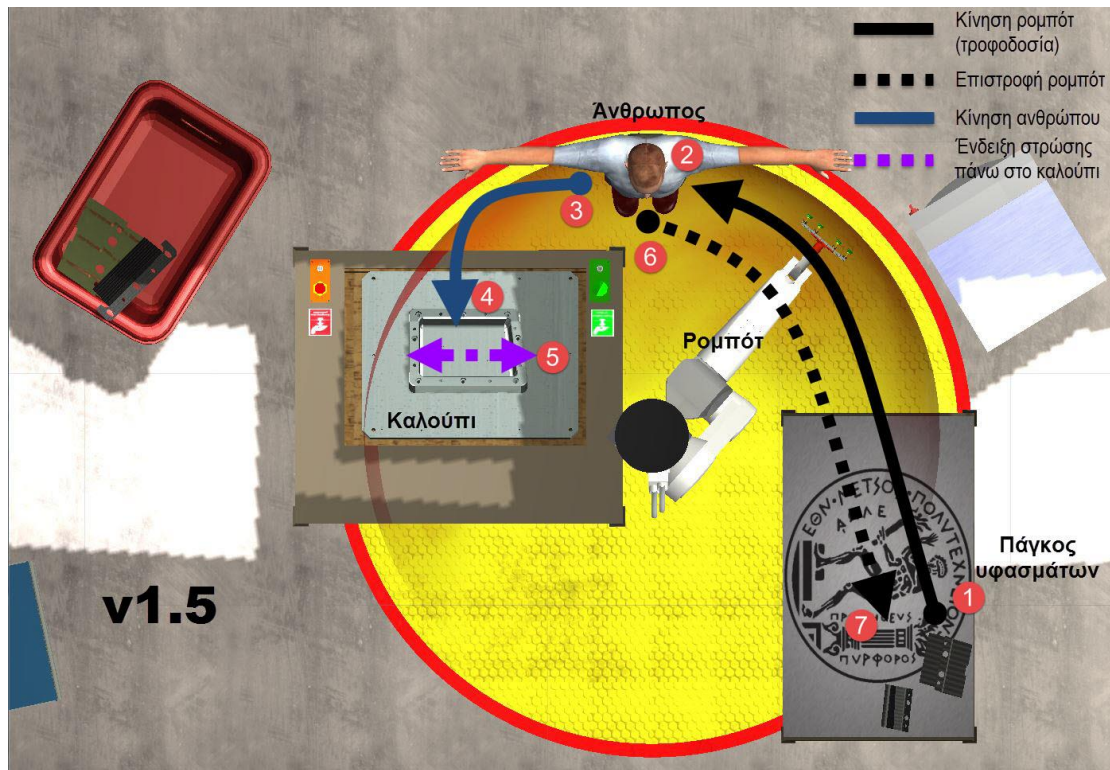
Στην έκδοση 2.0, έχει προστεθεί κατά την κίνηση του ρομπότ το παραστατικό βοήθημα του όγκου κίνησης, ο οποίος είναι ένα κίτρινο ημιδιαφανές τμήμα κυλινδρικού δακτυλίου, προσαρτημένο στον πήχη του ρομποτικού βραχίονα. Η ένδειξη αυτή ακολουθεί το ρομπότ από την τέταρτη άρθρωση και μετά, ενώ είναι ορατή μόνον όσο το ρομπότ κινείται. Όταν έλθει σε επαφή με το χρήστη και για όσο διάστημα εξακολουθεί η επαφή, το χρώμα του γίνεται κόκκινο, εμφανίζεται το οπτικό μήνυμα προειδοποίησης “ATTENTION” και ξεκινά ο ηχητικός συναγερμός (βλ. Εικόνα 6-17/7-8-10-16-22-24). Αποτελεί ένα επιπλέον, δεύτερου βαθμού, στοχευμένο και πιο ακριβές βοήθημα για την ευκολότερη αντίληψη του βραχίονα στο χώρο και την αποφυγή σύγκρουσης, ενώ ενεργοποιείται μόνο όταν το άκρο του ρομπότ είναι πάρα πολύ κοντά (<1m) στα χέρια ή στο σώμα του ανθρώπου.

Επίσης, στην έκδοση 2.0 έχουν προστεθεί οι δύο τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας A-P, (i) με επιβράδυνση και (ii) με υποχώρηση του ρομπότ έναντι του ανθρώπου. Λεπτομερής περιγραφή για τη χρήση γνωστικών βοηθημάτων, τις τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας και τους μηχανισμούς ενεργοποίησης αυτών γίνεται στο Κεφάλαιο 8.

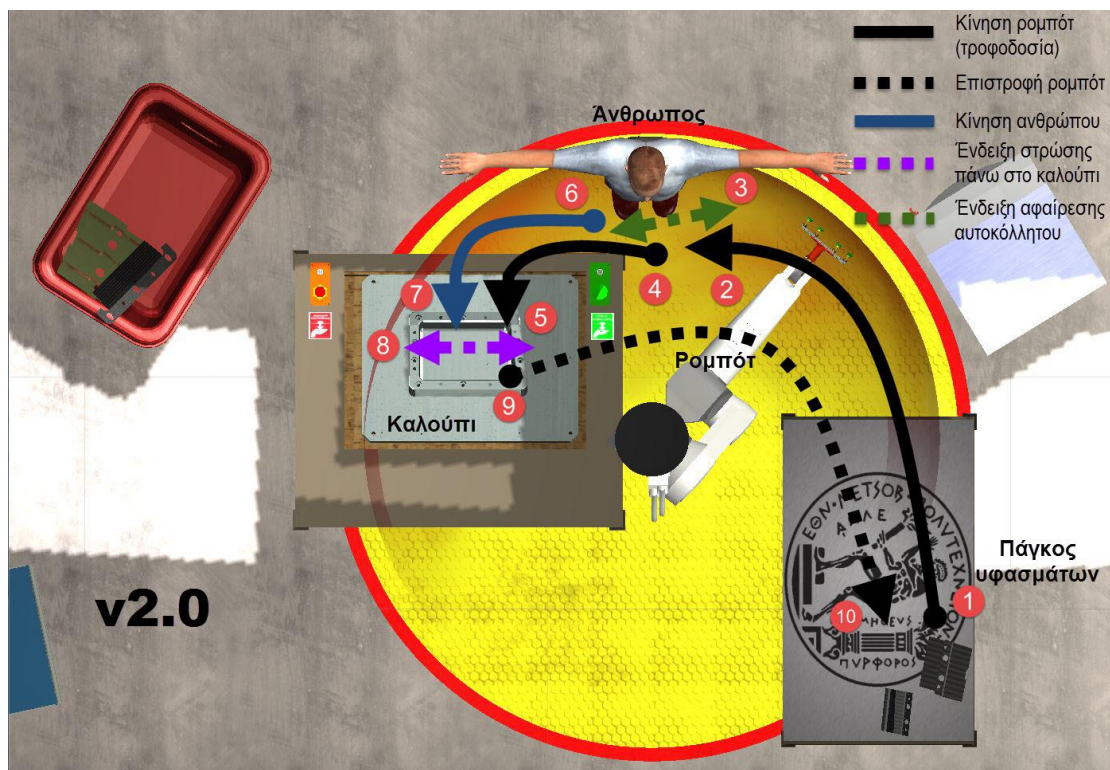
Τέλος, στις Εικόνα 6-20, Εικόνα 6-21 και Εικόνα 6-22, παρουσιάζονται σχηματικά οι βασικότερες διαφορές στο σενάριο κίνησης και συνεργασίας A-P μεταξύ των εκδόσεων beWare of the Robot v1.0, v1.5 και v2.0 αντίστοιχα.



Εικόνα 6-20: Σχηματική αναπαράσταση του σεναρίου συνεργασίας στην πρώτη περίπτωση εφαρμογής (έκδοση beWare of the Robot v1.0)



Εικόνα 6-21: Σχηματική αναπαράσταση του σεναρίου συνεργασίας στην πρώτη περίπτωση εφαρμογής (έκδοση beWare of the Robot v1.5)

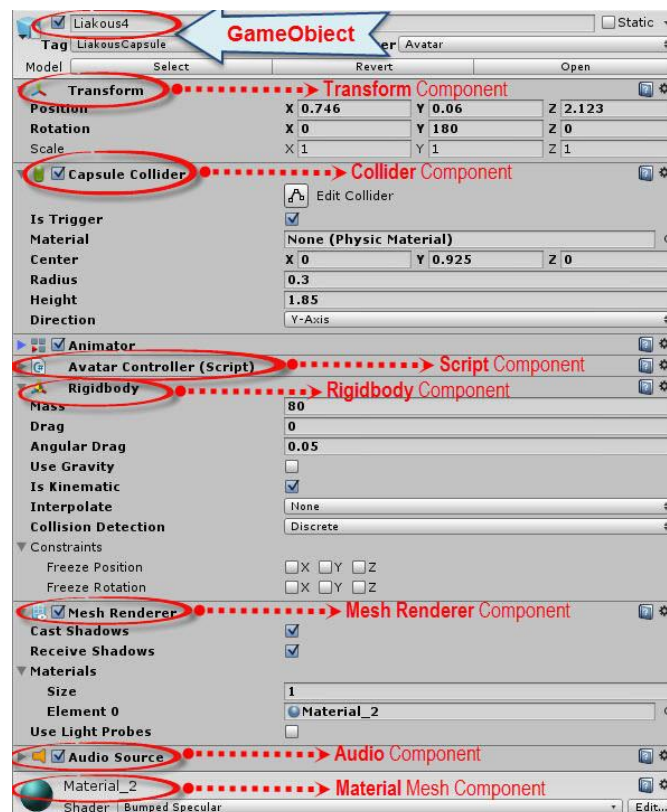


Εικόνα 6-22: Σχηματική αναπαράσταση του σεναρίου συνεργασίας στη δεύτερη περίπτωση εφαρμογής (έκδοση beWare of the Robot v2.0)

6.5. Θεμελιώδεις έννοιες του περιβάλλοντος Unity 3d

Στην Ενότητα αυτή κρίνεται σκόπιμο να παρουσιασθούν πολύ συνοπτικά κάποια βασικά στοιχεία και θεμελιώδεις έννοιες του περιβάλλοντος Unity 3d, με το οποίο υλοποιήθηκαν οι περιπτώσεις εφαρμογής, προκειμένου να είναι δυνατή η κατανόηση ορισμένων όρων οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια. Η αναλυτική παρουσίαση των δυνατοτήτων του είναι εκτός του ενδιαφέροντος της παρούσας διδακτορικής διατριβής, καθότι το περιβάλλον Unity 3d χρησιμοποιείται ως εργαλείο υλοποίησης του ΕΠε και δεν αποτελεί τμήμα του ερευνητικού αντικείμενου.

Το Unity 3d είναι μια εξαιρετικά διαδεδομένη πλατφόρμα δημιουργίας βιντεοπαιχνιδιών, η οποία περιλαμβάνει τη μηχανή παιχνιδιού (game engine) και το Ολοκληρωμένο Περιβάλλον Ανάπτυξης (IDE). Όλοι οι απαραίτητοι πόροι (resources) για τη δημιουργία της εφαρμογής (demo) επίδειξης (γραφικά μοντέλα αντικειμένων, υλικά, υφές, ήχοι κλπ.) εισάγονται στο Unity ως assets, τα οποία περιλαμβάνονται σε GameObjects. Τα GameObjects είναι τα θεμελιώδη αντικείμενα του Unity, τα οποία από μόνα τους δεν πραγματοποιούν κάτι, αλλά λειτουργούν ως περιέκτες (containers) των στοιχείων/χαρακτηριστικών (components), τα οποία είναι στην ουσία οι κλάσεις που προσαρτώνται στο GameObject και προσθέτουν λειτουργικότητα.



Εικόνα 6-23: Το GameObject του ανθρωποειδούς και τα προσαρτημένα σε αυτό στοιχεία (components)

Ενδεικτικά, τα χαρακτηριστικά (components) μπορεί να είναι μετασχηματισμοί, κάμερες, υλικά, ανιχνευτές σύγκρουσης, στοιχεία συμπεριφοράς φυσικής, ή ένα στοιχείο κώδικα το οποίο θα προσδίδει στο αντικείμενο οποιαδήποτε άλλη επιθυμητή συμπεριφορά (π.χ. αλληλεπίδραση σε πραγματικό χρόνο, κινηματική ρομπότ κλπ.). Για παράδειγμα, το αντικείμενο του ανθρωποειδούς, είναι ένα κενό GameObject στο οποίο έχουν προστεθεί επιμέρους στοιχεία (components), τα οποία συνθέτουν ένα λειτουργικό μοντέλο με την επιθυμητή συμπεριφορά (βλ. Εικόνα 6-23). Στο Unity εργαζόμαστε πάντα σε μία ή περισσότερες σκηνές, η οποία ανήκει σε ένα ευρύτερο project, το οποίο περιέχει όλους τους διαφορετικούς πόρους και σκηνές. Η δομή του περιβάλλοντος εργασίας του Unity παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-24. Η έκδοση beWare of the Robot v1.0 αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Unity 3, ενώ οι εκδόσεις beWare of the Robot v1.5 και v2.0 αναπτύχθηκαν σε περιβάλλον Unity 4.



Εικόνα 6-24: Επισκόπηση του περιβάλλοντος ενός Unity project: ο project browser με τα assets του project, η σκηνή, η ιεραρχία με όλα τα GameObjects της σκηνής και ο inspector, με τα components του επιλεγμένου GameObject.

Βασικό στοιχείο κάθε εφαρμογής ΕΠ είναι τα στοιχεία κώδικα (script components), τα οποία αντιμετωπίζονται από τη μηχανή παιχνιδιού ως πρωτότυπα στοιχεία (components) γραμμένα από το χρήστη. Η σύνταξη κώδικα είναι απαραίτητη σε κάθε διαδραστικό ΕΠε πραγματικού χρόνου και ενδεικτικά μπορεί να αφορά: κίνηση στο χώρο, μηχανισμούς triggering, χρονικά γεγονότα, ανάδραση σε εισόδους ή γεγονότα, ανίχνευση σύγκρουσης, συμπεριφορές φυσικής, κινηματικής κλπ. Το Unity υποστηρίζει τρεις αντικειμενοστραφείς γλώσσες προγραμματισμού για τη σύνταξη κώδικα: (i) τη C#, (ii) τη UnityScript, η οποία είναι σχεδόν ταυτόσημη με τη JavaScript και (iii) τη Boo, η οποία είναι εμπνευσμένη από τη σύνταξη της Python.

Οι κυριότερες συναρτήσεις οι οποίες εμπεριέχονται στη μητρική κλάση MonoBehaviour του Unity είναι οι εξής (βλ. Εικόνα 6-25): (i) η συνάρτηση Awake, η οποία τρέχει άπαξ, πριν το πρώτο frame του παιχνιδιού και συνήθως χρησιμοποιείται για αρχικοποίηση σε στιγμιότυπα κλάσεων, (ii) η συνάρτηση Start, η

οποία τρέχει άπαξ, κατά το πρώτο frame, (iii) η συνάρτηση Update η οποία καλείται σε κάθε frame και είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη συνάρτηση για την υλοποίηση οποιασδήποτε συμπεριφοράς μεταβάλλεται στη διάρκεια του χρόνου (κίνηση, αντίδραση, ενεργοποίηση αντικειμένων, μεταβολή παραμέτρων), (iv) η συνάρτηση FixedUpdate, η οποία χρησιμοποιείται κάθε φορά που πρόκειται να γίνει ένας υπολογισμός φυσικής (π.χ. συμπεριφορά στερεού σώματος). Η συνάρτηση Update παρουσιάζει χρονική μεταβλητότητα στο βήμα κατά την εκτέλεση της εφαρμογής, ανάλογα με την ταχύτητα του επεξεργαστή και τον επιτυγχανόμενο ρυθμό των frames ανά δευτερόλεπτο (fps), γι' αυτό και χρησιμοποιείται η FixedUpdate σε εφαρμογές φυσικής, όπου απαιτείται σταθερό χρονικό βήμα. Σε όλους τους πρωτότυπους κώδικες που συντάχθηκαν για την εφαρμογή επίδειξης (demo) beWare of the Robot, χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα C#.

```
1 using UnityEngine;
2 using System.Collections;
3
4 public class NewBehaviourScript : MonoBehaviour
5 {
6
7     void Awake()
8     {
9
10    }
11
12    void Start ()
13    {
14
15    }
16
17
18    void Update ()
19    {
20
21    }
22
23    void FixedUpdate()
24    {
25        |
26    }
27 }
28
```

Εικόνα 6-25: Οι σημαντικότερες συναρτήσεις χρονικών γεγονότων της μητρικής κλάσης MonoBehaviour του Unity.

Ένας άλλος πολύ σημαντικός τύπος πόρων (assets) στο Unity είναι τα Prefabs. Τα Prefabs είναι επαναχρησιμοποιούμενα στιγμιότυπα ενός GameObject, τα οποία «κλωνοποιούν» το αρχικό αντικείμενο μαζί με τις ιδιότητες και τα στοιχεία του (components). Στη σκηνή μπορούν να βρίσκονται περισσότερα του ενός prefabs και κάθε αλλαγή που πραγματοποιείται στο αρχικό, μεταφέρεται αυτόματα και στα στιγμιότυπα. Το πλεονέκτημα των prefabs είναι ότι είναι επαναχρησιμοποιούμενα και είναι πολύ εύκολη η δημιουργία ή η καταστροφή ενός στιγμιότυπου κατά την εκτέλεση της εφαρμογής (runtime) με λίγες μόνο γραμμές κώδικα. Για παράδειγμα, στην υλοποίηση του σεναρίου της demo εφαρμογής beWare of the Robot, για την εισαγωγή, τη μεταβίβαση και τη στρώση των ανθρακούφασμάτων, την εμφάνιση

μηνυμάτων και ενδείξεων αλλά και στο ίδιο το ανθρωποειδές έχουν χρησιμοποιηθεί prefabs.

Οι μετασχηματισμοί (Transform components) είναι τα βασικότερα κινηματικά στοιχεία και συνοδεύουν όλα τα αντικείμενα, αποτελώντας ουσιαστικά τους ομογενείς μετασχηματισμούς των GameObjects. Οι μετασχηματισμοί περιλαμβάνουν την θέση, την περιστροφή γύρω από τους τρεις άξονες εκπεφρασμένη σε γωνίες Euler και την κλίμακα/μέγεθος του αντικειμένου σε κάθε άξονα.

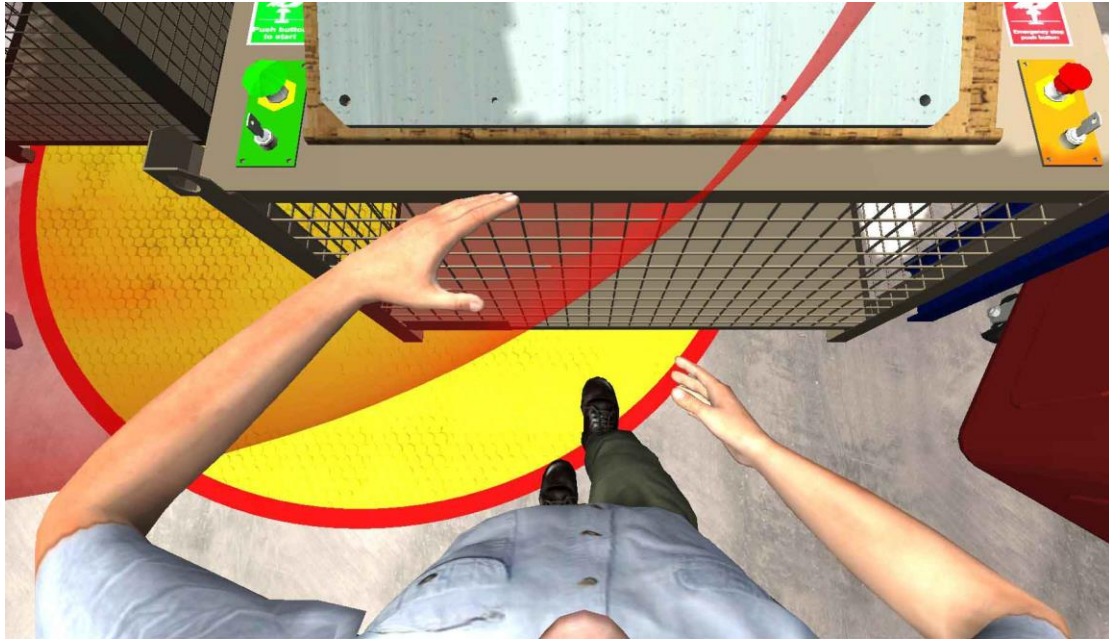
Τέλος, οι «συγκρουστές» (colliders) ή, πιο δόκιμα «ανιχνευτές συγκρούσεων», είναι αόρατα στοιχεία (components) της βιβλιοθήκης συμπεριφοράς φυσικής του Unity, τα οποία καθορίζουν τη μορφή του αντικειμένου όσον αφορά την ανίχνευση φυσικών συγκρούσεων. Οι «συγκρουστές» μπορεί να έχουν την ίδια μορφή με το πλέγμα του αντικειμένου πάνω στο οποίο βρίσκονται (mesh colliders), ή να έχουν τη μορφή βασικών σχημάτων (σφαίρα, κουτί, κάψουλα κλπ.) για ταχύτερους υπολογισμούς. Ακόμα, οι «συγκρουστές» μπορούν να προκαλούν φυσική αλληλεπίδραση στερεών σωμάτων με τα άλλα αντικείμενα με τα οποία συγκρούονται, ή να είναι τύπου «σκανδάλης» (trigger) όταν δεν επιθυμούνται υπολογισμοί φυσικής, παρά μόνο να προκληθεί/διεγερθεί κάποιο γεγονός (π.χ. συναγερμός εισόδου του χρήστη στο ρομποτικό χώρο εργασίας).

6.6. Το ανθρωποειδές (avatar) και η ανίχνευση/αναγνώρισης κίνησης (tracking)

Η χρήση λειτουργικού μοντέλου ανθρωποειδούς (avatar) είναι από ελάχιστη έως ανύπαρκτη στις εφαρμογές συνεργασίας A-P που καταγράφονται στη βιβλιογραφία, ανεξάρτητα από το βαθμό εμπύθισης που επιτυγχάνει η καθεμία εφαρμογή. Στις περισσότερες χρησιμοποιείται είτε κάποια σταθερή κάμερα, ή απλή οπτική πρώτη προσώπου (first-person controller), η οποία προσομοιώνει αφαιρετικά την όραση και την πλοήγηση του χρήστη στο ΕΠε. Οι σχεδιαστές ΕΠε σε εφαρμογές συστημάτων παραγωγής, δείχνουν να υποβαθμίζουν τη συνεισφορά στην παρουσία που αποδεδειγμένα παρουσιάζει η ύπαρξη ενός ρεαλιστικού ανθρωποειδούς, ή έστω τμήματος του σώματος ορατό από την οπτική πρώτου προσώπου (Kilteni, Groten, & Slater, 2012). Η εισαγωγή ενός ρεαλιστικού εικονικού σώματος, το οποίο θα αισθάνεται ο χρήστης ως δικό του, μπορεί να εντείνει την αίσθηση της παρουσίας στον εικονικό κόσμο, η οποία με τη σειρά της έχει θετικό αντίκτυπο στην αποτελεσματικότητα του ΕΠε, αλλά και στην απόκτηση γνώσης για τον εικονικό χώρο (Bowman et al., 2004; Usoh et al., 1999). Μάλιστα στο (Usoh et al., 1999) τονίζεται η σημασία της σχέσης μεταξύ του χρήστη και του εικονικού του σώματος, καθώς και η επίδραση που έχει αυτή η σχέση στην εμπειρία του χρήστη στο ΕΠε.

Αποφασίστηκε λοιπόν η εισαγωγή ενός πρωτότυπου, ρεαλιστικού, πλήρως λειτουργικού και λεπτομερούς ανθρωποειδούς, αποτελούμενου από 11000 πολύγωνα, με αναγνώριση κίνησης, με ρούχα εργασίας και υφή πραγματικού δέρματος, στοχεύοντας σε πιο αποτελεσματική και με εύροια συνεργασία μεταξύ ανθρώπου και ρομπότ. Μάλιστα, με την προσθήκη της δυνατότητας αναγνώρισης

κίνησης της κεφαλής του χρήστη μέσω της κάσκας στερεοσκοπίας (head tracking), όταν ο χρήστης κοιτάει προς τα κάτω, ή όταν απλά αντικρίζει τα χέρια του, μπορεί να δει τη ρεαλιστική απεικόνιση των κινούμενων χεριών του, αλλά και τμήμα του σώματός του (βλ. Εικόνα 6-26). Το τελευταίο, θεωρείται βασικό, αλλά ταυτόχρονα και επαρκές σε ΕΠε με χρήση οπτικής πρώτου προσώπου, για την αίσθηση της παρουσίας του χρήστη και της «ιδιοκτησίας» αυτού του σώματος (Kilteni et al., 2012; Kilteni, Maselli, Kording, & Slater, 2015). Το φαινόμενο αυτό υποστηρίζεται και εντείνεται με τη χρήση της κάσκας στερεοσκοπίας, αφού ο χρήστης απομονώνεται πλήρως από τον πραγματικό κόσμο και κατ' επέκταση από το πραγματικό του σώμα.



Εικόνα 6-26: Αποψη πρώτου προσώπου του εικονικού σώματος του ανθρωποειδούς καθώς ο χρήστης κοιτάει προς τα κάτω.

Το μοντέλο του ανθρωποειδούς, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-27, είναι πρωτότυπο και δημιουργήθηκε με το online εργαλείο Evolver (“Evolver 3D digital avatar website,” 2012) ως ένα ενδεδυμένο μοντέλο πλέγματος με ειδικά διαμορφωμένο πρόσωπο (κλώνος). Στη συνέχεια, προκειμένου να αποκτήσει κινηματική συμβατότητα με το Unity, εισήχθη στο 3ds Max όπου προσαρμόστηκε σε αυτό κινηματικός σκελετός διπόδου (biped) και κάποιες βασικές στάσεις (στάση τύπου «T» και «Y»). Ο σκελετός του διπόδου φαίνεται στην Εικόνα 6-27 (δεξιά), ενώ στην Εικόνα 6-28 παρουσιάζεται η κινηματική λειτουργικότητα του ανθρωποειδούς: ο πλήρης έλεγχος του πλέγματος, του δέρματος και των ρούχων του ανθρωποειδούς, με τη μεταβολή των γωνιών των αρθρώσεων του σκελετού.

Στο Unity, η αναπαράσταση του αντικειμένου του ανθρωποειδούς γίνεται με μία ευθεία δενδροειδή ιεραρχία, με το μοντέλο πλέγματος στην κορυφή ως γονέα και μετασχηματισμούς (Transforms) ως τέκνα του, διατεταγμένα σε επίπεδα ώστε να σχηματίζεται η κινηματική αλυσίδα (βλ. Εικόνα 6-27 αριστερά).



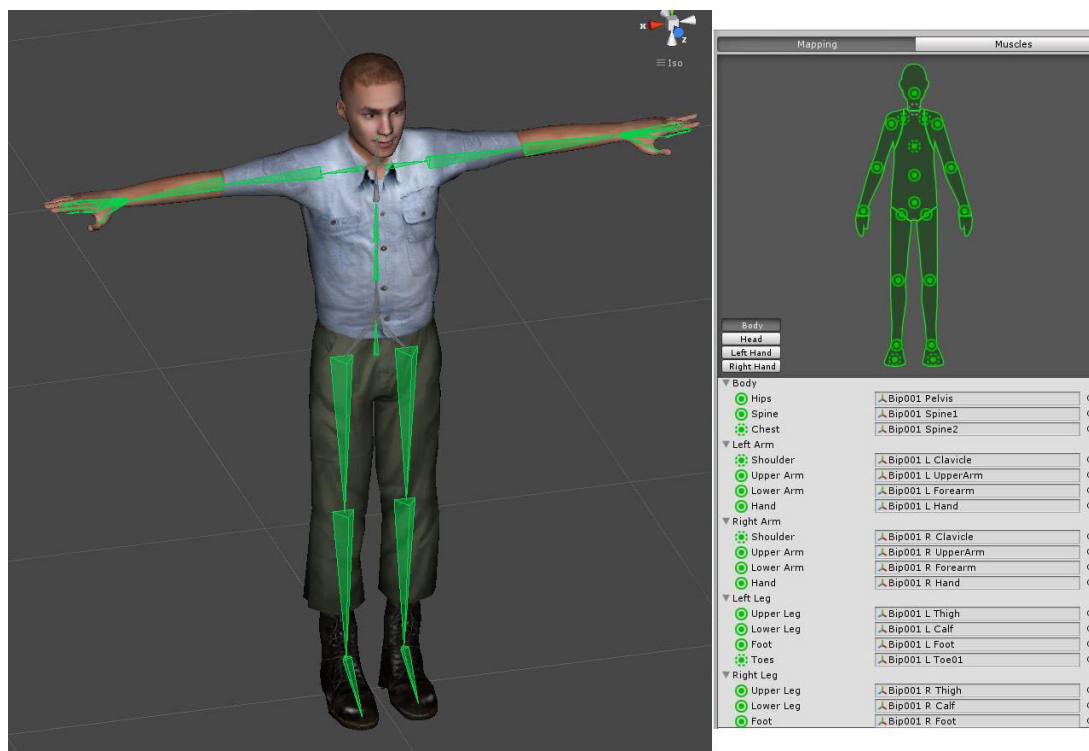
Εικόνα 6-27: Το μοντέλο του ανθρωποειδούς στην αρχική του στάση (T) μέσα στο ΕΠε της έκδοσης beWare of the Robot v1.0



Εικόνα 6-28: Το ανθρωποειδές σε διαφορετικές στάσεις και ο ενσωματωμένος σκελετός του με γκρι χρώμα.

Στις εκδόσεις 1.0 και 1.5, ο κορμός του ανθρωποειδούς περιβάλλεται από μία κάψουλα ανίχνευσης συγκρούσεων (capsule collider), ενώ δύο μικρότερες κάψουλες περικλείουν τα χέρια του ανθρωποειδούς (βλ. Εικόνα 6-27). Οι ανιχνευτές σύγκρουσης χρησιμοποιούνται από τη μηχανή φυσικής του Unity για έλεγχο σύγκρουσης και για την έναρξη γεγονότων ή συμπεριφορών, όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 6.5. Στα χέρια, τον κορμό και το κεφάλι του χρήστη έχει προστεθεί στοιχείο φυσικής στερεού σώματος. Από τα ακροδάκτυλα του χρήστη εκπέμπονται ακτίνες (Ray casting) για την υλοποίηση της λήψης και της πρόσδεσης του υφάσματος στα χέρια του χρήστη. Για την αναγνώριση και την παρακολούθηση κίνησης του χρήστη, χρησιμοποιούνται 11 σημεία (Unity Transforms) του σκελετού του, τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 6-27.

Στην έκδοση 2.0, για την αναγνώριση και την παρακολούθηση κίνησης του χρήστη, χρησιμοποιούνται 20 σημεία (αρθρώσεις) του σκελετού του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-29. Μία κάψουλα ανίχνευσης σύγκρουσης περιβάλλει το σύνολο του κορμού του ανθρωποειδούς, ενώ το άνω τμήμα του σώματος περιβάλλεται από μια άλλη, μικρότερη κάψουλα ανίχνευσης συγκρούσεων, η οποία μπορεί να ακολουθεί καλύτερα το σώμα σε κάμψη. Δύο κάψουλες περικλείουν το κάθε τα χέρι του ανθρωποειδούς, μία το βραχίονα και μία μικρότερη την παλάμη.



Εικόνα 6-29: Ο σκελετός, το μοντέλο του ανθρωποειδούς και τα 20 σημεία που χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση κίνησης στην έκδοση beWare of the Robot v2.0

Η κύρια κάμερα, μέσα από την οποία επιτυγχάνεται η οπτική πρώτου προσώπου, είναι προσαρτημένη ως τέκνο στο μετασχηματισμό του κεφαλιού του χρήστη, στο ύψος των ματιών του και με εύρος πεδίου όρασης (field of view) 60° στον τοπικό κατακόρυφο άξονα (βλ. Εικόνα 6-30). Κατ' αυτό τον τρόπο σχηματίζεται ένας χαρακτήρας με οπτική Α' προσώπου (first person point of view/first person controller), ο οποίος προσφέρει στο χρήστη την οπτική μέσα από τα μάτια του ανθρωποειδούς και την άποψη των χεριών του, εφόσον συνδυάζεται με αναγνώριση κίνησης.



Εικόνα 6-30: Η κύρια κάμερα (main camera) στο ύψος των ματιών του ανθρωποειδούς και η επιτυγχάνόμενη άποψη Α΄ προσώπου στο κάτω δεξιά πλαίσιο.

6.7. Ο ρομποτικός βραχίονας και σύντομη κινηματική του

Στο σενάριο συνεργασίας A-P χρησιμοποιείται ο βιομηχανικός ρομποτικός βραχίονας Stäubli™ RX 90L, ο οποίος είναι ένα αρθρωτό ρομπότ 6 περιστροφικών βαθμών ελευθερίας. Ο πραγματικός ρομποτικός βραχίονας (βλ. Εικόνα 6-31) χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές χειρισμού ελαφρών αντικειμένων με μέγιστο βάρος τα 6kg, ή για εφαρμογές βαφής, ψεκασμού plasma κλπ., εντός ενός εύρους 1185 mm χωρίς το εργαλείο. Σε όλες τις εκδόσεις της demo εφαρμογής beWare of the Robot θεωρείται πνευματική ρομποτική συγκράτηση του τεμαχίου ανθρακούφασματος με υποπίεση (κενό), καθότι τα τεμάχια ανθρακούφασματος είναι ελαφρά και απαιτείται ταχύτητα και ευελιξία στο χειρισμό. Στις εκδόσεις 1.0 και 1.5 το άκρο (πνευματική αρπάγη) του ρομπότ είναι αφαιρετικά σχεδιασμένο, ενώ στην έκδοση 2.0 έχει ληφθεί ένα έτοιμο μοντέλο πνευματικής αρπάγης (βλ. Εικόνα 6-32 και Εικόνα 6-33). Ο σχεδιασμός της αρπάγης ξεφεύγει από το ερευνητικό αντικείμενο του παρόντος διδακτορικού.

Το βιομηχανικό ρομπότ είναι ανηρτημένο ανάποδα, με το άκρο του προς το δάπεδο, από μια μεταλλική κατασκευή έτσι ώστε να μπορεί να εξυπηρετήσει και τους δύο πάγκους (ανθρακούφασμάτων και εργασίας), αλλά και να τροφοδοτήσει και να συνεργαστεί με τον άνθρωπο, όπως προβλέπεται και στις δύο περιπτώσεις εφαρμογής (βλ. Εικόνα 6-32).



Εικόνα 6-31: Ο βιομηχανικός ρομποτικός βραχίονας Stäubli™ RX 90L: αριστερά, στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ και δεξιά, σε σκηνή ΕΠε, σε περιβάλλον Unity.

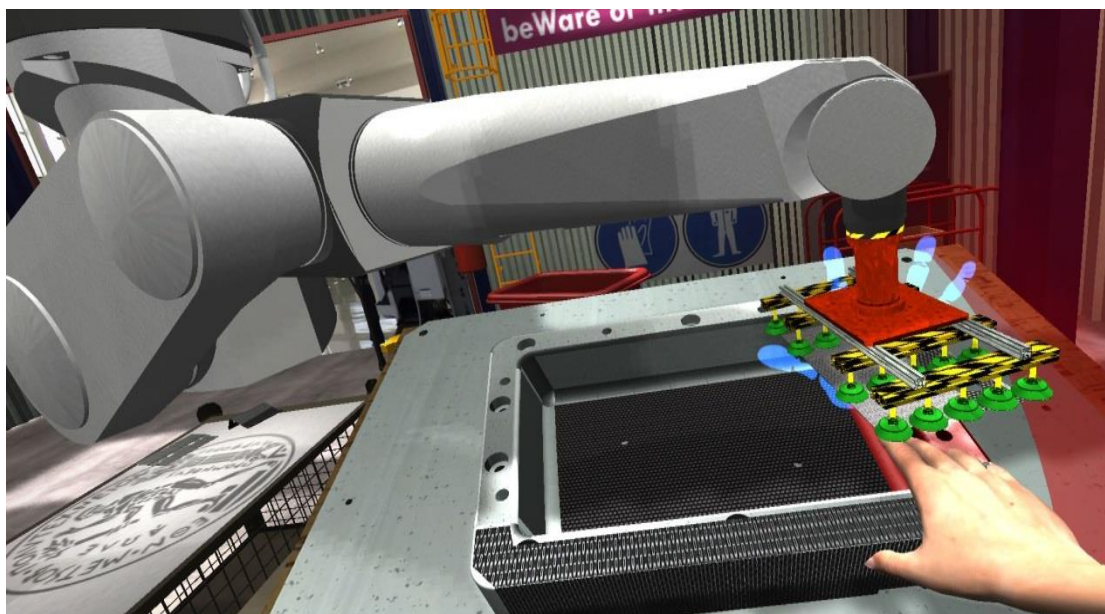
Το τριδοδιάστατο μοντέλο του ρομποτικού βραχίονα ελήφθη σε μορφή .stp (step) από την κατασκευάστρια εταιρεία, ενώ τροποποιήθηκε κατάλληλα ως προς το πλέγμα του στο Rhinoceros™ και ως προς την προσάρτηση συστημάτων συντεταγμένων ελέγχου (pivots/transforms) στο 3ds Max, έτσι ώστε ο προσανατολισμός τους στο χώρο να συμφωνεί με την κινηματική σύμβαση της μεθόδου Denavit-Hartenberg.



Εικόνα 6-32: Ο ρομποτικός βραχίονας: αριστερά στην έκδοση 1.0/1.5, με την αφαιρετικά-σχεδιασμένη πνευματική αρπάγη στο άκρο του, και δεξιά στη σκηνή της έκδοσης 2.0 με το διαφορετικό σχεδιασμό αρπάγης.

Ο χώρος εργασίας του ρομπότ αναπαρίσταται στην εικονική σκηνή με μία κόκκινη, ημιδιαφανή διαπερατή επιφάνεια τοροειδούς μορφής, δίνοντας τη δυνατότητα προβολής του ακριβούς μοντέλου του ρομποτικού χώρου εργασίας στο χρήστη, εν είδει εικονικού ολογράμματος και εν τέλει, ως γνωστικού βοηθήματος (βλ. Εικόνα 6-32). Η εποπτική ένδειξη του χώρου εργασίας είναι πάντα ορατή και η λειτουργία της έχει περιγραφεί στην Ενότητα 6.4, ενώ υλοποιήθηκε με το τριδοδιάστατο μοντέλο (πλέγμα) του χώρου εργασίας, πάνω στο οποίο έχουν

προσθεθεί ένας ανιχνευτής σύγκρουσης τύπου πλέγματος (mesh collider) και μια τρισδιάστατη πηγή ήχου (συναγερμός).



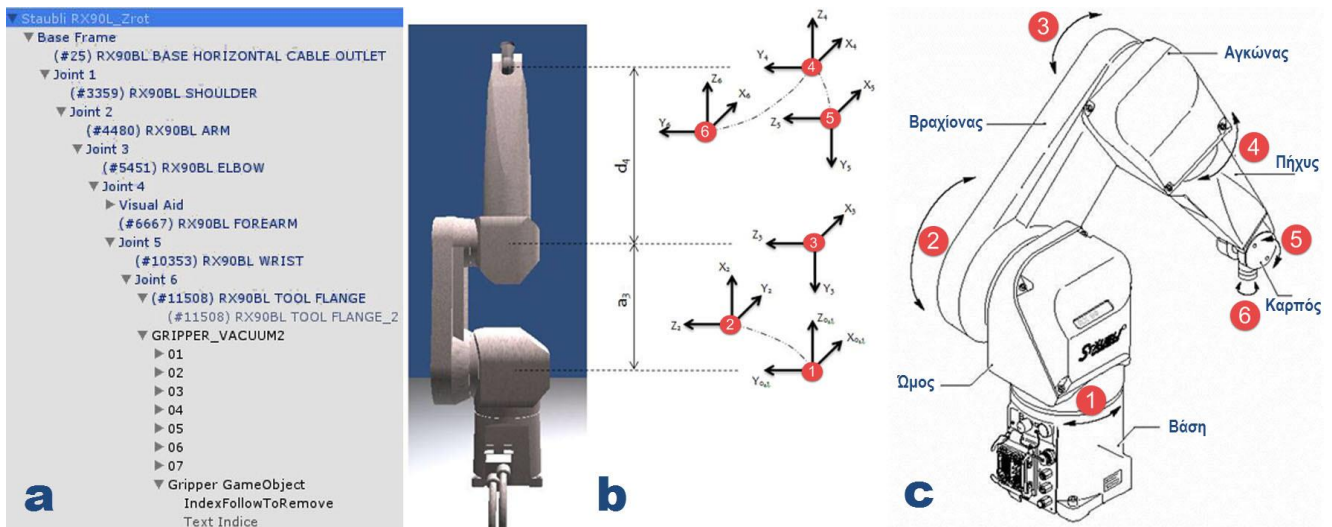
Εικόνα 6-33: Συνεργασία A-P κατά τη στρώση ανθρακοϋφάσματος στην έκδοση 2.0.

Για την ανίχνευση συγκρούσεων μεταξύ A-P, έχει προσαρτηθεί στο ρομπότ ένας συνδυασμός στοιχείων ανίχνευσης σύγκρουσης, είτε με μορφή πλέγματος, ή με μορφή στοιχειωδών σχημάτων (mesh και primitive shape colliders, βλ. Εικόνα 6-32), προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς των ελέγχων σύγκρουσης της μηχανής φυσικής. Οι ανιχνευτές σύγκρουσης με μορφή στοιχειωδών σχημάτων (π.χ. κουτί, σφαίρα, ωοειδής κάψουλα) επιβαρύνουν πολύ λιγότερο την ταχύτητα των υπολογισμών σε σχέση με τους ανιχνευτές τύπου πλέγματος περίπλοκης μορφής, ιδιαίτερα όταν συνυπάρχει στη σκηνή μεγάλος αριθμός ταυτόχρονα κινούμενων ανιχνευτών σύγκρουσης. Στις εκδόσεις 1.0 και 1.5, στη βάση και στο βραχίονα του ρομπότ έχουν προσαρμοσθεί ανιχνευτές τύπου κάψουλας, στον ώμο και τον αγκώνα υπάρχουν ανιχνευτές τύπου κουτιού, ενώ στον πήχη και το άκρο του ρομπότ προτιμήθηκαν ανιχνευτές τύπου πλέγματος, για μεγαλύτερη ακρίβεια και αποφυγή ανακριβών ενδείξεων σύγκρουσης. Στην έκδοση 2.0, όλοι οι ανιχνευτές σύγκρουσης αντικαταστάθηκαν με ανιχνευτές στοιχειώδους μορφής (σχήματος κουτιού και κάψουλας), χάριν οικονομίας υπολογιστικών πόρων. Εκτός από τους ανιχνευτές σύγκρουσης, πάνω στο άκρο του ρομπότ είναι προσαρτημένη και η πηγή του ήχου της κίνησης (κινητήρων) του ρομπότ, η οποία κινείται κι αυτή μαζί με το άκρο, επιδιώκοντας τη μέγιστη δυνατή μετατόπισή της στο χώρο και τη δημιουργία του εφέ του ήχου του κινούμενου ρομποτικού κινητήρα.

Στη σκηνή του Unity, το αντικείμενο (GameObject) του ρομπότ μοντελοποιείται με μία ευθεία δένδροειδή ιεραρχία, με το μοντέλο της βάσης στην κορυφή ως γονέα και την αλληλουχία των αρθρώσεων και των συνδέσμων ως τέκνα του, διατεταγμένα σε διαδοχικά επίπεδα, έτσι ώστε να σχηματίζεται η ευθεία κινηματική αλυσίδα (βλ. Εικόνα 6-34 αριστερά). Οι αρθρώσεις, ως γονείς του κάθε συνδέσμου,

μοντελοποιούνται με μετασχηματισμούς (Transforms) και οι σύνδεσμοι ως τέκνα τους, μοντελοποιημένοι με τα αντίστοιχα γεωμετρικά πλέγματα. Η ευθεία δένδροειδής ιεραρχία με σχέσεις γονέα/τέκνου, εξασφαλίζει την κίνηση του ρομπότ με μία ανοικτή κινηματική αλυσίδα, ξεκινώντας από την άρθρωση της βάσης (J1) ως γονέα και καταλήγοντας διαδοχικά στην τελευταία άρθρωση του καρπού (J6), ως τέκνο όλων των προηγούμενων.

Στη demo εφαρμογή beWare of the Robot, το ρομπότ ελέγχεται από κώδικα ευθείας κινηματικής, δηλαδή χρησιμοποιούνται τα τετραδρόνια (quaternions) του Unity και γωνίες Euler για τον ορισμό της κίνησης του ρομπότ και για τον υπολογισμό της θέσης του άκρου του στον τριδιάστατο χώρο.



Εικόνα 6-34: Το ρομπότ: (a) η ευθεία δένδροειδής κινηματική δομή των αρθρώσεων στην ιεραρχία του Unity, (b) η προσάρτηση των συστημάτων συντεταγμένων σύμφωνα με τη σύμβαση της μεθόδου Denavit - Hartenberg και (c) οι αρθρώσεις και τα μέλη (σύνδεσμοι) του.

Για τον προσδιορισμό της ευθείας κινηματικής του ρομπότ, χρησιμοποιείται η μέθοδος [Denavit-Hartenberg](#) (D-H). Πολύ περιληπτικά και μόνο για λόγους πληρότητας, σημειώνουμε ότι με τη μέθοδο D-H, (i) γίνεται προσάρτηση συστημάτων συντεταγμένων (ΣΣ) στους συνδέσμους και (ii) υπολογισμός των παραμέτρων D-H. Το ΣΣ {0} τοποθετήθηκε στην πρώτη άρθρωση του ρομπότ, έτσι ώστε όταν η μεταβλητή της άρθρωσης 1 είναι μηδέν, τα ΣΣ {0} και ΣΣ {1} να ταυτίζονται. Επίσης, όπως και στο πραγματικό ρομπότ, η θέση του τελικού σημείου δράσης μετράται ως προς αυτό το σύστημα (βλ Εικόνα 6-34b,c).

Ο προκύπτων πίνακας των παραμέτρων D-H του ρομποτικού βραχίονα είναι ο εξής:

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	0	-90	0	θ_2
3	a_3	0	0	θ_3

4	0	90	d_4	θ_4
5	0	-90	0	θ_5
6	0	90	0	θ_6

Πίνακας 6-1: Πίνακας παραμέτρων D - H για το Staubli RX90L

Με τη συμπλήρωση του πίνακα D-H, υπολογίζονται στη συνέχεια οι ομογενείς μετασχηματισμοί κάθε συνδέσμου ως προς τον προηγούμενο. Ο συμβολισμός που χρησιμοποιείται για τους ομογενείς μετασχηματισμούς είναι: ${}^{i-1}T_i$ και περιγράφεται ως η θέση και η περιστροφή του συστήματος συντεταγμένων i ως προς το σύστημα συντεταγμένων $i - 1$. Οι πίνακες ομογενούς μετασχηματισμού κάθε συνδέσμου¹² προκύπτουν ως εξής:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1T_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^3T_4 = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -d_4 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} c_5 & -s_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_5 & -c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^5T_6 = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Οπότε προκύπτει και ο ομογενής μετασχηματισμός του άκρου ως προς τη βάση:

$${}^0T_6 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \cdot {}^4T_5 \cdot {}^5T_6 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

όπου:

$$r_{11} = c_1 \cdot [c_{23} \cdot (c_4 \cdot c_5 \cdot c_6 - s_4 \cdot s_6) - s_{23} \cdot s_5 \cdot s_6] + s_1 \cdot (c_4 \cdot s_6 - s_4 \cdot c_5 \cdot c_6)$$

$$r_{12} = c_1 \cdot [c_{23} \cdot (-c_4 \cdot c_5 \cdot s_6 - s_4 \cdot c_6) + s_{23} \cdot s_5 \cdot s_6] + s_1 \cdot (s_4 \cdot c_5 \cdot s_6 - c_4 \cdot c_6)$$

$$r_{13} = c_1 \cdot (c_{23} \cdot c_4 \cdot s_5 + s_{23} \cdot c_5) - s_1 \cdot s_4 \cdot s_5$$

$$r_{21} = s_1 \cdot [-s_{23} \cdot s_5 \cdot c_6 - c_{23} \cdot (s_4 \cdot s_6 - c_4 \cdot c_5 \cdot c_6)] + c_1 \cdot (s_4 \cdot c_5 \cdot c_6 + c_4 \cdot s_6)$$

$$r_{22} = s_1 \cdot [c_{23} \cdot (-c_4 \cdot c_5 \cdot s_6 - s_4 \cdot c_6) + s_{23} \cdot s_5 \cdot s_6] - c_1 \cdot (s_4 \cdot c_5 \cdot s_6 - c_4 \cdot c_6)$$

$$r_{23} = -s_{23} \cdot (c_4 \cdot c_5 \cdot c_6 - s_4 \cdot s_6) - c_{23} \cdot s_5 \cdot c_6$$

¹² Όπου: $c_1 = \cos(\theta_1)$, $s_1 = \sin(\theta_1)$, $c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$, $s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$

$$r_{31} = -s_{23} \cdot (c_4 \cdot c_5 \cdot c_6 - s_4 \cdot s_6) - c_{23} \cdot s_5 \cdot c_6$$

$$r_{32} = s_{23} \cdot (c_4 \cdot c_5 \cdot s_6 + s_4 \cdot c_6) + c_{23} \cdot s_5 \cdot s_6$$

$$r_{33} = c_{23} \cdot c_5 - s_{23} \cdot c_4 \cdot s_5$$

$$p_x = c_1 \cdot s_{23} \cdot d_4 + c_1 \cdot c_2 \cdot a_3$$

$$p_y = s_1 \cdot s_{23} \cdot d_4 + s_1 \cdot c_2 \cdot a_3$$

$$p_z = c_{23} \cdot d_4 - a_3 \cdot s_2$$

6.8. Τρισδιάστατες διεπαφές αλληλεπίδρασης με το χρήστη (3D UIs)

Στην παρούσα Ενότητα θα παρουσιασθούν πολύ συνοπτικά κάποια βασικά στοιχεία για τις διεπαφές (συσκευές) τρισδιάστατης αλληλεπίδρασης με το χρήστη, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στις δύο περιπτώσεις εφαρμογής, προκειμένου να είναι δυνατή η κατανόηση της υλοποίησης της αλληλεπίδρασης στο ΕΠε. Η σε βάθος παρουσίαση της λειτουργίας και των δυνατοτήτων των συσκευών αλληλεπίδρασης είναι εκτός του ενδιαφέροντος της παρούσας διδακτορικής διατριβής, καθότι οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται ως εργαλεία υλοποίησης και δεν αποτελούν τμήμα του ερευνητικού μας αντικειμένου.

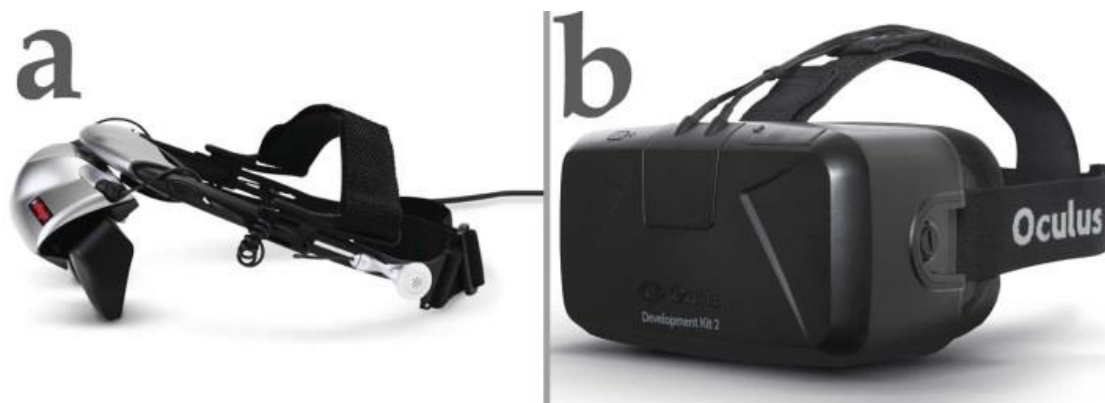
Οι διεπαφές χρήστη (User Interfaces - UIs) είναι τα μέσα εκείνα δια των οποίων πραγματοποιείται η αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ χρηστών και υπολογιστή. Οι διεπαφές χρήστη μετατρέπουν τις εισόδους σε μια κατανοητή για τον υπολογιστή μορφή και αντίστροφα, τις εξόδους του υπολογιστή σε κάποια μορφή την οποία μπορεί να κατανοήσει ο χρήστης και να αντιδράσει σε αυτή. Η τρισδιάστατη (3D) αλληλεπίδραση (3D Interaction) είναι η αλληλεπίδραση ανθρώπου-υπολογιστή κατά την οποία τα καθήκοντα του χρήστη πραγματοποιούνται απευθείας σε ένα τρισδιάστατο χωρικό πλαίσιο (Bowman et al., 2004). Η ύπαρξη 3D αλληλεπίδρασης, δεν απαιτεί, βέβαια, υποχρεωτικά τη χρήση 3D διεπαφής χρήστη

Στην ολοκληρωμένη λειτουργία της demo εφαρμογής beWare of the Robot χρησιμοποιούνται δύο τύποι τρισδιάστατων διεπαφών αλληλεπίδρασης: (i) κάσκες στερεοσκοπίας (HMDs), ως συσκευές εξόδου τρισδιάστατης απεικόνισης (Z800 3DVisor και Oculus Rift DK2), αλλά και ως συσκευές εισόδου για την αναγνώριση της κίνησης του κεφαλιού και (ii) αισθητήρες αναγνώρισης κίνησης ως τρισδιάστατες συσκευές εισόδου και κιναισθητικού ελέγχου (Microsoft Kinect™). Οι χρησιμοποιηθείσες συσκευές παρουσιάζονται συνοπτικά στη συνέχεια, ενώ για εμφάθυση ο αναγνώστης παραπέμπεται στο (Bowman et al., 2004).

6.8.1. Κάσκες Στερεοσκοπίας - HMDs

Οι κάσκες στερεοσκοπίας (Head Mounted Display, HMD) ή διαφορετικά, Προβολικά Συστήματα επί Προσωπιδας (ΠΣΠ), χρησιμοποιούνται ως συσκευές εξόδου για την προβολή του εικονικού κόσμου και τη στερεοσκοπική όραση, ενώ

παρέχουν και τη δυνατότητα του στερεοφωνικού ήχου. Επιπλέον, αξιοποιούνται οι αισθητήρες που διαθέτουν για ανίχνευση κίνησης του κεφαλιού του χρήστη (head tracking), οπότε οι κάσκες στερεοσκοπίας χρησιμοποιούνται και ως συσκευές εισόδου.

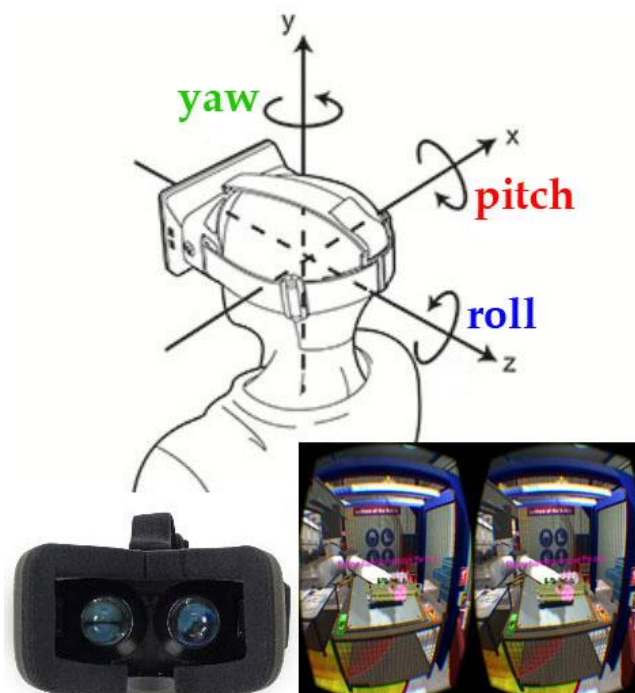


Εικόνα 6-35: (a) η κάσκα στερεοσκοπίας eMagin Z800 3DVisor και (b) η κάσκα στερεοσκοπίας Oculus Rift DK2

Στην έκδοση 1.0 της demo εφαρμογής beWare of the Robot, χρησιμοποιήθηκε η κάσκα στερεοσκοπίας eMagin Z800 3DVisor (βλ. Εικόνα 6-35a) για τη στερεοσκοπική προβολή, το tracking του κεφαλιού και την αναπαραγωγή στερεοφωνικού ήχου μέσω των ακουστικών που διαθέτει. Η κάσκα στερεοσκοπίας eMagin Z800 διαθέτει δύο μικρο-οθόνες τύπου Organic LED με ανάλυση SVGA (800x600), και υλοποιεί τη στερεοσκοπία με διαδοχικά καρέ (frame sequential) τα οποία μεταφέρονται μέσω μιας συμβατής κάρτας γραφικών. Μολονότι η κάσκα Z800 διαθέτει ενσωματωμένα γυροσκόπια και επιταχυνσιόμετρα τριών βαθμών ελευθερίας, για την ανίχνευση περιστροφής γύρω από τους τρεις άξονες x,y και z, στην έκδοση 1.0 η ανίχνευση κίνησης περιορίζεται μόνο στη γωνία pitch του κεφαλιού (περιστροφή του κεφαλιού επάνω/κάτω) και σε ένα εύρος $\pm 60^\circ$. Τα δεδομένα για τις άλλες δύο περιστροφές (yaw, roll) δε χρησιμοποιήθηκαν εξαιτίας προβλημάτων ασυμβατότητας μεταξύ των δεδομένων ανίχνευσης της γωνίας yaw που λαμβάνονταν από την κάσκα και των δεδομένων του αισθητήρα Kinect που αφορούσαν την περιστροφή γύρω από την ίδια γωνία στους ώμους και το λαιμό του χρήστη. Συγκεκριμένα, όταν οι ώμοι στρέφονταν οριζόντια προς τη μία κατεύθυνση και το κεφάλι προς την αντίθετη κατεύθυνση, παρουσιάστηκε ανακολουθία και μη-ελεγχόμενο «τρέμουλο», το οποίο έκανε την αίσθηση της εμπύθισης ανυπόφορη για το χρήστη. Για τον ίδιο λόγο, στην έκδοση 1.0, δεν λαμβάνονταν υπόψη στην κίνηση του ανθρωποειδούς τα δεδομένα ανίχνευσης κίνησης του αισθητήρα Kinect για το κεφάλι και το λαιμό του χρήστη.

Η κάσκα στερεοσκοπίας eMagin Z800 συνοδεύεται από λογισμικό ελέγχου του ποντικιού (mouse emulating software), το οποίο μετατρέπει την ανιχνευθείσα κίνηση του κεφαλιού σε γραμμική κίνηση του κέρσορα του ποντικιού στην αντίστοιχη κατεύθυνση της οθόνης. Το παραπάνω το εκμεταλλευτήκαμε για τη διασύνδεση στο Unity της κεφαλής του χρήστη με τα δεδομένα ανίχνευσης κίνησης της κάσκας: προσαρτήθηκε στο μετασχηματισμό του κεφαλιού του χρήστη, πάνω στον οποίο βρίσκεται ως τέκνο του η κύρια κάμερα, ένα στοιχείο κώδικα τύπου "Mouse Look",

το οποίο συνδέει και αντιστοιχίζει τη γραμμική μετατόπιση του κέρσορα του ποντικιού με την περιστροφή της κάμερας. Το λογισμικό ελέγχου του tracking απαιτεί υποχρεωτικά έκδοση 32-bit λειτουργικού συστήματος Windows. Η σύνδεση της κάσας Z800 με τον υπολογιστή πραγματοποιείται με καλώδιο VGA για την εικόνα και USB 2.0 για την τροφοδοσία και τη μεταφορά των δεδομένων του tracking.



Εικόνα 6-36: Κάτω: στα αριστερά άποψη της πλευράς του Oculus Rift με τους διπλούς φακούς και στα δεξιά η εικόνα που προβάλλεται στερεοσκοπικά στο χρήστη. Επάνω, οι γωνίες περιστροφής της κεφαλής του χρήστη κατά την αναγνώριση περιστροφής (head tracking)

Στις εκδόσεις 1.5 και 2.0 της demo εφαρμογής beWare of the Robot, χρησιμοποιήθηκε το μη-εμπορικό πρωτότυπο της έκδοσης Development Kit 2 της κάσας στερεοσκοπίας Oculus Rift (βλ. Εικόνα 6-35b). Η κάσκα Oculus Rift προσφέρει απόλυτη απομόνωση από το φυσικό περιβάλλον και περιλαμβάνει μία οθόνη OLED υψηλής ευκρίνειας ανά μάτι, έκαστη με ανάλυση 1080×1200 και εξαιρετικά υψηλό ρυθμό ανανέωσης 90Hz. Ο χρήστης βλέπει τις οθόνες μέσα από ένα ζεύγος φακών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη διεύρυνση του πεδίου όρασής του (βλ. Εικόνα 6-36). Η κάσκα Oculus Rift DK2 προσφέρει ανίχνευση κίνησης και περιστροφής 6 βαθμών ελευθερίας (βλ. Εικόνα 6-36), με ακρίβεια μικρότερη του χιλιοστόμετρου και σχεδόν μηδενική χρονική υστέρηση. Η ανίχνευση κίνησης υλοποιείται με μια συστοιχία υπέρυθρων LED τα οποία βρίσκονται κάτω από το κάλυμμα του Rift κι από έναν αισθητήρα (κάμερα) αναγνώρισής τους και είναι εξαιρετικής ποιότητας, όσον αφορά την αίσθηση, την ακρίβεια και την υστέρηση σε σχέση με τον μέχρι σήμερα υπάρχοντα ανταγωνισμό.

Το SDK του Rift είναι διαθέσιμο για απευθείας ολοκλήρωση της συσκευής σε εφαρμογές μέσα από το περιβάλλον του Unity και δίνει τη δυνατότητα απευθείας εξόδου της στερεοσκοπικής εικόνας στη συσκευή, παρακάμπτοντας το λειτουργικό

σύστημα και ανεξαρτητοποιώντας έτσι το ρυθμό ανανέωσης και την υστέρηση από τις επιμέρους παραμέτρους του Η/Υ. Η σύνδεση της κάσκας Oculus Rift με τον υπολογιστή πραγματοποιείται με καλώδιο HDMI για τη μετάδοση εικόνας και USB 2.0 για την τροφοδοσία και τη μεταφορά των δεδομένων του tracking.

6.8.2.Ο Αισθητήρας Αναγνώρισης Κίνησης Kinect™

Ο Αισθητήρας αναγνώρισης κίνησης Microsoft Kinect™ για το Xbox 360 είναι η βασική διεπαφή τρισδιάστατης αλληλεπίδρασης με το χρήστη (βλ. Εικόνα 6-37). Χρησιμοποιείται στη συγκρότηση της demo εφαρμογής beWare of the Robot ως συσκευή εισόδου για την αναγνώριση και παρακολούθηση της κίνησης του σώματος του χρήστη (body/skeletal tracking), αλλά και ως τρισδιάστατη διεπαφή κιναισθητικού ελέγχου και αλληλεπίδρασης. Η ανέπαφη και αδιάλειπτη κιναισθητική αλληλεπίδραση (kinaesthetic interaction) υλοποιείται στην περίπτωση εφαρμογής μας ως αλληλεπίδραση με χειρονομίες ελεύθερης-μορφής (free-form gestures) και με κίνηση στο χώρο (μετακίνηση-locomotion). Αφορά δε, την αλληλεπίδραση του ανθρώπου με το ΕΠε και τα εικονικά αντικείμενα, με τις κινήσεις του σώματος, τα μοτίβα κίνησης και τις χειρονομίες του.

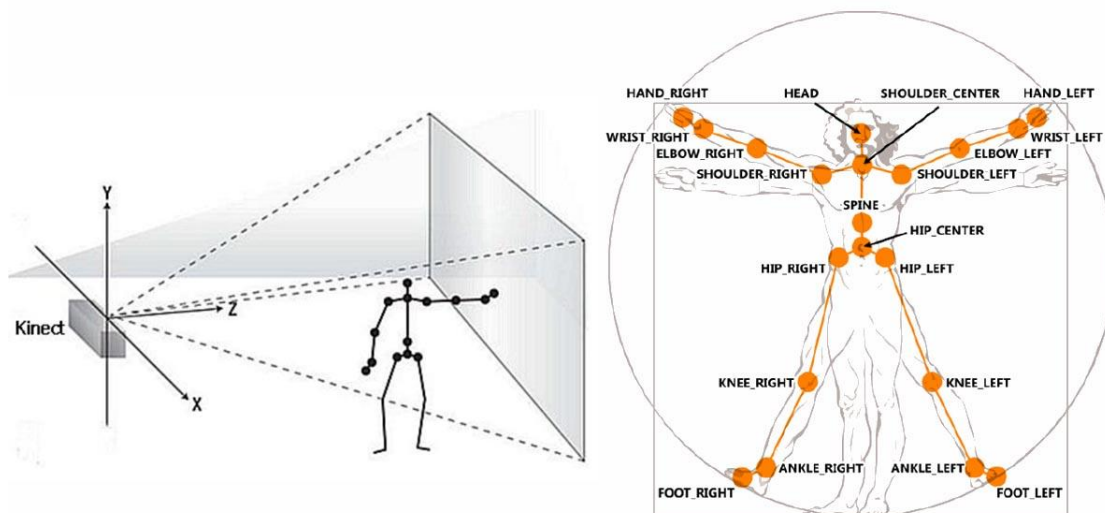
Η τρισδιάστατη ανίχνευση και παρακολούθηση κίνησης του σκελετού του χρήστη (skeletal tracking) πραγματοποιείται από τον αισθητήρα Kinect με συνεχή επεξεργασία εικόνων χρώματος και βάθους του χρήστη, ο οποίος στέκεται απέναντι από τον αισθητήρα. Ο αισθητήρας Kinect είναι μια οριζόντια διάταξη επάνω σε μια μηχανοκίνητη βάση και αποτελείται από δύο κάμερες (μία τοπική έγχρωμη κάμερα RGB και μία υπέρυθρη κάμερα βάθους/αισθητήρας CMOS), έναν προβολέα υπέρυθρων και μια συστοιχία μικροφώνων (βλ. Εικόνα 6-37). Ο προβολέας υπέρυθρων παράγει ένα πλέγμα κουκκίδων δομημένου υπέρυθρου φωτός 830 nm, με τα οποία δημιουργείται ο «χάρτης βάθους» της σκηνής, με αποτέλεσμα το υπολογισμό της απόστασης των αντικειμένων από τον αισθητήρα (Du & Zhang, 2014; Miles, 2012). Με κατάλληλο υποβιβασμό στη δειγματοληψία, οι παραγόμενες εικόνες μεταδίδονται στον υπολογιστή με ρυθμό 9-30 Hz, μέσω του καλωδίου USB. Οι εικόνες και ο χάρτης βάθους λαμβάνονται από το λογισμικό που συνοδεύει τον αισθητήρα Kinect και προκύπτει η θέση του σώματος με τη χρήση μηχανικής μάθησης και μιας βιβλιοθήκης «γνωστών σκελετών», μετατρέποντας ως εκ τούτου τα μέλη του σώματος σε έναν κινηματικό σκελετό με κόμβους (αρθρώσεις) και συνδέσμους (μέλη).



Εικόνα 6-37: Επάνω, άποψη του αισθητήρα αναγνώρισης κίνησης Microsoft Kinect και κάτω τα βασικά λειτουργικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται.

Ως ενδιάμεσο λογισμικό διεπαφής (middleware) και ως οδηγός για τον αισθητήρα Kinect, στις εκδόσεις beWare of the Robot 1.0 και 1.5 χρησιμοποιήθηκε το πλαίσιο NITE και οι οδηγοί OpenNI, ενώ στην έκδοση 2.0 χρησιμοποιήθηκε το Microsoft Kinect SDK v1.8. Η λειτουργία ανίχνευσης του σκελετού στο χώρο και τα είκοσι σημεία του σκελετού τα οποία αναγνωρίζονται και παρακολουθούνται από τις διεπαφές προγραμματισμού παρουσιάζονται σχηματικά στην Εικόνα 6-38.

Όπως αναφέρθηκε ήδη στις Ενότητες 6.6 και 6.8.1, για την ανίχνευση τη κίνησης του κεφαλιού δεν χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του Kinect, αλλά αυτά της κάσκας στερεοσκοπίας. Επίσης, στις εκδόσεις 1.0 και 1.5 δεν χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα των κάτω άκρων του χρήστη. Ο συνδυασμός των παραπάνω δεν επηρέασε τη συνολική αίσθηση της εμπόθισης του χρήστη, αντιθέτως οδήγησε σε πιο σταθερή κίνηση του ανθρωποειδούς στο κατακόρυφο επίπεδο. Μάλιστα, το γεγονός ότι τα πόδια του χρήστη απλώς ακολουθούσαν την κατεύθυνση των μηρών, δεν αναφέρθηκε από κάποιον χρήστη ως ανακολουθία ή ενόχληση.



Εικόνα 6-38: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας tracking σκελετού σώματος στο χώρο (αριστερά) και τα σημεία του σκελετού τα οποία αναγνωρίζονται και παρακολουθούνται (δεξιά) [Microsoft Kinect for Windows SDK]

Όσον αφορά τους περιορισμούς από τη χρήση του αισθητήρα Kinect για την ανίχνευση κίνησης του χρήστη, παρατηρήθηκε ότι κατά τις δοκιμές της έκδοσης 1.0, οι μισοί σχεδόν χρήστες ανέφεραν ότι κάποια στιγμή έχασαν τον έλεγχο των χεριών του ανθρωποειδούς, και η παρακολούθηση της κίνησης «πάγωνε», έστω και στιγμιαία. Αυτό συνέβη διότι το σενάριο και ο χώρος εργασίας απαιτούσε περιστροφή του χρήστη σε γωνία μεγαλύτερη των 90° έναντι του άξονα Z του αισθητήρα, οπότε από αυτή την πλευρά ήταν αδύνατος ο διαχωρισμός του ενός χεριού από το άλλο. Οι παρατηρήσεις αυτές παρουσιάζονται αναλυτικότερα στο (Matsas, Batras, & Vosniakos, 2013b). Οι παραπάνω περιορισμοί επιλύθηκαν με την αλλαγή της διάταξης ρομπότ και πάγκου εργασίας στη σκηνή των εκδόσεων 1.5 και 2.0, όπου βάσει σεναρίου και σε κανονικές συνθήκες, ο χρήστης δε χρειάζεται να περιστρέφει το σώμα του σε εύρος γωνιών μεγαλύτερο των 60° έναντι της αρχικής θέσης προκειμένου να συνεργαστεί με το ρομπότ.

6.9. Σύνθεση

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάστηκε αρχικά το πεδίο εφαρμογής (συνεργατική χειροκίνητη στρώση ανθρακούφασμάτων) και τα βασικά καθήκοντα τα οποία πρέπει να εκτελεστούν κατά τη συνεργατική στρώση ανθρακούφασμάτων από άνθρωπο και ρομπότ. Στη συνέχεια παρουσιάστηκε η συγκρότηση (διάταξη) του υλικού του συστήματος, καθώς και τα στοιχεία (αντικείμενα, οντότητες) που αποτελούν την εικονική σκηνή. Έπειτα, έγινε αναλυτική περιγραφή του σεναρίου συνεργασίας A-P και των δράσεων και καθηκόντων που απαιτούνται στις δύο επιμέρους περιπτώσεις εφαρμογής (use cases) που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της διερεύνησης της συνεργασίας αυτής. Κατόπιν, και προκειμένου να είναι κατανοητή η υλοποίηση της δημιουργηθείσας εφαρμογής, παρουσιάστηκαν συνοπτικά: (i) το περιβάλλον του Unity, εντός του οποίου χτίστηκε η εφαρμογή, (ii) το μοντέλο του ανθρωποειδούς, (iii) το μοντέλο του βιομηχανικού ρομπότ και, τέλος, (iv) οι τρισδιάστατες διεπαφές

χρήστη οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της αλληλεπίδρασης ανθρώπου και ρομπότ σε διαδραστικό ΕΠε.

Ουσιαστικά, στο κεφάλαιο αυτό, αναπτύχθηκε βήμα-βήμα το κυρίως παραγωγικό τμήμα της διδακτορικής διατριβής. Τόσο το σενάριο εργασίας, όσο και οι επιμέρους περιπτώσεις εφαρμογής, χρησιμοποιήθηκαν σε μία πλατφόρμα πειραματισμού και δοκιμών προκειμένου να διερευνηθούν οι προβληματικές που αφορούν στη συνεργασία A-P και παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5. Τέλος, δόθηκε έμφαση στην κατά το δυνατόν αναλυτική και συνάμα απλή περιγραφή του σεναρίου (συν-)εργασίας και της υλοποίησης της εφαρμογής επίδειξης (demo) στο περιβάλλον Unity.

7. Ανάλυση και Υλοποίηση της Αλληλεπίδρασης

7.1. Ανάλυση και περιγραφή με διαγράμματα UML

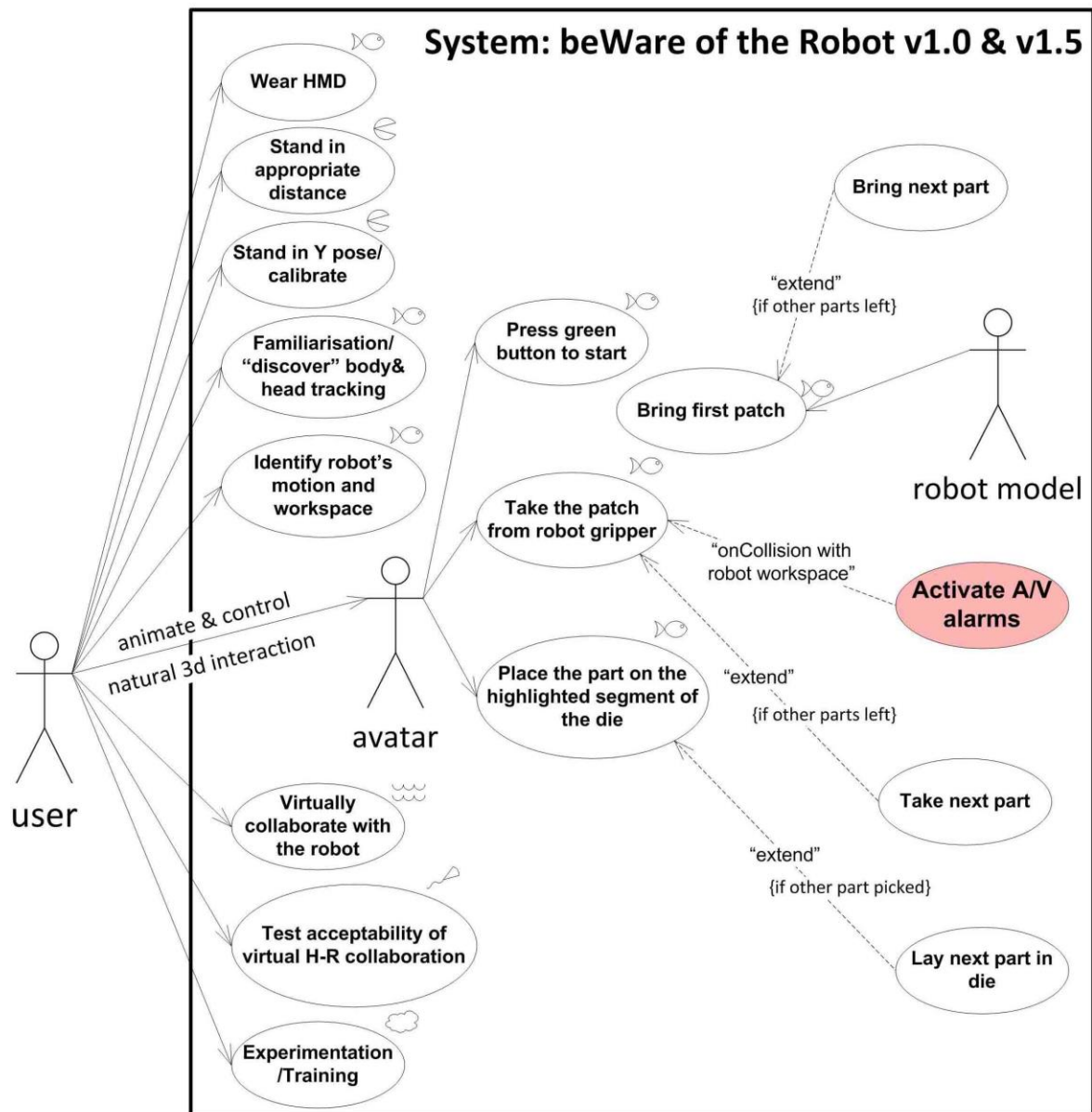
Ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος περιγραφής, διαχωρισμού στα συνθετικά του μέρη και ανάλυσης ενός Εικονικού Περιβάλλοντος (ΕΠε), είναι τα αντικειμενοστραφή εργαλεία ανάλυσης (OOA tools) και οι εκφράσεις και τα διαγράμματα της γλώσσας UML 2.0, πόσο μάλλον όταν τα ίδια τα ΕΠε είναι αντικειμενοστραφή συστήματα. Οι αντικειμενοστραφείς μέθοδοι αναλύουν το σύστημα στα συνθετικά του μέρη και κάνουν τις μεταξύ τους σχέσεις ρητές (Deacon, 2005). Στα ΕΠε, τα εργαλεία αντικειμενοστραφούς ανάλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως ένας οδηγός για τη δημιουργία του εικονικού κόσμου (αναπαράσταση δραστηριοτήτων, ακολουθίας και αλληλεπίδρασης). Εκτός δε από εργαλεία ανάλυσης, όταν χρησιμοποιούνται εκ των υστέρων και μετά από τη δημιουργία του ΕΠε, μπορούν να συνεισφέρουν στη συστηματοποίηση της παραγόμενης γνώσης και της αλληλεπίδρασης και στη δημιουργία ευφυΐας μέσα από την ανάλυση της συμπεριφοράς του συστήματος.

Η Ενοποιημένη Γλώσσα Σχεδιασμού (Unified Modeling Language - UML) είναι μια γραφική γλώσσα για την απλοποιημένη εποπτική αναπαράσταση, τη διαμόρφωση προδιαγραφών και την (σημασιολογική) τεκμηρίωση λογισμικών και συστημάτων. Η UML περιλαμβάνει τρία βασικά στοιχεία (οντότητες, σχέσεις και διαγράμματα) και περιλαμβάνει εννιά διαφορετικά είδη διαγραμμάτων, το καθένα εκ των οποίων περιγράφει μια διαφορετική συμπληρωματική όψη του συστήματος. Τα διαγράμματα δομής (κλάσεων/αντικειμένων) χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη στατική δομή του συστήματος, ενώ τα διαγράμματα συμπεριφοράς (περιπτώσεων χρήσης, δραστηριοτήτων, συνεργασίας, καταστάσεων) περιγράφουν τη δυναμική δομή του συστήματος.

Η αναλυτική περιγραφή αντικειμενοστραφών μεθόδων ανάλυσης και η εμβάθυνση στη γλώσσα UML δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας παρουσίασης και για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης παραπέμπεται στα (Deacon, 2005) και (Booch, Rumbaugh, & Jacobson, 2005).

7.1.1. Διάγραμμα Περίπτωσης Χρήσης - Use Case Diagram

Το Διάγραμμα Περίπτωσης Χρήσης (Use Case Diagram) της UML περιγράφει και ορίζει τα απαιτούμενα καθήκοντα και την αλληλεπίδραση μεταξύ του χρήστη και του συστήματος. Περιλαμβάνει: (i) τα όρια του συστήματος, (ii) τις περιπτώσεις χρήσης, (iii) τους δρώντες/ηθοποιούς (actors), οι οποίοι είναι εκτός των ορίων του συστήματος και (iv) τις σχέσεις εξάρτησης, γενίκευσης και σύνδεσης μεταξύ αυτών.

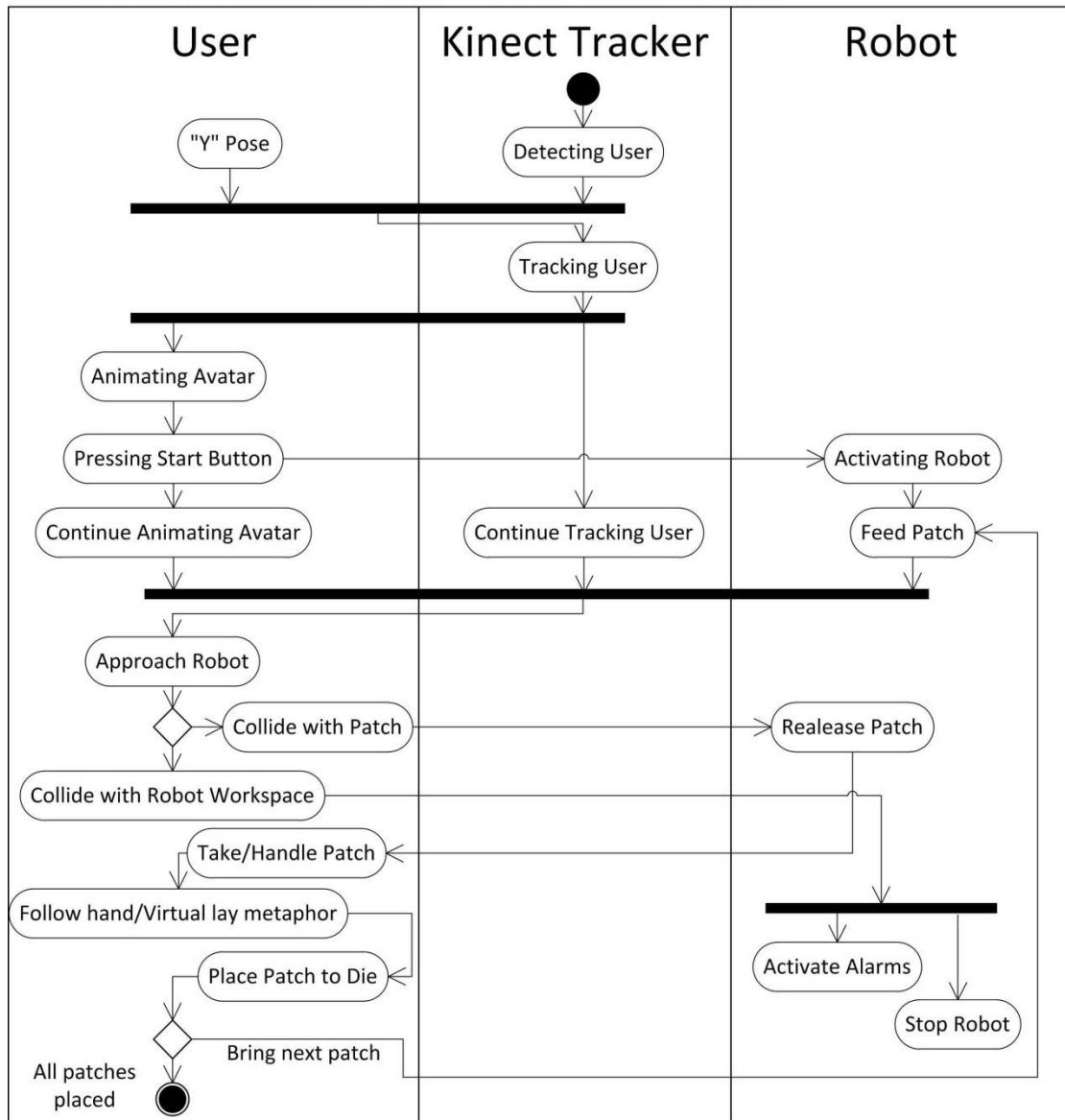


Εικόνα 7-1: Διάγραμμα Περιπτώσης Χρήσης (Use Case Diagram) της έκδοσης beWare of the Robot v1.0 και v1.5

Στις Εικόνα 7-1 και Εικόνα 7-2 παρουσιάζονται δύο διαγράμματα περίπτωσης χρήσης: το ένα για τις εκδόσεις beWare of the Robot v1.0 και v1.5 και το δεύτερο για την έκδοση beWare of the Robot v2.0. Και στα δύο διαγράμματα, ο χρήστης (actor) είναι εκτός του συστήματος και ελέγχει άμεσα με τις κινήσεις του το ανθρωποειδές (sub-actor), το οποίο αλληλεπιδρά και συνεργάζεται με το ρομπότ (επίσης sub-actor) μέσα στο σύστημα. Σε πολλές περιπτώσεις, οι συμβολισμοί ξεφεύγουν από την αυστηρότητα της γλώσσας UML και χρησιμοποιούνται πιο ελεύθερα.

Activity Diagram: Swimlanes

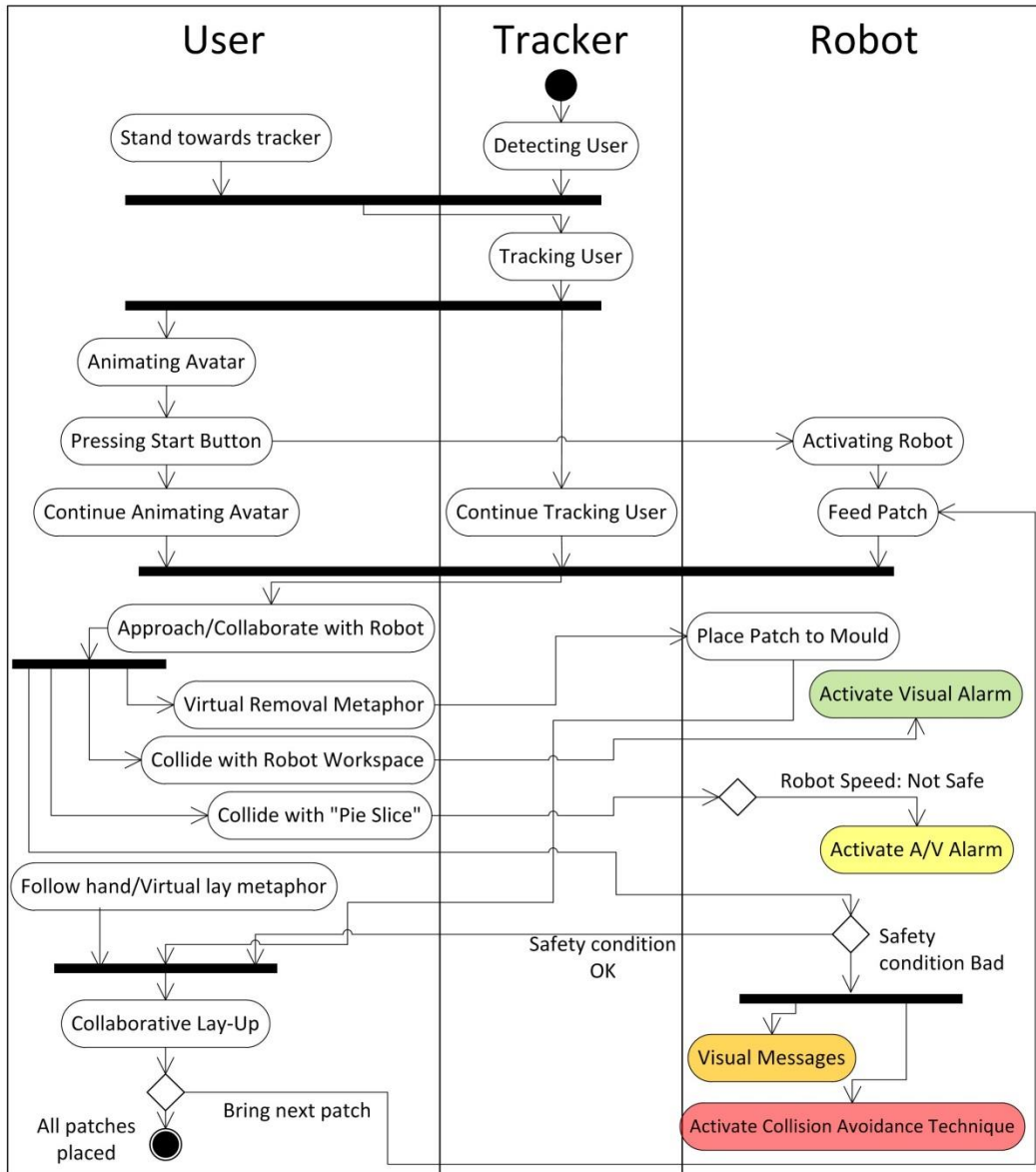
beWare of the Robot v1.5: workflow of the main tasks



Εικόνα 7-3: Διάγραμμα Δραστηριότητας (Activity Diagram) της έκδοσης beWare of the Robot v1.5

Activity Diagram: Swimlanes

beWare of the Robot v2.0: workflow of the main tasks

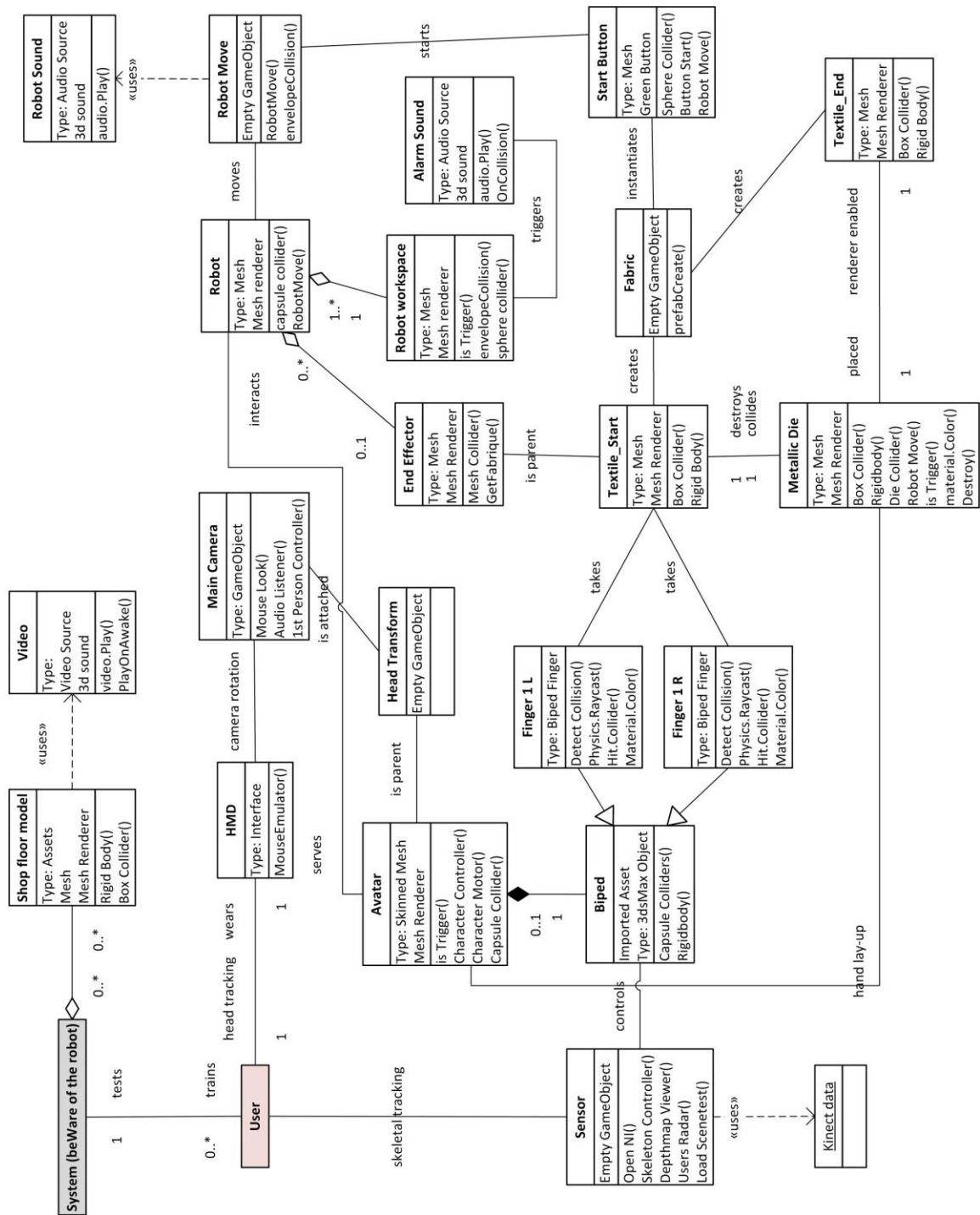


Εικόνα 7-4: Διάγραμμα Δραστηριότητας (Activity Diagram) της έκδοσης beWare of the Robot v2.0

7.1.3. Διάγραμμα Δομής/Οντοτήτων - Structure Diagram

Τα Διαγράμματα Κλάσης παρουσιάζουν, με τη μορφή γράφου, τη στατική δομή ενός μοντέλου και συγκεκριμένα τα υπάρχοντα στοιχεία (κλάσεις ή αντικείμενα), την εσωτερική τους δομή και τη σχέση τους με άλλα στοιχεία. Το Διάγραμμα Δομής που παρουσιάζεται στην Εικόνα 7-4 είναι ένα στατικό διάγραμμα Οντοτήτων-Διασυνδέσεων, καθώς δεν είναι αυστηρό ως προς την αποκλειστική χρήση αντικειμένων ως στοιχείων. Αντιθέτως, είναι ένας γράφος των οντοτήτων (objects και components), των βασικών τους ιδιοτήτων, των χρησιμοποιούμενων μεθόδων και των διασυνδέσεων μεταξύ των οντοτήτων.

Structure diagram (entities)



Εικόνα 7-5: Το Διάγραμμα Δομής (οντοτήτων/διασυνδέσεων) της έκδοσης beWare of the Robot v1.0.

7.2. Τεχνικές αλληλεπίδρασης για την εκτέλεση των βασικών καθηκόντων της συνεργασίας A-P στο Εικονικό Περιβάλλον

Όπως ήδη ορίστηκαν στην Ενότητα 4.2, τα καθήκοντα αλληλεπίδρασης (interaction tasks) σε ένα ΕΠε είναι οι ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιήσει ο χρήστης σε σχέση με κάποιο άλλο αντικείμενο ή στοιχείο του εικονικού κόσμου (π.χ. λήψη ανθρακοϋφάσματος από το ρομπότ). Οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές αλληλεπίδρασης (interaction techniques) είναι ο τρόπος, ή οι μέθοδοι, μέσω των

οποίων επιτυγχάνεται η εκτέλεση ενός καθήκοντος αλληλεπίδρασης (π.χ. η εκπομπή επιλεκτικών ακτίνων/ray-casting από τα ακροδάκτυλα του χρήστη, προκειμένου να είναι δυνατή η προσάρτηση του ανθρακούφασματος στο χέρι του). Τα βασικά γενικά καθήκοντα αλληλεπίδρασης (interaction tasks) σε ένα οποιοδήποτε ΕΠε (Bowman et al., 2004) περιγράφτηκαν στην Ενότητα 4.2 και είναι τα εξής: (i) *επιλογή* (selection), (ii) *χειρισμός* (manipulation), (iii) *πλοήγηση* (navigation), και, (iv) *έλεγχος του συστήματος* (system control).

Η φύση της περίπτωσης εφαρμογής (συνεργασία A-P) αλλά και η ανάγκη για την κατά το δυνατόν φυσική (natural) και άμεση (direct) 3D αλληλεπίδραση με τον άνθρωπο, μας οδήγησαν στα εξής: (i) αφενός στην ένταξη ενός λειτουργικού ανθρωποειδούς στην εικονική σκηνή, (ii) αφετέρου στη χρήση του αισθητήρα Microsoft Kinect για την ανίχνευση κίνησης. Οι παραπάνω επιλογές είχαν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ΕΠε το οποίο παρέχει τη δυνατότητα άμεσης, αδιάκοπης αλλά κυρίως φυσικής αλληλεπίδρασης, χωρίς τη χρήση μεταφορών αλλά ή χρονικών διαλειμμάτων για την εκτέλεση των βασικών αλληλεπιδραστικών καθηκόντων. Με μία άμεση και φυσική τεχνική αλληλεπίδρασης (direct 3d/natural interaction), ο χρήστης αλληλεπιδρά χρησιμοποιώντας τις φυσιολογικές κινήσεις του σώματός του (μέσω του ανθρωποειδούς) με έμφυτο, ψευδο-φυσικό τρόπο. Τέλος, η φυσική αλληλεπίδραση εξασφαλίζει ότι ο χρήστης είναι εξοικειωμένος με το γνωστικό μοντέλο του καθήκοντος που πρέπει να εκτελέσει, ότι ελαχιστοποιείται το γνωστικό φορτίο που διαχειρίζεται ο χρήστης κατά τη δοκιμή στο ΕΠε και ότι δεν απαιτείται παρά ελάχιστη πρότερη εκπαίδευση.

Με βάση το σενάριο συνεργασίας A-P, κατά την εκτέλεση της εφαρμογής beWare of the Robot, συναντώνται και τα τέσσερα βασικά καθήκοντα αλληλεπίδρασης (πλοήγηση, επιλογή, χειρισμός, έλεγχος συστήματος). Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7-1, τα περισσότερα καθήκοντα και υπο-καθήκοντα πραγματοποιούνται με έναν μεγάλο αριθμό διαφορετικών, φυσικών τεχνικών αλληλεπίδρασης (άμεσα σχήματα συμπεριφοράς). Μεταφορές, ή «μαγικές»¹³ τεχνικές αλληλεπίδρασης έχουν χρησιμοποιηθεί σε ελάχιστα καθήκοντα (ενδεικτικά: παραλαβή και στρώση του ανθρακούφασματος). Μάλιστα, ορισμένες από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται σε κάποια καθήκοντα, μπορεί να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό και με άλλες τεχνικές για την εκτέλεση καθηκόντων για τα οποία δεν προορίζονται (cross-task techniques). Για παράδειγμα, η τεχνική εκπομπής ακτίνων (ray-casting), η οποία εμφανίστηκε ως τεχνική για την επιλογή αντικειμένων στο ΕΠε, χρησιμοποιείται τόσο για την επιλογή (λήψη ανθρακούφασμάτων), όσο και για το χειρισμό και την ενεργοποίηση τεχνικών αποφυγής σύγκρουσης A-P.

¹³ Μαγικές τεχνικές αλληλεπίδρασης είναι αυτές που υπερβαίνουν τις δυνατότητες του ανθρώπου, ή τους περιορισμούς του πραγματικού κόσμου

Καθήκον	Υπο-καθήκον	Τεχνική Αλληλεπίδρασης	Υλοποίηση Τεχνικής
Πλοήγηση	Κίνηση στο χώρο	Φυσική αλληλεπίδραση Πραγματικό βάδισμα	Ανίχνευση κίνησης σώματος - Kinect Avatar body Camera
	Στάση σώματος	Φυσική αλληλεπίδραση Πραγματική κίνηση σώματος Κινησθητικός έλεγχος	Ανίχνευση κίνησης σώματος - Kinect Avatar Skeleton
	Παρατήρηση	Φυσική αλληλεπίδραση Ανίχνευση κίνησης κεφαλιού	Ανίχνευση κίνησης κεφαλιού - HMD Camera
Επιλογή	Άγγιγμα	Κίνηση χεριών Άμεσο Άγγιγμα Ανίχνευση Σύγκρουσης Εκπομπή ακτίνων	Ανίχνευση κίνησης σώματος Kinect Avatar Hands
Χειρισμός	Μετακίνηση	Φυσική αλληλεπίδραση Άμεση μετακίνηση Κίνηση χεριών Κίνηση σώματος Εκπομπή ακτίνων	Ανίχνευση κίνησης σώματος - Kinect Avatar Hands
	Τοποθέτηση-Στρώση	Άμεση τοποθέτηση (v1.0) Μεταφορά κίνησης στρώσης (v2.0) Ανίχνευση Σύγκρουσης Εικονικό βοήθημα παλάμης Παραλλαγή Follow me Κίνηση χεριών Μαγική στρώση	Ανίχνευση κίνησης σώματος - Kinect Avatar Hands Μοτίβο κινούμενου εικονικού χεριού Hand gesture
	Αφαίρεση αυτοκόλλητου	Μεταφορά κίνησης αφαίρεσης αυτοκόλλητου Εικονικό βοήθημα παλάμης Παραλλαγή Follow me Κίνηση χεριών	Ανίχνευση κίνησης σώματος - Kinect Avatar Hands Μοτίβο κινούμενου εικονικού χεριού Hand gesture
Έλεγχος Συστήματος	Κουμπιά (μπουτόν) ελέγχου	Φυσική αλληλεπίδραση Μεταφορά πατήματος μπουτόν Click Gesture Κίνηση χεριών	Ανίχνευση κίνησης σώματος - Kinect Avatar Hands Μοτίβο κίνησης, φώτος και ήχου μπουτόν
	Ενεργοποίηση συμβάντων, ενεργειών και συναγερμών	Φυσική αλληλεπίδραση Εκπομπή ακτίνων Ανίχνευση Σύγκρουσης	Ανίχνευση κίνησης σώματος - Kinect Agent Avatar body Triggers-Events

Πίνακας 7-1: Οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές 3D αλληλεπίδρασης για την εκτέλεση των βασικών καθηκόντων και η υλοποίηση της εκάστοτε τεχνικής μέσω του ανθρωποειδούς.

Στην κατηγοριοποίηση των καθηκόντων του Πίνακα 7-1, κάτω από το καθήκον της *πλοήγησης*, μπορούμε να ξεχωρίσουμε τα εξής υπο-καθήκοντα: (i) της κίνησης του ανθρωποειδούς στο χώρο, (ii) της τροποποίησης της στάσης του σώματος και (iii) της παρατήρησης (οπτικής και ακουστικής) του χώρου. Και τα τρία αυτά υπο-καθήκοντα επιτυγχάνονται με φυσική αλληλεπίδραση και κατά συνέπεια με άμεσο κιναισθητικό έλεγχο, μέσω του αισθητήρα Kinect αφενός, για την ανίχνευση κίνησης και της κάσκας στερεοσκοπίας αφετέρου, για την ανίχνευση κίνησης του κεφαλιού. Έτσι, για την κίνηση του ανθρωποειδούς στο χώρο, παραδείγματος χάριν, χρησιμοποιείται η τεχνική του πραγματικού βαδίσματος, η οποία είναι απλή, φυσική και ενστικτώδης, επιτρέποντας στο χρήστη να αφοσιωθεί στα συνεργατικά και πιο σημαντικά καθήκοντα, χωρίς το γνωστικό «θόρυβο» του να χρειάζεται να σκεφτεί πως θα μετακινηθεί στο χώρο (όπως π.χ. με την πλοήγηση με τη χρήση 3D ποντικιού, πληκτρολογίου κλπ.). Συνεπώς, τα χέρια του χρήστη δε χρησιμοποιούνται καθόλου σε αυτό το καθήκον, επιτρέποντας τη χρήση τους στα καθήκοντα της επιλογής και του χειρισμού, στα οποία χρησιμοποιούνται ούτως ή άλλως και στο πραγματικό περιβάλλον. Επίσης, στα πλεονεκτήματα της χρήσης της τεχνικής του πραγματικού βαδίσματος, προστίθεται το ότι παρέχονται στο χρήστη σήματα από το αισθησιακό σύστημα, τα οποία τον βοηθούν να κατανοήσει τις διαστάσεις και τις αποστάσεις στον εικονικό χώρο (Bowman et al., 2004). Βέβαια η τεχνική του πραγματικού βαδίσματος μπορεί να μην είναι πάντα εφικτή ένεκα χωρικών περιορισμών του υλικού στον πραγματικό χώρο εργασίας, ωστόσο στην παρούσα περίπτωση εφαρμογής, το χωρικό εύρος εργασίας του χρήστη στο ΕΠε συμπίπτει με το εύρος της πραγματικής του κίνησης, το οποίο προκύπτει από τους περιορισμούς του μήκους καλωδίου της κάσκας και του βεληνεκού αναγνώρισης του αισθητήρα Kinect.

Το καθήκον της *επιλογής* (selection) συναντάται στην επιλογή του αντικειμένου του ανθρακοϋφάσματος. Το ανθρακοϋφάσμα επιλέγεται αρχικά από την αρπάγη του ρομπότ, προκειμένου να το προσαρτήσει στο άκρο του και έπειτα από το χέρι του ανθρώπου, στις εκδόσεις 1.0 και 1.5, όταν το ρομπότ τον τροφοδοτεί με τεμάχια και αυτός τα παραλαμβάνει με τα χέρια του. Για την υλοποίηση του καθήκοντος της επιλογής πραγματοποιείται συνδυασμός τεχνικών φυσικής αλληλεπίδρασης: της φυσικής κίνησης και της ανίχνευσης των χεριών, του άμεσου αγγίγματος (direct touch) μέσω του εικονικού χεριού του ανθρωποειδούς και, τέλος, της εκπομπής ακτίνων (ray-casting). Σε αυτή την περίπτωση, βέβαια, έχουμε μεν φυσική αλληλεπίδραση, απουσιάζει δε ο απόλυτος ρεαλισμός, καθότι δεν πραγματοποιείται tracking των δακτύλων του χρήστη, ώστε να προκύψει η ακριβής αναπαράσταση της κίνησης της λήψης (αρπαγής) του ανθρακοϋφάσματος από τα δάκτυλα. Σε αντίθεση με τις κλασικές τεχνικές εκπομπής ακτίνων¹⁴, εδώ η ακτίνα είναι ελάχιστου μήκους (μεταξύ 0.01-0.02m) και αόρατη από το χρήστη, ώστε να προσφέρει μεν λειτουργικότητα αλληλεπίδρασης στο άκρο του χεριού, αλλά να μην εμφανίζεται ως

¹⁴ Η τεχνική εκπομπής ακτίνων (ray-casting), στην κλασική της μορφή, περιλαμβάνει μία ορατή ακτίνα, συνήθως άπειρου μήκους, η οποία ακολουθεί την κίνηση του χεριού του χρήστη (κατά βάση με κάποιον αισθητήρα χεριός, π.χ. [Wii Remote](#), [Razer Hydra](#)) και επιλέγει τα αντικείμενα τα οποία κτυπά (π.χ. επιλογή χρώματος από μία παλέτα, επιλογή εργαλείου κλπ.).

στοιχείο που μειώνει το ρεαλισμό αυτής της αλληλεπίδρασης. Συνεπώς, σχηματίζουμε μια υβριδική φυσική τεχνική αλληλεπίδρασης η οποία είναι το *άμεσα εικονικό άγγιγμα* από το χέρι του ανθρωποειδούς (tracked hand) και την εκπομπή ακτίνας, ως μία επικουρική και μη-εμφανή τεχνική, η οποία όμως δίνει λειτουργικότητα στο άμεσα άγγιγμα του χεριού του ανθρωποειδούς. Μετά από την επιλογή του ανθρακοϋφάσματος από το ανθρώπινο χέρι ή από το άκρο του ρομπότ, το ανθρακοϋφάσμα αποκτά σχέση τέκνου έναντι του χεριού ή του άκρου του ρομπότ αντίστοιχα, και ακολουθεί πιστά τις κινήσεις του γονέα του σαν να είναι φυσικά προσαρτημένο σε αυτό.

Στο γενικό καθήκον του *χειρισμού* (manipulation) περιλαμβάνονται τα επιμέρους καθήκοντα της μετακίνησης, της τοποθέτησης και της στρώσης του ανθρακοϋφάσματος, αλλά και το υπο-καθήκον της αφαίρεσης του αυτοκόλλητου καλύμματος του ανθρακοϋφάσματος από το χρήστη. Στο υπο-καθήκον της μετακίνησης του ανθρακοϋφάσματος από τα χέρια του χρήστη χρησιμοποιούνται οι ίδιες τεχνικές αλληλεπίδρασης που χρησιμοποιήθηκαν και στο καθήκον της επιλογής (βλ. Πίνακας 7-1). Στο υπο-καθήκον της τοποθέτησης και στρώσης του ανθρακοϋφάσματος στο καλούπι από το χρήστη, υπάρχουν διαφοροποιήσεις ανά έκδοση της εφαρμογής. Στην έκδοση 1.0 έχουμε άμεση τοποθέτηση του υφάσματος στο κατάλληλο τμήμα του καλουπιού, η οποία υλοποιείται με ανίχνευση σύγκρουσης, μεταξύ του ανθρακοϋφάσματος και του καλουπιού. Συγκεκριμένα, ο χρήστης χειρίζεται το τεμάχιο του ανθρακοϋφάσματος με τα χέρια του και όταν το φέρει σε επαφή με το τμήμα στο οποίο πρέπει να τοποθετηθεί, τότε το ανθρακοϋφάσμα εμφανίζεται ακαριαία τοποθετημένο και στρωμένο στην τελική του θέση (βλ. Εικόνα 7-6). Η εμφάνιση του υφάσματος ως στρωμένου, πραγματοποιείται με μία «μαγική» τεχνική, όπου το αντικείμενο του υφάσματος στα χέρια του ανθρώπου καταστρέφεται από τη σκηνή και ταυτόχρονα εμφανίζεται το στιγμιότυπο του αντικειμένου του στρωμένου υφάσματος στην κατάλληλη θέση και προσανατολισμό (βλ. και Ενότητα 6.4).

Στην έκδοση 1.5 δεν έχουμε άμεση τοποθέτηση, αλλά ο χρήστης, κρατώντας στα χέρια του το τεμάχιο ανθρακοϋφάσματος, πρέπει να ακολουθήσει για ένα χρονικό διάστημα την παλινδρομική κίνηση μιας εικονικής ένδειξης/«οδηγού»/πλότου (γαλάζια φωτεινή ημιδιαφανής παλάμη χεριού, βλ. και Εικόνα 7-6). Η παραπάνω κίνηση του χρήστη στο ΕΠε είναι μια αναπαράσταση του μοτίβου κίνησης που πραγματοποιείται στο πραγματικό στρώσιμο. Δημιουργείται έτσι μια πρωτότυπη μεταφορά αλληλεπίδρασης, αυτή της *εικονικής στρώσης* (virtual lay metaphor), η οποία χρησιμοποιεί ένα κινούμενο εικονικό χέρι (παλάμη) ως γνωστικό βοήθημα περιγραφής της κίνησης που πρέπει να κάνει ο χρήστης. Η πρωτότυπη αυτή τεχνική είναι μια εξελιγμένη (και προσαρμοσμένη στις σύγχρονες συσκευές αλληλεπίδρασης) παραλλαγή των τεχνικών “Just Follow-me” (Yang & Kim, 2002) και “Follow-me” (Ouramdane, Otmane, Davesne, & Mallem, 2006) και θα περιγράφεται από εδώ και στο εξής με τον όρο «*ακολουθήσε το χέρι μου*» (“Follow my hand”).

Στην έκδοση 2.0, το καθήκον της στρώσης πραγματοποιείται συνεργατικά από τον άνθρωπο και το ρομπότ: το ρομπότ συγκρατεί και τοποθετεί το ύφασμα στην κατάλληλη θέση και ο άνθρωπος πρέπει να το εφαρμόσει και να το συμπιέσει με τα χέρια του στο καλούπι. Στο ΕΠε, αυτή η εφαρμογή και συμπιέση του ανθρακοϋφάσματος από το χρήστη, αναπαρίσταται πάλι με τη μεταφορά της εικονικής στρώσης και της τεχνικής «ακολούθησε το χέρι μου», όπως και στην έκδοση 1.5, με τη μόνη διαφορά ότι ο άνθρωπος δε μεταφέρει το ύφασμα με τα χέρια του, παρά μόνο το στρώνει συνεργατικά με το ρομπότ, το οποίο και το συγκρατεί (βλ. Εικόνα 7-6).



Εικόνα 7-6: Οι παραλλαγές του καθήκοντος της στρώσης του ανθρακοϋφάσματος στις 3 εκδόσεις της εφαρμογής beWare of the Robot.

Στην έκδοση 2.0, η τεχνική του «ακολούθησε το χέρι μου» (“Follow my hand”) χρησιμοποιείται και στο καθήκον της αφαίρεσης της αυτοκόλλητης προστατευτικής ταινίας από το ανθρακοϋφασμα, οπότε σχηματίζεται ακόμα μία πρωτότυπη μεταφορά, η *μεταφορά της εικονικής αφαίρεσης του αυτοκόλλητου καλύμματος* (virtual removal metaphor). Σε αυτή την περίπτωση, ο χρήστης πρέπει πάλι να ακολουθήσει για ένα σύντομο χρονικό διάστημα την παλινδρομική κίνηση μιας εικονικής ένδειξης/«οδηγού»/πιλότου πάνω στο ανθρακοϋφασμα (ιώδης φωτεινή ημιδιαφανής παλάμη χεριού, βλ. Εικόνα 7-12), η οποία παραπέμπει νοητικά στο πραγματικό καθήκον.

Το γενικό καθήκον του *ελέγχου του συστήματος* είναι κρίσιμο, αφού επιτρέπει στο χρήστη να ελέγξει τη ροή της αλληλεπίδρασης μεταξύ διαφορετικών καθηκόντων. Συνήθως, το καθήκον συνίσταται σε κάποια εντολή η οποία είτε αλλάζει την κατάσταση του συστήματος, ή ζητά από αυτό να πραγματοποιηθεί κάποια λειτουργία. Στην περίπτωση της εφαρμογής beWare of the Robot, ο έλεγχος του συστήματος πραγματοποιείται με φυσικές και διαισθητικές τεχνικές και δεν χρησιμοποιούνται καθόλου γραφικά περιβάλλοντα χρήστη (GUIs: μενού, φόρμες ή εικονίδια) και εισοδοί μέσω του πληκτρολογίου. Ο χρήστης προκαλεί αλλαγές στην κατάσταση του συστήματος διαισθητικά, μέσω των κινήσεων και των ενεργειών του, με τη χρήση ενός συνδυασμού τεχνικών φυσικής αλληλεπίδρασης: της φυσικής κίνησής του και της ανίχνευσης των χεριών του, του άμεσου αγγίγματος (direct touch), μέσω ανίχνευσης σύγκρουσης και της εκπομπής ακτίνων (ray-casting). Για παράδειγμα, για την ενεργοποίηση ενός σεναρίου αποφυγής σύγκρουσης αρκεί η ικανοποίηση κριτηρίων που προκύπτουν από τη θέση ανθρώπου και ρομπότ, για την εκκίνηση του σεναρίου συνεργασίας A-P ο χρήστης πρέπει να πατήσει με το χέρι του

ένα πράσινο κουμπί (βλ. Εικόνα 6-20b), ενώ για το σταμάτημα της κίνησης του ρομπότ σε περίπτωση κινδύνου και για την έξοδο από την εφαρμογή ο χρήστης πρέπει να πατήσει το κόκκινο κουμπί (πανικού). Σε αυτή την περίπτωση, ο χρήστης πατάει το κουμπί με φυσική (natural) αλληλεπίδραση με τα χέρια του και με χρήση ανίχνευσης σύγκρουσης. Επειδή το σύστημα δεν προσφέρει ανάδραση δύναμης και προκειμένου να μπορεί να αντιληφθεί ο χρήστης ότι πράγματι πάτησε το κουμπί, δημιουργήθηκε μία *μεταφορά πατήματος κουμπιού* (button click metaphor, βλ. και Εικόνα 7-9), η οποία ενεργοποιείται μόλις ανιχνευθεί σύγκρουση μεταξύ του κουμπιού και του εσωτερικού μέρους της παλάμης του ανθρωποειδούς. Με τη μεταφορά πατήματος κουμπιού, συμβαίνουν τα εξής: (i) εμφανίζεται μία φωτεινή λάμψη γύρω από αυτό, (ii) ταυτόχρονα ακούγεται ένας χαρακτηριστικός ήχος «κλικ» πατήματος κουμπιού (τύπου ενεργοποίησης ηλεκτρονόμου καστανίας) και (iii) το κουμπί μετακινείται στιγμιαία προς τα μέσα και επανέρχεται στην αρχική του θέση, όπως θα γινόταν και στην πραγματικότητα.

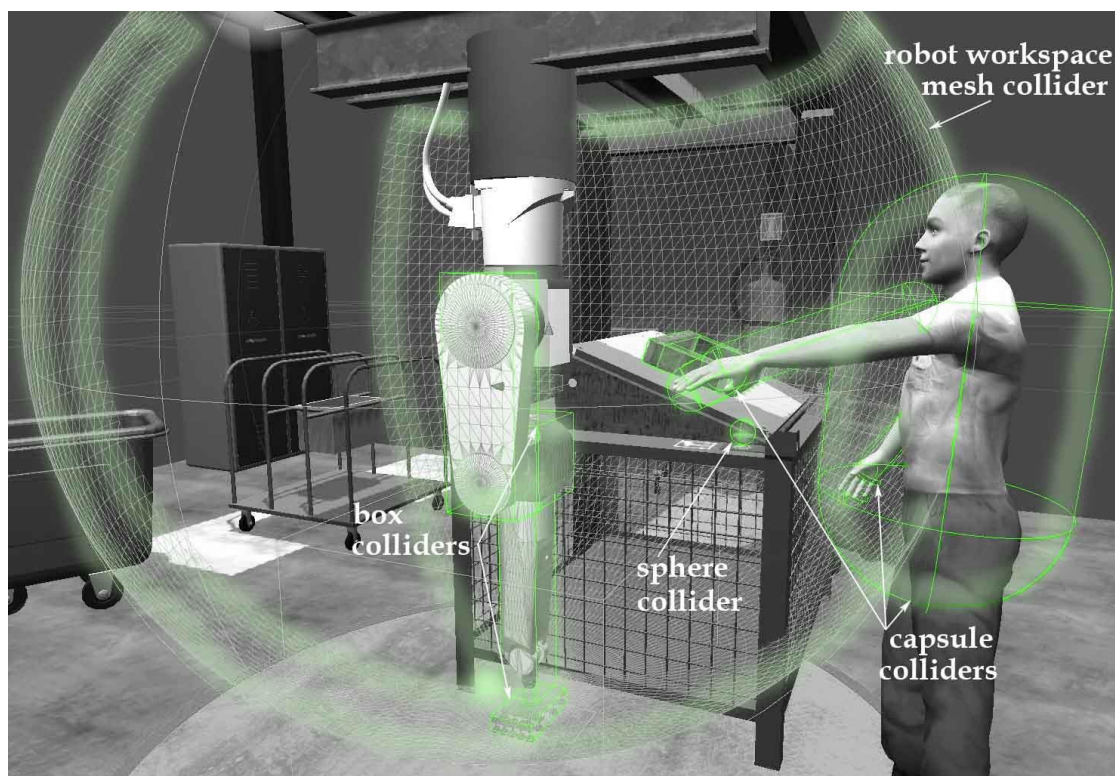
Συνοψίζοντας, οι δυνατότητες αναγνώρισης κίνησης που προσφέρουν οι συσκευές εισόδου και η ρεαλιστική κίνηση του ανθρωποειδούς, μας οδήγησαν στο σχεδιασμό της τρισδιάστατης αλληλεπίδρασης με άμεσο και φυσικό (natural) τρόπο. Με τη χρήση του ανθρωποειδούς, ελεγχόμενου πάντα από την ανίχνευση κίνησης, η αλληλεπίδραση είναι ανέπαφη και διαισθητική και σχεδιάστηκε έτσι, ώστε να μην απαιτούνται χρονοβόρες ή πολύπλοκες χειρονομίες για την εκτέλεση απλών καθηκόντων. Ο έλεγχος του ανθρωποειδούς είναι αδιάκοπος, οπότε χρησιμοποιώντας επικουρικά απλές τεχνικές στο υπόβαθρο (π.χ. ray-casting), επιτυγχάνεται αντίστοιχα αμεσότητα και φυσικότητα σε όλα τα γενικά καθήκοντα αλληλεπίδρασης (επιλογή, πλοήγηση, χειρισμός και έλεγχος συστήματος).

7.3. Ανίχνευση σύγκρουσης και Μηχανισμοί ενεργοποίησης γεγονότων αλληλεπίδρασης

7.3.1. Η ανίχνευση σύγκρουσης

Η δημιουργία συμβάντων και η υλοποίηση των περισσότερων τεχνικών αλληλεπίδρασης που περιγράφονται στην Ενότητα 7.2 γίνεται με τη χρήση ανίχνευσης σύγκρουσης. Η μηχανή φυσικής συμπεριφοράς του Unity βασίζεται στην ύπαρξη των στοιχείων (components) ανίχνευσης σύγκρουσης (colliders- «συγκρουστές») σε κάθε αντικείμενο. Τα στοιχεία ανίχνευσης σύγκρουσης καθορίζουν τη μορφή/3Δ σχήμα του αντικειμένου όσον αφορά την ανίχνευση φυσικών συγκρούσεων: μπορεί είτε να έχουν την ίδια γεωμετρία και μορφή με το πλέγμα του αντικειμένου πάνω στο οποίο βρίσκονται (mesh colliders), ή να έχουν τη μορφή βασικών σχημάτων (σφαίρα, κουτί, κάψουλα κλπ.), όταν θέλουμε ταχύτερους υπολογισμούς και μικρότερη ακρίβεια. Αν επιθυμείται οι συγκρουστές να προκαλούν φυσική αλληλεπίδραση μεταξύ των συγκρουόμενων αντικειμένων (π.χ. ένα κινούμενο αντικείμενο μεγάλης μάζας πέφτει πάνω σε ένα άλλο, μικρότερης μάζας, τότε το μικρότερο θα εκτιναχθεί ανάλογα με τη φυσική της σύγκρουσης), πρέπει να προστεθεί και ένα στοιχείο στερεού σώματος (rigid-body component) σε

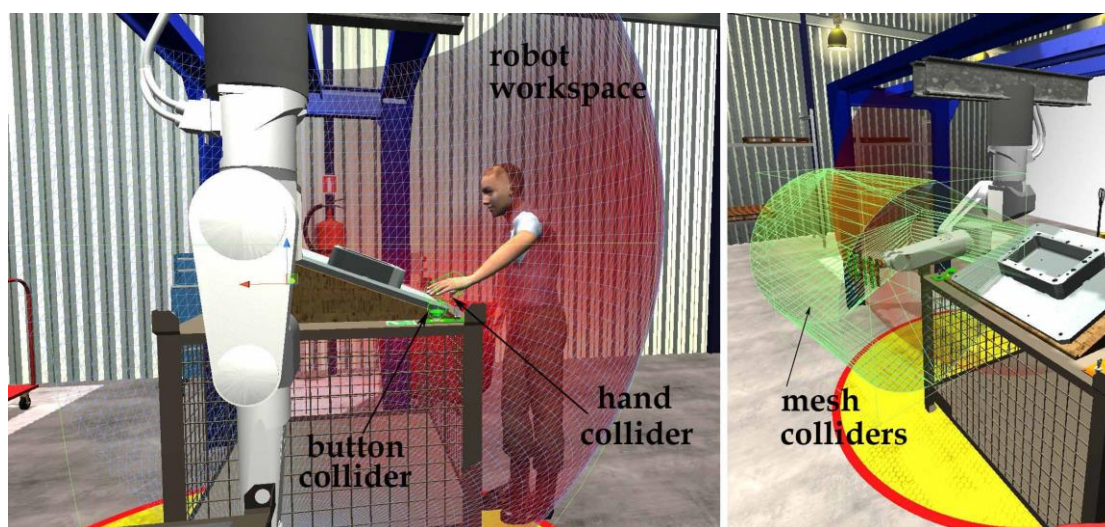
τουλάχιστον ένα εκ των αντικειμένων. Τα στοιχεία στερεού σώματος είναι απαραίτητα για την ενεργοποίηση ρεαλιστικής συμπεριφοράς φυσικής και μπορεί να είναι είτε στατικά ή κινηματικά. Τα στατικά στοιχεία χρησιμοποιούνται σε αντικείμενα που δεν κινούνται στο χώρο και μάλιστα σε αντικείμενα στα οποία η πτώση ενός άλλου στερεού σώματος επάνω τους, δεν θα τους προκαλέσει κάποια κίνηση. Τα κινηματικά στοιχεία στερεού σώματος (kinematic rigid-body colliders) τοποθετούνται σε αντικείμενα τα οποία κινούνται στην εικονική σκηνή και επιθυμείται να αλληλεπιδρούν με συμπεριφορά φυσικής στερεού σώματος με τα αντικείμενα με τα οποία συγκρούονται.



Εικόνα 7-7: Τα βασικά στοιχεία ανίχνευσης σύγκρουσης (με υπερτονισμένο πράσινο χρώμα) στην εφαρμογή beWare of the Robot v2.0.

Τα κυριότερα στοιχεία σύγκρουσης των διαφορετικών αντικειμένων στο ΕΠε παρουσιάζονται στην Εικόνα 7-7. Στην έκδοση 2.0, η οποία είναι η πλουσιότερη από πλευράς στοιχείων αλληλεπίδρασης, χρησιμοποιούνται κυρίως τα εξής στοιχεία ανίχνευσης σύγκρουσης: (i) στο ανθρωποειδές έχουμε κινηματικά στοιχεία στερεού σώματος τύπου κάψουλας και συγκεκριμένα στον κορμό του (ώστε να περικλείουν όλο το άνω τμήμα του σώματός του), στους πήχεις του και στους δείκτες των χεριών του, (ii) στο ρομπότ έχουμε κινηματικά στοιχεία τύπου κουτιού (box colliders) γύρω από το βραχίονα, τον αγκώνα, τον πήχη και τον καρπό, (iii) στο καλούπι έχουμε στατικά στοιχεία τύπου κουτιού, τα οποία περικλείουν τα σημεία τοποθέτησης των ανθρακοϋφασμάτων, (iv) στα ανθρακοϋφάσματα έχουμε κινηματικά στοιχεία τύπου κουτιού, (v) στα κουμπιά υπάρχουν στατικά στοιχεία τύπου σφαίρας και, τέλος, (vi) στην αναπαράσταση του χώρου εργασίας του ρομπότ, έχουμε στατικό στοιχείο τύπου πλέγματος. Οι παραπάνω colliders συνεισφέρουν στη βασική λειτουργική

αλληλεπίδραση της εφαρμογής και όχι στην ενεργοποίηση των τεχνικών αποφυγής σύγκρουσης, για την οποία χρησιμοποιούνται επιπλέον στοιχεία, όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 8.



Εικόνα 7-8: Στοιχεία ανίχνευσης σύγκρουσης κατά το πάτημα του κουμπιού έναρξης από το χρήστη (αριστερά) και στοιχεία τύπου πλέγματος επάνω στην ένδειξη του όγκου κίνησης του ρομπότ (δεξιά)

Όταν ανιχνευθεί μία σύγκρουση, η μηχανή φυσικής του Unity καλεί κάποιες συναρτήσεις, οι οποίες μπορεί να βρίσκονται σε οποιοδήποτε στοιχείο κώδικα του εμπλεκόμενου αντικειμένου. Η συνάρτηση `OnCollisionEnter()` καλείται αμέσως μετά τη σύγκρουση και χρησιμοποιείται για την εκκίνηση κάποιας ενέργειας. Εάν δεν επιθυμείται η εκτέλεση υπολογισμών φυσικής, παρά μόνο να προκληθεί/διεγερθεί κάποιο γεγονός (π.χ. ενεργοποίηση οπτικού συναγερμού εισόδου του χρήστη στο ρομποτικό χώρο εργασίας) τότε χρησιμοποιούνται οι συναρτήσεις τύπου «σκανδάλης» (`trigger`). Η συνάρτηση `OnTriggerEnter()` καλείται άπαξ μόλις ανιχνευθεί μία επαφή και αποστέλλει ένα μήνυμα ενεργοποίησης γεγονότος και στα δύο εμπλεκόμενα αντικείμενα. Η συνάρτηση `OnTriggerStay()` καλείται συνεχόμενα, σε κάθε `frame`, όσο μια επαφή διατηρείται στο χρόνο και τέλος η συνάρτηση `OnTriggerExit()` δηλώνει το πέρας αυτής της επαφής. Επίσης, το κάθε στοιχείο ανίχνευσης σύγκρουσης μπορεί να διαθέτει μια ετικέτα (`tag`) με ένα συγκεκριμένο όνομα, έτσι ώστε να αλληλεπιδρά με άλλα στοιχεία, τα οποία διαθέτουν ένα συγκεκριμένο όνομα ετικέτας. Ο μηχανισμός της ενεργοποίησης γεγονότων και δημιουργίας συμβάντων με τη χρήση συναρτήσεων `triggering` χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό στην εφαρμογή `beWare of the Robot` και μάλιστα σε πολλά καθήκοντα αλληλεπίδρασης, όπως η ενεργοποίηση συναγερμών, η τροφοδοσία και η στρώση ανθρακούφασμάτων, το πάτημα κουμπιών κ.ά.

7.3.2. Οι μηχανισμοί ενεργοποίησης των γεγονότων αλληλεπίδρασης

Όπως περιγράφηκε στις Ενότητες 7.2 και 7.3.1 τα περισσότερα καθήκοντα αλληλεπίδρασης/δραστηριότητες εκτελούνται με τη χρήση πληθώρας τεχνικών και υλοποιούνται με μηχανισμούς όπως η ανίχνευση σύγκρουσης, η εκπομπή ακτίνων κλπ. Στην Ενότητα αυτή θα περιγραφούν ενδεικτικά κάποιοι χαρακτηριστικοί

μηχανισμοί ενεργοποίησης των γεγονότων αλληλεπίδρασης της έκδοσης 2.0, έτσι ώστε να είναι καλύτερα κατανοητή η λειτουργία της εφαρμογής.

Κατά την εκκίνηση της εφαρμογής και προκειμένου να ξεκινήσει το συνεργατικό σενάριο, ο χρήστης πρέπει να πατήσει με τα χέρια του το πράσινο κουμπί ώστε το ρομπότ να κινηθεί προς τον πάγκο, να αναζητήσει το πρώτο ανθρακοϋφασμα και να το μεταφέρει προς το χρήστη. Στην πραγματικότητα, όταν ο χρήστης πατάει το κουμπί με τα χέρια του στο ΕΠε, ανιχνεύεται επαφή μεταξύ του κινηματικού στοιχείου σύγκρουσης που περικλείει τα χέρια του χρήστη και του στατικού σφαιρικού collider που περικλείει το κουμπί, οπότε καλείται η συνάρτηση `OnTriggerEnter()` εντός του κώδικα `ButtonStart`, ο οποίος είναι στοιχείο (component) στο αντικείμενο του κουμπιού. Μέσα από τη συνάρτηση `OnTriggerEnter()` ενεργοποιείται καταρχάς ένα τμήμα κώδικα το οποίο υλοποιεί τη μεταφορά του πατήματος του κουμπιού (button click metaphor) και κατά δεύτερον ξεκινούν οι εξής ενέργειες: (i) η δημιουργία του στιγμιότυπου του πρώτου υφάσματος στην εικονική σκηνή, (ii) η εκκίνηση της εγγραφής διαφόρων χαρακτηριστικών γεγονότων σε αρχείο καταγραφής (logging) και (iii) η εκκίνηση της κίνησης του ρομπότ προκειμένου να φέρει στο χρήστη το πρώτο ανθρακοϋφασμα (κίνηση `InitialRotationToCloth`). Η υλοποίηση της μεταφοράς πατήματος του κουμπιού φαίνεται στην Εικόνα 7-9(a)-(d): η κίνηση του κουμπιού προς τα κάτω στον y άξονα γίνεται με τη χρήση μιας ημιτονοειδούς συνάρτησης έτσι ώστε να ολοκληρωθεί η κίνηση προς τα κάτω και η επαναφορά του κουμπιού στην αρχική θέση σε μια περίοδο 0.5 s. Ταυτόχρονα ενεργοποιείται και η φωτεινή λάμψη γύρω από το κουμπί (Εικόνα 7-9c) και ο ήχος «κλικ» για όσο διαρκεί η παραπάνω κίνηση.

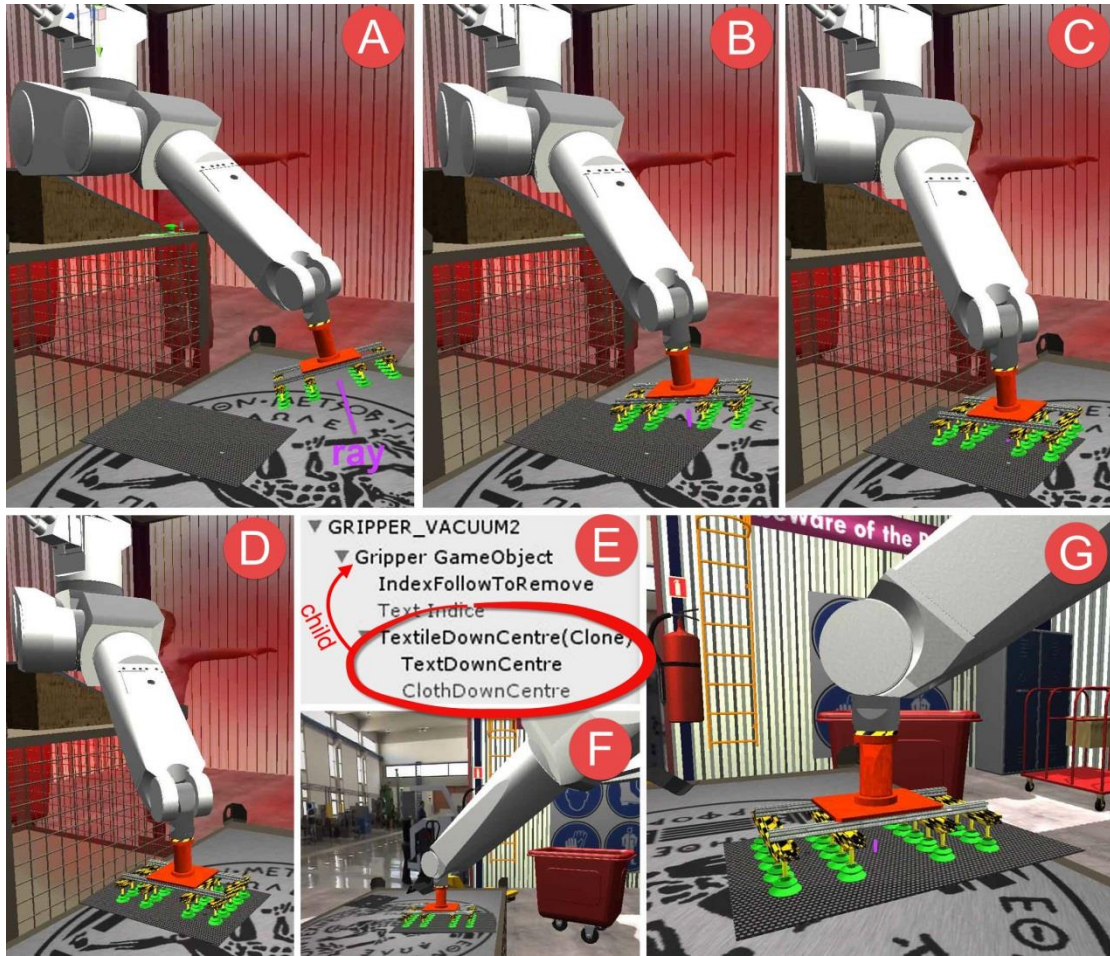
Η παραλαβή του ανθρακοϋφάσματος από το ρομπότ υλοποιείται με τη χρήση εκπομπής ακτίνας (ray-casting) και συγκεκριμένα με την εκπομπή μίας αόρατης ακτίνας μήκους 0.01 m, από το άκρο της αρπάγης του ρομπότ. Τα διαφορετικά τεμάχια ανθρακοϋφάσματος δημιουργούνται ένα-ένα, ως στιγμιότυπα των αντίστοιχων prefabs, και έχουν προσαρτημένο επάνω τους ένα στοιχείο ανίχνευσης σύγκρουσης (box collider), το οποίο αλληλεπιδρά με τις ακτίνες, και μία ετικέτα (tag) με το όνομά τους. Καθώς το ρομπότ κινείται, κινείται και η ακτίνα που ακτινοβολεί από την αρπάγη, και χτυπά επάνω σε διάφορα αντικείμενα (βλ. Εικόνα 7-10A). Η συνάρτηση `Raycast()` έχει τη δυνατότητα να «διαβάζει» και να επιστρέφει τις ετικέτες των αντικείμενων τα οποία χτυπά και έτσι έχει προγραμματισθεί να αναζητά μόνο τα αντικείμενα με την ετικέτα των προς παραλαβή ανθρακοϋφασμάτων. Όταν η ακτίνα της ρομποτικής αρπάγης χτυπήσει επάνω σε ένα ανθρακοϋφασμα, τότε το προσαρτά στην ιεραρχία ως παιδί της (βλ. Εικόνα 7-10E) και φροντίζει να γίνει σχεδόν ακαριαία ο παραλληλισμός και το κεντράρισμα των μεταξύ τους επιπέδων, έτσι ώστε να αποδοθεί στη σκηνή το εφέ της δια κενού προσκόλλησης του υφάσματος στην πνευματική αρπαγή (βλ. Εικόνα 7-10B-D). Παράλληλα, το τμήμα του καλουπιού πάνω στο οποίο πρέπει να στρωθεί το συγκεκριμένο ανθρακοϋφασμα γίνεται κόκκινο (υπερτονίζεται), ενώ ενημερώνεται το αντικείμενο `perceptionObject` για την ταυτότητα του τρέχοντος ανθρακοϋφάσματος, ώστε να προσαρμοσθεί η εξέλιξη των καθηκόντων στο συγκεκριμένο κάθε-φορά ανθρακοϋφασμα. Το

προσαρτημένο από την αρπάγη ανθρακοϋφασμα παρουσιάζεται στις Εικόνα 7-10(D), (F), (G) και η κατοπινή μεταφορά του προς το χρήστη φαίνεται στην Εικόνα 7-11.

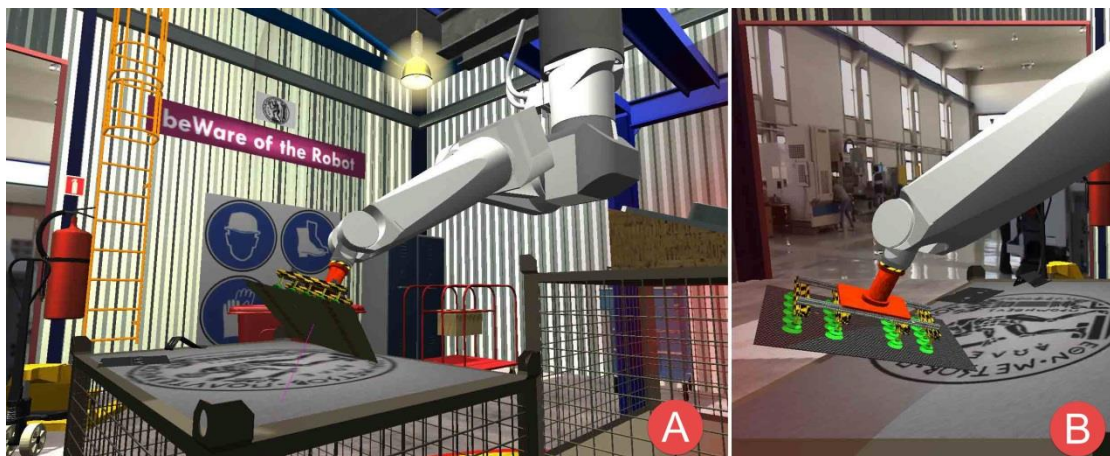


Εικόνα 7-9: Επάνω, το ανθρωποειδές εισέρχεται στο χώρο εργασίας του ρομπότ και πατάει το πράσινο κουμπί έναρξης. Κάτω, η υλοποίηση της μεταφοράς του πατήματος κουμπιού: (a) επαφή (isTrigger), (b) πάτημα/κίνηση (c) οριακή κάτω θέση (ήχος «κλικ» και φωτεινή λάμψη), (d) επαναφορά

Μετά την παραλαβή του υφάσματος από το ρομπότ, ξεκινά η κίνηση του ρομπότ προς το χρήστη (συνάρτηση `BringTextileTowardsUser()`). Ο προγραμματισμός της τροχιάς του ρομπότ γίνεται με ευθεία κινηματική, δηλαδή γίνεται παρεμβολή μεταξύ του τρέχοντος και του τελικού τετραδρόνιου προσανατολισμού (Quaternion), με τη χρήση της συνάρτησης `Quaternion.Lerp()` του Unity.



Εικόνα 7-10: Η προσάρτηση και παραλαβή του ανθρακούφασματος. Για λόγους βέλτιστης παρουσίασης, διακρίνεται η ακτίνα που εκπέμπεται από την αρπάγη του ρομπότ με ιώδες χρώμα (A).



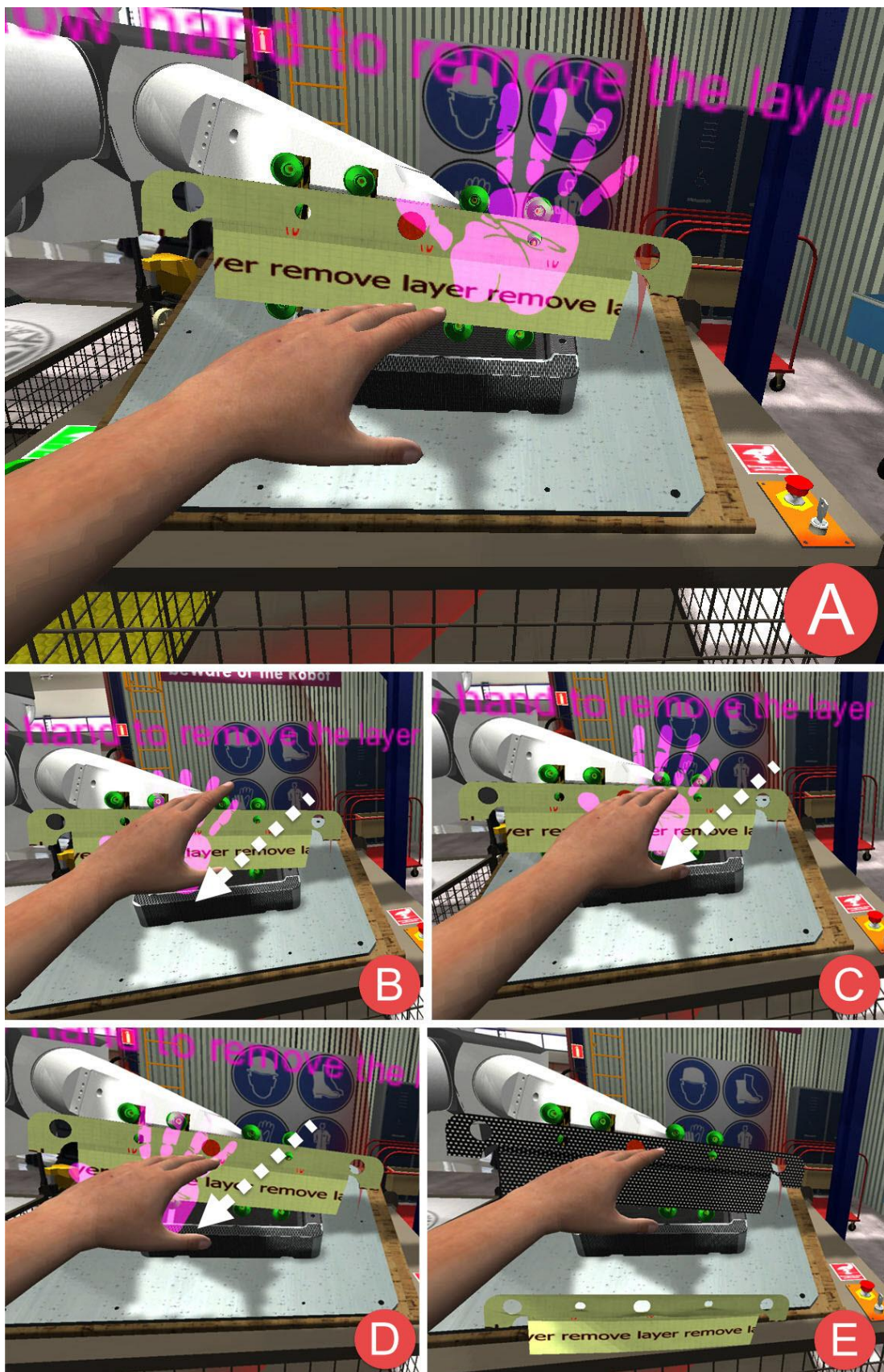
Εικόνα 7-11: Το ανθρακούφασμα, αφού έχει προσαρτηθεί ως τέκνο στη ρομποτική αρπάγη, μεταφέρεται από τον πάγκο εναπόθεσης προς το χρήστη.

Αφού το ρομπότ φέρει το ανθρακούφασμα έναντι του χρήστη και μετά το πέρας της κίνησης του ρομπότ, ξεκινάει η τεχνική «ακολούθησε το χέρι μου» (“Follow my hand”) με το μοτίβο της κινούμενης ιώδους ημιδιαφανούς παλάμη χεριού, που περιγράφηκε στην Ενότητα 7.2 και παρουσιάζεται στην Εικόνα 7-12(A). Ο χρήστης

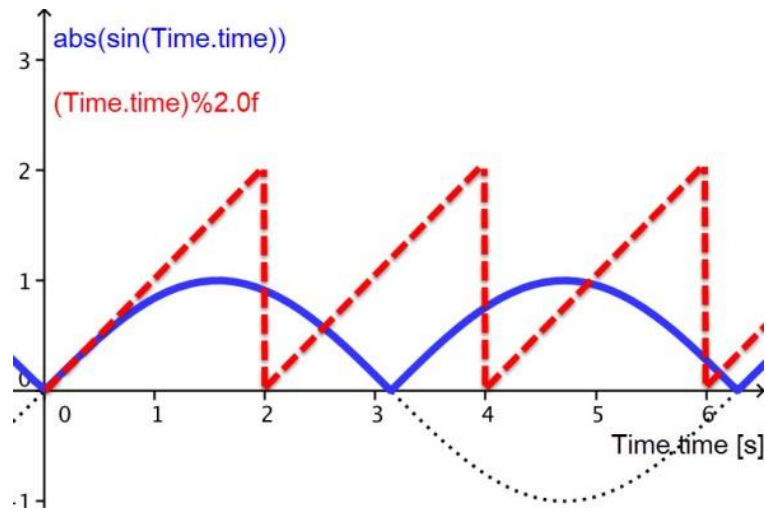
πρέπει να ακολουθήσει, ακουμπώντας με το χέρι του, για 2 s, την ένδειξη/οδηγό της εικονικής παλάμης, προκειμένου να αφαιρέσει το προστατευτικό κάλυμμα της κολλώδους πλευράς του ανθρακοϋφάσματος (εικονική αφαίρεση του αυτοκόλλητου καλύμματος/virtual removal metaphor, βλ. Εικόνα 7-12B, C και D). Όσο ο χρήστης ακουμπάει με τα δάκτυλα του χεριού του την ένδειξη της εικονικής παλάμης, σημειώνεται επαφή μεταξύ των στοιχείων σύγκρουσης (colliders) που διαθέτουν τα δύο αντικείμενα. Με τη χρήση της συνάρτησης OnTriggerStay() και για όσο διαρκεί αυτή η επαφή, ξεκινά ένα χρονόμετρο το οποίο μετράει το χρόνο επαφής. Κατόπιν, μόλις ο χρήστης έχει ακολουθήσει με το χέρι του το μοτίβο της κινούμενης ένδειξης για το ζητούμενο χρόνο, τότε ενεργοποιείται η ιδιότητα φυσικής υφάσματος στο αυτοκόλλητο κάλυμμα, οπότε αυτό αποκολλάται από το ανθρακοϋφασμα και πέφτει με τη δύναμη της βαρύτητας προς το δάπεδο (βλ. Εικόνα 7-12(E)). Ταυτόχρονα, σταματάει η ρουτίνα κίνησης του εικονικού χεριού και αυτό εξαφανίζεται από την εικονική σκηνή.

Η κινούμενη παλάμη κινείται ταυτόχρονα στους άξονες x και y, σε μια κεκλιμένη διεύθυνση στο κατακόρυφο επίπεδο XY, η οποία επιτυγχάνεται με τις συναρτήσεις $x = x + a(2t\%10)$ και $y = y - b(2t\%10)$, όπου (x,y) οι συντεταγμένες του εικονικού χεριού, t ο χρόνος σε s και «%» (ή mod) είναι το σύμβολο του τελεστή του υπόλοιπου της διαίρεσης. Με τη χρήση του τελεστή του υπόλοιπου της διαίρεσης, επιτυγχάνεται ένα περιοδικό, γραμμικά κλιμακωτό μοτίβο κίνησης, η μορφή του οποίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 7-13.

Το γραφικό μοντέλο της εικονικής ένδειξης της παλάμης-οδηγού, υλοποιείται με τη χρήση στοιχείων Line Renderer του Unity, τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως είτε για τη δημιουργία γραμμικών μορφών που έχουν σταθερό προσανατολισμό στο χώρο, ανεξάρτητα της πλευράς από την οποία τα κοιτάει κανείς, σα να «επιπλέουν» ελεύθερα (free-floating lines). Το γραφικό αποτέλεσμα της ημιδιαφανούς φωτεινής παλάμης το οποίο παρουσιάζεται σαν «ολόγραμμα» στο χώρο, επιτυγχάνεται με κατάλληλη χρήση διαπερατής υφής και με υλικό υφής τύπου Particles/Additive.



Εικόνα 7-12: Η υλοποίηση της μεταφοράς της αφαίρεσης του χάρτινου καλύμματος της κολλώδους πλευράς του ανθρακούφασματος.



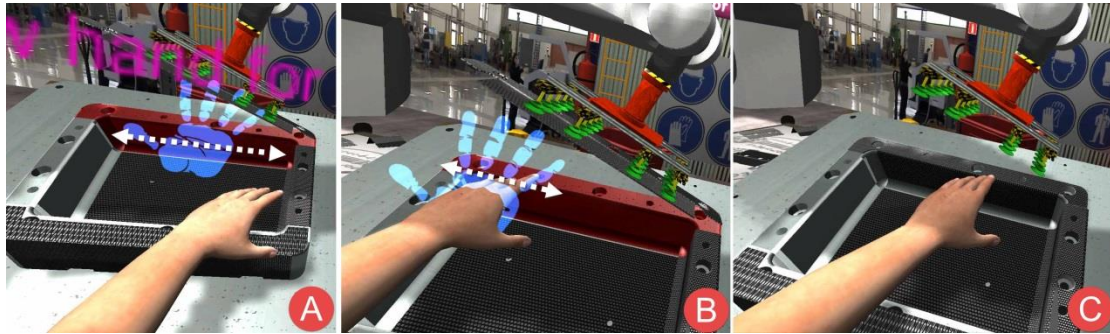
Εικόνα 7-13: Γραφική παράσταση των δύο συναρτήσεων με βάση τις οποίες δημιουργούνται τα μοτίβα κίνησης του βοηθήματος/οδηγού του εικονικού χεριού.

Μετά την αφαίρεση του καλύμματος, ξεκινά η κίνηση του ρομπότ προς το κατάλληλο τμήμα του καλούπι επί του οποίου θα τοποθετηθεί το ανθρακούφασμα (μία ξεχωριστή συνάρτηση `RotationPlaceTextile()` ανά επιμέρους ανθρακούφασμα, λόγω διαφορετικής θέσης τοποθέτησης στο καλούπι). Όταν ολοκληρωθεί αυτή η κίνηση, το ύφασμα βρίσκεται ακριβώς επάνω από τη θέση τοποθέτησης, με κατάλληλο προσανατολισμό, ώστε να ακουμπά μόνο η μία του ακμή στο καλούπι και το υπόλοιπο τμήμα του να είναι ακόμα προσαρτημένο στη ρομποτική αρπάγη. Προκειμένου να στρωθεί και το υπόλοιπο τμήμα του, πρέπει να εκτελεστεί η μεταφορά της εικονικής στρώσης (*virtual lay metaphor*) από το χρήστη, όπως περιγράφηκε και στην Ενότητα 7.2. Έτσι, ξεκινάει πάλι η τεχνική «ακολουθήσε το χέρι μου» (“follow my hand”), αυτή τη φορά προσομοιώνοντας την κίνηση της στρώσης επάνω στο καλούπι.

Η γαλάζια, φωτεινή, ημιδιαφανής ένδειξη του χεριού εμφανίζεται πάνω στο τμήμα στο οποίο θα στρωθεί το ανθρακούφασμα και κινείται παλινδρομικά σε όλο το γραμμικό μήκος της στρώσης (βλ. Εικόνα 7-14A), με τις συντεταγμένες της ένδειξης να παίρνουν τιμές μέσα σε ένα εύρος τιμών ($x_{max} - x_{min}$), από μία συνάρτηση ημιτονοειδούς μορφής: $x = x_{min} + (x_{max} - x_{min}) * |\sin(0.5t)|$, η μορφή της οποίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 7-13.

Ο χρήστης πρέπει να ακολουθήσει, ακουμπώντας την με το χέρι του για ένα χρονικό διάστημα μεταξύ 5-12s, την ένδειξη/οδηγό της εικονικής παλάμης, προκειμένου να τοποθετήσει σωστά και να στρώσει το ανθρακούφασμα επάνω στο καλούπι (εικονική στρώση του ανθρακούφασματος/*virtual lay metaphor*, βλ. Εικόνα 7-14B). Όπως και στην εικονική αφαίρεση του καλύμματος, έτσι κι εδώ, όσο ο χρήστης ακουμπάει με τα δάκτυλα του χεριού του την ένδειξη της εικονικής παλάμης, σημειώνεται επαφή μεταξύ των στοιχείων σύγκρουσης (*colliders*) που διαθέτουν τα δύο αντικείμενα. Με τη χρήση της συνάρτησης `OnTriggerStay()` και για όσο διαρκεί αυτή η επαφή, ξεκινάει ένα χρονόμετρο το οποίο μετράει το χρόνο επαφής. Όταν ο χρήστης έχει ακολουθήσει για το ζητούμενο χρόνο με το χέρι του το

μοτίβο της κινούμενης ένδειξης, τότε το τεμάχιο ανθρακούφασμα που συγκρατείται από το ρομπότ καταστρέφεται από τη σκηνή και ταυτόχρονα εμφανίζεται μοντέλο του στρωμένου ανθρακούφασματος, τοποθετημένου στην οριστική του θέση (βλ. Εικόνα 7-14C). Ταυτόχρονα, σταματάει η ρουτίνα κίνησης του εικονικού χεριού και αυτό εξαφανίζεται από την εικονική σκηνή, ενώ ενεργοποιείται ένας χαρακτηριστικός ήχος ο οποίος παραπέμπει στην επιτυχή ολοκλήρωση του καθήκοντος.



Εικόνα 7-14: Η υλοποίηση της μεταφοράς της στρώσης του ανθρακούφασματος στο καλούπι (virtual lay metaphor).

Αφού ολοκληρωθεί το καθήκον της στρώσης, το ρομπότ κινείται πάλι προς τον πάγκο με τα ανθρακούφασμα (συνάρτηση κίνησης `RotationReturnToTextiles()`) και η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται ανάλογα και για τα εναπομείναντα τεμάχια ανθρακούφασμάτων.

7.4. Σύνθεση

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά παρουσιάστηκαν ορισμένα ενδεικτικά διαγράμματα UML 2.0, ως ένας φορμαλισμός αναπαράστασης και ανάλυσης της δομής (Structure Diagram) και της συμπεριφοράς της εφαρμογής (Use Case Diagram, Activity Diagram). Τα διαγράμματα UML, εκτός από εργαλεία αντικειμενοστραφούς ανάλυσης, μπορούν να συνεισφέρουν στη συστηματοποίηση της παραγόμενης γνώσης και στη δημιουργία ευφυΐας μέσω της ανάλυσης της συμπεριφοράς των Εικονικών Περιβαλλόντων.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν οι τεχνικές αλληλεπίδρασης που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των βασικών καθηκόντων της συνεργασίας A-P στο Εικονικό Περιβάλλον. Επισημάνθηκε ότι, εξαιτίας της ανίχνευσης κίνησης (tracking) και της χρήσης του ανθρωποειδούς για την αναπαράσταση των καθηκόντων του χρήστη, επιτυγχάνεται αντίστοιχα αμεσότητα και φυσικότητα σε όλα τα γενικά καθήκοντα αλληλεπίδρασης (επιλογή, πλοήγηση, χειρισμός και έλεγχος συστήματος). Δημιουργήθηκαν δύο πρωτότυπες μεταφορές αλληλεπίδρασης, αυτές της εικονικής συνεργατικής στρώσης (virtual lay metaphor) και αυτή της εικονικής αφαίρεσης του αυτοκόλλητου καλύμματος (virtual removal metaphor), και μία τεχνική. Η τεχνική «ακολούθησε το χέρι μου» (follow my hand) πραγματοποιείται με τη χρήση ενός εικονικού χεριού (οδηγού/πλότου) και ενός

μοτίβου κίνησης, παράγοντας ένα γνωστικό βοήθημα προσομοίωσης του πραγματικού καθήκοντος στο ΕΠε.

Κατόπιν, έγινε περιγραφή των βασικότερων στοιχείων (colliders) και δυνατοτήτων ανίχνευσης σύγκρουσης που προσφέρει το Unity, αλλά και της χρήσης των διαφορετικών στοιχείων για την υλοποίησή της. Τέλος, αναλύθηκαν ενδεικτικά οι πιο χαρακτηριστικοί μηχανισμοί ενεργοποίησης (triggers) των συμβάντων και των γεγονότων της αλληλεπίδρασης στα κύρια συνεργατικά καθήκοντα του συστήματος.

8. Οι τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας Ανθρώπου-Ρομπότ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί από τον ορισμό του ερευνητικού ερωτήματος στο Κεφ. 1, η παρούσα διδακτορική διατριβή διερευνά ενεργητικές τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας οι οποίες υπερβαίνουν τη λογική stop-and-go στην αλληλεπίδραση A-P και δεν διακόπτουν -κατά το δυνατόν- την ομαλή ροή (flow) της συνεργασίας. Κομβικής σημασίας για την επίτευξη της ασφάλειας και της εύροιας (fluency) στη συνεργασία A-P, είναι η επίγνωση της κατάστασης (situation awareness) και η αναγνώριση της πρόθεσης (anticipation of intention/intention recognition), τόσο από τον άνθρωπο, όσο και από το ρομπότ (Hoffman & Breazeal, 2007) (Schlenoff, Pietromartire, Kootbally, Balakirsky, & Fougou, 2013). Κατά την αναγνώριση πρόθεσης, είτε το ρομπότ, ή ο άνθρωπος, επιχειρεί να προβλέψει τις μελλοντικές κινήσεις και πράξεις του έτερου συνεργάτη του, ερμηνεύοντας κατάλληλα τις πράξεις του, ώστε να είναι δυνατή η εκτέλεση της εργασίας (ή έστω τμήματος αυτής) χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο ο άνθρωπος. Συνεπώς, η ενεργοποίηση οποιασδήποτε τεχνικής αποφυγής σύγκρουσης, ή συναγερμού, θα πρέπει να πραγματοποιείται με βάση ένα κριτήριο πρόβλεψης της πρόθεσης (κίνησης) του ρομπότ ή του ανθρώπου αντίστοιχα, ή έστω, εναλλακτικά, της σχετικής μεταξύ τους θέσης στο άμεσο μέλλον, εφόσον κινούνται και οι δύο στο χώρο.

Από τα παραπάνω προκύπτουν οι δύο κατευθυντήριες γραμμές: (i) ο σχεδιασμός των τεχνικών ασφάλειας κατά την κίνηση του ρομπότ (π.χ. τεχνικές αποφυγής συγκρούσεων) ώστε να μη δυσχεραίνεται η ροή, η επικοινωνία και η άνεση της συνεργασίας, και, (ii) η γνωστική διευκόλυνση της αντίληψης της κατάστασης (situation awareness), της πρόβλεψης της πρόθεσης και της συμπεριφοράς, αμφίδρομα, τόσο από τον άνθρωπο, όσο και από τον ελεγκτή του βιομηχανικού ρομπότ. Σε κάθε περίπτωση ο άνθρωπος θα πρέπει να είναι συνεχώς ενήμερος και να επαγρυπνεί για τον εν δυνάμει κίνδυνο, αλλά ταυτόχρονα να αποδέχεται τη συνύπαρξη και να συνεργάζεται με το ρομποτικό του εταίρο. Η πρόκληση που αντιμετωπίζουμε είναι η προσπάθεια συγκερασμού και εξισορρόπησης αφενός της ασφάλειας, χωρίς καμία απολύτως έκπτωση σε αυτήν, και αφετέρου της αποδοτικότητας, της άνεσης και της εύροιας της συνεργασίας ανθρώπου-ρομπότ.

Ταυτόχρονα πρέπει να διασφαλισθεί ότι η ενεργοποίηση της τεχνικής αποφυγής ή του συναγερμού δεν θα γίνεται υπερβολικά νωρίς, άσκοπα ή χωρίς ιδιαίτερο λόγο, διότι αυτό είτε θα οδηγήσει το χρήστη στο να αγνοεί την όποια νύξη ή συναγερμό έπειτα από έναν αριθμό αναίτιων κατ' αυτόν ενεργοποιήσεων, ή διαφορετικά θα οδηγήσει στη δραματική αύξηση του απαιτούμενου χρόνου συνεργασίας.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται καταρχάς η λογική και τα κριτήρια ενεργοποίησης διαφορετικών τεχνικών ασφάλειας και κατά δεύτερον οι τεχνικές ασφάλειας αυτές καθαυτές. Η λογική των δημιουργηθέντων τεχνικών είναι διττή, καθότι οι διαφορετικές τεχνικές δρουν σε δύο κατευθύνσεις: (i) η μία είναι παθητική, απευθύνεται στον άνθρωπο και σκοπεύει στην καλλιέργεια *προνοητικής/προβλεπτικής* (proactive) συμπεριφοράς εκ μέρους του, και, (ii) η άλλη είναι ενεργητική και σκοπεύει στη δημιουργία *προσαρμοστικής* (adaptive) κινηματικής συμπεριφοράς από

το ρομπότ. Η προβλεπτική τεχνική απευθύνεται άμεσα στο γνωστικό μοντέλο του ανθρώπου, καθώς στοχεύει στην υποστήριξη της επικοινωνίας του με το ρομπότ, της επίγνωσης της κατάστασης και της αντίληψης του κινδύνου. Οι προσαρμοστικές (adaptive) τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας A-P που ερευνούμε είναι δύο (i- επιβράδυνση, ii-υποχώρηση) και εστιάζουν στην αποφυγή της επαφής μεταξύ A-P, χωρίς διακοπή της κίνησης του ρομπότ (αδιάκοπη συνεργασία).

8.1. Τα κριτήρια ενεργοποίησης της τεχνικής ασφαλούς συνεργασίας

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, η λογική της επιτυχούς ενεργοποίησης μιας τεχνικής ασφαλούς συνεργασίας ή ενός συναγερμού, βασίζεται σε κριτήρια τα οποία διασφαλίζουν ότι η ενεργοποίησή τους δε θα γίνεται υπερβολικά νωρίς, ή άσκοπα (false alarms), διότι αυτό είτε θα αυξήσει το χρόνο συνεργασίας, ή θα οδηγήσει το χρήστη στο να αγνοεί πλήρως τον όποιο συναγερμό (σύνδρομο του «ψεύτη βοσκού»). Οι «ψεύτικοι» ή άσκοποι συναγερμοί είναι τοπικό χαρακτηριστικό ενός κακοσχεδιασμένου διαδραστικού συστήματος αυτού του είδους και προκειμένου να αποφευχθούν, πρέπει να κατανοηθεί από το σχεδιαστή του συστήματος ο συνδυασμός των γνωστικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα μέχρι την απόφαση και τελικά την αντίδραση του χρήστη (βλ. Εικόνα 8-1). Τα ερεθίσματα του συναγερμού (οπτικά ή ηχητικά) που δέχεται ο χρήστης επεξεργάζονται σε συνδυασμό με τις άλλες πληροφορίες που λαμβάνει από το περιβάλλον, προκειμένου να ερμηνευθεί η αιτία και η προέλευση του συναγερμού. Από εκεί και πέρα, η αντίδραση του χρήστη θα εξαρτηθεί από την κατανόηση του σήματος βάσει: του παρελθόντος του χρήστη με το σύστημα που εκπέμπει το συναγερμό, του νοητικού του μοντέλου για το συμβάν (προσλαμβάνουσες), και της προσδοκίας του και της προβλεψιμότητας του συναγερμού.

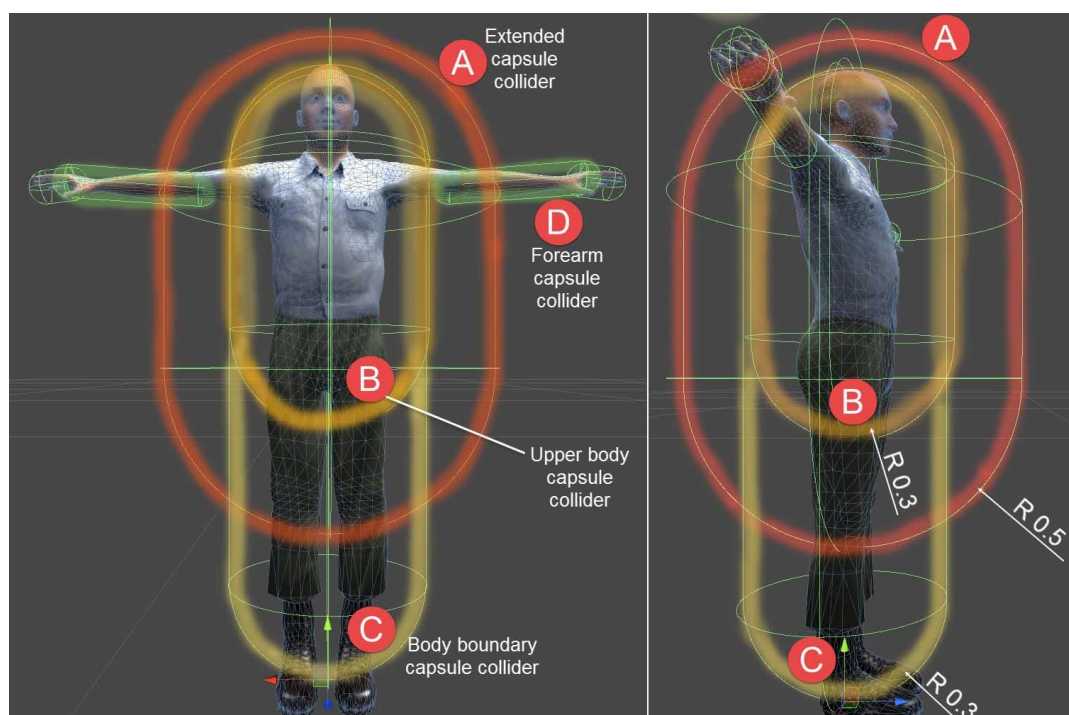


Εικόνα 8-1: Μηχανισμός γνωστικής επεξεργασίας ενός σήματος συναγερμού [προσαρμογή από (Endsley, 2011)]

Σύμφωνα με τη θεωρία της επίγνωσης της κατάστασης του Endsley (Endsley, 1995, 2011; Wickens, 2008) οι χρήστες πρέπει να έχουν επίγνωση της κατάστασης «μέσα σε ένα χωρικό και χρονικό πλαίσιο», το οποίο στη δική μας περίπτωση πρέπει να είναι δυναμικό και να εξαρτάται σε πραγματικό χρόνο από τις δυνατότητες κίνησης του ρομπότ σε σχέση με τον επίσης κινούμενο άνθρωπο και, ειδικότερα, από έναν συνδυασμό: ταχύτητας, σχετικής θέσης, κατεύθυνσης κίνησης, ενδεχόμενου

σύγκρουσης κλπ. Προκειμένου να είναι δυνατή η αποτελεσματική και κλιμακούμενη ενεργοποίηση των συμβάντων συναγερμού, ορίζονται αυστηρά και διαφορετικά κριτήρια ενεργοποίησης για κάθε τεχνική/ή συναγερμό. Μάλιστα, προσπαθούμε, εφόσον είναι βέβαια εφικτό, τα δύο πρώτα βήματα για την επίγνωση της κατάστασης (αντίληψη και κατανόηση) να έχουν υποστηριχθεί ήδη μέσα από το κριτήριο ενεργοποίησης, έτσι ώστε να προβάλλεται στο χρήστη απευθείας η επιθυμητή πληροφορία, ή η μελλοντική κατάσταση του συστήματος (τρίτο επίπεδο της επίγνωσης της κατάστασης).

Στη χρονική αλληλουχία της εκτέλεσης της εφαρμογής, τα πρώτα κριτήρια ενεργοποίησης αφορούν τις προβλεπτικές τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας A-P (οπτικοακουστικές ενδείξεις/συναγερμοί), αφού αυτές προηγούνται χρονικά των προσαρμοστικών τεχνικών και στοχεύουν στον εμπλουτισμό της επικοινωνίας του ανθρώπου με το ρομπότ, στην υποστήριξη της επίγνωσης της κατάστασης και της αντίληψης του κινδύνου. Η ενεργοποίηση των προβλεπτικών τεχνικών υλοποιείται αποκλειστικά με τη χρήση στοιχείων ανίχνευσης σύγκρουσης (colliders), τα οποία ανιχνεύουν επαφή μεταξύ του χρήστη και των οπτικών ενδείξεων που έχουν προστεθεί στην εικονική σκηνή ως γνωστικά βοηθήματα (π.χ. κόκκινος ημιδιαφανής όγκος εργασίας του ρομπότ) και θα αποτελέσουν στη συνέχεια οι ίδιες το στοιχείο συναγερμού (π.χ. ο προαναφερθείς όγκος εργασίας αρχίζει να αναβοσβήνει). Τα διαφορετικά στοιχεία ανίχνευσης σύγκρουσης (colliders), τα οποία χρησιμοποιούνται για την ενεργοποίηση των τεχνικών, φαίνονται στην Εικόνα 8-2.



Εικόνα 8-2: Τα διαφορετικά στοιχεία ανίχνευσης σύγκρουσης (colliders) τα οποία χρησιμοποιούνται για την ενεργοποίηση των επιμέρους τεχνικών ασφάλειας.

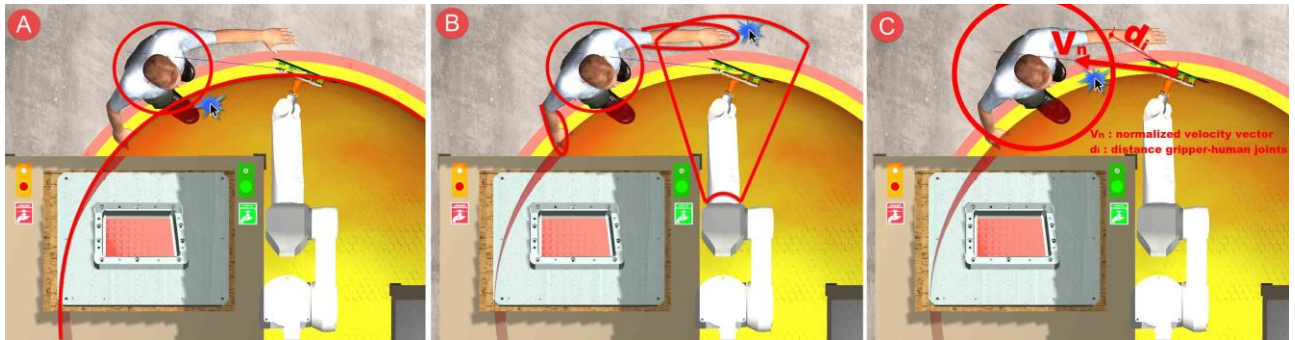
Η διευρυμένη κάψουλα (A) χρησιμοποιείται μόνο στον έλεγχο με το διάνυσμα της κατεύθυνσης κίνησης του ρομπότ, για να ελεγχθεί αν το ρομπότ κινείται προς τον

άνθρωπο. Η κάψουλες (B) και (C) περικλείουν το σώμα του ανθρωποειδούς και χρησιμοποιούνται σε όλους τους ελέγχους, ενώ οι κάψουλες (D) περικλείουν τα χέρια (πήχεις) του ανθρωποειδούς. Εξαιρουμένου του στοιχείου ανίχνευσης (A), τα υπόλοιπα στοιχεία ανίχνευσης σύγκρουσης της Εικ. Εικόνα 8-2 περικλείουν έναν όγκο που καλύπτει αποτελεσματικά σχεδόν όλες τις κινήσεις του αντίστοιχου μέλους του σώματος, βάσει του σεναρίου συνεργασίας. Για παράδειγμα, η κάψουλα (collider) C, καλύπτει το σύνολο του ανθρώπινου σώματος σε όρθια στάση, ενώ η κάψουλα B καλύπτει τον κορμό σε κάμψη ή περιστροφή. Η κάψουλα A χρησιμοποιείται στον έλεγχο της κατεύθυνσης της κίνησης του άκρου του ρομπότ σε σχέση με τον άνθρωπο και είναι μεγεθυμένη (πεπλατυσμένη), προκειμένου να ανιχνεύεται ένα μεγαλύτερο φάσμα κινήσεων γύρω από τον άνθρωπο. Στόχος είναι να ανιχνεύονται κινήσεις με κατεύθυνση η οποία στις δεδομένες συνθήκες δε φαίνεται να είναι προς το ανθρώπινο σώμα, αλλά με μικρο-αλλαγές στην κατεύθυνσή τους, θα μπορούσαν τελικά να καταλήξουν πάνω σε αυτό.

Ο πρώτος συναγερμός (Warning Area Alarm στην Εικόνα 8-3) είναι οπτικός (αναβοσβήνουσα περιβάλλουσα του χώρου εργασίας) και ενεργοποιείται όταν ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι δύο παρακάτω συνθήκες: (i) ο κορμός, ή τα πόδια του χρήστη (colliders B και C στην Εικόνα 8-2) έλθουν σε επαφή με το χώρο εργασίας και (ii) παράλληλα το ρομπότ κινείται, δηλαδή η ταχύτητα του ΤΣΔ, $V > 0$ (πρακτικά έχει τεθεί το όριο $V > 0.01 \text{ m/s}$, έτσι ώστε να μην λαμβάνονται υπόψη οι μικρο-κινήσεις με αμελητέα ταχύτητα). Το κριτήριο ενεργοποίησης του πρώτου συναγερμού αναπαρίσταται γραφικά στην Εικόνα 8-4(A).

Ο επόμενος συναγερμός (Danger Area Alarm στην Εικόνα 8-3) είναι οπτικοακουστικός (αλλαγή χρώματος της προειδοποιητικής οπτικής ένδειξης του όγκου κίνησης/“pie-slice” από κίτρινο σε έντονο κόκκινο και έναρξη ηχητικού συναγερμού). Η τεχνική αυτή ενεργοποιείται όταν: (i) οποιοδήποτε τμήμα του σώματος του χρήστη (κορμός, πόδια ή χέρια, colliders B, C και D αντίστοιχα στην Εικόνα 8-2 και με αυτή τη σειρά) έλθει σε επαφή με τον όγκο κίνησης (pie-slice) και (ii) παράλληλα το ρομπότ κινείται, δηλαδή $V > 0$. Αυτό το κριτήριο ενεργοποίησης απεικονίζεται στην Εικόνα 8-4(B).

Μέχρι τώρα, εξετάστηκαν τα κριτήρια ενεργοποίησης που αφορούσαν τις προνοητικές τεχνικές. Τα κριτήρια αυτά βασίζονται σε κάποιο συμβάν σύγκρουσης του ανθρώπου με κάποια ένδειξη στο ΕΠε, η οποία, μετά από το συμβάν αυτό, μετατρέπεται σε συναγερμό (οπτικό ή ακουστικό). Το επόμενο κριτήριο, το οποίο αφορά στην ενεργοποίηση των προσαρμοστικών τεχνικών, είναι σύνθετο και ορίζεται από έναν συνδυασμό μετρικών, με τη σειρά που αναγράφονται στην Εικόνα 8-3. Συγκεκριμένα: (i) η ταχύτητα της αρπάγης πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από τη μέγιστη ασφαλή ταχύτητα που ορίζει το ISO 10218/2011, ήτοι 0.25 m/s , (ii) η απόσταση μεταξύ της αρπάγης και ενός τουλάχιστον από 8 συνολικά σημεία του άνω σώματος πρέπει να είναι $\leq 1.5 \text{ m}$ (κεφάλι, ώμοι, αγκώνες, χέρια, οπονδυλική στήλη), (iii) η ακτίνα μήκους 0.5 m η οποία εκπέμπεται από την αρπάγη και έχει την κατεύθυνση του διανύσματος της ταχύτητάς της, πρέπει να χτυπάει πάνω στο



Εικόνα 8-4: Οι μηχανισμοί ενεργοποίησης των διαφορετικών τεχνικών ασφαλείας. (A) επαφή collider κορμού χρήστη και ρομποτικού χώρου εργασίας, (B) επαφή collider χεριού και όγκου κίνησης, (C) τομή ακτίνας ταχύτητας και μεγεθυμένου collider ανθρωποειδούς, όταν η απόσταση μεταξύ του σώματος και της αρπάγης επαρκώς μικρή (1.5 m)

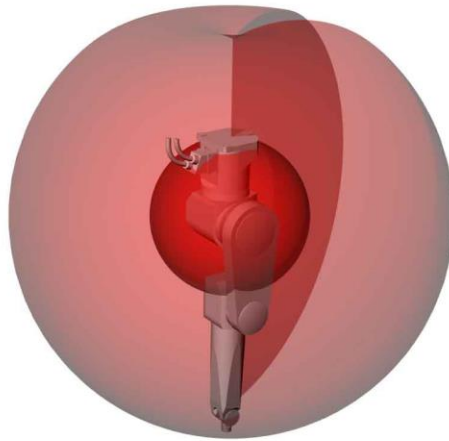
Ο Χρόνος Μέχρι τη Σύγκρουση (TTC) υπολογίζεται λαμβάνοντας ως δεδομένα τη στιγμιαία γραμμική ταχύτητα της ρομποτικής αρπάγης και την απόσταση μεταξύ αυτής και της κοντινότερης άρθρωσης του ανθρωποειδούς, στην κατεύθυνση κίνησης. Η κατεύθυνση της κίνησης της αρπάγης του ρομπότ, υπολογίζεται ως το κανονικοποιημένο διάνυσμα της ταχύτητάς της, σε κάθε χρονική στιγμή. Πάνω σε αυτή την κατεύθυνση γίνεται και η εκπομπή της ακτίνας μήκους 0.5m από το κέντρο της αρπάγης, για την υλοποίηση του ελέγχου επικείμενης σύγκρουσης μεταξύ A-P.

Τα κριτήρια ενεργοποίησης των διαφορετικών τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στην Εικόνα 8-3 και γραφικά στην Εικόνα 8-4.

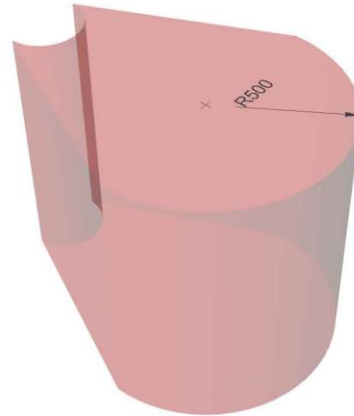
8.2. Η χρήση γνωστικών βοηθημάτων και συναγερμών

Η χρήση γνωστικών βοηθημάτων και συναγερμών είναι μια προνοητική (proactive) τεχνική δημιουργίας προβλεπτικής συμπεριφοράς, η οποία απευθύνεται άμεσα στο γνωστικό μοντέλο του ανθρώπου και στοχεύει στην υποστήριξη της επίγνωσης της κατάστασης, της αντίληψης του κινδύνου και τον εμπλουτισμό της επικοινωνίας του ανθρώπου με το ρομπότ.

Οι δύο βασικές οπτικές ενδείξεις που εισάγονται στο ΕΠε με τη μορφή γνωστικών βοηθημάτων είναι: (i) το βοήθημα του χώρου εργασίας του ρομπότ (robot workspace) και (ii) το βοήθημα του νοητού όγκου κίνησης του ρομπότ. Τα 3D μοντέλα των όγκων αυτών φαίνονται στην Εικόνα 8-5 ως κόκκινες ημιδιαφανείς επιφάνειες τύπου πλέγματος, οι οποίες εισήχθησαν στη συνέχεια στο Unity. Σε αντίθεση με το χώρο εργασίας του ρομπότ, ο οποίος αποτελεί μια καθιερωμένη και χαρακτηριστική έννοια της ρομποτικής, το μοντέλο του όγκου κίνησης είναι πρωτότυπο και έχει τη μορφή σφήνας καμπυλωμένης στη μία της πλευρά (wedge ή «κομμάτι πίτας»/“pie-slice”). Ο όγκος κίνησης είναι προσαρμοσμένος στον πήχη του ρομπότ και κινείται μαζί με αυτό, ενώ εκτείνεται από την τέταρτη άρθρωση του ρομπότ και αυξάνει γραμμικά σε μέγεθος μέχρι την αρπάγη, από όπου ξεκινάει ένα τμήμα κυλινδρικού τομέα ακτίνας R0.5m.



**γνωστικό βοήθημα
χώρου εργασίας**



**γνωστικό βοήθημα
“όγκου κίνησης”**

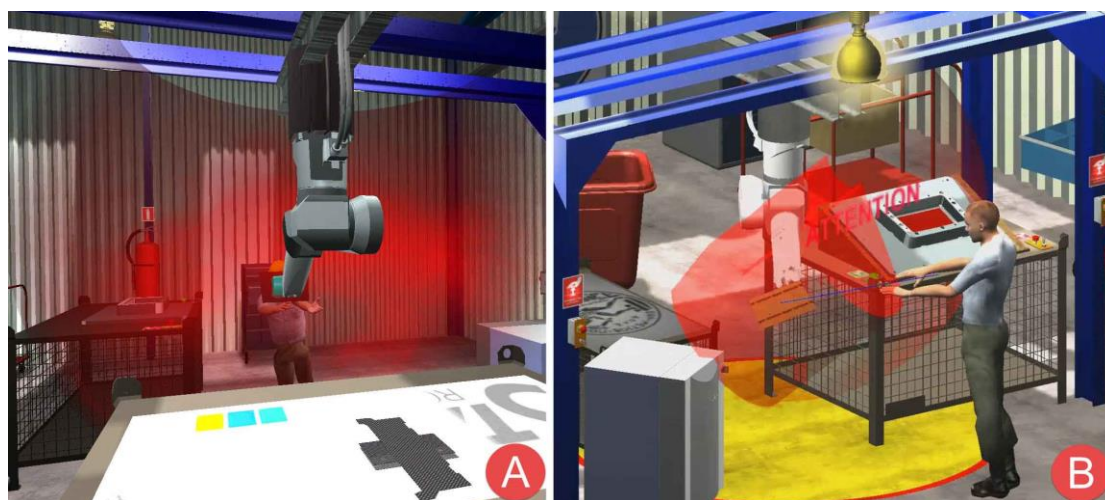
Εικόνα 8-5: Τα 3D γραφικά μοντέλα του χώρου εργασίας (αριστερά) και του «όγκου κίνησης» του ρομπότ (δεξιά).

Τα παραπάνω γνωστικά βοηθήματα βρίσκονται στην εικονική σκηνή από την αρχή της εκτέλεσης της εφαρμογής. Συγκεκριμένα, η ένδειξη του όγκου εργασίας του ρομπότ είναι μόνιμα ορατή γύρω του, για να αντιλαμβάνεται εύκολα ο χρήστης μέχρι που εκτείνεται ο χώρος δράσης του ρομπότ. Αντιθέτως, ο όγκος κίνησης είναι αρχικά αόρατος μέσα στη σκηνή και εμφανίζεται γύρω από τον πήχη του ρομπότ, όταν αυτό κινείται, προκειμένου να είναι άμεσα αντιληπτή η θέση του στο χώρο και να ορίζεται μια εν δυνάμει κρίσιμη, ή «άμεσα-επηρεαζόμενη» ζώνη. Επομένως, η χρήση αυτών των βοηθημάτων -καταρχήν ως βοηθήματα- γίνεται για να έχουμε ασφαλή και αναγνωρίσιμη/ευανάγνωστη κίνηση (safe and readable motion), για να μπορεί να επικοινωνεί το ρομπότ την πρόθεσή της κίνησής του στο χρήστη και αντίστοιχα ο χρήστης να αντιλαμβάνεται έγκαιρα την πρόθεση και την επόμενη κίνηση του ρομπότ.

Εάν κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της εφαρμογής ικανοποιηθεί κάποιο από τα κριτήρια ενεργοποίησης (Warning ή Danger Area Conditions, βλ. Εικόνα 8-3), τότε έχουμε τη μετατροπή των παραπάνω οπτικών ενδείξεων από γνωστικά βοηθήματα σε συναγερμούς. Έτσι, τα ίδια τα γνωστικά βοηθήματα αλλάζουν με την τροποποίηση κάποιων παραμέτρων τους (π.χ. χρώμα, φωτεινότητα, αναβόσβημα, κλπ) και μετατρέπονται σε συναγερμό επαγρύπνησης. Δηλαδή, σε σχέση με τη θεωρία της αντίληψης της κατάστασης (Endsley, 1995), οι οπτικές ενδείξεις αρχικά απευθύνονται στο πρώτο επίπεδο της αντίληψης της κατάστασης, απλά ως γνωστικά βοηθήματα. Στη συνέχεια όμως, με τις δυνατότητες εμπλουτισμού της εμπειρίας του χρήστη που προσφέρει η ΕΠ, και με τα κριτήρια ενεργοποίησης που έχουμε θέσει, οι ίδιες οι οπτικές ενδείξεις μετατρέπονται σε στοχευμένους συναγερμούς, οι οποίοι, λόγω της φύσης τους, απευθύνονται κατευθείαν στο ανώτερο επίπεδο της αντίληψης της κατάστασης, ήτοι την προβολή της κατάστασης στο άμεσο μέλλον.

Εκτός από τις οπτικές ενδείξεις, γίνεται ευρύτατη χρήση 3D ήχου, τόσο σε επίπεδο ηχητικών (γνωστικών) ερεθισμάτων (π.χ. σημειακή πηγή ήχου ρομπότ, χαρακτηριστικός ήχος «κλικ» κατά το πάτημα κουμπιού, ήχος «σωστής απάντησης σε τηλεπαιχνίδι» όταν ο χρήστης στρώνει επιτυχώς ένα ύφασμα, ήχος μηχανουργείου στο παρασκήνιο κ.ά.), όσο και σε επίπεδο ηχητικών συναγεμίων (π.χ. συναγεμμός κατά την επαφή του χρήστη με τον όγκο κίνησης, προειδοποιητικός-χαρακτηριστικός μακρόσυρτος ήχος «μπιπ» εκκίνησης μηχανής πριν την κίνηση του ρομπότ κ.ά.). Έτσι, παρέχεται στο χρήστη ήχος, ο οποίος προσομοιώνει το ηχητικό αποτέλεσμα της σχετικής απόστασης μεταξύ του χρήστη και της ηχητικής πηγής, την κίνηση του αντικειμένου εκπομπής και τις αντανακλάσεις του ήχου στα διαφορετικά υλικά των αντικειμένων της εικονικής σκηνής. Επίσης, τα παρεχόμενα ηχητικά σήματα έχουν εκλεγεί ώστε να παραπέμπουν άμεσα στην κατάσταση στην οποία αναφέρονται και να δημιουργούν ένα γνωστικό σύνδεσμο με αυτή.

Βέβαια, στο δυναμικά-αλληλεπιδραστικό ΕΠε, η χρήση μεμονωμένων ηχητικών σημάτων δεν αρκεί, καθώς επιθυμούμε να παρέχεται στο χρήστη μια εμπλουτισμένη διαισθητική εμπειρία. Όταν ο χρήστης αντιληφθεί έναν ηχητικό συναγεμμό θα αντιδράσει με βάση το μηχανισμό που περιγράφεται στην Εικόνα 8-1, αλλά ο ήχος από μόνος του δεν μπορεί να αποτυπώσει με ακρίβεια στο χώρο την ενέργεια που πρέπει να κάνει για να προστατευτεί από το κινούμενο ρομπότ. Αντιθέτως, με τη συνδυαστική χρήση ηχητικού και οπτικού συναγεμμού (π.χ. απευθείας προβολή ενός κρίσιμου όγκου στο χώρο), μαζί με την αντίληψη του ηχητικού σήματος, παρέχεται στο χρήστη και η ερμηνεία του, μέσω του οπτικού-παραστατικού γνωστικού βοηθήματος, οδηγώντας τον σε ταχύτερη –και πιθανώς πιο αποτελεσματική– αντίδραση.



Εικόνα 8-6: Ενεργοποίηση των οπτικών ενδείξεων/συναγεμίων (A) στην έκδοση 1.0 με βάση το χώρο εργασίας και (B) στην έκδοση 2.0 με βάση τον όγκο κίνησης.

Όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 8.1, στις εκδόσεις 1.0 και 1.5 της εφαρμογής, ο οπτικός και ακουστικός συναγεμμός ενεργοποιείται κάθε φορά που ο χρήστης εισέρχεται στο χώρο εργασίας του ρομπότ και σχεδιάστηκε ως γνωστικό βοήθημα για την υποστήριξη τόσο της αντίληψης ενός δυνητικά επικίνδυνου χώρου, όσο και της

επίγνωσης του κινδύνου (Εικόνα 8-6Α). Εντούτοις, οι παρατηρήσεις των χρηστών κατά τη διάρκεια των δοκιμών έδειξαν ότι ο ηχητικός συναγερμός κατά τη διάρκεια του συνεργατικού καθήκοντος προκαλεί διάσπαση και άγχος στο χρήστη και τον προδιαθέτει να αντιδράσει ενστικτωδώς στο συναγερμό. Για αυτό το λόγο και αντί να ζητούμε από το χρήστη να συνεργαστεί με το ρομπότ υπό το καθεστώς του συναγερμού, στην έκδοση 2.0 προτείνουμε την παροχή στοχευμένης πληροφορίας στο χρήστη, ώστε να συμπεριφέρεται προνοητικά (proactively). Η χρήση μάλιστα της ένδειξης του όγκου κίνησης, απευθύνεται κατευθείαν στο ανώτερο (τρίτο) επίπεδο της θεωρίας της επίγνωσης της κατάστασης (Endsley, 1995), δηλαδή στην προβολή της μελλοντικής κατάστασης της συνεργασίας μεταξύ A-P στο ΕΠε. Εξάλλου, ο ουσιαστικός στόχος ενός εκπαιδευτικού ΕΠε σε τέτοιου είδους καθήκοντα, είναι η μεταφορά αυτής της εικονικώς αποκτηθείσας εμπειρίας και προνοητικής συμπεριφοράς στο πραγματικό περιβάλλον και στο πραγματικό καθήκον.



Εικόνα 8-7: Ανίχνευση σύγκρουσης μεταξύ του ανθρώπου και του όγκου εργασίας.

Ο όγκος κίνησης είναι ένα γραφικό γνωστικό βοήθημα το οποίο περικλείει το άκρο του ρομπότ και προηγείται αυτού κατά την κίνησή του (0.5m σε όλες τις διευθύνσεις κίνησης), προβάλλοντας τη θέση στην οποία μπορεί να βρεθεί το ρομπότ βραχυπρόθεσμα (Εικόνα 8-6B). Ο όγκος κίνησης εμφανίζεται στη σκηνή όσο το ρομπότ κινείται, είναι διαπερατός και ακολουθεί την κίνηση του ρομπότ από την τέταρτη άρθρωση και προς το άκρο. Το αρχικό του χρώμα είναι πρασινοκίτρινο ημιδιαφανές (βλ. Εικόνα 6-7) και όταν ανιχνευθεί σύγκρουση, μετατρέπεται σε έντονο κόκκινο, με μικρότερη διαφάνεια (το alpha component του χρώματος RGBA αλλάζει από 0.6 σε 0.3). Παράλληλα εμφανίζεται στο οπτικό πεδίο του χρήστη η προειδοποιητική ένδειξη "ATTENTION" (βλ. Εικόνα 8-7).

Τέλος, επειδή η ακριβής αντίληψη της θέσης και της απόστασης από το ρομπότ μπορεί να μην είναι απόλυτα σαφής ένεκα της στερεοσκοπίας του ΕΠε, ο όγκος κίνησης είναι μια καταρχήν οπτική και δευτερευόντως οπτικοακουστική νύξη, η οποία ενημερώνει το χρήστη για τη σχετική του θέση και για την εγγύτητα του κινούμενου άκρου του ρομπότ, σε μία ζώνη βραχυπρόθεσμου κινδύνου.

8.3. Η τεχνική επιβράδυνσης του βραχίονα

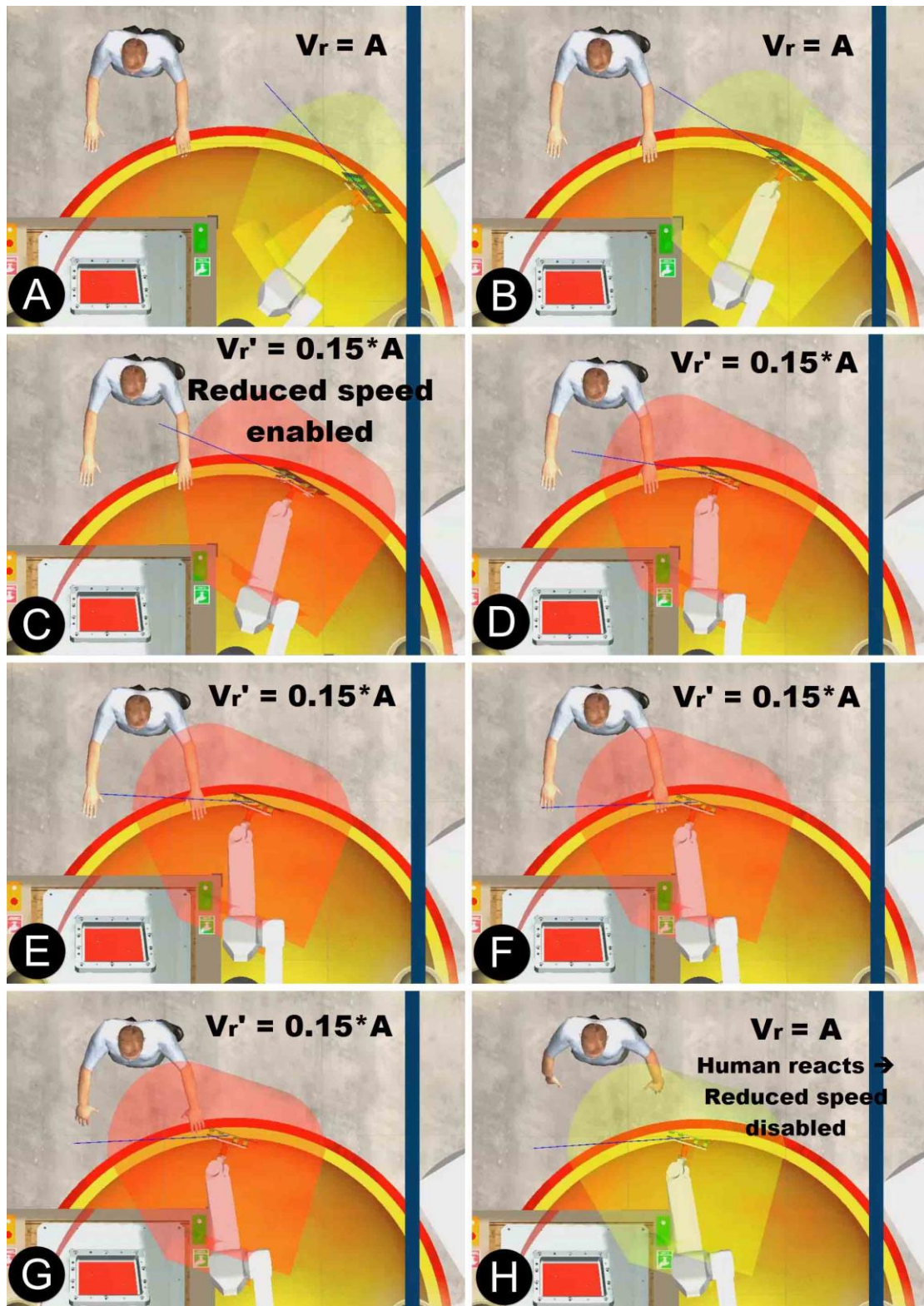
Η τεχνική επιβράδυνσης είναι η πρώτη και απλούστερη από τις ερευνώμενες προσαρμοστικές (adaptive) τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας A-P. Η τεχνική επιβράδυνσης είναι ενεργητική, στοχεύει στη δημιουργία *προσαρμοστικής* κινηματικής συμπεριφοράς από το ρομπότ, εστιάζοντας στην αποφυγή της σύγκρουσης μεταξύ A-P, χωρίς να πραγματοποιείται διακοπή της κίνησης του ρομπότ (αδιάκοπη συνεργασία) και χωρίς να δυοχεραίνεται η ροή, η επικοινωνία και η άνεση της συνεργασίας.

Εάν κατά την κίνηση του ρομπότ ικανοποιηθεί το κριτήριο ενεργοποίησης που περιγράφεται στην Εικόνα 8-3, τότε, αμέσως, η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των αρθρώσεων του ρομπότ μειώνεται στο 15% της αρχικά προγραμματισμένης (βλ. Εικόνα 8-8C). Μετά από την ενεργοποίηση της τεχνικής, η μειωμένη ταχύτητα παραμένει όσο εξακολουθεί να ικανοποιείται η συνθήκη ενεργοποίησης (βλ. Εικόνα 8-8C έως G) και μάλιστα έχει ελάχιστη διάρκεια 1 s, ακόμα και αν ο άνθρωπος απομακρυνθεί νωρίτερα. Όταν παύει να ισχύει το κριτήριο ενεργοποίησης, η ταχύτητα του ρομπότ επανέρχεται στην προ της τεχνικής επιβράδυνσης τιμή της (βλ. Εικόνα 8-8H).

Ο προγραμματισμός της κίνησης του ρομπότ στο Unity, υλοποιείται με παρεμβολή μεταξύ του αρχικού και του τελικού τετραδρόνιου (quaternion) προσανατολισμού της κάθε άρθρωσης στο χώρο των αρθρώσεων. Έτσι, για την εκτέλεση κάποιας κίνησης του ρομπότ, έχουν ορισθεί οι τιμές των αρθρώσεων του ρομπότ στη θέση του προορισμού. Η πραγματοποίηση της κίνησης επιτυγχάνεται με παρεμβολή μεταξύ της τρέχουσας και της τελικής θέσης, σε κάθε χρονικό frame. Έπειτα από την ενεργοποίηση της τεχνικής επιβράδυνσης, η τελική θέση (προορισμός) δε μεταβάλλεται, ούτε σταματά η εκτέλεση της συνάρτησης κίνησης, παρά μόνο μειώνεται η γωνιακή ταχύτητα του ρομπότ στο 15% της αρχικά προγραμματισθείσας.

Η λογική της τεχνικής βασίζεται στην υπόθεση ότι η επιβράδυνση της κίνησης του ρομπότ θα δώσει τον απαιτούμενο χρόνο στον άνθρωπο να αντιληφθεί την πιθανότητα σύγκρουσης και να απομακρυνθεί από την τροχιά του ρομπότ. Ακόμα και αν για κάποιο λόγο ο άνθρωπος δεν απομακρυνθεί, θεωρείται ότι η ταχύτητα του ρομπότ έχει μειωθεί τόσο ώστε να βρίσκεται μέσα στα επιτρεπόμενα όρια επαφής A-P, βάσει του ισχύοντος προτύπου ISO 10218/2011 (βλ. Ενότητα 3.2).

Κατά την εκτέλεση του συνεργατικού σεναρίου, ο άνθρωπος έχει τη δυνατότητα να αποφύγει την ενεργοποίηση της τεχνικής εάν παρακολουθεί αυστηρά τα γνωστικά βοηθήματα που του παρέχονται και εφόσον αντιδρά κατάλληλα (απομακρύνεται ή αλλάζει στάση) όταν το ρομπότ κινείται προς αυτόν. Τέλος, για την ενημέρωση του χρήστη και για όσο διαρκεί η ενεργοποίηση της τεχνικής, προβάλλεται στο οπτικό πεδίο του χρήστη η οπτική ένδειξη “reduced robot speed”.



Εικόνα 8-8: Διαδοχικά στιγμιότυπα από την ενεργοποίηση της τεχνικής. Διακρίνεται η ακτίνα η οποία εκπέμπεται από το άκρο του ρομπότ προς την κατεύθυνση της κίνησης του ΤΣΔ.

8.4. Η τεχνική υποχώρησης του βραχίονα

Η τεχνική υποχώρησης (move back/retract) του ρομπότ έναντι του ανθρώπου, είναι η δεύτερη και πιο σύνθετη από τις ερευνώμενες προσαρμοστικές (adaptive)

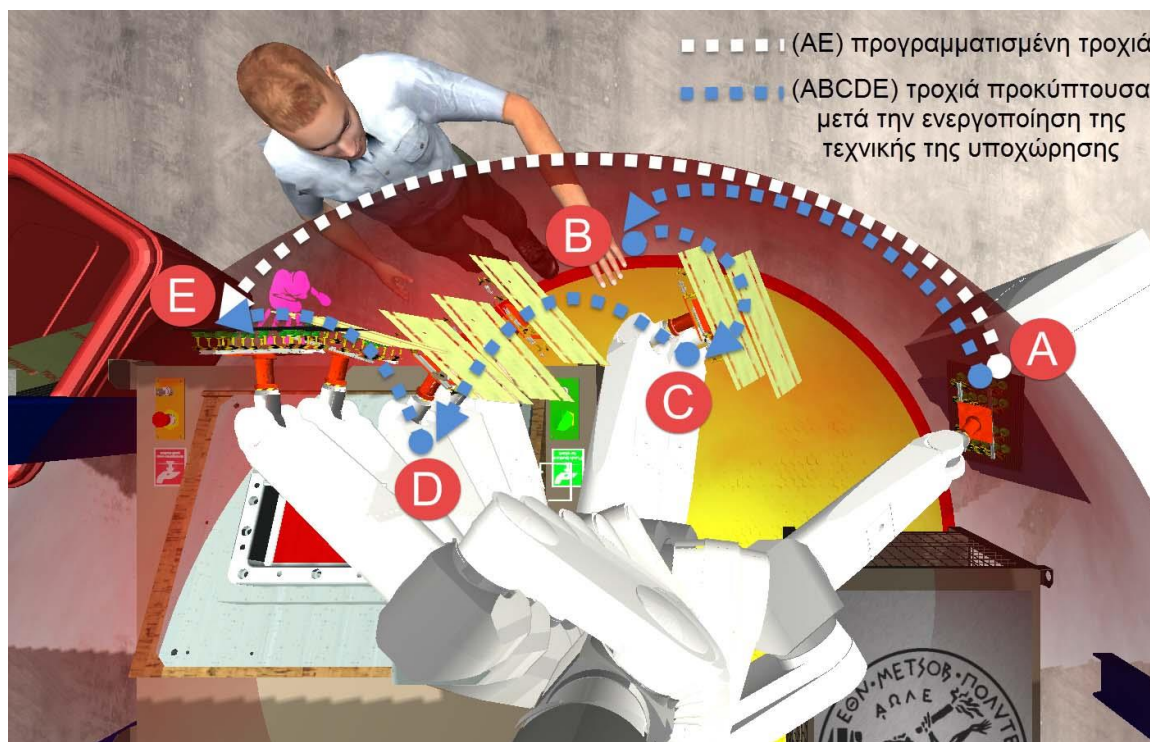
τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας A-P. Η τεχνική υποχώρησης, όντας και αυτή ενεργητική, στοχεύει στη δημιουργία *προσαρμοστικής* κινηματικής συμπεριφοράς από την πλευρά του ρομπότ, εστιάζοντας στην αποφυγή της σύγκρουσης μεταξύ A-P, χωρίς να πραγματοποιείται διακοπή της κίνησης του ρομπότ (αδιάκοπη συνεργασία) και χωρίς να δυσχεραίνεται η ροή, η επικοινωνία και η άνεση της συνεργασίας.

Εάν το ρομπότ κινείται ακολουθώντας μια συγκεκριμένη τροχιά (π.χ. τροχιά ΑΕ στην Εικόνα 8-9) και εντωμεταξύ παρεμβληθεί στο ενδιάμεσο (σημείο Β στην Εικόνα 8-9) ο χρήστης, με τρόπο ώστε να ικανοποιηθεί η συνθήκη ενεργοποίησης που περιγράφεται στην Εικόνα 8-3, τότε, ενεργοποιείται η τεχνική υποχώρησης του ρομπότ. Η τεχνική υποχώρησης προβλέπει την ακαριαία διακοπή της ρουτίνας (coroutine) κίνησης που τρέχει τη στιγμή της ενεργοποίησης της τεχνικής και την άμεση έναρξη μιας άλλης ρουτίνας, η οποία θέτει ένα νέο, ενδιάμεσο και «ασφαλές» σημείο προορισμού, μακριά από τη θέση του χρήστη (σημείο C στην Εικόνα 8-9). Το ρομπότ κινείται προς το νέο του, μεταβατικό προορισμό (τροχιά BC), ώστε να αποφύγει το χέρι του ανθρώπου και αφού φτάσει στο (C), τότε ξεκινά μια νέα κίνηση προς τον αρχικά προγραμματισμένο προορισμό (E). Εάν στο μεταξύ ο άνθρωπος απομακρυνθεί και δεν ανιχνευθεί εκ νέου επερχόμενη σύγκρουση, το ρομπότ θα ακολουθήσει απευθείας την τροχιά (CE) και θα ολοκληρώσει την κίνησή του. Εάν όμως παρ' ελπίδα ο χρήστης δεν απομακρυνθεί και παραμείνει στην ίδια θέση (όπως γίνεται στο σενάριο της Εικόνα 8-9), τότε ανιχνεύεται και πάλι η επερχόμενη σύγκρουση (από το σημείο C), ενεργοποιείται και πάλι η τεχνική υποχώρησης, δηλαδή το ρομπότ υποχωρεί ακόμα περισσότερο έναντι του χρήστη και κινείται προς μία νέα ενδιάμεση ασφαλή θέση (σημείο D). Στη θέση (D) δεν διαγιγνώσκεται κάποιος επερχόμενος κίνδυνος σύγκρουσης με τον άνθρωπο, οπότε το ρομπότ ολοκληρώνει την κίνηση την οποία κάνει και κατευθύνεται στον τελικό του προορισμό (σημείο E).

Ο προγραμματισμός της μετάβασης από τη μία ρουτίνα κίνησης στην άλλη έχει γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε η κίνηση να είναι συνεχόμενη και χωρίς στάσεις, ή αντιληπτά ενδιάμεσα κενά. Όταν η τεχνική έχει ενεργοποιηθεί, και για τα πρώτα 5 s κατά τα οποία το ρομπότ κινείται προς τη νέα, ασφαλή θέση υποχώρησης, παύει ο έλεγχος σύγκρουσης, προκειμένου να μην έχουμε επανειλημμένες εκκινήσεις της τεχνικής και συνεχείς υπολογισμούς της νέας, ασφαλούς θέσης, που προκαλούν «τρέμουλο» στην κίνηση του ρομπότ. Μετά από αυτά τα 5 s, επανέρχεται ο έλεγχος σύγκρουσης και η δυνατότητα εκ νέου υποχώρησης.

Όσον αφορά στην υλοποίηση, όπως και στην τεχνική επιβράδυνσης, έτσι και στην τεχνική υποχώρησης ο προγραμματισμός της κίνησης του ρομπότ, πραγματοποιείται με παρεμβολή μεταξύ του αρχικού και του τελικού τετραδρόνιου (quaternion) προσανατολισμού της κάθε άρθρωσης στο χώρο των αρθρώσεων. Τα «ασφαλή» σημεία υποχώρησης στα οποία καταφεύγει το ρομπότ μετά την ενεργοποίηση της τεχνικής, δεν είναι άπειρα, αντιθέτως, έχουν σχεδιαστεί βάσει των κινήσεων του σεναρίου συνεργασίας. Κάθε δεδομένη κίνηση του ρομπότ (τροφοδοσία υφάσματος, μεταφορά προς/αναχώρηση από το καλούπι κλπ)

χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες, οπότε γνωρίζοντας κάθε φορά τη θέση του ανθρώπου και τη ζώνη κίνησης στην οποία βρίσκεται το ρομπότ, αμέσως αφού ενεργοποιηθεί η τεχνική υποχώρησης, το ρομπότ οδηγείται στην εκάστοτε ασφαλή θέση. Μετά από την ασφαλή θέση, το ρομπότ επανεκκινεί προς τον αρχικό προορισμό του, κινούμενο με παρεμβολή στο χώρο των αρθρώσεων (παρεμβολή μεταξύ αρχικών-τελικών γωνιών αρθρώσεων).

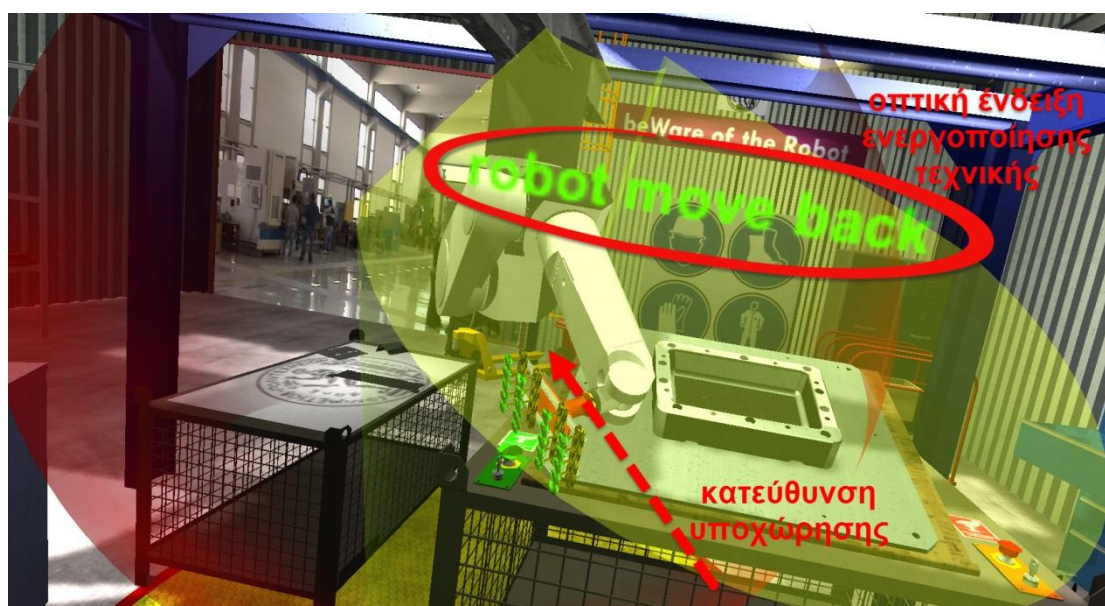


Εικόνα 8-9: Αναπαράσταση της ενεργοποίησης της τεχνικής υποχώρησης του ρομπωτικού βραχίονα.

Για την ενημέρωση του χρήστη και για όσο διαρκεί η ενεργοποίηση της τεχνικής υποχώρησης, προβάλλεται στο οπτικό του πεδίο η οπτική ένδειξη “robot move back” (βλ. Εικόνα 8-10), έτσι ώστε να καθίσταται σαφής στο χρήστη η ενεργοποίηση της τεχνικής και η ανάγκη αντίδρασης ή εκτίμησης της κατάστασης από πλευράς του. Κατά την εκτέλεση του συνεργατικού σεναρίου, ο άνθρωπος έχει και τη δυνατότητα και το χρόνο να αποφύγει την ενεργοποίηση της τεχνικής, εάν παρακολουθεί προσεκτικά τα γνωστικά βοηθήματα και τα ερεθίσματα που του παρέχονται. Ο χρόνος δε που του παρέχεται θεωρείται επαρκής ώστε να αντιδρά κατάλληλα (απομάκρυνση ή αλλαγή στάσης) όταν το ρομπότ κινείται προς αυτόν, πριν (προβλεπτικά) ή και κατά τη διάρκεια της ενεργοποίησης της τεχνικής ασφαλούς συνεργασίας (αντίδραση).

Η λογική της τεχνικής βασίζεται στην υπόθεση ότι από μόνη της η υποχώρηση του ρομπότ αρκεί για να αποφευχθούν συγκρούσεις ή επικίνδυνες επαφές μεταξύ A-P. Θεωρητικά, ακόμα και αν ο χρήστης στέκεται ακίνητος στην ίδια θέση, το ρομπότ θα τροποποιήσει την τροχιά του και θα υποχωρήσει όσες φορές χρειαστεί προκειμένου να τον αποφύγει. Εντούτοις, ο χρήστης ιδανικά αλληλεπιδρά κατά την ενεργοποίηση της τεχνικής και την υποχώρηση του ρομπότ, και τροποποιεί τη θέση

του κατάλληλα ώστε να μη δημιουργούνται συνεχείς επανενεργοποιήσεις της τεχνικής, διότι έτσι αυξάνεται κατά πολύ ο χρόνος συνεργασίας και η απόδοση πέφτει σε μη αποδεκτά επίπεδα.



Εικόνα 8-10: Προβολή πληροφορίας (πράσινο μήνυμα «robot move back») για την ενημέρωση του χρήστη κατά την ενεργοποίηση της τεχνικής της υποχώρησης του ρομπότ.

8.5. Σύνθεση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι δημιουργηθείσες τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε (i) παθητικές και προνοητικές (proactive) τεχνικές και (ii) ενεργητικές και προσαρμοστικές (adaptive) τεχνικές. Επίσης παρουσιάζεται η λογική και τα κριτήρια ενεργοποίησης των διαφορετικών τεχνικών ασφάλειας και η υλοποίησή τους στο ΕΠε.

Η λογική των προβλεπτικών τεχνικών βασίζεται κυρίως στη χρήση γνωστικών βοηθημάτων (οπτικών και ηχητικών ενδείξεων, νύξεων και συναγεμίων) και στοχεύει στην υποστήριξη της επικοινωνίας του χρήστη με το ρομπότ, της επίγνωσης της κατάστασης και της αντίληψης του κινδύνου. Ιδανικά, η πληροφορία που παρέχεται στο χρήστη, τον βοηθάει στην πραγματοποίηση αποδοτικής και ασφαλούς συνεργασίας με το ρομπότ. Οι προσαρμοστικές (adaptive) τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας A-P που ερευνούμε είναι δύο: επιβράδυνση και υποχώρηση, αναφέρονται στην (προσαρμοστική) κινηματική συμπεριφορά του ρομπότ και εστιάζουν στην αποφυγή της επαφής μεταξύ A-P, χωρίς διακοπή της κίνησης του ρομπότ (αδιάκοπη συνεργασία).

9. Πειραματικές Δοκιμές Χρηστών και Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι πραγματοποιηθείσες δοκιμές με χρήστες και τα σημαντικότερα αποτελέσματα αυτών. Όπως ήδη αναφέρθηκε στην Ενότητα 5.2, δημιουργήθηκαν δύο περιπτώσεις εφαρμογής (beWare of the Robot v1.0 και v2.0), με διαφορετικό σκοπό, αλλά και βαθμό συνεργασίας, η καθεμία. Το σενάριο της έκδοσης 1.0 αφορά συνύπαρξη και συγχρονισμένη συνεργασία μεταξύ A-P, ενώ το σενάριο της έκδοσης 2.0 αναφέρεται σε συνύπαρξη, ταυτόχρονη συνεργασία και εργασία εν παραλλήλω με έντονη αλληλεπίδραση μεταξύ A-P.

Πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές χρηστών, μία για κάθε περίπτωση εφαρμογής, έχοντας ως δεδομένο ότι οι δοκιμές θα αφορούν πάντα το ΕΠε και ότι δε θα πραγματοποιηθούν συγκριτικές δοκιμές σε αντίστοιχο πραγματικό περιβάλλον. Η δοκιμή της πρώτης εφαρμογής είναι πρωτόλεια, γίνεται από ομάδα χρηστών, με υποκειμενικές μετρικές ικανοποίησης (self-report measures) και ερωτηματολόγια στο τέλος της δοκιμής (post-test questionnaire). Αντιθέτως, στη δεύτερη περίπτωση εφαρμογής γίνεται καταγραφή πολλών χαρακτηριστικών μεγεθών της συνεργασίας (χρόνοι, αριθμοί ενεργοποίησης τεχνικών, συγκρούσεις κλπ) και υπολογίζονται συνδυαστικά μετρικές συμπεριφοράς (απόδοσης), δεδομένα από την καταγραφή των χρηστών και υποκειμενικές μετρικές ικανοποίησης με συμπλήρωση ερωτηματολογίων στο τέλος της δοκιμής. Μάλιστα, όλες οι τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας δοκιμάζονται από όλους τους χρήστες και πραγματοποιούνται συγκριτικές δοκιμές. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από την επεξεργασία των ερωτηματολογίων και τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων.

9.1. Δοκιμή σεναρίου συνύπαρξης και συγχρονισμένης συνεργασίας εν σειρά (beWare of the Robot v1.0)

Η πρώτη περίπτωση εφαρμογής (έκδοση 1.0) είναι πρωτόλεια και δημιουργήθηκε με σκοπό να απαντήσει στην πρώτη ερευνητική προβληματική και να αποτελέσει μια δυναμική πλατφόρμα ΕΠ πάνω στην οποία θα γίνει ο πειραματισμός και η διερεύνηση της συνεργασίας A-P σε μηχανουργικά καθήκοντα.

Η δοκιμή της έκδοσης 1.0 από ομάδα χρηστών, αποτελεί το πρώτο βήμα για την καταρχήν διερεύνηση των εξής παραμέτρων: (i) της *αποτελεσματικότητας της μοντελοποίησης* (της κατάστασης) της συνεργασίας A-P και της αναπαραγωγής των βασικότερων χαρακτηριστικών αυτής σε διαδραστικό ΕΠε, (ii) της *αποτελεσματικότητας του ΕΠε*, (iii) της *εμπλοκής και της παρουσίας* του χρήστη, (iv) της *χρήσης οπτικοακουστικών βοηθημάτων* και (v) της *αποδοχής του ΕΠε* από το χρήστη. Στη φάση αυτή, η διερεύνηση των παραπάνω παραμέτρων δεν έγινε σε μεγαλύτερο βάθος καθότι κύριος στόχος ήταν η καταρχήν παρακολούθηση της συμπεριφοράς των χρηστών στο ΕΠε, η εύρεση των ορίων/περιορισμών των συσκευών εισόδου (tracking) και η «χάραξη» των βασικότερων κατευθύνσεων για τη δημιουργία της πιο αλληλεπιδραστικής έκδοσης 1.5 και το σχεδιασμό του πιο έντονα αλληλεπιδραστικού συνεργατικού καθήκοντος της έκδοσης 2.0.

Στη δοκιμή της έκδοσης 1.0, χρησιμοποιήθηκε ένα πρωτότυπο ερωτηματολόγιο, παρατηρήσεις επί της καταγραφής της συμπεριφοράς των χρηστών και σχόλια των ίδιων των χρηστών. Τα ερωτηματολόγια συμπληρώνονταν αμέσως μετά το τέλος της δοκιμής (post-test questionnaires) και οι ερωτήσεις κάλυπταν όλο το εύρος των πέντε παραμέτρων που περιγράφηκαν στην προηγούμενη Ενότητα.

Όσον αφορά τα όρια και τους περιορισμούς των συσκευών εισόδου, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε κιναισθητικές αποκλίσεις, στόχος ήταν να παρατηρήσουμε το κατά πόσο αυτές επηρεάζουν την εκτέλεση του συνεργατικού καθήκοντος και την ανθρώπινη συμπεριφορά, έτσι ώστε αυτή να μην αποκλίνει σημαντικά σε σχέση με τη συνήθη συμπεριφορά σε απλά καθήκοντα (π.χ. άγγιγμα, μεταφορά με τα χέρια κλπ) στον πραγματικό κόσμο.

9.1.1. Περιγραφή-Εξοπλισμός

Πραγματοποιήθηκε μία σειρά δοκιμών στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ. Στο πείραμα συμμετείχε μία ομάδα από 30 τελειόφοιτους σπουδαστές της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, 26 άνδρες και 4 γυναίκες, με ηλικιακό εύρος 22-31 έτη και με πρότερη εξοικείωση με βασικές έννοιες της Ρομποτικής και των Συστημάτων Κατεργασιών. Κάθε χρήστης έπρεπε να συμμετέχει στη δοκιμή ατομικά και να συνεργασθεί με το ρομπότ στο ΕΠε, συνυπάρχοντας στον ίδιο χώρο, βάσει του δοθέντος σεναρίου.

Η πλατφόρμα της δοκιμής αποτελείτο από: το εκτελέσιμο αρχείο της standalone demo εφαρμογής beWare of the Robot v1.0, έναν προσωπικό Η/Υ με λειτουργικό σύστημα Windows XP™, εξοπλισμένο με μία κάρτα γραφικών nVidia Quadro™ FX1700, την κάσκα στερεοσκοπίας (HMD) eMagin Z800 με τα στερεοφωνικά της ακουστικά, τον αισθητήρα Microsoft Kinect™ και, τέλος, πληκτρολόγιο και ποντίκι για τον έλεγχο της εφαρμογής από τον επιβλέποντα της δοκιμής. Προκειμένου να αναπαραχθεί η εικόνα που βλέπει ο χρήστης μέσα από την κάσκα στερεοσκοπίας, χρησιμοποιείται ένας προβολέας (projector) ο οποίος προβάλλει την εικόνα αυτή (clone) στον τοίχο πίσω από το χρήστη. Επίσης, χρησιμοποιείται μία βίντεο-κάμερα για την καταγραφή της εμπειρίας του χρήστη, ώστε να είναι δυνατή η εκ των υστέρων παρατήρηση, μελέτη και εξαγωγή συμπερασμάτων επί της συμπεριφοράς του χρήστη στο ΕΠε.

9.1.2. Πρωτόκολλο

Η καθαρή διάρκεια της δοκιμής ήταν 10-15' ανά άτομο, ενώ στην αρχή δίνονταν σαφείς οδηγίες στον κάθε χρήστη προφορικά. Ο κάθε χρήστης έπρεπε να ακολουθήσει το σενάριο που περιγράφεται αναλυτικά στην Ενότητα 6.4.1 και στο Διάγραμμα Περίπτωσης Χρήσης της Εικόνα 7-1. Αφού ρύθμιζε και φορούσε στο κεφάλι του την κάσκα στερεοσκοπίας, ο χρήστης έπρεπε να σταθεί απέναντι από τον αισθητήρα Kinect, σε απόσταση 2-3 m από αυτόν, με σηκωμένα τα χέρια του και με τους αγκώνες του να εμφανίζουν γωνία 90°, σχηματίζοντας κατ' αυτό τον τρόπο στάση σώματος τύπου «Ψ» προκειμένου να ανιχνευθεί και να βαθμονομηθεί ο σκελετός του. Στη συνέχεια είχε στη διάθεσή του 2-3 λεπτά για να εξοικειωθεί με το

ΕΠε, την ανίχνευση κίνησης, αλλά και τις δυνατότητες αλληλεπίδρασης με τα διαφορετικά αντικείμενα της εικονικής σκηνής. Κατόπιν, ο χρήστης είχε στη διάθεσή του περίπου 10 λεπτά για να ολοκληρώσει τα συνεργατικά καθήκοντα και τη στρώση των υφασμάτων, όπως περιγράφεται στο σενάριο του Διαγράμματος Περίπτωσης Χρήσης της Εικόνα 7-1.

Στο τέλος της δοκιμής, γινόταν ολιγόλεπτη συζήτηση με το χρήστη επί της εμπειρίας του, ή επί ζητημάτων τα οποία ενδέχεται να δυσκόλεψαν την εκτέλεση των καθηκόντων του και έπειτα ο χρήστης έπρεπε να συμπληρώσει το ερωτηματολόγιο (online Google Form).0

9.1.3.Ερωτηματολόγιο

Στην περίπτωση της έκδοσης 1.0, δεν είχαμε να αντιμετωπίσουμε μία τυπική συγκριτική δοκιμή μεταξύ δύο (ή περισσότερων) καταστάσεων, ώστε να συγκρίνουμε με κατάλληλα στατιστικά εργαλεία την ύπαρξη, ή μη, σημαντικής διαφοράς μεταξύ των αντικειμένων της συγκρίσεως. Για το λόγο αυτό, δεν έγινε χρήση κάποιου έτοιμου, αυτούσιου ερωτηματολογίου, π.χ. τα ερωτηματολόγια των (Bethel, Salomon, Murphy, & Burke, 2007; Slater, 1999; Takatalo et al., 2011; Usoh et al., 2000; Witmer & Singer, 1998), αντιθέτως επελέγησαν μεμονωμένες ερωτήσεις από τα παραπάνω ερωτηματολόγια, προσαρμόστηκαν κατάλληλα και εξειδικεύθηκαν.

Το ερωτηματολόγιο αποτελείται από 42 ερωτήσεις, η πλειοψηφία εκ των οποίων κατηγοριοποιείται σε έξι θεματικές ομάδες:

- i. προσωπικά στοιχεία των συμμετεχόντων, επίπεδο και εμπειρία (14 ερωτήσεις),
- ii. αποτελεσματικότητα της μοντελοποίησης (**AM**) της συνεργασίας A-P (4 ερωτήσεις),
- iii. αποτελεσματικότητα του ΕΠε (**AE**), (5 ερωτήσεις),
- iv. εμπλοκή και παρουσία (**ΕΠ**) του χρήστη (4 ερωτήσεις),
- v. χρήση οπτικοακουστικών βοηθημάτων (**OB**), (4 ερωτήσεις),
- vi. αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη (**AX**), (4 ερωτήσεις).

Οι απαντήσεις στις περισσότερες ερωτήσεις έπρεπε να δοθούν σε μια περιγραφική κλίμακα Likert 5 σημείων (βαθμός συμφωνίας), από το 1 μέχρι το 5, όπου 1 σημαίνει καθόλου/απαράδεκτο και 5 απόλυτη κατάφαση/εξαιρετικό, έτσι ώστε να προκύψουν υποκειμενικές μετρικές ικανοποίησης του χρήστη. Στον Πίνακα 9-1 παρουσιάζονται είκοσι ερωτήσεις οι οποίες αφορούν τις θεματικές ομάδες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι θεματικές ομάδες στις οποίες αναφέρονταν οι ερωτήσεις δεν ήταν εμφανείς στους ερωτώμενους. Κατά το σχεδιασμό του ερωτηματολογίου, έγινε προσπάθεια ισοκατανομής καταφατικών και αρνητικών/απορριπτικών εκφράσεων μεταξύ των ερωτήσεων (αντιστροφή ερωτήσεων), έτσι ώστε να αντιμετωπισθεί η τάση (σφάλμα) συγκατάβασης (acquiescence bias) που παρατηρείται σε ερωτηματολόγια που χρησιμοποιούν τέτοιου τύπου κλίμακες.

Ερώτηση	SD (1)	D (2)	N (3)	A (4)	SA (5)
(ΑΜ) Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης της συνεργασίας Α-Ρ	%	%	%	%	%
Σας φάνηκε ρεαλιστική η αντιστοίχιση των πραγματικών σας κινήσεων σε σχέση με αυτές του ανθρωποειδούς;	3	7	40	47	3
Αξιολογήστε το πόσο εύκολα καταφέρατε να «πάρτε» τα υφάσματα στο χέρι σας από την αρπάγη του ρομποτικού βραχίονα	0	0	30	43	27
Αντιλαμβανόσασταν εύκολα την ενδεικνυόμενη θέση πάνω στο καλούπι στην οποία έπρεπε να τοποθετήσετε τα υφάσματα;	0	0	7	20	73
Εάν υπήρξαν στιγμές που δε μπορούσατε να δείτε τα χέρια (είτε «χάνατε» παροδικά τον έλεγχο των χεριών) του ανθρωποειδούς μέσα στο οπτικό σας πεδίο, τότε αυτό σας δυσκόλεψε στην εκτέλεση των καθηκόντων;	40	0	0	53	7
(ΑΕ) Αποτελεσματικότητα του ΕΠε	%	%	%	%	%
Σε τι βαθμό θα λέγατε πως είχατε ευχέρεια κινήσεων στο εικονικό περιβάλλον; (π.χ. άνεση στις κινήσεις, αυτοπεριορισμός του σώματός σας κλπ)	0	10	40	40	10
Αξιολογείτε τη σταθερότητα των κινήσεων των χεριών του ανθρωποειδούς («τρέμουλο», ακρίβεια αντιστοίχισης θέσης)	0	23	50	17	7
Νιώσατε τον εαυτό σας να αλλάζει συμπεριφορά στο εικονικό περιβάλλον σε σχέση με την άνεση (κίνησης) που θα είχατε στον πραγματικό κόσμο;	0	27	30	33	10
Ένωσα ότι κινούνται πραγματικά στη σκηνή	0	3	10	17	70
Αισθανθήκατε κούραση στα μάτια σας από τη χρήση της κάσκας στερεοσκοπίας κατά τη διάρκεια της δοκιμής;	50	33	10	7	0
(ΕΠ) Εμπλοκή και Παρουσία του χρήστη	%	%	%	%	%
Αφαιρεθήκατε καθόλου κατά τη διάρκεια της δοκιμής;	93	-	-	-	7
Αξιολογείτε το κατά πόσο νιώθατε ότι πραγματικά μετακινείτε και χειρίζεστε ένα αντικείμενο με το χέρι σας, παρότι αυτό δεν είχε υλικό βάρος.	3	23	27	40	7
Με τη χρήση της κάσκας HMD νιώσατε ότι "εμβυθίζεστε" με τις κινήσεις σας σ' ένα εικονικό περιβάλλον;	3	0	23	43	30
Με τη χρήση της κάσκας HMD νιώσατε ότι είστε πραγματικά παρόντες στο εικονικό περιβάλλον;	7	3	17	50	23
(ΟΒ) Χρήση Οπτικοακουστικών Βοηθημάτων	%	%	%	%	%
Αντιληφθήκατε εύκολα το χώρο εργασίας του ρομποτικού βραχίονα;	3	-	-	-	97
Δυσκολευτήκατε να μη μπείτε στο χώρο εργασίας του ρομπότ;	70	-	-	-	30
Αν αντιληφθήκατε κάποιον ηχητικό ή εμποτικό συναγερμό, μπορούσατε να προσδιορίσετε κάθε φορά την αιτία της ενεργοποίησής του;	0	-	-	-	100
Κατά την κρίση σας πόσο σας βοήθησαν τα οπτικοακουστικά μέσα («συναγερμοί») για την κατανόηση από το χρήστη της ύπαρξης ενός «επικίνδυνου» χώρου;	0	0	7	27	67
(ΑΧ) Αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη	%	%	%	%	%
Θα λέγατε πως κατά τη διάρκεια της δοκιμής νιώσατε περισσότερο πως παίζετε ένα διασκεδαστικό παιχνίδι;	0	7	17	33	43
Πιστεύετε ότι αντίστοιχες εφαρμογές ΕΠ μπορούν να	3	0	7	33	57

συνεισφέρουν στην εκπαίδευση για τη συνεργασία A-P, ή σε εφαρμογές πρόληψης επαγγελματικού κινδύνου;					
Μετά τη δοκιμή που περάσατε θα λέγατε πως η εκπαίδευση σε καθήκοντα που απαιτούν συνεργασία A-P μπορεί να γίνει πιο ελκυστική με τη χρήση εφαρμογών ΕΠε;	3	0	7	27	63
Πιστεύετε ότι μετά τη δοκιμή που περάσατε θα δεχόσασταν ευκολότερα να πραγματοποιήσετε μια αντίστοιχη εργασία σε πραγματικό περιβάλλον;	7	10	17	57	10

Πίνακας 9-1: Επισκόπηση των σημαντικότερων ερωτήσεων και απαντήσεων (συχνότητα εμφάνισης %) του ερωτηματολογίου της έκδοσης 1.0. Κλίμακα Likert: 1 (καθόλου/απαράδεκτο) 2 (λίγο) 3 (ουδέτερο) 4 (αρκετά) 5 (απόλυτη κατάφαση/εξαίρετικό).

9.1.4. Ανάλυση - Αποτελέσματα

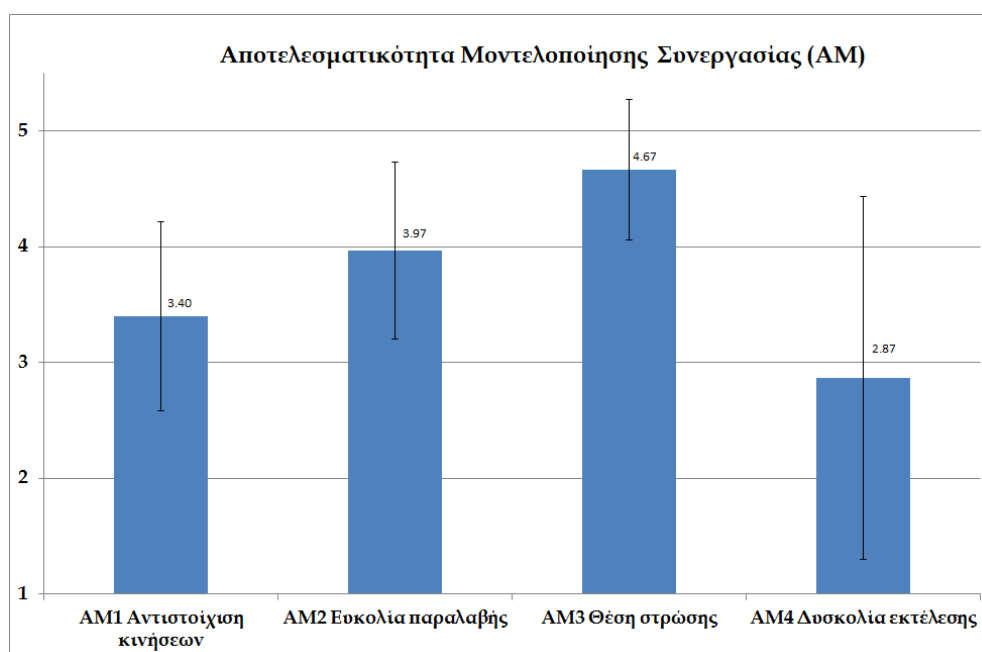
Η ανάλυση αποτελεσμάτων ιεραρχικού (ordinal) τύπου, όπως αυτά τα οποία λαμβάνουμε από τα ερωτηματολόγια μας, πραγματοποιείται με περιγραφική στατιστική. Στην περιγραφική στατιστική χρησιμοποιούνται γραφικές μέθοδοι σε συνδυασμό με στατιστικούς δείκτες κεντρικής τάσης (δειγματική μέση τιμή, διάμεσος και επικρατούσα τιμή) και διασποράς (δειγματικό εύρος, τυπική απόκλιση, εκατοστιαία σημεία και το ενδοτεταρτομοριακό εύρος). Σε δεδομένα ιεραρχικού τύπου χρησιμοποιείται, πολλές φορές, η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση, για να αποτυπώσουν το κέντρο ισορροπίας των δεδομένων και τη μεταβλητότητα γύρω από αυτό αντίστοιχα. Έπειτα, τα αποτελέσματα της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης παρουσιάζονται σε ραβδογράμματα (π.χ. Εικόνα 9-1). Εντούτοις, είναι στατιστικώς ορθότερη η χρήση της δειγματικά επικρατούσας τιμής (sample mode) και της διαμέσου (median), και η γραφική τους αποτύπωση σε συνδυασμό με τα μέτρα μεταβλητότητας ενδοτεταρτομοριακού εύρους (Potter, Hagen, Kerren, & Dappnenmann, 2006). Στην περίπτωση αυτή, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε διαγράμματα πλαισίου-απολήξεων ή θηκογράμματα (boxplots), τα οποία (πλαίσια) παρουσιάζουν το εύρος που καλύπτουν τα μισά από τα δεδομένα που είναι πιο κοντά στην κεντρική τιμή (π.χ. Εικόνα 9-2). Τα θηκογράμματα, εκτός από τη γραφική παρουσίαση της σύνοψης των αποτελεσμάτων, δίνουν και άμεσες ενδείξεις απόκλισης -ή μη- από την κανονική κατανομή. Η δειγματικά επικρατούσα τιμή (Πίνακας 9-1) είναι η τιμή που εμφανίζεται με τη μεγαλύτερη συχνότητα και δηλώνει την κεντρική (επικρατέστερη) τάση των δεδομένων.

Στον Πίνακα 9-1 παρουσιάζονται οι ερωτήσεις ταξινομημένες σε πέντε βασικές θεματικές κατηγορίες: (i) **ΑΜ**: Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης της συνεργασίας A-P, (ii) **ΑΕ**: Αποτελεσματικότητα του ΕΠε, (iii) **ΕΠ**: Εμπλοκή και Παρουσία του χρήστη, (iv) **ΟΒ**: Χρήση Οπτικοακουστικών Βοηθημάτων και, (v) **ΑΧ**: Αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη. Δίπλα από κάθε ερώτηση παρουσιάζεται η συχνότητα εμφάνισης (ως ποσοστό επί τοις εκατό) της κάθε τιμής και, με έντονα γράμματα, η επικρατούσα τιμή, δηλαδή αυτή η οποία εμφανίζεται με τη μεγαλύτερη συχνότητα.

Στον Πίνακα 9-2 και στους πίνακες που ακολουθούν, παρουσιάζονται στατιστικοί δείκτες των αποτελεσμάτων ανά θεματική κατηγορία ερωτήσεων. Μάλιστα γίνεται και μια αναγωγή όλων των δεδομένων, συγκεντρώνοντας όλες τις θετικές και αρνητικές απαντήσεις στο δίπολο κατάφασης-απόρριψης (κατάφαση/πολύ/συμφωνώ έναντι απόρριψης/καθόλου/διαφωνώ), ώστε να είναι πιο ξεκάθαρες οι τάσεις και να απαλειφθούν οι ουδέτερες απαντήσεις.

Ερώτηση	+	-	Μ.Τ.	Τ.Α.
(AM) Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης της συνεργασίας A-P	[%]	[%]	\bar{x}	s
AM1 Σας φάνηκε ρεαλιστική η αντιστοιχισή των πραγματικών σας κινήσεων σε σχέση με αυτές του ανθρωποειδούς;	50	10	3.40	0.81
AM2 Αξιολογήστε το πόσο εύκολα καταφέρατε να «πάρτε» τα υφάσματα στο χέρι σας από την αρπάγη του ρομποτικού βραχίονα	70	0	3.97	0.76
AM3 Αντιλαμβάνοσασταν εύκολα την ενδεικνυόμενη θέση πάνω στο καλούπι στην οποία έπρεπε να τοποθετήσετε τα υφάσματα;	93	0	4.67	0.61
AM4 Εάν υπήρξαν στιγμές που δε μπορούσατε να δείτε τα χέρια (είτε «χάνατε» παροδικά τον έλεγχο των χεριών) του ανθρωποειδούς μέσα στο οπτικό σας πεδίο, τότε αυτό σας δυσκόλεψε στην εκτέλεση των καθηκόντων;	60	40	2.87	1.57

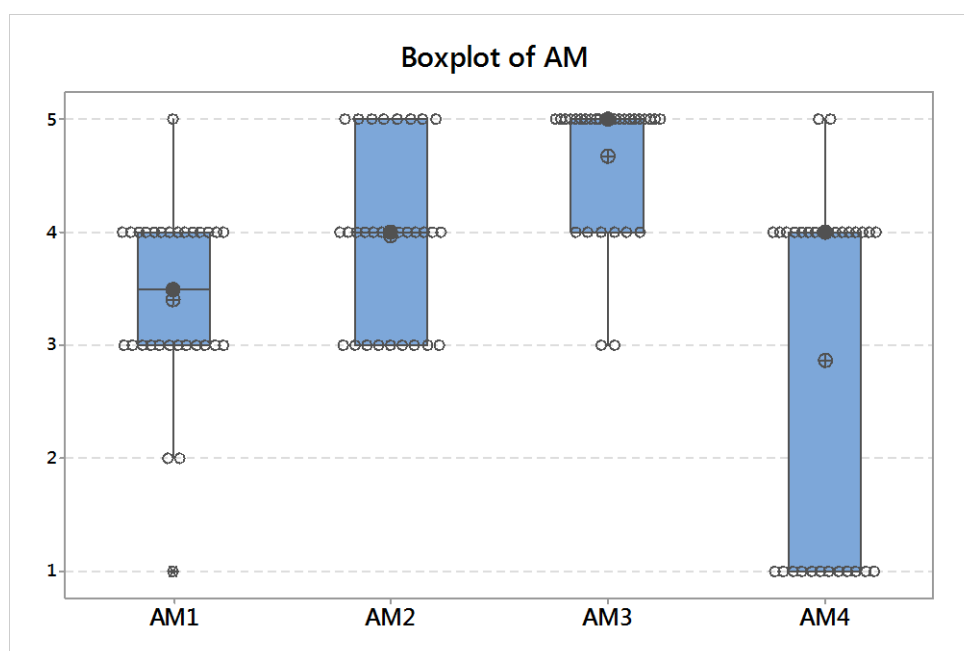
Πίνακας 9-2: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης (AM) της συνεργασίας A-P». (+/-): ανηγμένες θετικές και αρνητικές απαντήσεις, ΜΤ: η δειγματική μέση τιμή, ΤΑ: δειγματική τυπική απόκλιση.



Εικόνα 9-1: Ραβδοδιάγραμμα (bar chart) των αποτελεσμάτων στη θεματική ενότητα «Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης της συνεργασίας A-P» (AM). Αναπαρίσταται η δειγματική μέση τιμή και η δειγματική τυπική απόκλιση ανά απάντηση.

Η **πρώτη** θεματική ενότητα περιλαμβάνει τα δεδομένα από τέσσερις ερωτήσεις (AM_i, i=1,...,4), οι οποίες αφορούν την *Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης (AM)* της συνεργασίας A-P (Πίνακας 9-2, Εικόνα 9-1, Εικόνα 9-2).

Τα αποτελέσματα αυτής της θεματικής ενότητας δείχνουν καταρχήν αποδοχή του ρεαλισμού και της αντιστοίχισης των κινήσεων του ανθρωποειδούς από το 50% των χρηστών (AM1). Επίσης, αναγνωρίζεται ότι υπήρξαν αναντιστοιχίες στην αναγνώριση κίνησης, ή απώλεια ελέγχου των χεριών κατά την εκτέλεση των καθηκόντων, και ότι τα προβλήματα αυτά συσχετίζονται με την πιθανή δυσκολία εκτέλεσης του καθήκοντος (AM4). Το τελευταίο, μας οδήγησε στο συμπέρασμα ότι έπρεπε να γίνουν βελτιώσεις στο tracking του χρήστη, προκειμένου αυτός να εκτελεί απερίσπαστα το ερευνώμενο καθήκον στο ΕΠε. Η περίπτωση των αποτελεσμάτων της ερώτησης AM4, τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά, είναι μια τυπική περίπτωση αδυναμίας παρουσίασης της κυρίαρχης τάσης των αποτελεσμάτων, όταν χρησιμοποιούνται ως στατιστικοί δείκτες μόνον η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και τα ραβδογράμματα (βλ. ενδεικτικά το αποτέλεσμα της AM4 στην Εικόνα 9-1 σε σχέση με τη διαφορετική εικόνα που δίνει η διάμεσος και η διασπορά της κατανομής, όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 9-2, διότι η διασπορά του ενδοτεταρτομοριακού εύρους δεν επηρεάζεται από τη μέση τιμή, αλλά από τη διάμεσο).



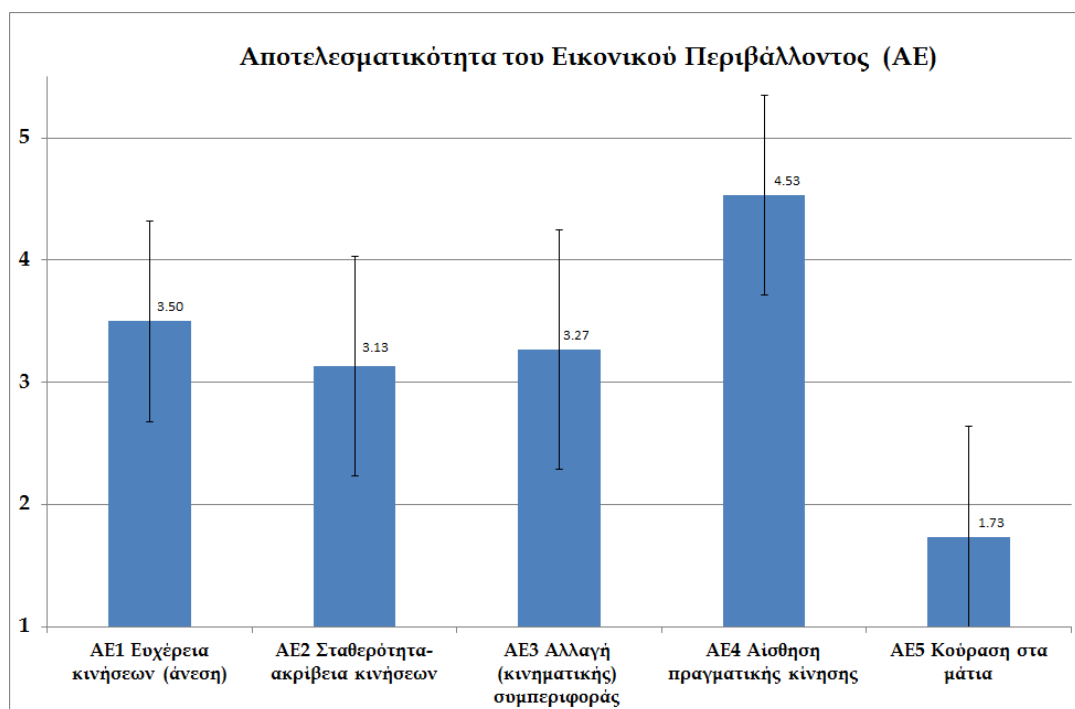
Εικόνα 9-2: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων ή θηκόγραμμα (boxplot) για τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης της συνεργασίας A-P» (AM). (συμπαγής μαύρος κύκλος: διάμεσος, σταυρό εντός κύκλου: μέση τιμή, θήκη: ενδοτεταρτομοριακό εύρος).

Αντιθέτως, το συνεργατικό καθήκον της τροφοδοσίας του υφάσματος και η λήψη του από το χρήστη (AM2), πραγματοποιήθηκε με ευκολία και χωρίς να αναφέρεται ούτε μία αρνητική απάντηση (Εικόνα 9-2). Η ενδεικνυόμενη (υπερτονισμένη με κόκκινο χρώμα) θέση στο καλούπι, πάνω στην οποία έπρεπε να στρωθεί το ανθρακοϋφασμα, γινόταν εύκολα αντιληπτή, σχεδόν από το σύνολο των χρηστών (AM3).

Η **δεύτερη** θεματική ενότητα της δοκιμής περιλαμβάνει τα δεδομένα από πέντε ερωτήσεις (ΑΕ_i, i=1,...,5), οι οποίες αφορούν την *Αποτελεσματικότητα του ΕΠε και της κίνησης του χρήστη (ΑΕ)* (Πίνακας 9-3, Εικόνα 9-3, Εικόνα 9-4).

Ερώτηση	+	-	Μ.Τ.	Τ.Α.
(ΑΕ) Αποτελεσματικότητα του ΕΠε	[%]	[%]	\bar{x}	s
ΑΕ1 Σε τι βαθμό θα λέγατε πως είχατε ευχέρεια κινήσεων στο εικονικό περιβάλλον; (π.χ. άνεση στις κινήσεις, αυτοπεριορισμός του σώματός σας κλπ)	50	10	3.50	0.82
ΑΕ2 Αξιολογείτε τη σταθερότητα των κινήσεων των χεριών του ανθρωποειδούς («τρέμουλο», ακρίβεια αντιστοίχισης θέσης)	24	23	3.13	0.89
ΑΕ3 Νιώσατε τον εαυτό σας να αλλάζει συμπεριφορά στο εικονικό περιβάλλον σε σχέση με την άνεση (κίνησης) που θα είχατε στον πραγματικό κόσμο;	43	27	3.27	0.98
ΑΕ4 Ένιωσα ότι κινούμουν πραγματικά στη σκηνή	87	3	4.53	0.82
ΑΕ5 Αισθανθήκατε κούραση στα μάτια σας από τη χρήση της κάσκας στερεοσκοπίας κατά τη διάρκεια της δοκιμής;	7	83	1.73	0.91

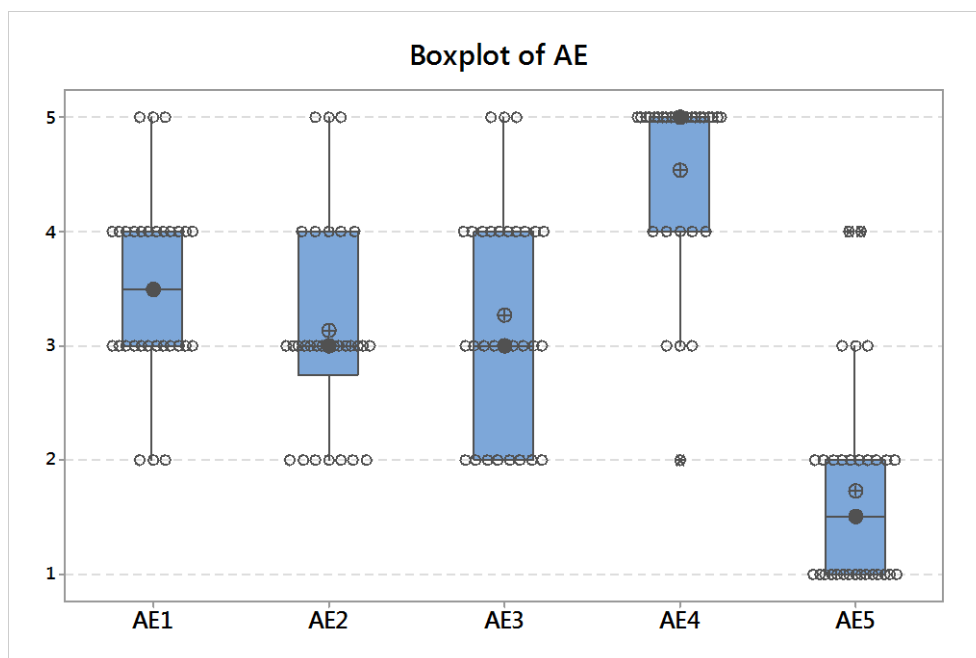
Πίνακας 9-3: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποτελεσματικότητα του ΕΠε (ΑΕ)»



Εικόνα 9-3: Ραβδοδιάγραμμα (bar chart) των αποτελεσμάτων (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) στη θεματική ενότητα «Αποτελεσματικότητα του ΕΠε» (ΑΕ).

Τα αποτελέσματα αυτής της θεματικής ενότητας δείχνουν ότι η πλειοψηφία των χρηστών αισθάνθηκε πως είχε ευχέρεια στις κινήσεις του (ΑΕ1), με ένα 10% να δηλώνει ελαφρά δυσχέρεια ή αυτο-περιορισμό στις κινήσεις του. Αντιθέτως, διαφαίνεται ότι ένα μεγάλο ποσοστό των χρηστών (23%) βρήκε τη σταθερότητα της κίνησης (τρέμουλο, απώλεια ελέγχου) ανεπαρκή, με μόλις το (24%) να δηλώνει ικανοποιημένο από τη σταθερότητα της κίνησης (ΑΕ2). Επίσης, το 27% των χρηστών θεώρησε τροποποιημένη την κινηματική του συμπεριφορά στο ΕΠε σε σχέση με αυτήν στο πραγματικό περιβάλλον (ΑΕ3), έναντι του 43%, το οποίο δεν εντόπισε

κάποια τροποποίηση. Μεταξύ αυτών που βρήκαν τροποποιημένη τη συμπεριφορά τους, οι χρήστες επεσήμαναν ως περισσότερο αλλαγμένες τις: κίνηση χεριών (50%), περιστροφή του σώματος (47%), βηματισμό (30%) και κίνηση κεφαλής (23%), αντίστοιχα.



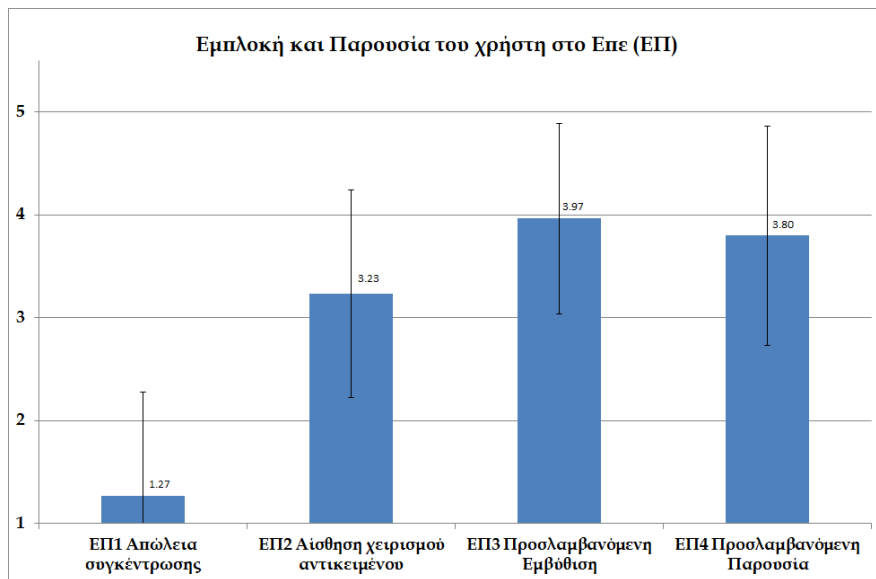
Εικόνα 9-4: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων (boxplot) για τα αποτελέσματα (διάμεσος, μέση τιμή, ενδοτεταρτομοριακό εύρος, διασπορά) της θεματικής ενότητας «Αποτελεσματικότητα του ΕΠε» (ΑΕ).

Όσον αφορά την αίσθηση της κίνησης στο χώρο (ΑΕ4), το 87% των χρηστών δήλωσε ότι ένιωσε σαν να κινείται πραγματικά μέσα στον εικονικό κόσμο. Τέλος, στην ερώτηση αν αισθάνθηκε κόπωση στα μάτια από τη χρήση της κάσκας στερεοσκοπίας κατά τη διάρκεια της δοκιμής (ΑΕ5), μόνο το 7% απάντησε καταφατικά.

Η **τρίτη** θεματική ενότητα της δοκιμής περιλαμβάνει τα δεδομένα από τέσσερις ερωτήσεις (ΕΠ_i, $i=1, \dots, 4$), οι οποίες σχετίζονται με παράγοντες που χαρακτηρίζουν την *Εμπλοκή και Παρουσία* του χρήστη στο ΕΠε» (ΕΠ) (Πίνακας 9-4, Εικόνα 9-5, Εικόνα 9-6).

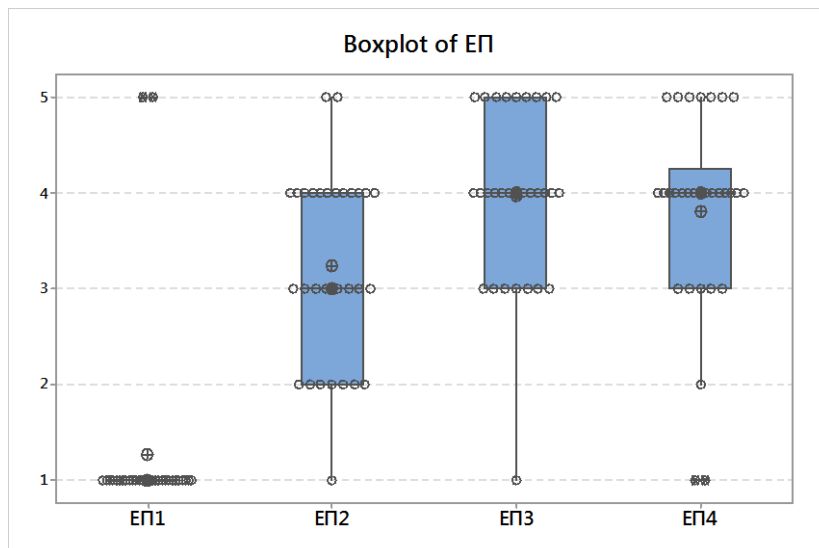
Ερώτηση	+	-	Μ.Τ.	Τ.Α.
(ΕΠ) Εμπλοκή και Παρουσία του χρήστη	[%]	[%]	\bar{x}	s
ΕΠ1 Αφαιρέθηκε καθόλου κατά τη διάρκεια της δοκιμής;	7	93	1.27	1.01
ΕΠ2 Αξιολογίστε το κατά πόσο νιώθατε ότι πραγματικά μετακινείτε και χειρίζεστε ένα αντικείμενο με το χέρι σας, παρότι αυτό δεν είχε υλικό βάρος.	47	26	3.23	1.01
ΕΠ3 Με τη χρήση της κάσκας HMD νιώσατε ότι "εμβυθίζεστε" με τις κινήσεις σας σ' ένα εικονικό περιβάλλον;	73	3	3.97	0.93
ΕΠ4 Με τη χρήση της κάσκας HMD νιώσατε ότι είστε πραγματικά παρόντες στο εικονικό περιβάλλον;	73	10	3.80	1.06

Πίνακας 9-4: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Εμπλοκή και Παρουσία του χρήστη στο ΕΠε» (ΕΠ)



Εικόνα 9-5: Ραβδοδιάγραμμα (bar chart) των αποτελεσμάτων (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) στη θεματική ενότητα «Εμπλοκή και Παρουσία του χρήστη στο ΕΠε» (ΕΠ)

Οι χρήστες, στη συντριπτική τους πλειοψηφία (93%), απάντησαν ότι ήταν αφοσιωμένοι στο εικονικό καθήκον και πως δεν αφαιρέθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής (ΕΠ1). Επικουρικά προς το παραπάνω, σχεδόν οι μισοί χρήστες (47%), δήλωσαν ότι ένιωθαν πως πραγματικά μετακινούν και χειρίζονται ένα αντικείμενο με το χέρι τους, παρότι αυτό δεν είχε υλικό βάρος (ΕΠ2), έναντι του 26% που απάντησε απορριπτικά.



Εικόνα 9-6: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων (boxplot) για τα αποτελέσματα (διάμεσος, μέση τιμή, ενδοτεταρτομοριακό εύρος, διασπορά) της θεματικής ενότητας «Εμπλοκή και Παρουσία του χρήστη στο ΕΠε» (ΕΠ).

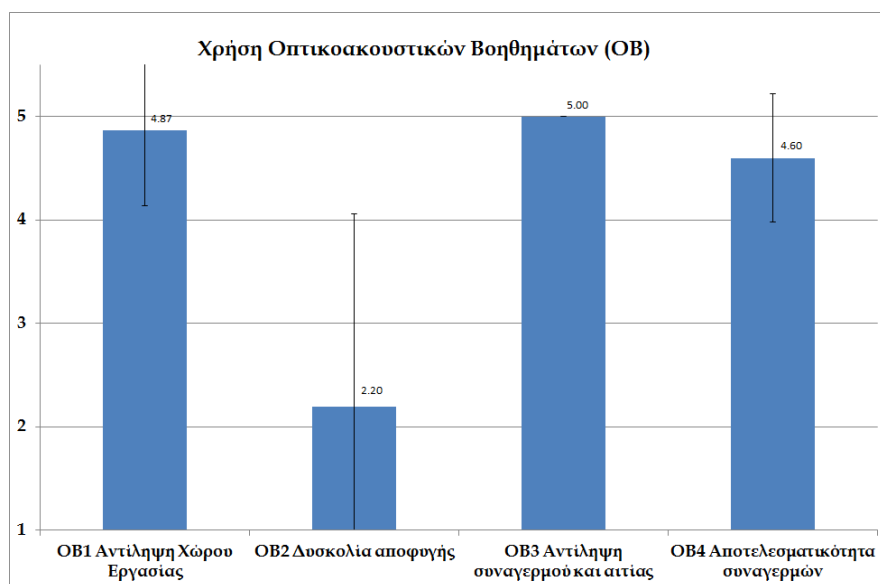
Όσον αφορά τα υποκειμενικά (προσλαμβανόμενα από το χρήστη αποτελέσματα) εξαιτίας της στερεοσκοπικής όρασης και τη χρήσης της κάσκας στερεοσκοπίας, 73%

των χρηστών απάντησε ότι ένιωσε ότι βυθίζεται με τις κινήσεις του σε έναν εικονικό κόσμο (ΕΠ3-προσλαμβανόμενη εμπύθιση), ενώ το ίδιο ποσοστό χρηστών (73%) απάντησαν ότι ένιωσαν πραγματικά παρόντες στο εικονικό περιβάλλον (ΕΠ4-προσλαμβανόμενη παρουσία).

Η **τέταρτη** θεματική ενότητα της δοκιμής περιλαμβάνει τα δεδομένα από τέσσερις ερωτήσεις (OB_i, i=1,...,4), οι οποίες αφορούν τη *χρήση των Οπτικοακουστικών Βοηθημάτων (OB)* και την αποτελεσματικότητα αυτών (Πίνακας 9-5, Εικόνα 9-7, Εικόνα 9-8).

Ερώτηση	+	-	Μ.Τ.	Τ.Α.
(OB) Χρήση Οπτικοακουστικών Βοηθημάτων	[%]	[%]	\bar{x}	s
OB1 Αντιληφθήκατε εύκολα το χώρο εργασίας του ρομποτικού βραχίονα;	97	3	4.87	0.73
OB2 Δυσκολευτήκατε να μη μπειτε στο χώρο εργασίας του ρομπότ;	30	70	2.20	1.86
OB3 Αν αντιληφθήκατε κάποιον ηχητικό ή εποπτικό συναγερμό, μπορούσατε να προσδιορίσετε κάθε φορά την αιτία της ενεργοποίησής του;	100	0	5.00	0.00
OB4 Κατά την κρίση σας πόσο σας βοήθησαν τα οπτικοακουστικά μέσα («συναγερμοί») για την κατανόηση από το χρήστη της ύπαρξης ενός «επικίνδυνου» χώρου;	93	0	4.60	0.62

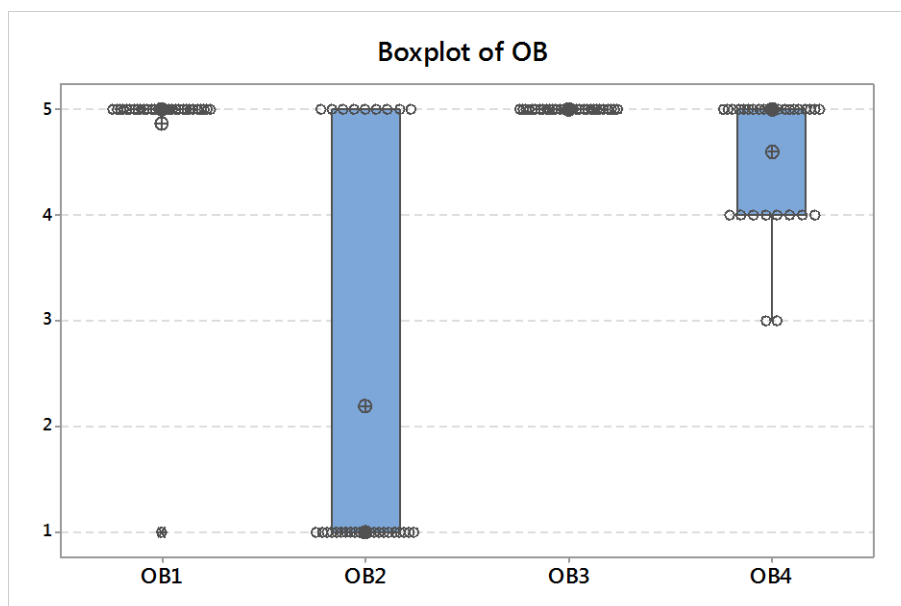
Πίνακας 9-5: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Χρήση Οπτικοακουστικών Βοηθημάτων» (OB)



Εικόνα 9-7: Ραβδοδιάγραμμα (bar chart) των αποτελεσμάτων (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) στη θεματική ενότητα «Χρήση Οπτικοακουστικών Βοηθημάτων» (OB)

Η απόλυτη σχεδόν πλειοψηφία των χρηστών (97%), αντιλαμβανόταν εύκολα το χώρο εργασίας του ρομποτικού βραχίονα (OB1), ο οποίος αναπαρίστατο από τον ημιδιαφανή κόκκινο όγκο. Μάλιστα, το 70% των χρηστών δήλωσε ότι μπορούσε να αντιλαμβάνεται το χώρο εργασίας και να πραγματοποιεί τα συνεργατικά καθήκοντα με τα χέρια του (τροφοδοσία και λήψη υφάσματος), χωρίς να εισέρχεται ολόκληρος

στο χώρο αυτό (OB2). Μεταξύ αυτών των χρηστών (που δεν αντιμετώπισαν ιδιαίτερη δυσκολία), το 70% δήλωσε ότι τον βοήθησε περισσότερο η ένδειξη του χώρου εργασίας για την αποφυγή άσκοπης εισόδου σε αυτόν, το 57% δήλωσε τον ηχητικό συναγερμό και ένα 9% δήλωσε την προβολή του χώρου εργασίας στο δάπεδο.



Εικόνα 9-8: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων (boxplot) για τα αποτελέσματα (διάμεσος, μέση τιμή, ενδοτεταρτομοριακό εύρος, διασπορά) της θεματικής ενότητας «Χρήση Οπτικοακουστικών Βοηθημάτων» (OB).

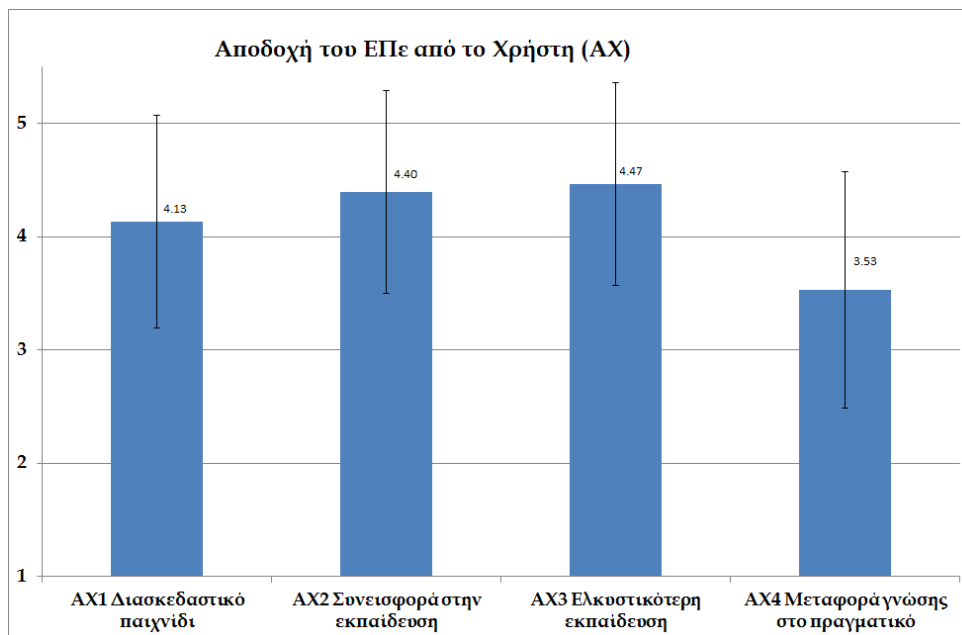
Το σύνολο των χρηστών (100%) απάντησε ότι αντιλήφθηκε κάποιον ηχητικό ή οπτικό (αναβοσβήνοντα) συναγερμό και μάλιστα ότι μπορούσε να προσδιορίσει, κάθε φορά, την αιτία που προκαλούσε την ενεργοποίησή του (OB3). Κατά την κρίση των συμμετεχόντων (93%), η χρήση των οπτικοακουστικών βοηθημάτων ήταν αποτελεσματική και τους βοήθησε για την κατανόηση της ύπαρξης ενός δυνητικώς επικίνδυνου χώρου, ενώ ουδείς εκφράστηκε αρνητικά για τη χρήση τους.

Η **πέμπτη** και τελευταία θεματική ενότητα της δοκιμής περιλαμβάνει τα δεδομένα από τέσσερις ερωτήσεις (AX_i, i=1,...,4), οι οποίες αφορούν την *Αποδοχή του ΕΠε από το Χρήστη (AX)* (Πίνακας 9-6, Εικόνα 9-9, Εικόνα 9-10).

Ερώτηση	+	-	Μ.Τ.	Τ.Α.
(AX) Αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη	[%]	[%]	\bar{x}	s
AX1 Θα λέγατε πως κατά τη διάρκεια της δοκιμής νιώσατε περισσότερο πως παίζετε ένα διασκεδαστικό παιχνίδι;	76	7	4.13	0.94
AX2 Πιστεύετε ότι αντίστοιχες εφαρμογές ΕΠ μπορούν να συνεισφέρουν στην εκπαίδευση για τη συνεργασία A-P, ή σε εφαρμογές πρόληψης επαγγελματικού κινδύνου;	90	3	4.40	0.89
AX3 Μετά τη δοκιμή που περάσατε θα λέγατε πως η εκπαίδευση σε καθήκοντα που απαιτούν συνεργασία A-P μπορεί να γίνει πιο ελκυστική με τη χρήση εφαρμογών ΕΠε;	90	3	4.47	0.90

AX4 Πιστεύετε ότι μετά τη δοκιμή που περάσατε θα δεχόσασταν ευκολότερα να πραγματοποιήσετε μια αντίστοιχη εργασία σε πραγματικό περιβάλλον;	67	17	3.53	1.04
---	----	----	------	------

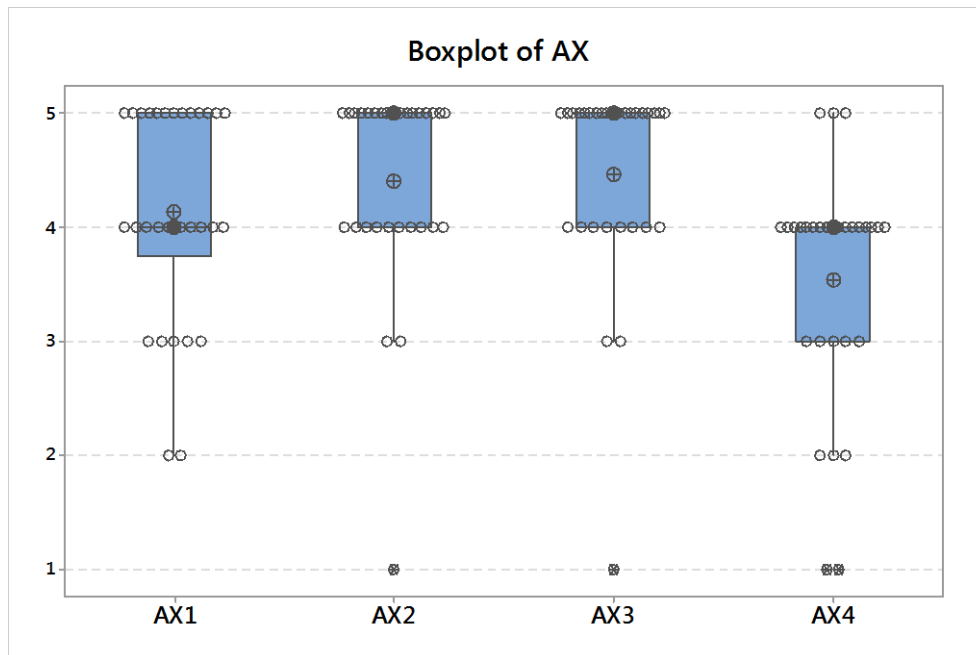
Πίνακας 9-6: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη» (ΑΧ)



Εικόνα 9-9: Ραβδοδιάγραμμα (bar chart) των αποτελεσμάτων (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) στη θεματική ενότητα «Αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη» (ΑΧ)

Το 76% των συμμετεχόντων δήλωσε ενδιαφέρον για τη δοκιμή, αφού απάντησε ότι κατά τη διάρκεια της δοκιμής ένιωσε σαν να έπαιζε ένα διασκεδαστικό παιχνίδι (ΑΧ1), σε αντίθεση με το 7% που απάντησε αρνητικά. Μετά τη δοκιμή των χρηστών, το 90% αυτών απάντησε ότι πιστεύει πως αντίστοιχες εφαρμογές ΕΠ μπορούν να συνεισφέρουν στην εκπαίδευση για τη συνεργασία Α-Ρ, αλλά και ευρύτερα, σε εφαρμογές πρόληψης επαγγελματικού κινδύνου(ΑΧ2). Επίσης, το 90% των χρηστών απάντησε ότι η εκπαίδευση σε καθήκοντα που απαιτούν συνεργασία Α-Ρ μπορεί να γίνει πιο ελκυστική με τη χρήση διαδραστικών εφαρμογών ΕΠε, σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους εκπαίδευσης (ΑΧ3). Τέλος, οι χρήστες απάντησαν σε ποσοστό 67% (περισσότερο διαισθητικά) ότι μετά τη δοκιμή που εκτέλεσαν, θα δέχονταν ευκολότερα να πραγματοποιήσουν μια αντίστοιχη εργασία σε πραγματικό περιβάλλον (ΑΧ4), εξαιτίας της γνώσης και της εξοικείωσης που απέκτησαν στο ΕΠε. Αντιθέτως, το 17% των χρηστών απάντησε αρνητικά στην παραπάνω ερώτηση.

Συνολικά, τα στοιχεία των απαντήσεων δείχνουν αποδοχή της χρήσης του διαδραστικού ΕΠε για τη διενέργεια δοκιμών συνεργασίας Α-Ρ, αλλά επισημαίνουν και τα προβλήματα της πρώτης εφαρμογής (π.χ. προβλήματα στην αναγνώριση κίνησης). Υπενθυμίζεται ότι το σύνολο των συμμετεχόντων στη δοκιμή, είχε πρότερη εξοικείωση με βασικό προγραμματισμό και χειρισμό ρομποτικού βραχίονα.



Εικόνα 9-10: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων (boxplot) για τα αποτελέσματα (διάμεσος, μέση τιμή, ενδοτεταρτομοριακό εύρος, διασπορά) της θεματικής ενότητας «Αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη» (AX).

9.2. Δοκιμή σεναρίου συνύπαρξης, ταυτόχρονης συνεργασίας και εργασίας εν παραλλήλω, με έντονη συνέργεια και αλληλεπίδραση (beWare of the Robot v2.0)

Η δεύτερη περίπτωση εφαρμογής (έκδοση 2.0) σχεδιάστηκε έχοντας λάβει υπόψη τις παρατηρήσεις που προέκυψαν μετά τη δοκιμή της έκδοσης 1.0. Η έκδοση 2.0 είναι πολύ πιο αλληλεπιδραστική, και εκτός από το να αποτελέσει κι αυτή μια πλατφόρμα πειραματισμού και δοκιμών, δημιουργήθηκε με σκοπό να απαντήσει στην τρίτη ερευνητική προβληματική, δηλαδή να διερευνήσει ποιες τεχνικές κρίνονται πιο αποτελεσματικές (i) για την ασφαλή και (ii) για την αποδοτική και με εύροια (απρόσκοπτη) συνεργασία ανθρώπου-ρομπότ. Οι δύο δημιουργηθείσες τεχνικές ασφαλούς ελέγχου, οι οποίες παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 8, είναι: (i) η τεχνική επιβράδυνσης του ρομπότ μέχρι μια ασφαλή ταχύτητα και (ii) η τεχνική «υποχώρησης» του ρομπότ μακριά από το χρήστη και υπολογισμού νέας τροχιάς, κρατώντας όμως σταθερό το σημείο τελικού προορισμού.

Η δοκιμή της έκδοσης 2.0 από ομάδα χρηστών γίνεται σε δύο επίπεδα: με υποκειμενικές μετρικές ικανοποίησης (ερωτηματολόγιο) και με μετρικές απόδοσης και συγκριτικά στατιστικά τεστ, για τον έλεγχο των υποθέσεων μεταξύ των χρηστών.

Το πείραμα συγκρίσεως εξετάζει την επίδραση που έχει η καθμία τεχνική: (i) στην ασφάλεια της συνεργασίας (μετρική: αριθμός συγκρούσεων) και (ii) στην απόδοση της συνεργασίας (μετρικές: χρόνος συνεργασίας, μέση ταχύτητα ρομπότ).

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των ερωτηματολογίων σκοπεύει (όπως και στην περίπτωση της έκδοσης 1.0) στη διερεύνηση των εξής παραμέτρων: (i) της

αποτελεσματικότητας της μοντελοποίησης της κατάστασης της συνεργασίας A-P και της αναπαραγωγής των βασικότερων χαρακτηριστικών αυτής σε διαδραστικό ΕΠε, (ii) της αποτελεσματικότητας του ΕΠε, (iii) της εμπλοκής και της παρουσίας του χρήστη, (iv) της χρήσης οπτικοακουστικών βοηθημάτων, (v) της αποδοχής του ΕΠε από το χρήστη και, επιπλέον, (vi) της προτίμησης των χρηστών επί των διαφορετικών τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας.

9.2.1. Περιγραφή-Εξοπλισμός

Πραγματοποιήθηκε μία σειρά δοκιμών στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ. Στο πείραμα συμμετείχε μία ομάδα από 30 τελειόφοιτους σπουδαστές της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, 23 άνδρες και 7 γυναίκες, με ηλικιακό εύρος 21-38 έτη και με πρότερη εξοικείωση με βασικές έννοιες της Ρομποτικής και των Συστημάτων Κατεργασιών. Κάθε χρήστης έπρεπε να συμμετέχει στη δοκιμή ατομικά, να συνεργασθεί με το ρομπότ στο ΕΠε, συνυπάρχοντας στον ίδιο χώρο με αυτό, βάσει του δοθέντος σεναρίου και να δοκιμάσει τις διαφορετικές τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας.

Η πλατφόρμα της δοκιμής αποτελείτο από: τα τρία εκτελέσιμα αρχεία της standalone εφαρμογής επίδειξης beWare of the Robot v2.0 (έκδοση χωρίς τεχνική ασφάλειας, έκδοση με τεχνική επιβράδυνσης, έκδοση με τεχνική υποχώρησης), έναν προσωπικό Η/Υ με λειτουργικό σύστημα Windows 7™, 64-bit και κάρτα γραφικών AMD Radeon R9 280, την κάσκα στερεοσκοπίας Oculus Rift DK2™ με στερεοφωνικό ήχο, τον αισθητήρα Microsoft Kinect™ και, τέλος, πληκτρολόγιο και ποντίκι για τον έλεγχο της εφαρμογής από τον επιβλέποντα της δοκιμής. Προκειμένου να αναπαραχθεί η εικόνα που βλέπει ο χρήστης μέσα από την κάσκα στερεοσκοπίας, χρησιμοποιείται ένας προβολέας (projector) ο οποίος προβάλλει την εικόνα αυτή (clone) στον τοίχο πίσω από το χρήστη. Επίσης, χρησιμοποιείται μία βίντεο-κάμερα για την καταγραφή της εμπειρίας του χρήστη, ώστε να είναι δυνατή η εκ των υστέρων παρατήρηση, μελέτη και εξαγωγή συμπερασμάτων επί της συμπεριφοράς του χρήστη στο ΕΠε.

9.2.2. Πρωτόκολλο

Κάθε χρήστης εκτελούσε διαδοχικά τρεις παραλλαγές της demo εφαρμογής beWare of the Robot v2.0, με τυχαία σειρά: (i) έκδοση χωρίς κάποια τεχνική ασφαλούς συνεργασίας (control version), (ii) έκδοση με τεχνική επιβράδυνσης ρομπότ, και, (iii) έκδοση με τεχνική υποχώρησης ρομπότ.

Η συνολική διάρκεια της δοκιμής ήταν 30-45' ανά άτομο. Στην αρχή δίνονταν σαφείς οδηγίες στον κάθε χρήστη προφορικά, ενώ είχε 2-3' να περάσει από μία αρχική σκηνή εξοικείωσης με το ΕΠε, με την ανίχνευση κίνησης και με τα βασικά καθήκοντα αλληλεπίδρασης. Ο κάθε χρήστης έπρεπε να ακολουθήσει το σενάριο που περιγράφεται αναλυτικά στην Ενότητα 6.4.2 και στο Διάγραμμα Περίπτωσης Χρήσης της Εικόνα 7-2. Αφού ρύθμιζε και φορούσε στο κεφάλι του την κάσκα στερεοσκοπίας Oculus Rift, ο χρήστης έπρεπε να σταθεί απέναντι από τον αισθητήρα Kinect, σε απόσταση 2.5 m από αυτόν, μέχρι να ανιχνευθεί ο σκελετός του και να ξεκινήσει το

σενάριο. Κατόπιν, ο χρήστης είχε στη διάθεσή του περίπου 5-8 λεπτά για να ολοκληρώσει την κάθε παραλλαγή του συνεργατικού καθήκοντος και τη στρώση των υφασμάτων, όπως περιγράφεται στο σενάριο του Διαγράμματος Περίπτωσης Χρήσης της Εικόνα 7-2.

Ο χρήστης εκτελούσε διαδοχικά τη δοκιμή και για τις τρεις παραλλαγές του σεναρίου (control-χωρίς τεχνική, με τεχνική επιβράδυνσης, με τεχνική υποχώρησης) και καταγράφονταν σε log αρχεία οι εξαρτημένες μεταβλητές ελέγχου (συγκρούσεις, συμβάντα, χρόνοι, ταχύτητες). Στο τέλος της δοκιμής, γινόταν ολιγόλεπτη συζήτηση με το χρήστη επί της εμπειρίας του, ή επί ζητημάτων τα οποία ενδέχεται να δυσκόλεψαν την εκτέλεση των καθηκόντων του και έπειτα ο χρήστης έπρεπε να συμπληρώσει το ερωτηματολόγιο (online Google Form).

9.2.3.Ερωτηματολόγιο

Χρησιμοποιήθηκε ένα πρωτότυπο ερωτηματολόγιο, βασισμένο σε αυτό της δοκιμής της έκδοσης 1.0, αλλά προσαρμοσμένο στο σενάριο συνεργασίας της έκδοσης 2.0 της εφαρμογής. Τα ερωτηματολόγια συμπληρώνονταν αμέσως μετά το τέλος της δοκιμής (post-test questionnaires) και οι ερωτήσεις αποσκοπούν στην επανεξέταση και επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της έκδοσης 1.0, όσον αφορά την πρώτη και τη δεύτερη ερευνητική προβληματική, αλλά και υποκειμενικές μετρήσεις ικανοποίησης των χρηστών από τη χρήση και δοκιμή των διαφορετικών τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας (τρίτη ερευνητική προβληματική).

Το ερωτηματολόγιο αποτελείται από 52 ερωτήσεις (Πίνακας 9-7), η πλειοψηφία των οποίων κατηγοριοποιείται σε επτά θεματικές ομάδες:

- i. προσωπικά στοιχεία των συμμετεχόντων, προφίλ, επίπεδο και εμπειρία (14 ερωτήσεις),
- ii. αποτελεσματικότητα της μοντελοποίησης (AM) της συνεργασίας A-P (10 ερωτήσεις),
- iii. αποτελεσματικότητα του ΕΠε (AE), (6 ερωτήσεις),
- iv. εμπλοκή και παρουσία (ΕΠ) του χρήστη (5 ερωτήσεις),
- v. χρήση οπτικοακουστικών βοηθημάτων (OB), (5 ερωτήσεις),
- vi. αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη (AX), (3 ερωτήσεις)
- vii. χρήση τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας (XT), (5 ερωτήσεις).

Οι απαντήσεις στις περισσότερες ερωτήσεις έπρεπε να δοθούν σε μια περιγραφική κλίμακα, τύπου Likert, 5 σημείων (βαθμός συμφωνίας), από το 1 μέχρι το 5, όπου 1 σημαίνει καθόλου/απαράδεκτο και 5 απόλυτη κατάφαση/εξαιρετικό, έτσι ώστε να προκύψουν υποκειμενικές μετρικές ικανοποίησης του χρήστη. Στον Πίνακας 9-7 παρουσιάζονται τριάντα τέσσερις ερωτήσεις οι οποίες αφορούν τις θεματικές ομάδες (ii) έως (vii) που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι θεματικές ομάδες στις οποίες αναφέρονταν οι ερωτήσεις δεν ήταν εμφανείς στους ερωτώμενους. Κατά το σχεδιασμό του ερωτηματολογίου, έγινε προσπάθεια ισοκατανομής καταφατικών και αρνητικών/απορριπτικών εκφράσεων μεταξύ των ερωτήσεων (αντιστροφή

ερωτήσεων), έτσι ώστε να αντιμετωπισθεί η τάση (σφάλμα) συγκατάβασης (acquiescence bias) που παρατηρείται σε ερωτηματολόγια που χρησιμοποιούν τέτοιου τύπου κλίμακες.

Ερώτηση

(AM) Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης των καθηκόντων και της συνεργασίας A-P
AM1 Σας φάνηκε ρεαλιστική η αντιστοίχιση των πραγματικών σας κινήσεων σε σχέση με αυτές του ανθρωποειδούς;
AM2 Εάν υπήρξαν στιγμές που δε μπορούσατε να δείτε τα χέρια (είτε «χάνατε» παροδικά τον έλεγχο των χεριών) του ανθρωποειδούς μέσα στο οπτικό σας πεδίο, τότε αυτό σας δυσκόλεψε στην εκτέλεση των καθηκόντων;
AM3 Αξιολογήστε το πόσο εύκολα καταφέρατε να ακολουθήσετε με το χέρι σας την κινούμενη ένδειξη, ώστε να «ξεκολλήσετε» το αυτοκόλλητο από τα υφάσματα
AM4 Αξιολογήστε το πόσο εύκολα καταφέρατε να ακολουθήσετε με το χέρι σας την κινούμενη ένδειξη, ώστε να «στρώσετε» τα υφάσματα πάνω σε κάθε θέση του καλούπιού
AM5 Αντιλαμβανόσασταν εύκολα ότι το εκάστοτε ύφασμα είχε τοποθετηθεί σωστά (στρωθεί) στο καλούπι;
AM6 Αξιολογείτε το κατά πόσο νιώθατε ότι πραγματικά πραγματοποιείτε μια εργασία με το χέρι σας, ακολουθώντας κάθε φορά το αντίστοιχο μοτίβο κίνησης το οποίο παραπέμπει στην εργασία;
AM7 Μετά την αρχική σκηνή εξοικείωσης θα έλεγα ότι ήταν αρκετά εύκολη η πραγματοποίηση όλων των απαιτούμενων καθηκόντων και σεναρίων;
AM8 Εξοικειώθηκα γρήγορα με το σενάριο και την κίνηση του ρομπότ και μπορούσα να προβλέψω την επόμενη του κίνηση ή αντίδραση;
AM9 Θα έλεγα ότι η συνεργασία μεταξύ εμού και του ρομπότ ήταν στρωτή και υπήρχε μια συνέργεια και συνέχεια στην εκτέλεση των καθηκόντων;
AM10 Μου ήταν εξαιρετικά δύσκολο να κατανοήσω κάθε φορά το πως θα αντιδράσει το ρομπότ στην κάθε του κίνηση;
(AE) Αποτελεσματικότητα του ΕΠε
AE1 Σε τι βαθμό θα λέγατε πως είχατε ευχέρεια κινήσεων στο εικονικό περιβάλλον; (π.χ. άνεση στις κινήσεις, αυτοπεριορισμός του σώματός σας κλπ)
AE2 Αξιολογείτε τη σταθερότητα των κινήσεων των χεριών του ανθρωποειδούς («τρέμουλο», ανακολουθία κινήσεων, ακρίβεια αντιστοίχισης θέσης)
AE3 Αξιολογείτε την αντιστοίχιση των κινήσεων του κεφαλιού του ανθρωποειδούς σε σχέση με τις δικές σας («τρέμουλο», ανακολουθία κινήσεων, ακρίβεια περιστροφής).
AE4 Νιώσατε τον εαυτό σας να αλλάζει συμπεριφορά στο εικονικό περιβάλλον σε σχέση με την άνεση (κίνησης) που θα είχατε στον πραγματικό κόσμο;
AE5 Αισθανθήκατε κούραση στα μάτια σας από τη χρήση της κάσκας στερεοσκοπίας κατά τη διάρκεια της δοκιμής;
AE6 Αισθανθήκατε ζάλη ή δυσφορία από τη χρήση της κάσκας στερεοσκοπίας κατά τη διάρκεια της δοκιμής;
(EΠ) Εμπλοκή και Παρουσία του χρήστη
EΠ1 Αφαιρέθηκατε καθόλου κατά τη διάρκεια της δοκιμής;
EΠ2 Με τη χρήση της κάσκας Oculus Rift νιώσατε ότι "βυθίζεστε" με τις κινήσεις σας σ' ένα στερεοσκοπικό εικονικό περιβάλλον;
EΠ3 Με τη χρήση της κάσκας Oculus Rift νιώσατε ότι είστε πραγματικά παρόντες στο εικονικό περιβάλλον;
EΠ4 Θα έλεγα ότι η εφαρμογή ανταποκρινόταν άμεσα στις κινήσεις μου, χωρίς υστέρηση η οποία να γίνεται αισθητή από εμένα (latency)
EΠ5 Με τη χρήση της κάσκας Oculus Rift νιώσατε ότι είστε πλήρως απομονωμένοι από τον πραγματικό κόσμο;
(OB) Χρήση Οπτικοακουστικών Βοηθημάτων
OB1 Αντιληφθήκατε εύκολα το χώρο εργασίας του ρομποτικού βραχίονα;
OB2 Αντιλαμβανόσασταν εύκολα την κίτρινη ένδειξη (ημι-διαφανής κυλινδρικός τομέας)

που ακολουθούσε το ρομπότ καθώς αυτό κινείται;
OB3 Δυσκολευτήκατε να αποφύγετε τον κινούμενο βραχίονα καθώς ερχόταν προς το μέρος σας;
OB4 Αν αντιληφθήκατε κάποιον ηχητικό ή οπτικό συναγερμό, μπορούσατε να προσδιορίσετε κάθε φορά την αιτία της ενεργοποίησής του;
OB5 Κατά την κρίση σας πόσο σας βοήθησαν τα οπτικοακουστικά μέσα («συναγερμοί») για την αποφυγή του δυνητικά «επικίνδυνου» κινούμενου ρομπότ;
(AX) Αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη
AX1 Θα λέγατε πως κατά τη διάρκεια της δοκιμής νιώσατε περισσότερο πως παίζετε ένα διασκεδαστικό παιχνίδι;
AX2 Πιστεύετε ότι αντίστοιχες εφαρμογές ΕΠ μπορούν να συνεισφέρουν στην εκπαίδευση για τη συνεργασία A-P, ή σε εφαρμογές πρόληψης επαγγελματικού κινδύνου;
AX3 Πιστεύετε ότι μετά τη δοκιμή που περάσατε θα δεχόσασταν ευκολότερα να πραγματοποιήσετε μια αντίστοιχη εργασία σε πραγματικό περιβάλλον;
(XT) Παρατηρήσεις επί των τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας
XT1 Κατά την τεχνική επιβράδυνση του ρομπότ (καθώς αυτό με πλησίαζε) προλάβαινα να υποχωρήσω ή να αλλάξω θέση και έτσι να το αποφύγω
XT2 Κατά την τεχνική υποχώρησης του ρομπότ (καθώς αυτό με πλησίαζε) προλάβαινα να υποχωρήσω ή να αλλάξω θέση και έτσι να το αποφύγω
XT3 Κατά την τεχνική υποχώρησης του ρομπότ (καθώς αυτό με πλησίαζε) δε χρειαζόταν καν να αλλάξω θέση για να το αποφύγω;
XT4 Ποια τεχνική αποφυγής θεωρείτε ότι ήταν πιο αποτελεσματική για εσάς ως προς την αποφυγή συγκρούσεων;
XT5 Ποια τεχνική αποφυγής θεωρείτε ότι ήταν πιο ικανοποιητική για εσάς ως προς την ποιότητα και την συνέχεια της ροής της συνεργασίας σας με το ρομπότ;

Πίνακας 9-7: Επισκόπηση των σημαντικότερων ερωτήσεων του ερωτηματολογίου της έκδοσης 2.0, ταξινομημένες σε 6 βασικές κατηγορίες (AM-AE-EP-OB-AX-XT).

9.2.4. Αποτελέσματα

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με περιγραφική στατιστική και συγκεκριμένα με τη χρήση της δειγματικά επικρατούσας τιμής (sample mode), της μέσης τιμής (mean) και της διαμέσου (median), και τη γραφική τους αποτύπωση με διαγράμματα πλαισίου-απολήξεων (boxplots).

Στον Πίνακα 9-7 παρουσιάζονται οι ερωτήσεις ταξινομημένες σε έξι βασικές θεματικές κατηγορίες: (i) **AM**: Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης της συνεργασίας A-P, (ii) **AE**: Αποτελεσματικότητα του ΕΠε, (iii) **EP**: Εμπλοκή και Παρουσία του χρήστη, (iv) **OB**: Χρήση Οπτικοακουστικών Βοηθημάτων, (v) **AX**: Αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη και, (vi) **XT**: Χρήση Τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας.

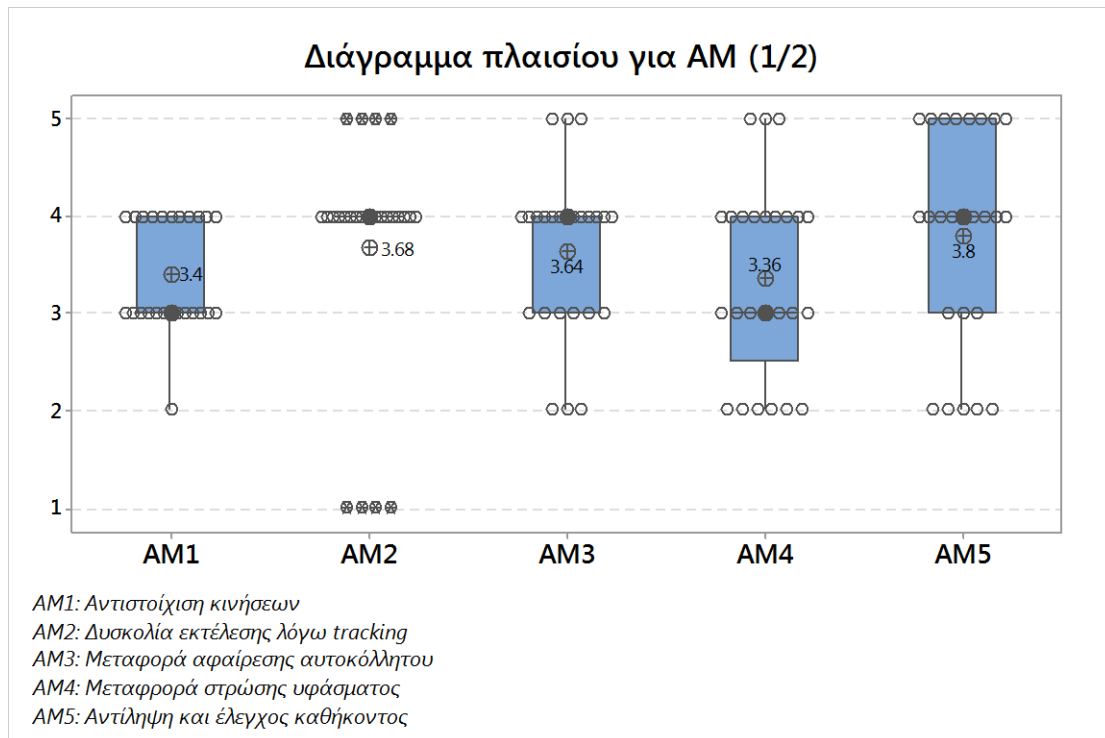
Στον Πίνακα 9-8 και στη συνέχεια στους πίνακες που ακολουθούν, παρουσιάζονται στατιστικοί δείκτες των αποτελεσμάτων ανά θεματική κατηγορία ερωτήσεων. Δίπλα από κάθε ερώτηση παρουσιάζεται η συχνότητα εμφάνισης (ως ποσοστό επί τοις εκατό) της κάθε τιμής και, με έντονα γράμματα, η επικρατούσα τιμή, δηλαδή αυτή η οποία εμφανίζεται με τη μεγαλύτερη συχνότητα. Επιπρόσθετα, οι δείκτες κεντρικής τάσης και διασποράς παρουσιάζονται στα αντίστοιχα διαγράμματα πλαισίου-απολήξεων.

Σε σύνολο 30 χρηστών, 5 εξ αυτών δεν κατάφεραν να ολοκληρώσουν τη δοκιμή λόγω ζάλης και δυσφορίας, και τελικά αποκλείστηκαν. Οι απαντήσεις των πέντε χρηστών που δεν κατάφεραν να ολοκληρώσουν τη δοκιμή και αποκλείστηκαν, δεν ελήφθησαν υπόψη στην ανάλυση των αποτελεσμάτων του ερωτηματολογίου.

Η πρώτη θεματική ενότητα περιλαμβάνει τα δεδομένα από δέκα ερωτήσεις (AM_i, i=1,...,10), οι οποίες αφορούν την *Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης (AM)* της συνεργασίας A-P (Πίνακας 9-8, Εικόνα 9-11, Εικόνα 9-12).

Ερώτηση	SD (1)	D (2)	N (3)	A (4)	SA (5)
(AM) Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης των καθηκόντων και της συνεργασίας A-P	%	%	%	%	%
AM1 Σας φάνηκε ρεαλιστική η αντιστοίχιση των πραγματικών σας κινήσεων σε σχέση με αυτές του ανθρωποειδούς;	0	4	52	42	0
AM2 Εάν υπήρξαν στιγμές που δε μπορούσατε να δείτε τα χέρια (είτε «χάνατε» παροδικά τον έλεγχο των χεριών) του ανθρωποειδούς μέσα στο οπτικό σας πεδίο, τότε αυτό σας δυσκόλεψε στην εκτέλεση των καθηκόντων;	16	0	0	68	16
AM3 Αξιολογήστε το πόσο εύκολα καταφέρατε να ακολουθήσετε με το χέρι σας την κινούμενη ένδειξη, ώστε να «ξεκολλήσετε» το αυτοκόλλητο από τα υφάσματα	0	12	24	52	12
AM4 Αξιολογήστε το πόσο εύκολα καταφέρατε να ακολουθήσετε με το χέρι σας την κινούμενη ένδειξη, ώστε να «στρώσετε» τα υφάσματα πάνω σε κάθε θέση του καλουπιού	0	24	28	36	12
AM5 Αντιλαμβανόσασταν εύκολα ότι το εκάστοτε ύφασμα είχε τοποθετηθεί σωστά (στρωθεί) στο καλούπι;	0	20	12	36	32
AM6 Αξιολογείτε το κατά πόσο νιώθατε ότι πραγματικά πραγματοποιείτε μια εργασία με το χέρι σας, ακολουθώντας κάθε φορά το αντίστοιχο μοτίβο κίνησης το οποίο παραπέμπει στην εργασία;	4	32	36	24	4
AM7 Μετά την αρχική σκηνή εξοικείωσης θα έλεγα ότι ήταν αρκετά εύκολη η πραγματοποίηση όλων των απαιτούμενων καθηκόντων και σεναρίων;	0	16	4	44	36
AM8 Εξοικειώθηκα γρήγορα με το σενάριο και την κίνηση του ρομπότ και μπορούσα να προβλέψω την επόμενη του κίνηση ή αντίδραση;	0	0	16	44	40
AM9 Θα έλεγα ότι η συνεργασία μεταξύ εμού και του ρομπότ ήταν στρωτή και υπήρχε μια συνέργεια και συνέχεια στην εκτέλεση των καθηκόντων;	0	0	8	76	16
AM10 Μου ήταν εξαιρετικά δύσκολο να κατανοήσω κάθε φορά το πως θα αντιδράσει το ρομπότ στην κάθε του κίνηση;	48	40	4	4	4

Πίνακας 9-8: Τα αποτελέσματα (συχνότητα εμφάνισης [ποσοστό %]) της θεματικής ενότητας «Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης (AM) της συνεργασίας A-P». Κλίμακα Likert: 1 (καθόλου/απαράδεκτο) 2 (λίγο) 3 (ουδέτερο) 4 (αρκετά) 5 (απόλυτη κατάφαση/εξαιρετικό)

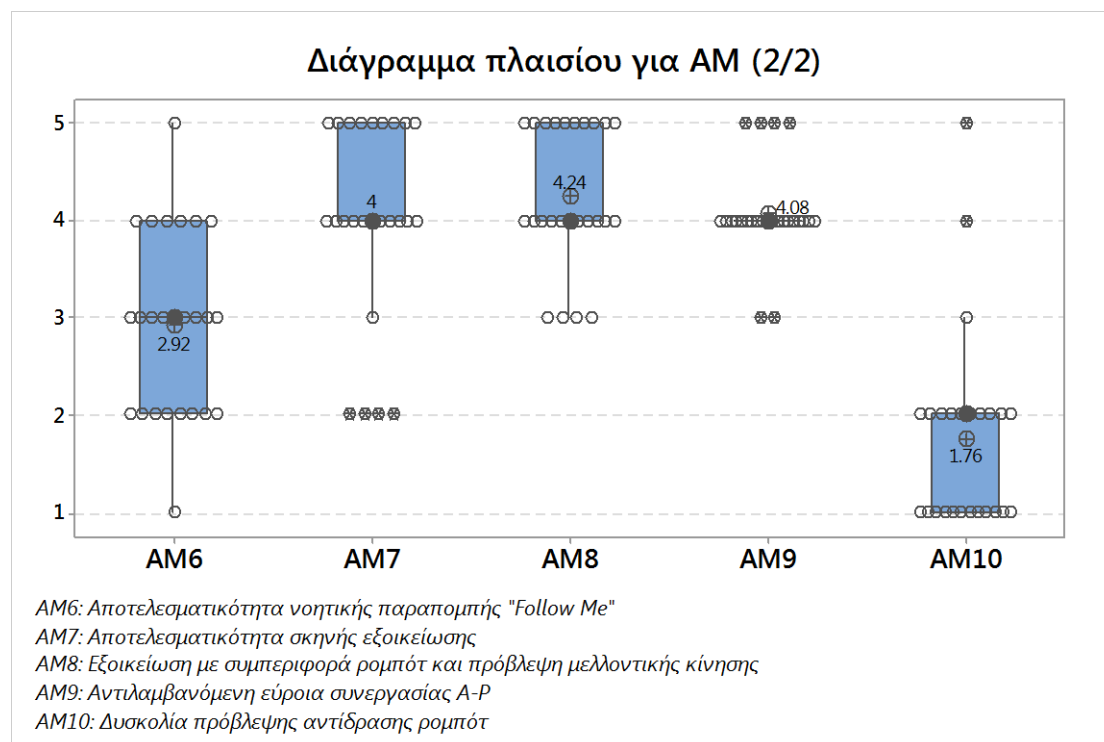


Εικόνα 9-11: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων (1/2) ή θηκόγραμμα (boxplot) για τα μισά αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης της συνεργασίας A-P» (AM) (συμπαγής μαύρος κύκλος : διάμεσος, σταυρός εντός κύκλου: μέση τιμή, θήκη: ενδοτεταρτομοριακό εύρος).

Τα αποτελέσματα αυτής της θεματικής ενότητας (AM), δείχνουν καταρχήν θετική τοποθέτηση των χρηστών έναντι της αποτελεσματικότητας της μοντελοποίησης της συνεργασίας στο ΕΠε, συνολικά. Η αποδοχή του ρεαλισμού και της αντιστοίχισης των κινήσεων του ανθρωποειδούς (AM1) γίνεται από το 42% των χρηστών, ενώ το 4% δεν βρήκε αποδεκτή την αντιστοίχιση των κινήσεων. Επίσης, από το 84% των αντικειμένων, αναγνωρίζεται ότι οι όποιες αναντιστοιχίες στην αναγνώριση κίνησης, ή απώλεια ελέγχου των χεριών κατά την εκτέλεση των καθηκόντων, συσχετίζονται με τη δυσκολία εκτέλεσης του καθήκοντος (AM2). Το τελευταίο, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πρέπει να γίνουν ουσιαστικές βελτιώσεις στο tracking του χρήστη, προκειμένου αυτός να εκτελεί απερίσπαστα το ερευνώμενο καθήκον στο ΕΠε.

Η μεταφορά της αφαίρεσης του αυτοκόλλητου καλύμματος πραγματοποιήθηκε χωρίς προβλήματα από το 88% των συμμετεχόντων, οι οποίοι δήλωσαν ότι μπορούσαν να ακολουθήσουν εύκολα την ένδειξη (οδηγό) του κινούμενου χεριού (AM3). Το ποσοστό αυτό μειώθηκε στο 76% των χρηστών όσον αφορά το καθήκον της στρώσης του ανθρακοϋφάσματος επάνω στο καλούπι (AM4). Μάλιστα, οι μισοί περίπου από τους χρήστες (48%) δήλωσαν ότι μπορούσαν να ακολουθήσουν εύκολα με το χέρι τους την κινούμενη ένδειξη πάνω από κάθε θέση του καλουπιού. Κατά την ολοκλήρωση της στρώσης του υφάσματος, και παρά το γεγονός ότι το ύφασμα παρουσιαζόταν στρωμένο στην τελική του θέση και παράλληλα ακουγόταν ένας χαρακτηριστικός ήχος, το 20% των χρηστών δήλωσε ότι δεν μπορούσε να καταλάβει

με ευκολία εάν όντως είχε ολοκληρωθεί το καθήκον της στρώσης του υφάσματος (AM5).



Εικόνα 9-12: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων (2/2) για τα υπόλοιπα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποτελεσματικότητα της Μοντελοποίησης της συνεργασίας A-P» (AM).

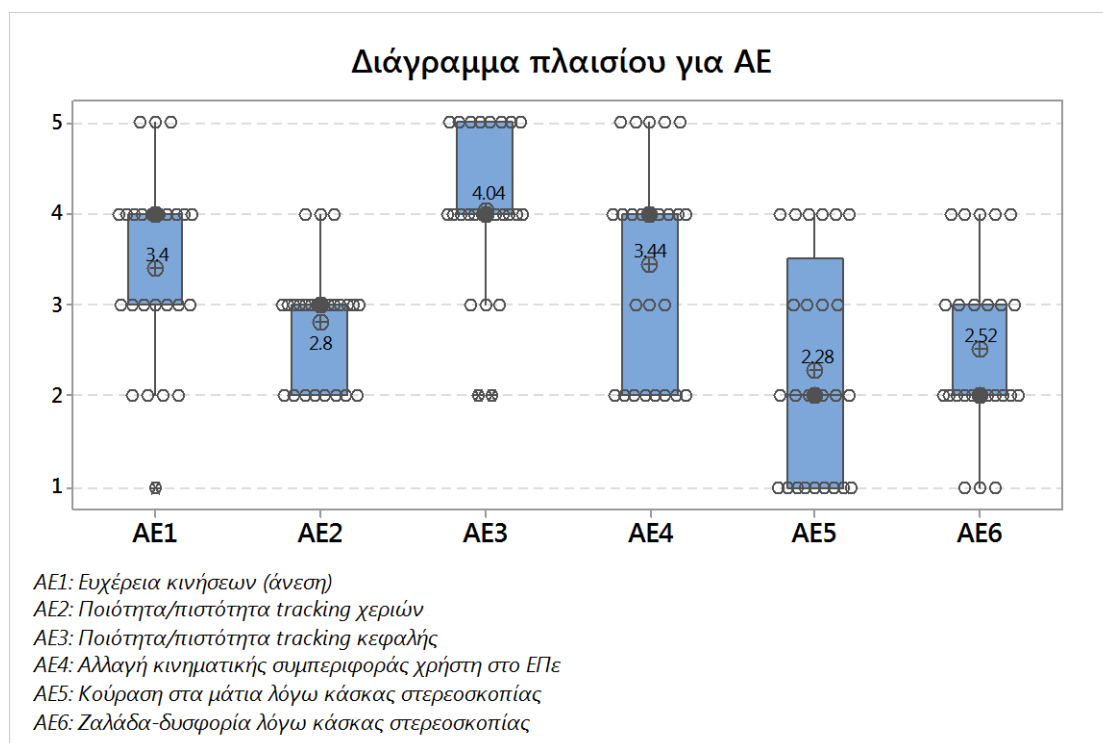
Το 36% των συμμετεχόντων απάντησε αρνητικά έναντι του 28% που απάντησε θετικά στην ερώτηση του κατά πόσο ένιωσε ότι έκανε πραγματικά μια εργασία με το χέρι του, ακολουθώντας κάθε φορά το αντίστοιχο μοτίβο κίνησης, το οποίο παραπέμπει στην αντίστοιχη εργασία (AM6). Αυτό σημαίνει ότι η αποτελεσματικότητα της μεταφοράς "Follow-My-Hand", όσον αφορά τη νοητική παραπομπή στο πραγματικό καθήκον, είναι χαμηλότερη της επιδιωκόμενης.

Αντιθέτως, η πλειοψηφία των χρηστών (80%) έκρινε θετικά την αρχική σκηνή εξοικείωσης, ως προς τη μετέπειτα ευκολία της πραγματοποίησης των απαιτούμενων καθηκόντων και εργασιών (AM7). Στο ίδιο πνεύμα, η συντριπτική πλειοψηφία των χρηστών (84%) δήλωσε ότι εξοικειώθηκε γρήγορα με το σενάριο και την κίνηση του ρομπότ και μπορούσε να προβλέψει την επόμενη του κίνηση ή αντίδραση του ρομπότ (AM8). Η ίδια ερώτηση τέθηκε αντιστραμμένη σε άλλο σημείο του ερωτηματολογίου (AM10) και ελήφθη η ίδια απάντηση από το 88% των χρηστών. Τέλος, όσον αφορά στην προσλαμβανόμενη εύροια της συνεργασίας μεταξύ A-P, το 92% των χρηστών δήλωσε ότι η συνεργασία μεταξύ αυτού και του ρομπότ ήταν στρωτή και ότι υπήρχε μια συνέργεια και συνέχεια στην εκτέλεση των καθηκόντων (AM9).

Η δεύτερη θεματική ενότητα της δοκιμής περιλαμβάνει τα δεδομένα από έξι ερωτήσεις (AE_i, i=1,...,6), οι οποίες αφορούν την *Αποτελεσματικότητα του ΕΠε και της κίνησης του χρήστη (ΑΕ)* (Πίνακας 9-9, Εικόνα 9-13).

Ερώτηση	SD (1)	D (2)	N (3)	A (4)	SA (5)
(ΑΕ) Αποτελεσματικότητα του ΕΠε	%	%	%	%	%
ΑΕ1 Σε τι βαθμό θα λέγατε πως είχατε ευχέρεια κινήσεων στο εικονικό περιβάλλον; (π.χ. άνεση στις κινήσεις, αυτοπεριορισμός του σώματός σας κλπ)	4	16	28	40	12
ΑΕ2 Αξιολογείτε τη σταθερότητα των κινήσεων των χεριών του ανθρωποειδούς («τρέμουλο», ανακολουθία κινήσεων, ακρίβεια αντιστοιχίας θέσης)	0	32	56	12	0
ΑΕ3 Αξιολογείτε την αντιστοιχία των κινήσεων του κεφαλιού του ανθρωποειδούς σε σχέση με τις δικές σας («τρέμουλο», ανακολουθία κινήσεων, ακρίβεια περιστροφής).	0	8	12	48	32
ΑΕ4 Νιώσατε τον εαυτό σας να αλλάζει συμπεριφορά στο εικονικό περιβάλλον σε σχέση με την άνεση (κίνησης) που θα είχατε στον πραγματικό κόσμο;	0	32	12	36	20
ΑΕ5 Αισθανθήκατε κούραση στα μάτια σας από τη χρήση της κάσκας στερεοσκοπίας κατά τη διάρκεια της δοκιμής;	36	24	16	24	0
ΑΕ6 Αισθανθήκατε ζάλη ή δυσφορία από τη χρήση της κάσκας στερεοσκοπίας κατά τη διάρκεια της δοκιμής;	12	44	24	20	0

Πίνακας 9-9: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποτελεσματικότητα του ΕΠε (ΑΕ)»

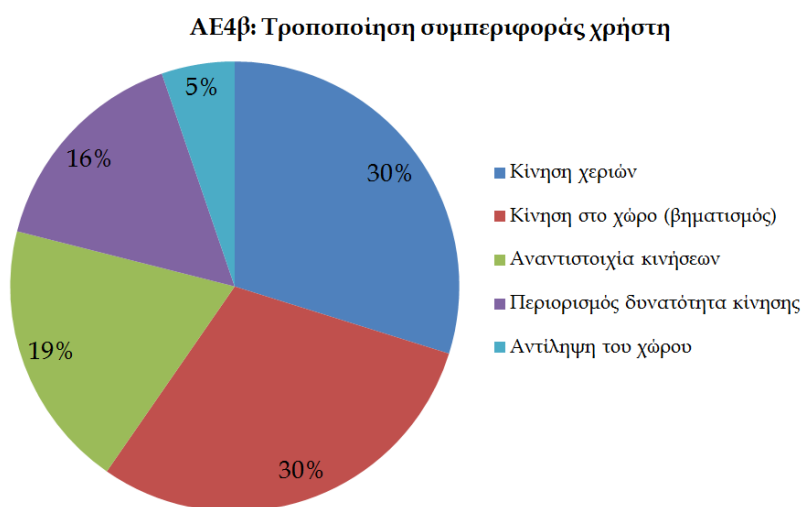


Εικόνα 9-13: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων ή θηκόγραμμα (boxplot) για τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποτελεσματικότητα του ΕΠε (ΑΕ)»

Τα αποτελέσματα αυτής της θεματικής ενότητας δείχνουν ότι η πλειοψηφία των χρηστών αισθάνθηκε πως είχε ευχέρεια και άνεση στις κινήσεις του (ΑΕ1), με ένα 20% να δηλώνει ελαφρά δυσχέρεια ή αυτο-περιορισμό στις κινήσεις του. Επίσης, διαφαίνεται ότι ένα μεγάλο ποσοστό των χρηστών (32%) βρήκε τη σταθερότητα της κίνησης (τρέμουλο, απώλεια ελέγχου) ανεπαρκή, με μόλις το 12% να δηλώνει πλήρως ικανοποιημένο από τη σταθερότητα της κίνησης των χεριών του (ΑΕ2). Αντιθέτως, το

80% του δείγματος αξιολόγησε θετικά την ποιότητα και την πιστότητα της αναγνώρισης κίνησης του κεφαλιού (ΑΕ3: «τρέμουλο», ανακολουθία κινήσεων, ακρίβεια περιστροφής).

Το 56% των χρηστών θεώρησε τροποποιημένη την κινηματική του συμπεριφορά στο ΕΠε, σε σχέση με αυτήν στο πραγματικό περιβάλλον (ΑΕ4), έναντι του 32%, το οποίο δεν εντόπισε κάποια τέτοια τροποποίηση. Μεταξύ αυτών που θεώρησαν τροποποιημένη τη συμπεριφορά τους, οι χρήστες προσδιόρισαν ως περισσότερο αλλαγμένες την κίνηση των χεριών (30%) και το βηματισμό (30%) αντίστοιχα (βλ. Εικόνα 9-14).



Εικόνα 9-14: Κυκλικό διάγραμμα (διάγραμμα πίτας-pie chart) που παρουσιάζει τις απαντήσεις μεταξύ των χρηστών που αισθάνθηκαν τροποποιημένη τη συμπεριφορά τους (ΑΕ4).

Όσον αφορά την αίσθηση της κούρασης στα μάτια από τη χρήση της κάσκας στερεοσκοπίας κατά τη διάρκεια της δοκιμής (ΑΕ5), η πλειοψηφία των χρηστών (60%) απάντησε ότι δεν αισθάνθηκε κούραση στα μάτια του. Τέλος, το 20% των συμμετεχόντων απάντησε ότι αισθάνθηκε ζάλη ή δυσφορία από τη χρήση της κάσκας στερεοσκοπίας (ΑΕ6), έναντι του 56% που δεν ένιωσε ζάλη. Υπενθυμίζεται, ότι στα παραπάνω ποσοστά δε λογίζονται οι 5 χρήστες (17%) που έχουν ήδη αποκλειστεί από τα αποτελέσματα λόγω ζάλης σε μη-αποδεκτό επίπεδο κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

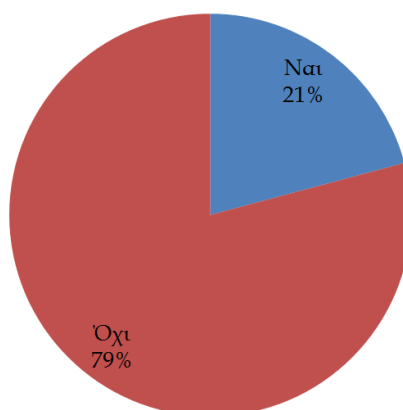
Η τρίτη θεματική ενότητα της δοκιμής περιλαμβάνει τα δεδομένα από πέντε ερωτήσεις (ΕΠ_i, $i=1, \dots, 5$), οι οποίες σχετίζονται με παράγοντες που χαρακτηρίζουν την *Εμπλοκή και Παρουσία* του χρήστη στο ΕΠε» (ΕΠ) (Πίνακας 9-10, Εικόνα 9-16).

Ερώτηση	SD (1)	D (2)	N (3)	A (4)	SA (5)
(ΕΠ) Εμπλοκή και Παρουσία του χρήστη	%	%	%	%	%
ΕΠ1 Αφαιρέθηκε καθόλου κατά τη διάρκεια της δοκιμής;	80	-	-	-	20
ΕΠ2 Με τη χρήση της κάσκας Oculus Rift νιώσατε ότι "βυθίζεστε" με τις κινήσεις σας σ' ένα στερεοσκοπικό εικονικό περιβάλλον;	0	8	20	44	28

ΕΠ3 Με τη χρήση της κάσκας Oculus Rift νιώσατε ότι είστε πραγματικά παρόντες στο εικονικό περιβάλλον;	0	8	4	46	32
ΕΠ4 Θα έλεγα ότι η εφαρμογή ανταποκρινόταν άμεσα στις κινήσεις μου, χωρίς υστέρηση η οποία να γίνεται αισθητή από εμένα (latency)	4	12	52	24	8
ΕΠ5 Με τη χρήση της κάσκας Oculus Rift νιώσατε ότι είστε πλήρως απομονωμένοι από τον πραγματικό κόσμο;	4	12	16	32	36

Πίνακας 9-10: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Εμπλοκή και Παρουσία του Χρήστη (ΕΠ)»

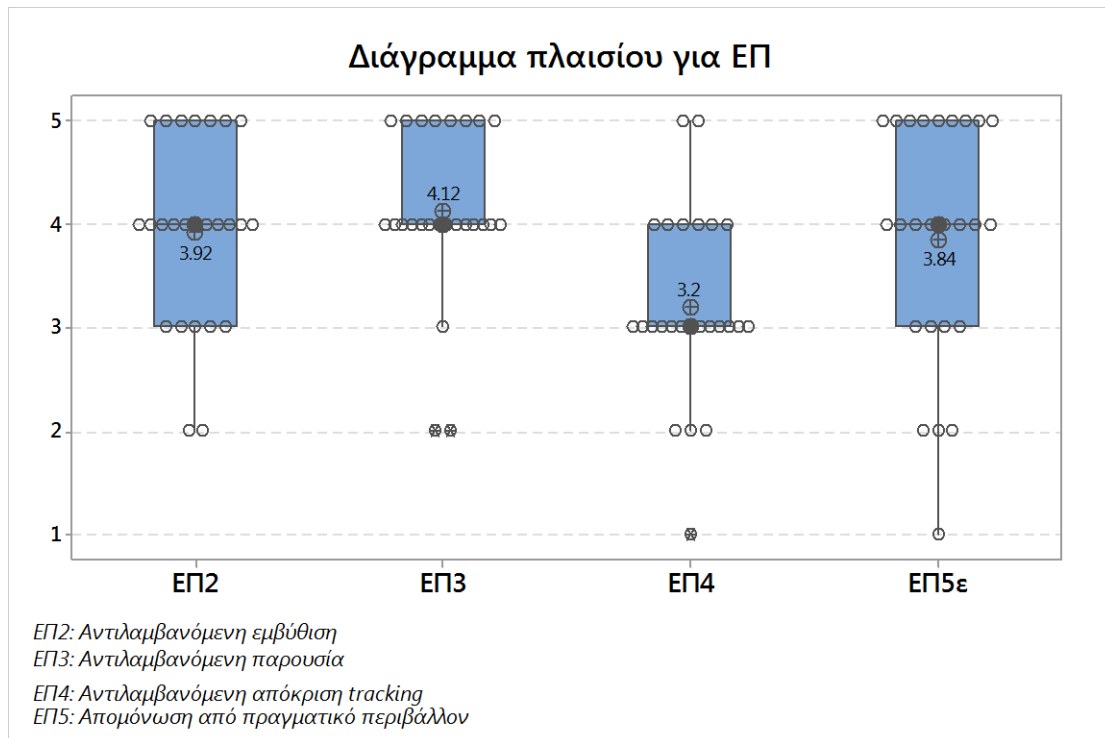
ΕΠ1: Απώλεια συγκέντρωσης (αφαίρεση χρήστη)



Εικόνα 9-15: Κυκλικό διάγραμμα απαντήσεων για την απώλεια συγκέντρωσης του χρήστη (ΕΠ1).

Οι χρήστες, στη συντριπτική τους πλειοψηφία (80%), απάντησαν ότι ήταν αφοσιωμένοι στο εικονικό καθήκον (ΕΠ1) και πως δεν αφαιρέθηκαν καθόλου κατά τη διάρκεια της δοκιμής (Εικόνα 9-15). Στο ερώτημα εάν η εφαρμογή ανταποκρινόταν άμεσα στις κινήσεις του χρήστη (ΕΠ4), χωρίς να γίνεται αισθητή κάποια υστέρηση (latency), υπερτερεί οριακά η καταφατική απάντηση, με επικρατούσα τιμή την ουδέτερη απάντηση.

Όσον αφορά τα υποκειμενικά, προσλαμβανόμενα από το χρήστη αποτελέσματα, εξαιτίας της στερεοσκοπικής όρασης και τη χρήσης της κάσκας Oculus Rift, 74% των χρηστών απάντησε ότι ένιωσε ότι βυθίζεται με τις κινήσεις του σε έναν εικονικό κόσμο (ΕΠ2-προσλαμβανόμενη εμπύθιση), ενώ το 78% των χρηστών απάντησαν ότι ένιωσαν πραγματικά παρόντες στο εικονικό περιβάλλον (ΕΠ3-προσλαμβανόμενη παρουσία). Τέλος το 68% των χρηστών απάντησε ότι ένιωσε πλήρως απομονωμένοι από το πραγματικό περιβάλλον όσο φορούσαν την κάσκα Oculus Rift (ΕΠ5).



Εικόνα 9-16: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων ή θηκόγραμμα (boxplot) για τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Εμπλοκή και Παρουσία του Χρήστη (ΕΠ)»

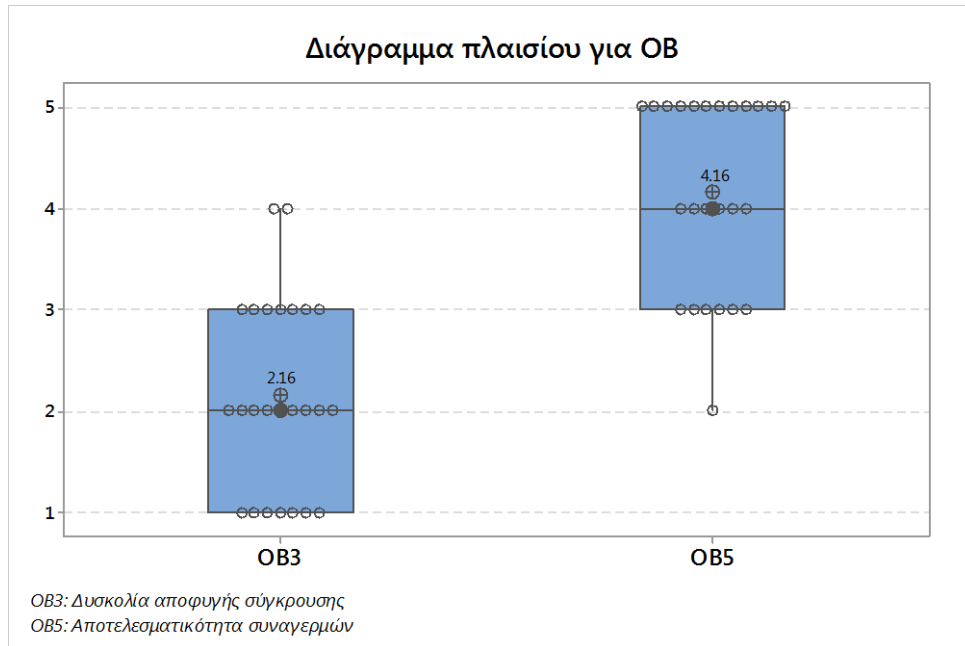
Η τέταρτη θεματική ενότητα της δοκιμής περιλαμβάνει τα δεδομένα από πέντε ερωτήσεις ($OB_i, i=1, \dots, 5$), οι οποίες αφορούν τη *χρήση των Οπτικοακουστικών Βοηθημάτων (OB)* και την αποτελεσματικότητα αυτών (Πίνακας 9-11, Εικόνα 9-17).

Ερώτηση	SD (1)	D (2)	N (3)	A (4)	SA (5)
(OB) Χρήση Οπτικοακουστικών Βοηθημάτων	%	%	%	%	%
OB1 Αντιληφθήκατε εύκολα το χώρο εργασίας του ρομποτικού βραχίονα;	0	-	-	-	100
OB2 Αντιλαμβανόσασταν εύκολα την κίτρινη ένδειξη (ημι-διαφανής κυλινδρικός τομέας) που ακολουθούσε το ρομπότ καθώς αυτό κινείται;	8	-	-	-	92
OB3 Δυσκολευτήκατε να αποφύγετε τον κινούμενο βραχίονα καθώς ερχόταν προς το μέρος σας;	28	36	28	8	0
OB4 Αν αντιληφθήκατε κάποιον ηχητικό ή εποπτικό συναγερμό, μπορούσατε να προσδιορίσετε κάθε φορά την αιτία της ενεργοποίησής του;	0	-	-	-	100
OB5 Κατά την κρίση σας πόσο σας βοήθησαν τα οπτικοακουστικά μέσα («συναγερμοί») για την αποφυγή του δυνητικά «επικίνδυνου» κινούμενου ρομπότ;	0	4	24	24	48

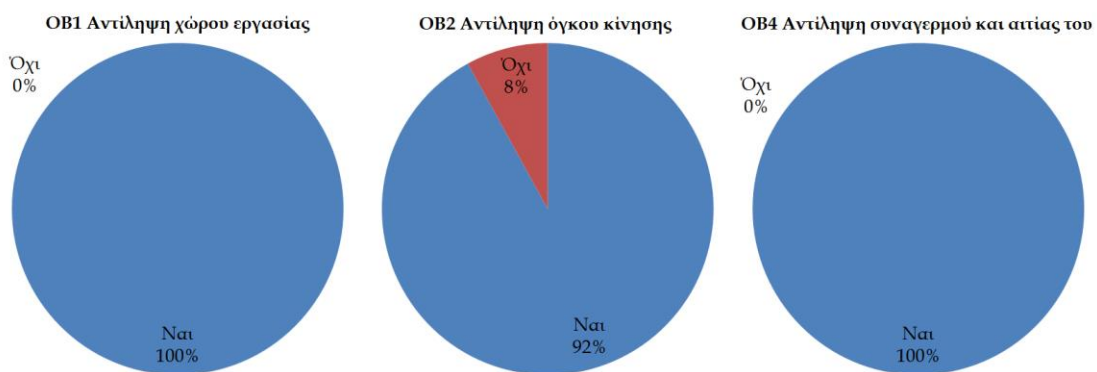
Πίνακας 9-11: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Χρήση Οπτικοακουστικών Βοηθημάτων (OB)»

Η απόλυτη πλειοψηφία των χρηστών (100%), απάντησε πως αντιλαμβανόταν εύκολα το χώρο εργασίας του ρομποτικού βραχίονα (OB1), ο οποίος αναπαρίστατο από τον ημιδιαφανή κόκκινο όγκο (βλ Εικόνα 9-18). Επίσης, το 92% των

αντικειμένων δήλωσε ότι αντιλαμβανόταν εύκολα το βοήθημα του όγκου κίνησης, το οποίο ακολουθούσε το ρομπότ καθώς αυτό κινείτο (OB2). Το σύνολο των χρηστών (100%) απάντησε ότι αντιλήφθηκε κάποιον ηχητικό ή εμποπτικό συναγερμό και ότι μπορούσε να προσδιορίσει, κάθε φορά, την αιτία που προκαλούσε την ενεργοποίησή του (OB4). Κατά την κρίση των συμμετεχόντων (72%), η χρήση των οπτικοακουστικών βοηθημάτων ήταν αποτελεσματική (OB5) και τους βοήθησε για την κατανόηση της ύπαρξης ενός δυνητικώς επικίνδυνου χώρου.



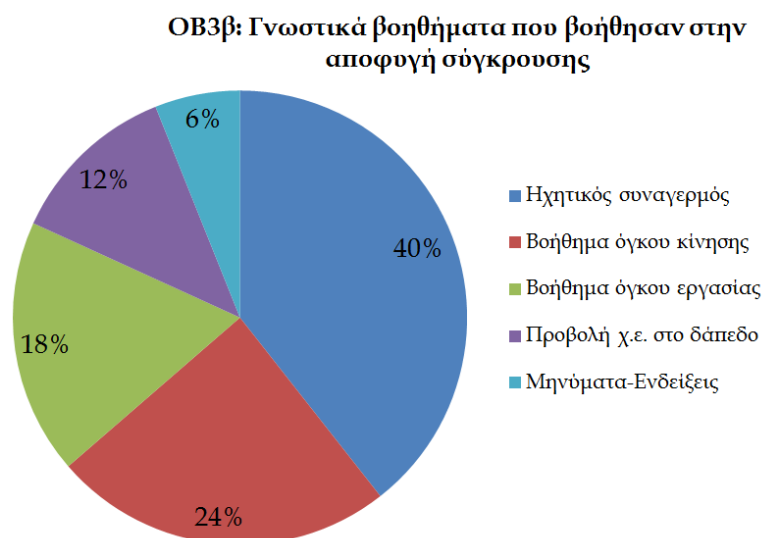
Εικόνα 9-17: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων ή θηκόγραμμα (boxplot) για τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Χρήση Οπτικοακουστικών Βοηθημάτων (OB)»



Εικόνα 9-18: Κυκλικά διαγράμματα των απαντήσεων επί της ευκολίας αντίληψης των διαφορετικών γνωστικών βοηθημάτων από τους χρήστες (OB1, OB2, OB4).

Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα του όγκου κίνησης και των υπόλοιπων βοηθημάτων, το 74% των χρηστών δήλωσε ότι ήταν εύκολο να αποφύγει τον κινούμενο ρομποτικό βραχίονα, καθώς ερχόταν προς το μέρος του (OB3). Μεταξύ αυτών των χρηστών (που δεν αντιμετώπισαν ιδιαίτερη δυσκολία), το 40% δήλωσε ότι τους βοήθησε περισσότερο ο ηχητικός συναγερμός και το 24% το βοήθημα του όγκου κίνησης (βλ. Εικόνα 9-19). Υπενθυμίζεται ότι ο ηχητικός συναγερμός ενεργοποιείτο

όταν ο χρήστης ερχόταν σε επαφή με τον όγκο κίνησης του ρομπότ, οπότε τα δύο βοηθήματα συνδέονται μεταξύ τους.



Εικόνα 9-19: Κυκλικό διάγραμμα αξιολόγησης των διαφορετικών γνωστικών βοηθημάτων σε σχέση με τη συνεισφορά τους στην αποφυγή σύγκρουσης A-P.

Η πέμπτη θεματική ενότητα της δοκιμής περιλαμβάνει τα δεδομένα από τρεις ερωτήσεις (AX_i, i=1,...,3), οι οποίες αφορούν την *Αποδοχή του ΕΠε από το Χρήστη (ΑΧ)* (Πίνακας 9-12, Εικόνα 9-20).

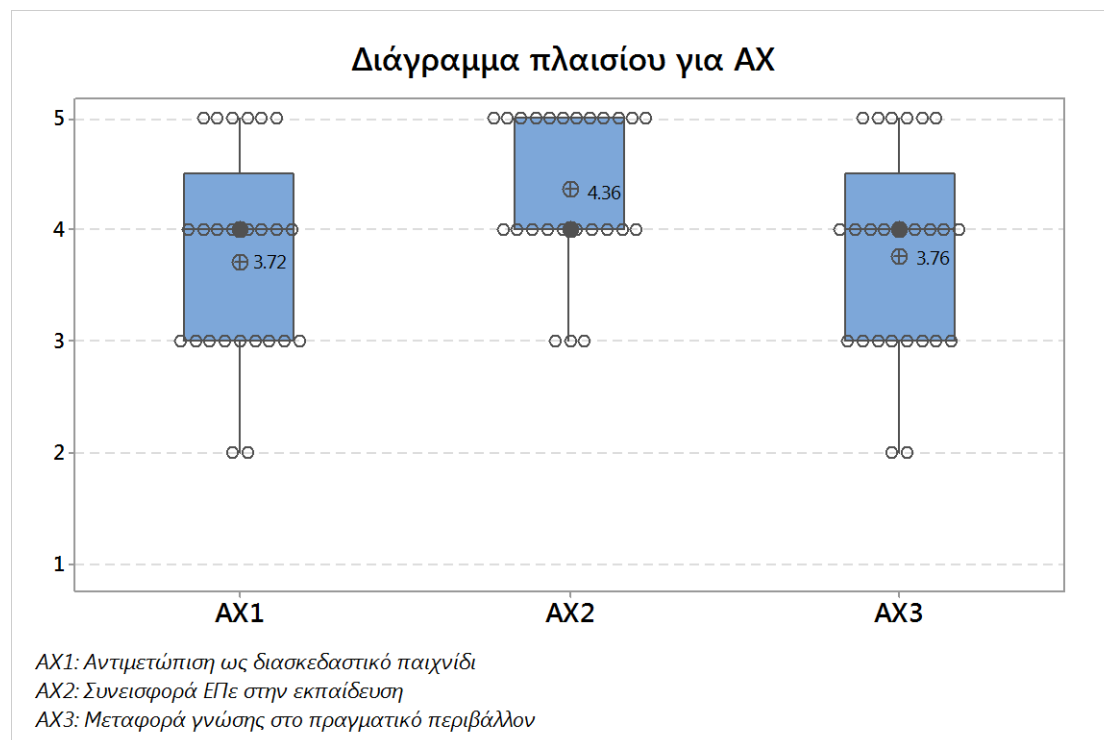
Ερώτηση	SD (1)	D (2)	N (3)	A (4)	SA (5)
(ΑΧ) Αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη	%	%	%	%	%
ΑΧ1 Θα λέγατε πως κατά τη διάρκεια της δοκιμής νιώσατε περισσότερο πως παίζετε ένα διασκεδαστικό παιχνίδι;	0	8	36	32	24
ΑΧ2 Πιστεύετε ότι αντίστοιχες εφαρμογές ΕΠ μπορούν να συνεισφέρουν στην εκπαίδευση για τη συνεργασία A-P, ή σε εφαρμογές πρόληψης επαγγελματικού κινδύνου;	0	0	12	40	48
ΑΧ3 Πιστεύετε ότι μετά τη δοκιμή που περάσατε θα δεχόσασταν ευκολότερα να πραγματοποιήσετε μια αντίστοιχη εργασία σε πραγματικό περιβάλλον;	0	8	32	36	24

Πίνακας 9-12: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη (ΑΕ)»

Το 56% των συμμετεχόντων δήλωσε ενδιαφέρον για τη δοκιμή στο ΕΠε, αφού απάντησε ότι κατά τη διάρκεια της δοκιμής ένιωσε σαν να έπαιζε ένα διασκεδαστικό παιχνίδι (ΑΧ1), σε αντίθεση με το 8% που απάντησε αρνητικά. Μετά τη δοκιμή των χρηστών, το 88% αυτών απάντησε ότι πιστεύει πως αντίστοιχες εφαρμογές ΕΠ μπορούν να συνεισφέρουν στην εκπαίδευση για τη συνεργασία A-P, αλλά και ευρύτερα, σε εφαρμογές πρόληψης επαγγελματικού κινδύνου(ΑΧ2). Τέλος, οι χρήστες απάντησαν σε ποσοστό 60% (περισσότερο διαισθητικά) ότι μετά τη δοκιμή που πέρασαν, θα δεχόντουσαν ευκολότερα να πραγματοποιήσουν μια αντίστοιχη εργασία σε πραγματικό περιβάλλον (ΑΧ3), εξαιτίας της γνώσης και της εξοικείωσης

που απέκτησαν στο ΕΠε. Αντιθέτως, το 8% των χρηστών απάντησε αρνητικά στην παραπάνω ερώτηση.

Συνολικά, τα στοιχεία των απαντήσεων δείχνουν αποδοχή της χρήσης του διαδραστικού ΕΠε για τη διενέργεια δοκιμών συνεργασίας Α-Ρ. Σημειώνεται ότι το σύνολο των συμμετεχόντων στη δοκιμή, είχε πρότερη εξοικείωση με βασικό προγραμματισμό και χειρισμό ρομποτικού βραχίονα.



Εικόνα 9-20: Διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων ή θηκόγραμμα (boxplot) για τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη» (ΑΕ)

Η έκτη και τελευταία θεματική ενότητα της δοκιμής περιλαμβάνει τα δεδομένα από πέντε ερωτήσεις (ΤΧ_i, i=1,...,5), οι οποίες αφορούν τη Χρήση Τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας (ΧΤ) (Πίνακας 9-13, Εικόνα 9-21, Εικόνα 9-22).

Ερώτηση

(ΧΤ) Παρατηρήσεις επί των τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας	%	&
ΧΤ1 Κατά την τεχνική επιβράδυνσης του ρομπότ (καθώς αυτό με πλησίαζε) προλάβαινα να υποχωρήσω ή να αλλάξω θέση και έτσι να το αποφύγω	ΝΑΙ 96%	ΟΧΙ 4%
ΧΤ2 Κατά την τεχνική υποχώρησης του ρομπότ (καθώς αυτό με πλησίαζε) προλάβαινα να υποχωρήσω ή να αλλάξω θέση και έτσι να το αποφύγω	ΝΑΙ 96%	ΟΧΙ 4%
ΧΤ3 Κατά την τεχνική υποχώρησης του ρομπότ (καθώς αυτό με πλησίαζε) δε χρειαζόταν καν να αλλάξω θέση για να το αποφύγω;	ΝΑΙ, χρειαζόταν 64%	ΟΧΙ, δε χρειαζόταν 36%
ΧΤ4 Ποια τεχνική αποφυγής θεωρείτε ότι ήταν πιο αποτελεσματική για εσάς ως προς την αποφυγή	ΕΠΙΒΡ/ΝΣΗ 52%	ΥΠΟΧ/ΣΗ 48%

συγκρούσεων;		
ΧΤ5 Ποια τεχνική αποφυγής θεωρείτε ότι ήταν πιο ικανοποιητική για εσάς ως προς την ποιότητα και την συνέχεια της ροής της συνεργασίας σας με το ρομπότ;	ΕΠΙΒΡ/ΝΣΗ 79%	ΥΠΟΧ/ΣΗ 21%

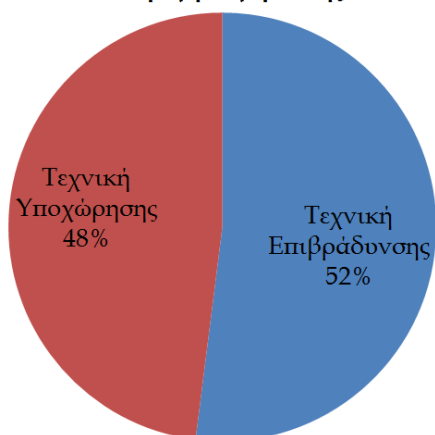
Πίνακας 9-13: Τα αποτελέσματα της θεματικής ενότητας «Παρατηρήσεις επί της Χρήσης των Τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας (ΧΤ)»

Τόσο το κριτήριο ενεργοποίησης της τεχνικής ασφαλούς συνεργασίας, όσο και η συμπεριφορά του ρομπότ μετά την ενεργοποίηση της τεχνικής, κρίνονται ως επιτυχή διότι παρείχαν στο χρήστη επαρκή χρόνο αντίδρασης, ώστε να ενεργήσει κατάλληλα και να αποφύγει τη σύγκρουση (ΧΤ1 και ΧΤ2). Μάλιστα οι χρήστες, σε ποσοστό 96%, απάντησαν ότι ο χρόνος που είχαν στη διάθεσή τους για να αντιδράσουν ήταν επαρκής, τόσο στο σενάριο της αντίδρασης, όσο και σε αυτό της υποχώρησης (βλ. Εικόνα 9-21). Η πλειοψηφία των χρηστών (64%) απάντησε ότι κατά την τεχνική υποχώρησης του ρομπότ και καθώς αυτό πλησίαζε το χρήστη, αυτός δε χρειαζόταν καν να αλλάξει θέση προκειμένου να το αποφύγει (ΧΤ3).

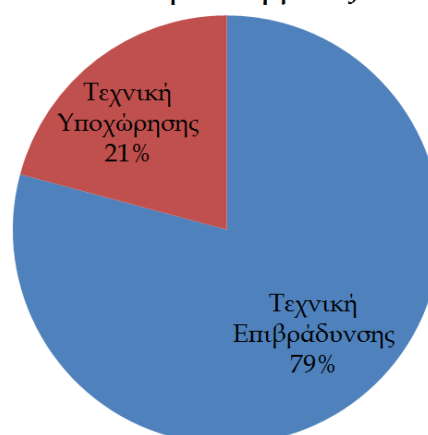


Εικόνα 9-21: Υποκειμενική αξιολόγηση της επάρκειας του χρόνου αντίδρασης του χρήστη, έπειτα από την ενεργοποίηση της κάθε τεχνικής (ΧΤ1) και (ΧΤ2) και της ανάγκης μετακίνησης του χρήστη έπειτα από την ενεργοποίηση της τεχνικής υποχώρησης (ΧΤ3).

ΧΤ4 Αποτελεσματικότητα τεχνικής για αποφυγή σύγκρουσης



ΧΤ5 Αποτελεσματικότητα τεχνικής για εύροια και ποιότητα συνεργασίας



Εικόνα 9-22: Υποκειμενική (προσλαμβανόμενη) αποτελεσματικότητα των δύο τεχνικών ως προς την αποφυγή σύγκρουσης (ΧΤ4) και ως προς την εύροια και την απόδοση της συνεργασίας (ΧΤ5)

Όσον αφορά την προσλαμβανόμενη αποτελεσματικότητα των δύο τεχνικών, οι χρήστες έδειξαν την προτίμησή τους στην τεχνική επιβράδυνσης έναντι αυτής της υποχώρησης (Εικόνα 9-22). Η τεχνική επιβράδυνσης υπερτερεί οριακά στις απαντήσεις των χρηστών σε σχέση με την αποφυγή σύγκρουσης (TX4), οπότε δεν προκύπτει ασφαλές συμπέρασμα. Αντιθέτως, με κριτήριο την εύροια, τη συνέχεια και την ποιότητα της συνεργασίας A-P, η διαφορά είναι σαφέστατη, αφού η τεχνική επιβράδυνσης προτιμάται από το 79% των συμμετεχόντων (TX5).

9.2.5.Μετρικές συμπεριφοράς και απόδοσης

Για τη διερεύνηση της τρίτης ερευνητικής προβληματικής, εκτός από πρώτο επίπεδο δοκιμών (αυτό-αξιολόγησης) με ερωτηματολόγια, χρησιμοποιούνται και μετρικές συμπεριφοράς και απόδοσης (behavioral measures). Οι μετρικές αυτές μας επιτρέπουν τη διενέργεια συγκριτικών δοκιμών μεταξύ των χρηστών και εκτέλεση στατιστικών τεστ, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της κάθε τεχνικής στην ασφάλεια και στην απόδοση της συνεργασίας.

Όπως αναφέρθηκε ήδη, κάθε χρήστης εκτελούσε διαδοχικά (και με διαφορετική σειρά) τρεις παραλλαγές της demo εφαρμογής beWare of the Robot v2.0: (i) έκδοση χωρίς κάποια τεχνική ασφαλούς συνεργασίας (control version), (ii) έκδοση με τεχνική επιβράδυνσης ρομπότ, και, (iii) έκδοση με τεχνική υποχώρησης ρομπότ.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών της κάθε έκδοσης από κάθε χρήστη, καταγράφονται, σε αρχεία log, οι τιμές για τις παρακάτω μετρικές:

- i. μετρικές σχετικές με την **ασφάλεια** της συνεργασίας
 - a. *αριθμός συγκρούσεων* μεταξύ κάποιου μέλους του ανθρώπου και κάποιου τμήματος του ρομπότ (ιδανικά δεν πρέπει να καταγραφεί ούτε μία ανεπιθύμητη επαφή μεταξύ A-P)
 - b. *συχνότητα* (αριθμός) *ενεργοποίησης* του οπτικοακουστικού *συναγερμού* του *όγκου κίνησης* (απαιτείται ανίχνευση επαφής του ανθρωποειδούς με το βοήθημα του όγκου κίνησης και σχετίζεται με την ασφάλεια της συνεργασίας διότι είναι ένδειξη υπερβολικής εγγύτητας μεταξύ A-P)
- ii. μετρικές σχετικές με την **απόδοση** της συνεργασίας
 - a. *καθαρός χρόνος κίνησης του ρομπότ*, από και προς τον άνθρωπο, προκειμένου να εκτελέσει τα συνεργατικά του καθήκοντα. Χρησιμοποιείται ο καθαρός χρόνος, δηλαδή δεν προσμετρώνται σε αυτόν οι «νεκροί χρόνοι», οι χρόνοι κατά τους οποίους το ρομπότ είναι ακίνητο, οι χρόνοι στρώσης του υφάσματος και αφαίρεσης του αυτοκόλλητου και ο αρχικός χρόνος από την εκκίνηση μέχρι το πάτημα του κουμπιού εκκίνησης από το χρήστη. Προφανώς, όσο μικρότερος είναι ο καθαρός χρόνος της συνεργασίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόδοσή της.
 - b. *μέση ταχύτητα κίνησης ρομπότ*, (χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι περίοδοι κατά τις οποίες η ταχύτητα του ρομπότ είναι μηδενική). Μία υψηλή μέση ταχύτητα του ρομπότ παραπέμπει σε υψηλή απόδοση και

σημαίνει πως είτε η τεχνική ασφαλούς συνεργασίας δεν ενεργοποιήθηκε πολλές φορές, ή ότι κατά την ενεργοποίησή της δεν επηρεάζεται πολύ η ταχύτητα του ρομπότ.

- c. *συχνότητα* (αριθμός) *ενεργοποίησης της τεχνικής* ασφαλούς συνεργασίας (μία κατάσταση συνεργασίας A-P κατά την οποία ενεργοποιείται πολύ συχνά η τεχνική ασφαλούς συνεργασίας, προφανώς δεν παραπέμπει σε υψηλή απόδοση).

Στο πείραμα συγκρίσεως που περιγράφεται στην επόμενη Ενότητα, διερευνούμε εάν (και πως) επηρεάζεται η καθεμία από τις παραπάνω μετρικές από τη χρησιμοποιούμενη τεχνική ασφαλούς συνεργασίας (επιβράδυνση/υποχώρηση). Η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων για τις μετρικές (i-a) συχνότητα ενεργοποίησης του συναγερμού του όγκου κίνησης και (ii-c) συχνότητα ενεργοποίησης της τεχνικής ασφαλούς συνεργασίας, δεν παρουσιάζονται στην παρούσα φάση.

9.2.5.1. Στατιστικά τεστ: διερεύνηση της επίδρασης της τεχνικής στην ασφάλεια και στην απόδοση της συνεργασίας A-P

Το πείραμα συγκρίσεως αφορά τη δοκιμή της έκδοσης 2.0, η οποία έχει περιγραφεί στις Ενότητες 9.2.1 και 9.2.2, είναι τύπου επαναλαμβανόμενων μετρήσεων μεταξύ του ίδιου δείγματος χρηστών και αποσκοπεί στη διερεύνηση τυχόν επίδρασης της κάθε τεχνικής (επιβράδυνσης/υποχώρησης), στην ασφάλεια και στην απόδοση της συνεργασίας.

Οι **εξαρτημένες μεταβλητές** (dependent variables) του πειράματος είναι οι μετρικές που περιγράψαμε στην προηγούμενη Ενότητα και συγκεκριμένα οι εξής τρεις: (i) *αριθμός συγκρούσεων*, (ii) *καθαρός χρόνος συνεργασίας* και (iii) *μέση ταχύτητα ρομπότ*. Υψηλότερη ασφάλεια εξασφαλίζεται με χαμηλό αριθμό συγκρούσεων, ενώ υψηλή απόδοση επιτυγχάνεται με μικρούς καθαρούς χρόνους συνεργασίας και υψηλή μέση ταχύτητα ρομπότ.

Οι **ανεξάρτητες μεταβλητές** (independent variables/factors) που ελέγχονται σε αυτό το πείραμα είναι οι τρεις (δύο συν τη μηδενική) τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας A-P: *Τεχνική 1*- το ρομπότ δεν αντιδρά στην παρουσία του ανθρώπου, *Τεχνική 2*- το ρομπότ επιβραδύνει στο 15% της ταχύτητάς του όταν πρόκειται να συγκρουσθεί με το χρήστη, και, *Τεχνική 3*- το ρομπότ υποχωρεί και αλλάζει τροχιά όταν πρόκειται να συγκρουσθεί με το χρήστη.

Στο πείραμα συγκρίσεως ενδιαφέρει αν η εκάστοτε υπό μελέτη εξαρτημένη μεταβλητή διαφοροποιείται, στις τρεις παραλλαγές της εφαρμογής (μία παραλλαγή ανά δοκιμαζόμενη τεχνική), δηλαδή να ελέγξουμε την παρακάτω μηδενική υπόθεση:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

όπου μ_k η μέση τιμή της προς εξέταση μεταβλητής στο δείγμα k ($k=1,2,3$). Η εναλλακτική υπόθεση H_1 είναι ότι τουλάχιστον δύο μέσες τιμές διαφέρουν

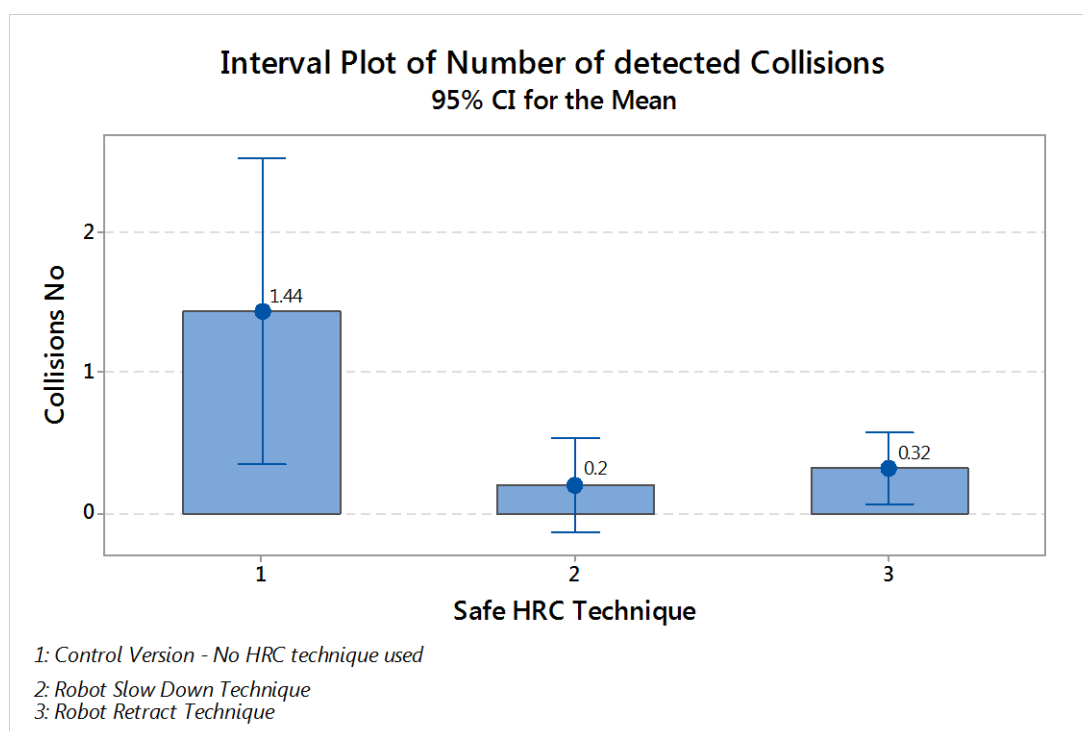
στατιστικώς σημαντικά. Ο έλεγχος των υποθέσεων γίνεται σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$.

Το πείραμά μας είναι συσχετιζόμενων δειγμάτων, δηλαδή διερευνάται η επίδραση μιας εξαρτημένης ποσοτικής μεταβλητής σε ένα δείγμα, με μετρήσεις στα ίδια άτομα, σε k διαφορετικές χρονικές στιγμές ($k=3$, όσες και οι ανεξάρτητες μεταβλητές/παράγοντες). Η περίπτωση του πειράματός μας αντιμετωπίζεται στη στατιστική συμπερασματολογία με το μοντέλο ανάλυσης διασποράς ANOVA επαναλαμβανόμενων μετρήσεων (Repeated Measures ANOVA), το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως επέκταση του paired t-test για εξαρτημένα δείγματα, με $k>2$. Το απλό μοντέλο ANOVA δεν είναι κατάλληλο γιατί δε λαμβάνεται υπόψη η συσχέτιση μεταξύ των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων και παραβιάζεται η προϋπόθεση της ανεξαρτησίας (Duffy et al., 2006; Huang, Cakmak, & Mutlu, 2015).

Για τη διεξαγωγή της ανάλυσης διασποράς ANOVA επαναλαμβανόμενων μετρήσεων, χρησιμοποιείται το λογισμικό πακέτο στατιστικής [Minitab](#) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις επόμενες Ενότητες.

9.2.5.2. Ασφάλεια της συνεργασίας

Στην Ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της επίδρασης της κάθε τεχνικής στην ασφάλεια της συνεργασίας A-P.



Εικόνα 9-23: Διάγραμμα μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης για τον αριθμό των συγκρούσεων A-P ανά εξεταζόμενη τεχνική ασφαλούς συνεργασίας

Στο διάγραμμα μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης (Εικόνα 9-23) παρατηρούμε ότι οι μέσες τιμές του αριθμού συγκρούσεων διαφέρουν ανά τεχνική. Μάλιστα έχουμε σαφή μείωση των μέσων καταγραφόμενων επαφών (άρα ισχυροποίηση της

ασφάλειας της συνεργασίας) μεταξύ της έκδοσης (1) χωρίς τεχνική και των εκδόσεων με επιβράδυνση (2) ή υποχώρηση (3). Επίσης παρατηρείται διαφοροποίηση και μεταξύ των τεχνικών (2) και (3). Προκειμένου να διερευνήσουμε εάν οι παρατηρούμενες διαφορές είναι στατιστικά σημαντικές (απόρριψη μηδενικής υπόθεσης), πραγματοποιούμε ανάλυση διασποράς ANOVA επαναλαμβανόμενων μετρήσεων στο Minitab και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακας 9-14.

General Linear Model: Detected Collisions versus HRC Technique

Factor	Type	Levels	Values
User ID	Random	25	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25
Technique	Fixed	3	1, 2, 3

Analysis of Variance

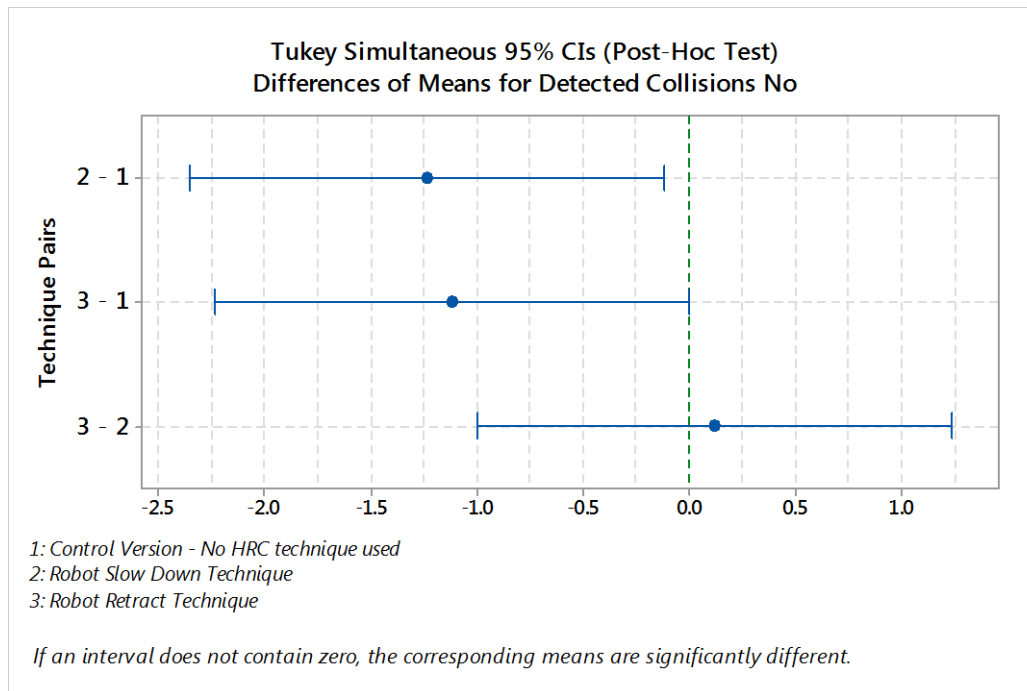
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
User ID	24	64.99	2.708	1.01	0.472
Technique	2	23.39	11.693	4.36	0.018<0.05
Error	48	128.61	2.679		
Total	74	216.99			

Model Summary

S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)
1.63690	40.73%	8.62%	0.00%

Πίνακας 9-14: Τα αποτελέσματα της ανάλυσης διασποράς ANOVA επαναλαμβανόμενων μετρήσεων στο Minitab.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ($P\text{-Value}=0.018<0.05$) δείχνουν ότι υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των μέσων τιμών, οπότε η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται για τη μεταβλητή του αριθμού συγκρούσεων στα 3 σενάρια (τεχνικές) συνεργασίας, σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$. Εφόσον η μηδενική υπόθεση απορρίφθηκε και καταλήξαμε ότι υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των αντικειμένων της συγκρίσεως ανά τεχνική ασφαλούς συνεργασίας, κάνουμε post-hoc tests (πολλαπλά Tukey ή Fischer τεστ, ανά ζεύγη μεταξύ δειγμάτων) προκειμένου να προσδιορίσουμε κατά πόσο τα αντικείμενα μπορούν να καταταγούν σε ομοιογενείς ομάδες, τα αντικείμενα των οποίων να μη διαφέρουν σημαντικά.



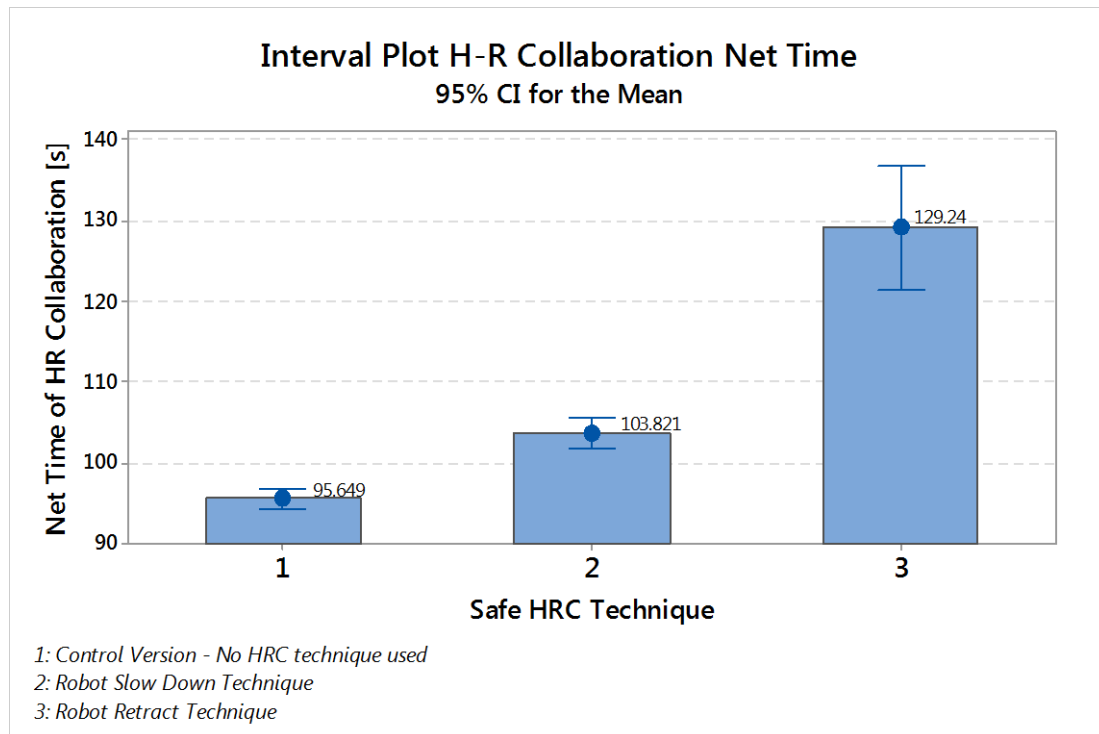
Εικόνα 9-24: Αποτελέσματα του Τεστ Tukey για τον αριθμό συγκρούσεων μεταξύ των επιμέρους ομάδων (ανά ζεύγη τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας A-P).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 9-24, από τα Tukey tests, υπάρχει σημαντική διαφορά στα ζεύγη μεταξύ των τεχνικών 2-1 ($P\text{-Value}=0.027 < 0.05$) και 3-1 ($P\text{-Value}=0.049 < 0.05$), αλλά όχι μεταξύ των 3-2, σε επίπεδο σημαντικότητας 98.06%. Αυτό σημαίνει ότι η ύπαρξη των τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας μειώνει σημαντικά τον αριθμό επαφών (συγκρούσεων) A-P, σε σχέση με την έκδοση στην οποία δε χρησιμοποιείται κάποια τεχνική. Αντιθέτως, δεν προκύπτει σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ της τεχνικής της επιβράδυνσης και της τεχνικής της υποχώρησης 3-2 ($P\text{-Value}=0.964 > 0.05$).

Άρα, οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας (επιβράδυνση/υποχώρηση) είναι όντως αποτελεσματικές ως προς την ασφάλεια του χρήστη στο ΕΠε, αλλά δεν μπορούμε να βγάλουμε ασφαλές συμπέρασμα για το ποια από τις δύο τεχνικές είναι πιο αποτελεσματική.

9.2.5.3. Απόδοση της συνεργασίας

Στην Ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της επίδρασης της κάθε τεχνικής στην απόδοση της συνεργασίας A-P, με βάση τις μετρικές του καθαρού χρόνου συνεργασίας A-P και της μέσης ταχύτητας του ρομπότ.

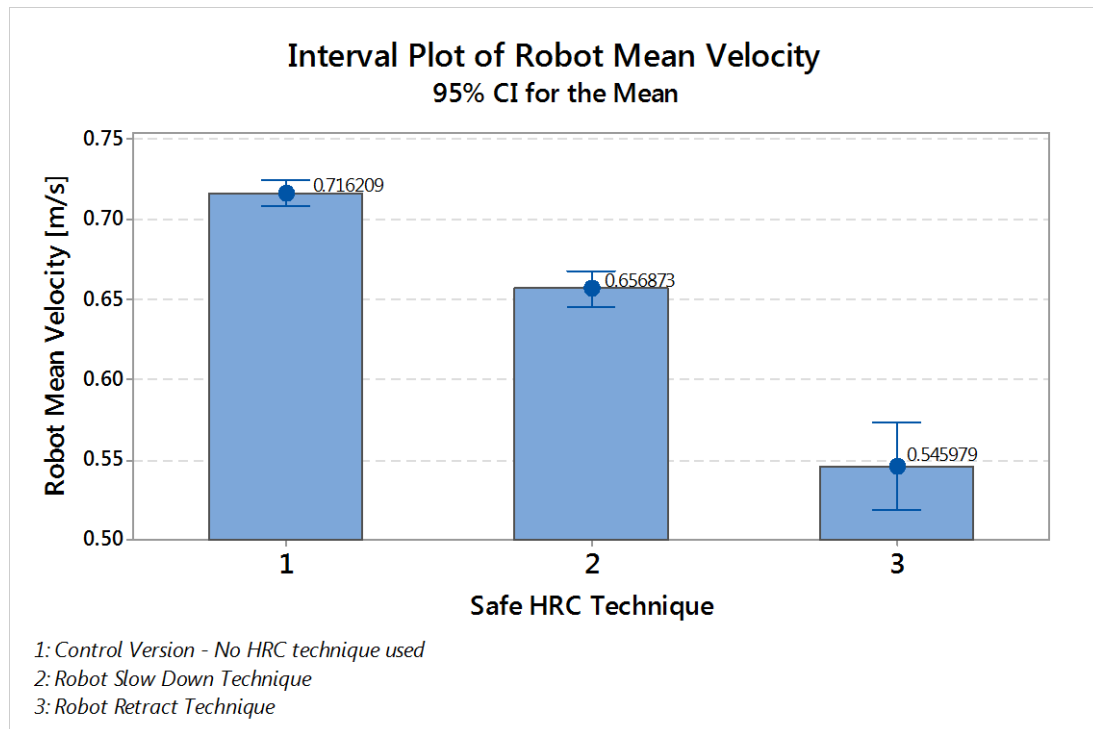


Εικόνα 9-25: Διάγραμμα μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης για τον καθαρό χρόνο κίνησης κατά τη συνεργασία A-P, ανά εξεταζόμενη τεχνική ασφαλούς συνεργασίας

Στο διάγραμμα μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης (Εικόνα 9-25 και Εικόνα 9-26) παρατηρούμε ότι οι μέσες τιμές του καθαρού χρόνου κίνησης και της μέσης ταχύτητας του ρομπότ διαφέρουν εμφανώς ανά τεχνική. Συγκεκριμένα, έχουμε σαφή αύξηση των μέσων καταγραφόμενων τιμών του χρόνου κίνησης από την έκδοση (1-χωρίς κάποια τεχνική) στην έκδοση (2-με επιβράδυνση). Επίσης παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση (αύξηση) και μεταξύ των τεχνικών (2-με επιβράδυνση) και (3-με υποχώρηση).

Σαφής διαφοροποίηση (μείωση) παρατηρείται στις τιμές της μέσης ταχύτητας του ρομπότ ανά χρησιμοποιούμενη τεχνική (Εικόνα 9-26). Η μέση ταχύτητα είναι υψηλότερη στην έκδοση (1-χωρίς κάποια τεχνική) και μειώνεται διαδοχικά στις εκδόσεις με επιβράδυνση (2) και υποχώρηση (3), αντίστοιχα.

Συνεπώς, παρατηρώντας τις μετρικές χρόνου συνεργασίας και μέσης ταχύτητας ρομπότ, η απόδοση αυτής της συνεργασίας A-P φαίνεται καταρχήν να μειώνεται με τη χρήση των τεχνικών επιβράδυνσης και υποχώρησης του ρομπότ.



Εικόνα 9-26: Διάγραμμα μέσης τιμής και τοπικής απόκλισης για τη μέση ταχύτητα κίνησης του ρομπότ, ανά εξεταζόμενη τεχνική ασφαλούς συνεργασίας

Προκειμένου να διερευνήσουμε εάν οι παρατηρούμενες διαφορές στους χρόνους και στις ταχύτητες είναι στατιστικά σημαντικές (απόρριψη μηδενικής υπόθεσης), πραγματοποιούμε ανάλυση διασποράς ANOVA επαναλαμβανόμενων μετρήσεων στο Minitab και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακας 9-15.

General Linear Model: Net Time HRC versus Technique

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
User ID	24	3811	158.8	1.49	0.120
Technique	2	15344	7671.8	71.80	0.000<0.05
Error	48	5129	106.8		
Total	74	24283			

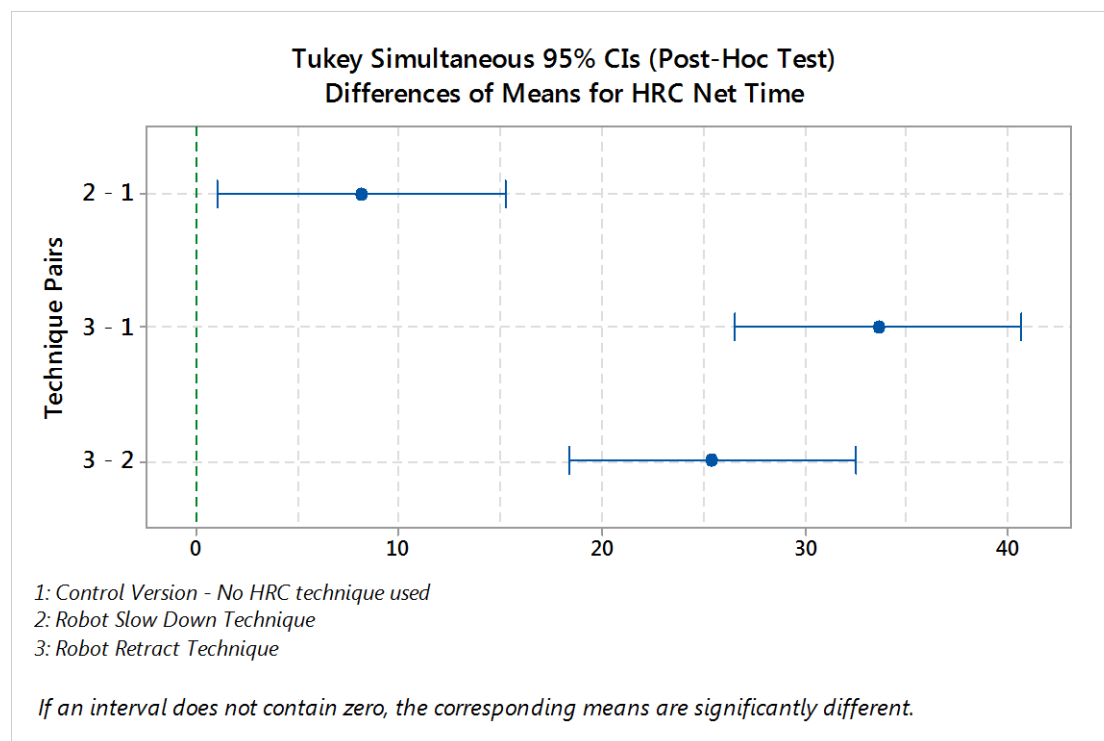
General Linear Model: Robot Mean Velocity versus Technique

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
User ID	24	0.06067	0.002528	1.63	0.075
Technique	2	0.37331	0.186653	120.26	0.000<0.05
Error	48	0.07450	0.001552		
Total	74	0.50848			

Πίνακας 9-15: Τα αποτελέσματα της ανάλυσης διασποράς ANOVA επαναλαμβανόμενων μετρήσεων στο Minitab

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ($P\text{-Value}=0.000<0.05$ και για τις δύο μετρικές) δείχνουν ότι υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των μέσων τιμών, οπότε η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται τόσο για τον καθαρό χρόνο, όσο και για τη μέση ταχύτητα και στα 3 σενάρια (τεχνικές) συνεργασίας, σε επίπεδο σημαντικότητας

$\alpha=0.05$. Κατόπιν, κάνουμε post-hoc tests (πολλαπλά Tukey ανά ζεύγη μεταξύ τεχνικών) προκειμένου να προσδιορίσουμε κατά πόσο τα αντικείμενα μπορούν να καταταγούν σε ομοιογενείς ομάδες των οποίων τα αντικείμενα να μη διαφέρουν σημαντικά.

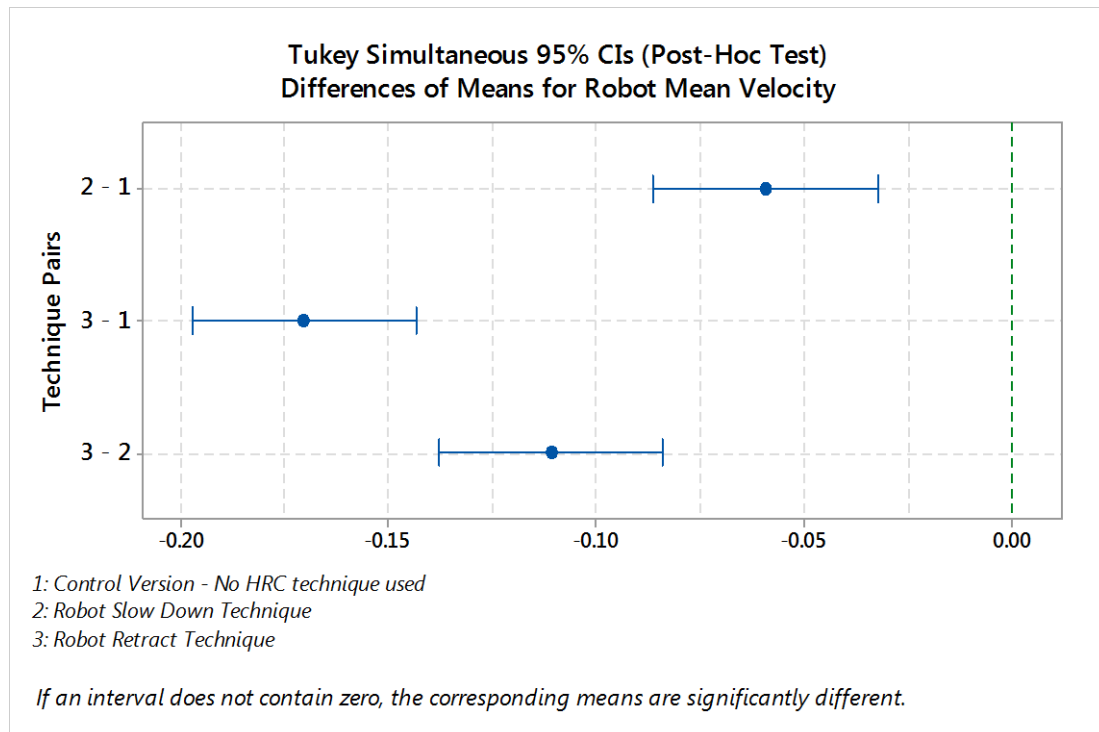


Εικόνα 9-27: Αποτελέσματα του Τεστ Tukey για τον καθαρό χρόνο κίνησης του ρομπότ, μεταξύ των επιμέρους ομάδων (ανά ζεύγη τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας A-P).

Όσον αφορά τον καθαρό χρόνο συνεργασίας, όπως φαίνεται από τα πολλαπλά Tukey tests στην Εικόνα 9-27, υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ όλων των ζευγών των τεχνικών 2-1 ($P\text{-Value}=0.02<0.05$), 3-1 ($P\text{-Value}=0.000<0.05$), και 3-2 ($P\text{-Value}=0.000<0.05$), σε επίπεδο σημαντικότητας 98.06%. Αυτό σημαίνει ότι η ύπαρξη των τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας αυξάνει σημαντικά τον καθαρό χρόνο συνεργασίας A-P, σε σχέση με την έκδοση στην οποία δε χρησιμοποιείται κάποια τεχνική. Επίσης, προκύπτει σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ της τεχνικής της επιβράδυνσης και της τεχνικής της υποχώρησης 3-2, με την τεχνική της επιβράδυνσης να υπερτερεί ως προς την απόδοση της συνεργασίας.

Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και για μέση ταχύτητα του ρομπότ, όπως φαίνεται από τα πολλαπλά Tukey tests στην Εικόνα 9-28. Υπάρχει σαφέστατα σημαντική διαφορά μεταξύ όλων των ζευγών των τεχνικών 2-1 ($P\text{-Value}=0.00<0.05$), 3-1 ($P\text{-Value}=0.000<0.05$), και 3-2 ($P\text{-Value}=0.000<0.05$), σε επίπεδο σημαντικότητας 98.06%. Αυτό σημαίνει ότι η ύπαρξη των τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας μειώνει σημαντικά τη μέση ταχύτητα κίνησης του ρομπότ, σε σχέση με την έκδοση στην οποία δε χρησιμοποιείται κάποια τεχνική. Επίσης, προκύπτει σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ της τεχνικής της επιβράδυνσης και της τεχνικής της υποχώρησης 3-2, με την τεχνική της επιβράδυνσης να υπερτερεί ξανά ως προς την

απόδοση (ταχύτητα ρομπότ) της συνεργασίας. Μάλιστα, οι διαφορές στη μέση ταχύτητα μεταξύ των διαφορετικών σεναρίων είναι τόσο ξεκάθαρες ($p=0.098$), ώστε τα αποτελέσματα να μπορούν να καταταγούν σε τρεις διαφορετικές ομοιογενείς ομάδες.



Εικόνα 9-28: Αποτελέσματα του Τεστ Tukey για τη μέση ταχύτητα του ρομπότ μεταξύ των επιμέρους ομάδων (ανά ζεύγη τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας A-P).

Άρα, οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας (επιβράδυνση/υποχώρηση) είναι όντως επιβαρυντικές ως προς την απόδοση της συνεργασίας A-P στο ΕΠε. Μάλιστα, προκύπτει το συμπέρασμα ($p=0.098$) ότι η τεχνική υποχώρησης επιβαρύνει περισσότερο την απόδοση της συνεργασίας (και ως προς το χρόνο συνεργασίας και ως προς την ταχύτητα του ρομπότ) σε σχέση με την τεχνική της επιβράδυνσης.

9.3. Σύνθεση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν δύο δοκιμές χρηστών και τα αποτελέσματα αυτών, αρχικά για την έκδοση 1.0 και κατόπιν για την έκδοση 2.0 της εφαρμογής “beWare of the Robot”. Η δοκιμή της έκδοσης 1.0 έγινε σε μικρότερο βάθος, διότι ο κύριος στόχος μας ήταν η καταρχήν παρακολούθηση της συμπεριφοράς των χρηστών στο ΕΠε, η εύρεση των ορίων/περιορισμών των συσκευών εισόδου (στερεοσκοπία/αναγνώριση κίνησης) και η «χάραξη» των βασικότερων κατευθύνσεων για τη δημιουργία της πιο αλληλεπιδραστικής έκδοσης 1.5 και το σχεδιασμό του πιο έντονα αλληλεπιδραστικού συνεργατικού καθήκοντος της έκδοσης 2.0. Η δοκιμή της έκδοσης 2.0 έγινε τόσο με τη χρήση μετρικών συμπεριφοράς και απόδοσης, όσο και με τη χρήση ερωτηματολογίου (post-test questionnaire). Ο χρήστης εκτελούσε διαδοχικά τη δοκιμή και για τις τρεις

παραλλαγές του σεναρίου (1: control-χωρίς τεχνική, το ρομπότ δεν αντιδρά στην πιθανότητα σύγκρουσης, 2: με την τεχνική επιβράδυνσης, 3: με τεχνική υποχώρησης του ρομπότ) και καταγράφονταν σε log αρχεία οι εξαρτημένες μεταβλητές ελέγχου (συγκρούσεις, συμβάντα, χρόνοι, ταχύτητες).

Όσον αφορά την *ασφάλεια*, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας (επιβράδυνση/υποχώρηση) είναι όντως αποτελεσματικές (με κριτήριο τον αριθμό συγκρούσεων A-P), αλλά δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για το ποιά από τις δύο τεχνικές είναι πιο αποτελεσματική. Όσον αφορά την *απόδοση* της συνεργασίας, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας (επιβράδυνση/υποχώρηση) είναι επιβαρυντικές ως προς την απόδοση της συνεργασίας A-P στο ΕΠε. Μάλιστα, εξάγεται το συμπέρασμα ($p=0.098$) ότι η τεχνική υποχώρησης επιβαρύνει περισσότερο την απόδοση της συνεργασίας (και ως προς το χρόνο συνεργασίας και ως προς την ταχύτητα του ρομπότ) σε σχέση με την τεχνική της επιβράδυνσης. Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνονται και από την ανάλυση των υποκειμενικών προτιμήσεων των χρηστών. Όσον αφορά την προσλαμβανόμενη αποτελεσματικότητα (απόδοση) των δύο τεχνικών, οι χρήστες έδειξαν σαφή προτίμηση στην τεχνική επιβράδυνσης έναντι αυτής της υποχώρησης. Η τεχνική επιβράδυνσης υπερτερεί οριακά έναντι της υποχώρησης στις απαντήσεις των χρηστών, με κριτήριο την προσλαμβανόμενη ασφάλεια (αποφυγή σύγκρουσης), αλλά, όπως φαίνεται από τα αντίστοιχα αποτελέσματα των t-tests, δεν προκύπτει ασφαλές στατιστικό συμπέρασμα.

Όσον αφορά τις υποκειμενικές προτιμήσεις των χρηστών, η χρήση και ο σχεδιασμός των οπτικοακουστικών βοηθημάτων και συναγερμών κρίθηκε ως πολύ αποτελεσματική, τόσο στη δοκιμή της έκδοσης 1.0, όσο και σε αυτή της έκδοσης 2.0. Επίσης, συνολικώς θετικά κρίνονται τα αποτελέσματα στις θεματικές ενότητες της αποτελεσματικότητας της μοντελοποίησης της συνεργασίας A-P, της αποτελεσματικότητας του ΕΠε και της εμπλοκής, εμπύθισης και παρουσίας του χρήστη. Εκτός από τα θετικά αποτελέσματα, επισημάνθηκαν τα προβλήματα και οι ανεπάρκειες της εφαρμογής (π.χ. προβλήματα αναγνώρισης κίνησης, συχνή απώλεια ελέγχου των χεριών, κιναισθητικές αποκλίσεις, αισθανόμενη ζάλη, αποτελεσματικότητα της τεχνικής «Follow-My-Hand»). Τέλος, πολύ θετικά κρίνεται και η αποδοχή του ΕΠε ως εργαλείου εκπαίδευσης ενός έντονα αλληλεπιδραστικού καθήκοντος, όπως αυτό της συνεργασίας A-P.

10.Συζήτηση – Συμπεράσματα

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται τη συνεργασία Ανθρώπου-Ρομπότ (A-P) στα ρομποτικά συστήματα παραγωγής, και την αποτελεσματικότητα, την ασφάλεια και την αποδοχή αυτής της συνεργασίας από τον άνθρωπο. Επιπλέον, μελετάται η χρήση της διαδραστικής Εικονικής Πραγματικότητας ως εργαλείο μελέτης της παραπάνω συνεργασίας, το οποίο μπορεί όχι μόνο να αναπαριστά, αλλά και να εμπλουτίζει γνωστικά την αλληλεπίδραση A-P.

Δημιουργήθηκε το ΕΠε “beWare of the Robot” ως μια αυτόνομη και υψηλά αλληλεπιδραστική εφαρμογή για τη μελέτη της συνεργασίας A-P. Συνολικά αναπτύχθηκαν δύο περιπτώσεις εφαρμογής (use cases). Η πρώτη περίπτωση εφαρμογής (εκδόσεις beWare of the Robot v1.0 και v1.5) αναπαριστά τη ρομποτική τροφοδοσία (παράδοση) των ανθρακούφασμάτων από έναν πάγκο εναπόθεσης υφασμάτων προς τον άνθρωπο και συνιστά συγχρονισμένο τύπο συνεργασίας με χωρική σύμπτωση A-P. Η δεύτερη περίπτωση εφαρμογής, (έκδοση beWare of the Robot v2.0) αφορά συνεργατική προετοιμασία του τεμαχίου (αφαίρεση ενός αυτοκόλλητου καλύμματος) και από κοινού στρώση του ανθρακούφασματος σε ένα καλούπι (ταυτόχρονος και υποβοηθητικός τύπος συνεργασίας A-P).

Στην Ενότητα 5.1 διατυπώθηκαν οι τρεις βασικές ερευνητικές προβληματικές της παρούσας εργασίας:

- η πρώτη προβληματική έχει δύο σκέλη. Αναφέρεται: (i) στην αποτελεσματικότητα της μοντελοποίησης της συνεργασίας A-P από το διαδραστικό ΕΠε και, (ii) στην αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη, ως εργαλείου για τη διερεύνηση αυτής της συνεργασίας και για την εκπαίδευση σε αυτήν.
- η δεύτερη προβληματική αφορά στη χρήση των γνωστικών βοηθημάτων που παρέχονται στο χρήστη και στην επίδραση που έχουν στην αντίληψη του κινδύνου (προσλαμβανόμενη/αντιληπτή ασφάλεια) και στην αντίληψη της κατάστασης
- η τρίτη προβληματική αφορά στη χρήση των δύο διαφορετικών στρατηγικών ασφαλείας, στην αποδοχή τους από το χρήστη και στην επίδραση που έχουν στην ασφάλεια και στην απόδοση (εύροια) της συνεργασίας A-P.

Η πρώτη ερευνητική προβληματική σχετίζεται με την εμπειρία του χρήστη στο ΕΠε, τόσο για το σκέλος της μοντελοποίησης της κατάστασης της συνεργασίας, όσο και για αυτό της αποδοχής του από το χρήστη. Η διερεύνηση της προβληματικής έγινε άμεσα, με τη χρήση ερωτηματολογίων, και στις δύο εκδόσεις της εφαρμογής, με τα αποτελέσματα να είναι σαφή και να έχουν θετικά χαρακτηριστικά.

Η διερεύνηση της δεύτερης προβληματικής έγινε μόνον όσον αφορά το σκέλος της υποκειμενικής προτίμησης των χρηστών, χωρίς να χρησιμοποιηθούν μετρικές

απόδοσης και χωρίς εξέταση σε μεγαλύτερο βάθος. Η ουσιαστική ολοκλήρωση της διερεύνησής της (με τη διεξαγωγή πειραμάτων συγκρίσεως) δεν κατέστη δυνατόν να πραγματοποιηθεί στην παρούσα διδακτορική διατριβή και προτείνεται ως μελλοντική ερευνητική εργασία. Μολαταύτα, τα πρώτα αποτελέσματα από τη χρήση των οπτικοακουστικών βοηθημάτων είναι εξαιρετικά θετικά.

Η διερεύνηση της τρίτης ερευνητικής προβληματικής πραγματοποιήθηκε σε μεγαλύτερο βάθος, καθώς εκτός από τη χρήση ερωτηματολογίων, διεξήχθησαν και πειράματα συγκρίσεως με πολύ αντιπροσωπευτικές μετρικές. Τα αποτελέσματα που σχετίζονται με την ασφάλεια του χρήστη είναι εξαιρετικά θετικά, αλλά η χρήση και τα χαρακτηριστικά μεγέθη των τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας, πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω, σε μελλοντική εργασία.

Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου, γίνεται μία συζήτηση και σύνθεση επί των παρατηρήσεων και των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την πορεία της ανάπτυξης της εφαρμογής και από τις δοκιμές με χρήστες.

10.1. Η εμπειρία του χρήστη στον εικονικό κόσμο

Για την περιγραφή της εμπειρίας του χρήστη στο ΕΠε, θα ξεκινήσουμε αντίστροφα, επισημαίνοντας καταρχάς την υψηλή **αποδοχή** του ΕΠε από τους χρήστες, θεωρώντας την αποδοχή ως θεμελιώδες χαρακτηριστικό μέγεθος της ανθρώπινης εμπειρίας. Παρά τα όποια προβλήματα, τα οποία επισημάνθηκαν από τους χρήστες στο κεφ. 9, το ΕΠε θεωρείται ενδιαφέρον, διασκεδαστικό και ελκυστικό από τους χρήστες (Ενότητες 9.1.4 και 9.2.4). Η αποδοχή της χρήσης του ΕΠε επισημαίνεται και από τις δύο δοκιμές, των εκδόσεων 1.0 και 2.0 αντίστοιχα. Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών, η χρήση του ΕΠε τυχάνει της αποδοχής των χρηστών, σε μεγάλο ποσοστό, στα παρακάτω θέματα: (i) ως εργαλείο μοντελοποίησης των διαδραστικών στοιχείων της συνεργασίας A-P, (ii) ως εργαλείο διερεύνησης των βασικών παραμέτρων αυτής της συνεργασίας (ταχύτητα, τεχνική, εγγύτητα, τεχνικές), (iii) ως εργαλείο εκπαίδευσης, με τη μεταφορά της εικονικώς αποκτηθείσας γνώσης στο πραγματικό καθήκον και, (iv) ως εργαλείο πρόληψης του κινδύνου, με την καλλιέργεια προνοητικής/προβλεπτικής συμπεριφοράς από την πλευρά του χρήστη και τον εμπλουτισμό της αίσθησης της επίγνωσης της κατάστασης.

Είναι σημαντικό για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων, ότι το σύνολο των χρηστών είχε περάσει σε πρότερη χρονική στιγμή από συμβατική εργαστηριακή εκπαίδευση στη χρήση βιομηχανικού ρομπότ και είχε πρότερη εξοικείωση με τον προγραμματισμό και την πραγματική κίνηση του ρομπότ στο χώρο. Συνεπώς, όλοι οι χρήστες διέθεταν τις ελάχιστες προσλαμβάνουσες ώστε να μπορούν να χαρακτηρίσουν ως αποδεκτή τη μοντελοποίηση της συνεργασίας A-P. Σημαντική επισήμανση είναι και το ότι η χρήση του διαδραστικού ΕΠε μπορεί να προσφέρει στο χρήστη το κίνητρο (motivation), ώστε να βιώσει την εκπαίδευσή του σε ένα τεχνικό καθήκον, ως ελκυστική ή ακόμα και ως διασκεδαστική.

Κατά τη δοκιμή των υψηλά διαδραστικών ΕΠε, ο χρήστης μετατρέπεται σε έναν πραγματικό συμμετέχοντα στον εικονικό κόσμο, ο οποίος μπορεί να χειριστεί και να αλληλεπιδράσει με τα εικονικά αντικείμενα. Η απόδοση του χρήστη σε εκπαιδευτικά ΕΠε εξαρτάται άμεσα από το βαθμό στον οποίο βιώνει την αίσθηση της **παρουσίας**, δηλαδή από το βαθμό επίτευξης της υποκειμενικής εμπειρίας (αίσθησης) του να βρίσκεται σε ένα χώρο, κόσμο, ή περιβάλλον, ασχέτως από το εάν βρίσκεται πραγματικά σε αυτόν. Μάλιστα, κατά τους (Vora et al., 2002) η αίσθηση της παρουσίας είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας για την επίγνωση της κατάστασης σε ένα διαδραστικό ΕΠε. Στην ίδια λογική, οι (Prothero, Parker, Furness III, & Wells, 1995) ισχυρίζονται ότι η παρουσία και η επίγνωση της κατάστασης είναι αλληλεπικαλυπτόμενες έννοιες. Η έρευνα γύρω από την παρουσία στην ΕΠ είναι εξαιρετικά ευρεία, αλλά είναι γενικώς αποδεκτό στη βιβλιογραφία ότι για την επίτευξη της αίσθησης της παρουσίας σε ένα ΕΠε, είναι απαραίτητες δύο συνθήκες: η εμβύθιση (*immersion*) και η εμπλοκή (*involvement*) (Schuemie et al., 2001). Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, η παρουσία νοείται μέσω της έντονης εμπλοκής του χρήστη (“*presence by involvement*”) στο εικονικό του καθήκον.

Τα αποτελέσματα και των δύο δοκιμών ήταν πολύ θετικά όσον αφορά την αυτο-αξιολόγηση (μέσω των ερωτηματολογίων) της αίσθησης παρουσίας των χρηστών. Η συντριπτική πλειοψηφία των χρηστών δήλωσε ότι με τη χρήση της κάσκας στερεοσκοπίας ένιωθε απομονωμένος από τον πραγματικό χώρο, αλλά βυθισμένος και παρών στον εικονικό κόσμο (προσλαμβανόμενη εμβύθιση και παρουσία). Επιπρόσθετα, η πλειοψηφία των χρηστών δήλωσε αφοσίωση και εμπλοκή στο εικονικό καθήκον, χωρίς να αφαιρεθεί καθόλου κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Η αίσθηση της **εμβύθισης** στα διαδραστικά ΕΠε συνδέεται άμεσα με τη στερεοσκοπία και την οπτική που προσφέρει το σύστημα και η κάσκα στερεοσκοπίας ειδικότερα. Στην περίπτωση μας, όπου ο χρήστης χειρίζεται και ελέγχει το ανθρωποειδές μέσω της αναγνώρισης κίνησης, φορώντας ταυτόχρονα την κάσκα στερεοσκοπίας, η αίσθηση της εμβύθισης σχετίζεται άμεσα και με την ακριβή και άμεση αντιστοίχιση των κινήσεών του σε αυτές του ανθρωποειδούς. Για την επίτευξη υψηλής αίσθησης εμβύθισης απαιτείται να υπάρχει πλήρης ταύτιση μεταξύ (i) της ιδιοδεκτικής (*proprioceptive*) ανάδρασης που λαμβάνει ο χρήστης από μια κίνηση του σώματός του και (ii) της πληροφορίας που αναπαράγεται στις οθόνες της κάσκας στερεοσκοπίας, σε σχέση με αυτή την κίνηση (Slater, Usoh, & Steed, 1995; Usoh et al., 1999). Με λίγα λόγια, πρέπει να υπάρχει συγχρονισμός μεταξύ της ιδιοδεκτικότητας και της κιναισθητικής ανάδρασης του χρήστη στο ΕΠε.

Στην παρούσα εργασία, η **αναγνώριση κίνησης** (περιστροφής) της **κεφαλής** πραγματοποιείται μέσω των αισθητήρων της κάσκας στερεοσκοπίας με ακρίβεια και χωρίς εμφανή χρονική υστέρηση, η οποία να προκαλεί αναντιστοιχίες μεταξύ της ιδιοδεκτικής πληροφορίας και της αισθητηριακής ανάδρασης που λαμβάνει πίσω ο χρήστης μέσω της κάσκας. Και στις δύο δοκιμές, σχεδόν η απόλυτη πλειοψηφία των χρηστών δήλωσε πολύ ικανοποιημένη από την ποιότητα της αναγνώρισης κίνησης (*tracking*) του κεφαλιού.

Αντιθέτως, στην **αναγνώριση κίνησης του σώματος**, παρότι αυτή πραγματοποιείται ανέπαφα και αδιάκοπα (ευχέρεια κινήσεων) με τη χρήση του αισθητήρα Kinect, παρατηρούνται αρκετές επιμέρους αναντιστοιχίες μεταξύ της ιδιοδεκτικής πληροφορίας του χρήστη για τις κινήσεις του και της αισθητηριακής ανάδρασης που λαμβάνει (βλέπει) για το σώμα του ανθρωποειδούς μέσω της οθόνης της κάσκας. Κατά πρώτον η αναγνώριση κίνησης δεν καταγράφει όλες τις περιστροφές των αρθρώσεων του χεριού και των δακτύλων του χρήστη, οπότε υπάρχουν κινήσεις που δεν αποτυπώνονται στο ΕΠε. Κατά δεύτερον, εάν υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεγέθους (π.χ. ύψους) μεταξύ του χρήστη και του μοντέλου του ανθρωποειδούς (το οποίο έχει δεδομένο μέγεθος), τότε ο έλεγχος των κινήσεων του ανθρωποειδούς δεν είναι σταθερός, ενώ μπορεί να παρατηρηθεί απώλεια ελέγχου ή «τρέμουλο» στην κίνηση. Κατά τρίτον, εμφανίζεται μια ελάχιστη χρονική υστέρηση στις κινήσεις του ανθρωποειδούς, η οποία γίνεται αισθητή όταν ο χρήστης κάνει πολύ γρήγορες και μεγάλες σε έκταση κινήσεις. Οι παραπάνω ανακολουθίες οφείλονται τόσο στο σχεδιασμό του ΕΠε, όσο και στους περιορισμούς των συσκευών αλληλεπίδρασης, και μπορεί να οδηγούν: (i) στη μείωση της αίσθησης της εμπύθισης του χρήστη, (ii) σε πιθανή δυσκολία εκτέλεσης του εικονικού καθήκοντος και σε αδικαιολόγητη αύξηση του χρόνου συνεργασίας και, (iii) στην πρόκληση δυσφορίας ή ζάλης, καθιστώντας έτσι το ΕΠε μη-αποδεκτό για το χρήστη. Τα παραπάνω προβλήματα επισημάνθηκαν από μερίδα χρηστών (βλ. Ενότητα 9.2.4) και μάλιστα συσχετίστηκαν με τη δυσκολία εκτέλεσης του καθήκοντος, την πιθανή περιορισμένη απόδοση και την αλλαγή της συμπεριφοράς τους στο ΕΠε. Μάλιστα στη δοκιμή της έκδοσης 2.0, πέντε σε σύνολο τριάντα χρηστών αισθάνθηκαν υπερβολική ζάλη και δυσφορία και εγκατέλειψαν τη δοκιμή πριν την ολοκλήρωσή της. Συνεπώς η -κατά το δυνατόν- επίλυση των παραπάνω κιναισθητικών ανακολουθιών και των συνεπαγόμενων προβλημάτων είναι εξαιρετικά σημαντική για την αποτελεσματικότητα του ΕΠε και την πλήρη αποδοχή του από το χρήστη.

Η **αποτελεσματικότητα** της χρήσης της ΕΠ για τη μοντελοποίηση της συνεργασίας A-P όσον αφορά την αποδοχή και την ασφάλεια αυτής της συνεργασίας, έχει επισημανθεί στη βιβλιογραφία από τους (Hugues et al., 2015; Weistroffer, 2014; Weistroffer et al., 2014) και (Duffy et al., 2006; Or, Duffy, & Cheung, 2009) αντίστοιχα. Στη δοκιμή των χρηστών, η αποτελεσματικότητα της μοντελοποίησης της συνεργασίας A-P αφορούσε κυρίως τη δυνατότητα αναπαραγωγής των βασικότερων χαρακτηριστικών αυτής μέσα στο διαδραστικό ΕΠε. Στη δοκιμή της έκδοσης 1.0, το συνεργατικό καθήκον της τροφοδοσίας και της λήψης του ανθρακούφασματος από τον άνθρωπο, πραγματοποιήθηκε με μεγάλη ευκολία από τους χρήστες, ενώ το στρώσιμο και η ενδεικνυόμενη θέση της στρώσης πάνω στο καλούπι γινόταν εύκολα αντιληπτή από το σύνολο των χρηστών. Στη δοκιμή της έκδοσης 2.0, τα συνεργατικά καθήκοντα της αφαίρεσης της αυτοκόλλητης ταινίας και του συνεργατικού στρώσιματος στο καλούπι πραγματοποιήθηκαν με ευκολία από την πλειοψηφία των χρηστών, ακολουθώντας, κάθε φορά, την ένδειξη (οδηγό) του κινούμενου εικονικού χεριού (μεταφορά αλληλεπίδρασης). Επιπλέον, οι χρήστες στη συντριπτική τους πλειοψηφία εξοικειώθηκαν πολύ γρήγορα με το ΕΠε

και το σενάριο συνεργασίας, μετά από την αρχική σκηνή εξοικείωσης, και δήλωσαν ότι υπήρχε εύροια στη συνεργασία τους με το ρομπότ και ότι μπορούσαν να προβλέψουν την επόμενη του κίνηση ή αντίδραση. Ένα χαρακτηριστικό στοιχείο ενός εκπαιδευτικού ΕΠε είναι η επιτάχυνση της εκπαίδευσης και η υποστήριξη της μεταφοράς της γνώσης από τον εικονικό κόσμο στο πραγματικό καθήκον (Bardy, 2011). Παρότι οι χρήστες απάντησαν ότι μετά την εκπαίδευση τους στο ΕΠε θα δεχόντουσαν ευκολότερα να πραγματοποιήσουν την αντίστοιχη εργασία στο πραγματικό περιβάλλον, για τον ουσιαστικό έλεγχο της παραπάνω υπόθεσης απαιτείται διεξαγωγή δοκιμών και σε πραγματικό περιβάλλον και εκτέλεση πειραμάτων συγκρίσεως.

Γενικότερα, ως προς τη χρήση της Εικονικής Πραγματικότητας (ΕΠ), αυτή παρέχει τη δυνατότητα αναπαραγωγής των βασικότερων χαρακτηριστικών της συνεργασίας A-P σε ένα διαδραστικό ΕΠε και μάλιστα μπορεί να αναδείξει συγκεκριμένες πλευρές αυτής, ή να προσφέρει γνωστικά βοηθήματα που είναι ιδιαίτερα δύσκολο να αναπαραχθούν στον πραγματικό κόσμο (π.χ. ένδειξη όγκου κίνησης). Η ΕΠ μπορεί να προσφέρει αυξημένη αντίληψη και επίγνωση κατάστασης σε τομείς της συνεργασίας A-P, συμβάλλοντας κατ' αυτό τον τρόπο όχι μόνο στην ασφάλεια της συνεργασίας, αλλά και στην αύξηση της απόδοσής της. Επίσης, η ΕΠ δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης της δυσλειτουργίας και του σφάλματος του συστήματος, χωρίς να υπάρχει κανένας κίνδυνος για τους χρήστες.

Στη μελέτη της συνεργασίας A-P, η χρήση της ΕΠ επιτρέπει την εύκολη ρύθμιση των παραμέτρων του συστήματος, ή ακόμα και του σεναρίου της συνεργασίας. Η ΕΠ μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της προσλαμβανόμενης (αντιληπτής) ασφάλειας που προκύπτει από τη χρήση διαφορετικών σεναρίων συνεργασίας A-P, και στην παρούσα έρευνα, χρησιμοποιείται για την καταρχήν δοκιμή διαφορετικών προσαρμοστικών και προβλεπτικών τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας (αποφυγής σύγκρουσης).

Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα των δοκιμών και οι παρατηρήσεις των χρηστών δείχνουν θετική προοπτική για τη χρήση των διαδραστικών ΕΠε τόσο για τη διερεύνηση της συνεργασίας A-P, όσο και για την εκπαίδευση του χρήστη σε αυτή. Αναφορικά με την εμπειρία του χρήστη, ο τελευταίος αισθάνεται υψηλό επίπεδο εμπλοκής και εμπύθισης, επομένως και παρουσίας στο ΕΠε. Η χρήση της οπτικής πρώτου προσώπου και του ρεαλιστικού ανθρωποειδούς (το οποίο αποτελεί την κινηματική αναπαράσταση και αντιπροσώπευση του χρήστη στο ΕΠε), εντείνουν την αίσθηση της παρουσίας. Η στερεοσκοπική όραση και η χρήση της κάσκας στερεοσκοπίας, σε συνδυασμό με τη δυνατότητες αναγνώρισης κίνησης, εμπλουτίζουν την αίσθηση της εμπύθισης και έχουν θετικό πρόσημο στην αντίληψη του χώρου. Η ανέπαφη και χωρίς αισθητήρες ή στόχους (contactless and markerless) αναγνώριση κίνησης, προσφέρει ευχέρεια, άνεση και -κυρίως- φυσικότητα στις κινήσεις του χρήστη στο ΕΠε, ενώ δεν χρειάζονται περίπλοκες μεταφορές αλληλεπίδρασης για την επίτευξη της κίνησης του σώματός του. Το βάδισμα στο χώρο, η ανταπόκριση του σώματος και η χρήση των χεριών του χρήστη (skeletal

tracking) για το χειρισμό των αντικειμένων και για την αλληλεπίδραση με το ρομπότ, κάνει την εκπαίδευση στο ΕΠε πιο ελκυστική σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους. Τέλος, όσο περισσότερο έλεγχο έχει ο χρήστης στην αλληλεπίδρασή του με το ρομπότ και έναντι του συστήματος, τόσο υψηλότερη είναι η αίσθηση της παρουσίας και της επίγνωσης της κατάστασης, επομένως και η επιτυχία του ΕΠε.

Η συζήτηση για τη χρήση και την αποτελεσματικότητα των γνωστικών βοηθημάτων (οιπτικοακουστικών ενδείξεων, νύξεων και συναγερμών) γίνεται στην Ενότητα 10.3.1.

10.2. Η περίπτωση συνύπαρξης και συγχρονισμένης εργασίας εν σειρά (έκδοση 1.0)

Η πρώτη περίπτωση εφαρμογής (έκδοση 1.0) ήταν πρωτόλεια και δημιουργήθηκε με σκοπό: αφενός να απαντήσει στην πρώτη ερευνητική προβληματική (αποτελεσματικότητα μοντελοποίησης/αποδοχή ΕΠε) και αφετέρου, να αποτελέσει μια δυναμική πλατφόρμα ΕΠ πάνω στην οποία θα γίνει ο πειραματισμός και η διερεύνηση της συνεργασίας A-P σε μηχανουργικά καθήκοντα.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών (βλ. Ενότητες 9.1.4 και 10.1) έρχονται να απαντήσουν θετικά στα ερευνητικά ερωτήματα και συγκεκριμένα δείχνουν ότι:

- η κατάσταση της συνεργασίας A-P και τα κυριότερα χαρακτηριστικά αυτής *μπορούν να αναπαραχθούν* με επιτυχία από το διαδραστικό ΕΠε
- το διαδραστικό ΕΠε *γίνεται αποδεκτό* από την πλευρά του χρήστη ως ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τη διερεύνηση της συνεργασίας A-P
- αναδείχθηκαν τα όρια και τα προβλήματα του ΕΠε και των συσκευών αλληλεπίδρασης, χωρίς όμως να μπορούν να αναιρέσουν τις δύο παραπάνω διαπιστώσεις.

Όσον αφορά τα όρια και τους περιορισμούς των συσκευών 3Δ αλληλεπίδρασης, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε κιναισθητικές αναντιστοιχίες, στόχος ήταν να παρατηρήσουμε το κατά πόσο αυτές επηρεάζουν την εκτέλεση του συνεργατικού καθήκοντος και την ανθρώπινη συμπεριφορά, έτσι ώστε αυτή να μην αποκλίνει σημαντικά σε σχέση με τη συνήθη συμπεριφορά του ανθρώπου σε απλά καθήκοντα (π.χ. άγγιγμα, μεταφορά με τα χέρια κλπ) στον πραγματικό κόσμο. Τα αποτελέσματα των δοκιμών της έκδοσης 1.0 (αυτο-αξιολόγηση, παρατηρήσεις), δείχνουν ότι πράγματι, οι κιναισθητικές αναντιστοιχίες και τα προβλήματα στην αναγνώριση κίνησης είναι η βασική αιτία που δυσκολεύει το χρήστη στην εκτέλεση του εικονικού καθήκοντος.

Τα σημαντικότερα ζητήματα προς επίλυση, τα οποία αναδείχθηκαν από τα αποτελέσματα και τις παρατηρήσεις είναι τα εξής:

- τα προβλήματα της αναγνώρισης κίνησης (τρέμουλο, απώλεια ελέγχου των χεριών, αναντιστοιχία κινήσεων χρήστη-ανθρωποειδούς) οφείλονταν κυρίως στη χωροθέτηση της εικονικής σκηνής. Η αστοχία χωροθέτησης απαιτούσε

από το χρήστη την περιστροφή του σώματός του, η οποία με τη σειρά της προκαλούσε προβλήματα στην αναγνώριση κίνησης (ξεπερνούσε τα όρια των δυνατοτήτων του αισθητήρα αναγνώρισης κίνησης).

- Το σενάριο συνεργασίας μεταξύ ανθρώπου και ρομπότ έπρεπε να γίνει πιο αλληλεπιδραστικό, με μεγαλύτερη μεταξύ τους εγγύτητα και να διαρκεί περισσότερο, προκειμένου να είναι δυνατή η ουσιαστική μελέτη της συνεργασίας A-P.
- Τα κριτήρια ενεργοποίησης του ηχητικού συναγερμού έπρεπε να επανεξεταστούν, καθώς η συχνή ενεργοποίησή του κατά τη διάρκεια της συνεργασίας, προκαλούσε άγχος και απόσπαση στο χρήστη.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις ελήφθησαν υπόψη και, με βάση αυτές, έγιναν οι κατάλληλες τροποποιήσεις και δημιουργήθηκε η εικονική σκηνή της έκδοσης 2.0. Στην έκδοση 2.0 ο άνθρωπος και το ρομπότ βρίσκονται σε πολύ μεγαλύτερη εγγύτητα, η κίνηση του ρομπότ πραγματοποιείται δίπλα ακριβώς από το χρήστη, ενώ τα συνεργατικά καθήκοντα πραγματοποιούνται από κοινού στον ίδιο χώρο.

10.3. Η περίπτωση συνύπαρξης, ταυτόχρονης συνεργασίας και εργασίας εν παραλλήλω, με έντονη συνέργεια και αλληλεπίδραση (έκδοση 2.0)

Στην έκδοση 2.0 έγινε μια προσπάθεια να επιλυθούν τα προβλήματα της έκδοσης 1.0, να τροποποιηθεί το καθήκον και να γίνει πολύ πιο συνεργατικό (βλ. Ενότητα 6.4.2) και, τέλος, να χρησιμοποιηθούν πιο σύγχρονες και πιο ισχυρές συσκευές αλληλεπίδρασης (π.χ. Oculus Rift DK2).

Με τη χρήση της κάσκας Oculus Rift, επετεύχθη μεγάλη βελτίωση στην ποιότητα της εικόνας, στην απομόνωση του χρήστη από το πραγματικό περιβάλλον, στην ποιότητα της αναγνώρισης κίνησης της κεφαλής και στο βάθος της στερεοσκοπίας. Από την άλλη, εξαιτίας της αύξησης του βαθμού στερεοσκοπίας (και της εμβύθισης), τυχόν κιναισθητικές αναντιστοιχίες οι οποίες δεν γινόντουσαν αντιληπτές στην προηγούμενη έκδοση, τώρα αναδεικνύονταν περισσότερο, με αποτέλεσμα την πρόκληση δυσφορίας σε μεγαλύτερο ποσοστό χρηστών.

Οι αλλαγές στη σκηνή (χωροθέτηση) κρίνονται επιτυχημένες γιατί επιλύθηκαν όλα τα ζητήματα της έκδοσης 1.0 που αφορούσαν την αναγνώριση κίνησης. Στην έκδοση 2.0 ο χρήστης δεν χρειάζεται να μετακινηθεί και να περιστρέψει το σώμα του για να πάρει τα υφάσματα, διότι το ρομπότ τα φέρνει ακριβώς μπροστά του. Επίσης, το σενάριο εργασίας προέβλεπε παράλληλη συνεργασία A-P, τόσο στην αφαίρεση του αυτοκόλλητου, όσο και στο στρώσιμο του υφάσματος: το ρομπότ μεταφέρει και συγκρατεί το ανθρακοϋφασμα με τον επιθυμητό προσανατολισμό και ο άνθρωπος αφαιρεί την ταινία και στρώνει το ύφασμα αντίστοιχα. Η συνεργασία τους αυτή με το ρομπότ, χαρακτηρίστηκε από την πλειοψηφία των χρηστών ως στρωτή και αδιάκοπη (προσλαμβανόμενη εύροια).

Στην έκδοση 2.0, δημιουργήθηκαν δύο πρωτότυπες μεταφορές αλληλεπίδρασης (βλ. Ενότητα 7.2), αυτή της εικονικής συνεργατικής στρώσης (virtual lay metaphor) και αυτή της εικονικής αφαίρεσης του αυτοκόλλητου καλύμματος (virtual removal metaphor). Επίσης δημιουργήθηκε και μία νέα τεχνική αλληλεπίδρασης, η τεχνική «ακολούθησε το χέρι μου» (follow my hand), με τη χρήση ενός εικονικού χεριού (οδηγού/πιλότου) και ενός μοτιβου κίνησης, το οποίο πρέπει να ακολουθήσει ο χρήστης με το χέρι του, και το οποίο παραπέμπει νοητικά στο πραγματικό καθήκον. Τόσο κατά την αφαίρεση του καλύμματος, όσο και κατά το στρώσιμο στο καλούπι, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι χρήστες ακολουθούσαν με ευκολία την κινούμενη ένδειξη του εικονικού χεριού.

Τα κριτήρια (συνθήκες) ενεργοποίησης των τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας (βλ. Εικόνα 8-3) στην έκδοση 2.0 είναι πολύ πιο σύνθετα σε σχέση με την έκδοση 1.0. Ενεργοποιούνται κλιμακωτά, πρώτα οι προβλεπτικές τεχνικές, με κριτήριο τη σχετική απόσταση A-P και στη συνέχεια οι προσαρμοστικές τεχνικές, με πιο σύνθετα και συνδυαστικά κριτήρια ενεργοποίησης (ταχύτητα και κατεύθυνση ρομπότ, μεταξύ τους απόσταση, χρόνος μέχρι τη σύγκρουση). Από τις παρατηρήσεις των χρηστών, τα συνδυαστικά κριτήρια ενεργοποίησης κρίνονται ως απόλυτα επιτυχημένα, καθότι οι τεχνικές ασφάλειας ενεργοποιούνται αρκετά έγκαιρα ώστε να αποφεύγεται η επαφή A-P, και όχι πολύ νωρίς (ή άσκοπα), ώστε να χάνουν την αποτελεσματικότητά τους. Φυσικά, τροποποιώντας τις παραμέτρους των κριτηρίων ενεργοποίησης, είναι δυνατό να επηρεάσουμε την απόδοση στη συνεργασία (χρόνος), ή την ασφάλεια (συγκρούσεις).

Η δοκιμή της έκδοσης 2.0 από ομάδα χρηστών έγινε κυρίως για να απαντήσει στην τρίτη ερευνητική προβληματική, δηλαδή στην αποτελεσματικότητα των τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας ως προς τον παράγοντα της ασφάλειας και ως προς τον παράγοντα της απόδοσης. Τα αποτελέσματα για τις προσαρμοστικές τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας δείχνουν ότι αμφότερες κρίνονται ως αποτελεσματικές, με την τεχνική της επιβράδυνσης να υπερτερεί σαφώς έναντι της υποχώρησης, ως προς την αποτελεσματικότητα, και να υπερτερεί οριακά, ως προς την ασφάλεια της συνεργασίας.

10.3.1. Η χρήση των οπτικοακουστικών γνωστικών βοηθημάτων (ένδειξων, νύξεων και συναγερμών)

Η χρήση των εποπτικών γνωστικών βοηθημάτων (ένδειξη χώρου εργασίας ένδειξη νοητού όγκου κίνησης) θα μπορούσε να κατηγορηθεί ως ανακριβής, μη-ρεαλιστική, ή ακόμα ότι υποβιβάζει τη φυσικότητα και την πιστότητα του ΕΠε. Εντούτοις, η χρήση αυτών των ενδείξεων, ακόμα κι αν αποτελούν κάποιου είδους παραφωνία ή υπερβολή στην αναπαράσταση του πραγματικού περιβάλλοντος, μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματική στην κατανόηση σύνθετων καταστάσεων (Burkhardt, Lourdeaux, & Fuchs, 1999), σε καθήκοντα τα οποία χαρακτηρίζονται από έντονο αντιληπτικό στοιχείο (Nathanael et al., 2010), και πόσο μάλλον στην προειδοποίηση του κινδύνου, ή στην αναπαράσταση ενός εν δυνάμει επικίνδυνου χώρου (Matsas, Batras, & Vosniakos, 2013a; Matsas & Vosniakos, 2015). Μάλιστα, οι

Bowman et al. (Bowman et al., 2004; Bowman, McMahan, & Ragan, 2012) υποστηρίζουν ότι η τρισδιάστατη αλληλεπίδραση και οι τρισδιάστατες διεπαφές χρήστη πρέπει να παρέχουν μόνο τον αναγκαίο ρεαλισμό, ανάλογα με το είδος της εφαρμογής.

Η χρήση γνωστικών βοηθημάτων και συναγερμών είναι μια τεχνική δημιουργίας προβλεπτικής συμπεριφοράς, η οποία στοχεύει στην υποστήριξη της επίγνωσης της κατάστασης, της αντίληψης του κινδύνου και στον εμπλουτισμό της επικοινωνίας του ανθρώπου με το ρομπότ. Υποστηρίζοντας την επίγνωση της κατάστασης, υποστηρίζονται άμεσα και οι βασικές γνωστικές διεργασίες του χρήστη (προσοχή, αντίληψη, κατανόηση, απόκτηση ικανοτήτων, λήψη απόφασης). Εάν κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της εφαρμογής ικανοποιηθεί κάποιο από τα κριτήρια ενεργοποίησης, τότε έχουμε τη μετατροπή των παραπάνω οπτικών ενδείξεων από γνωστικά βοηθήματα σε συναγερμούς. Έτσι, τα ίδια τα γνωστικά βοηθήματα αλλάζουν μορφή και ρόλο, και απευθύνονται στο ανώτερο επίπεδο της επίγνωσης της κατάστασης και συνεπώς στις πιο σύνθετες γνωστικές λειτουργίες (π.χ. κατανόηση, λήψη απόφασης). Επίσης, με τη συνδυαστική χρήση ηχητικού και οπτικού συναγερμού (π.χ. απευθείας αναπαράσταση ενός κρίσιμου όγκου στο χώρο), μαζί με την αντίληψη του ηχητικού σήματος, παρέχεται στο χρήστη και η ερμηνεία του, οδηγώντας τον σε ταχύτερη –και πιθανώς πιο αποτελεσματική– αντίδραση.

Η αξιολόγηση της χρήσης των προβλεπτικών τεχνικών (οπτικοακουστικών βοηθημάτων - ενδείξεων, νύξεων και συναγερμών) έγινε με αυτό-αξιολόγηση (υποκειμενική κρίση των χρηστών), μέσω των ερωτηματολογίων.

Η χρήση των οπτικοακουστικών βοηθημάτων κρίθηκε ως πολύ αποτελεσματική για την κατανόηση της ύπαρξης ενός δυνητικώς επικίνδυνου χώρου και για την αποφυγή της σύγκρουσης μεταξύ A-P, τόσο στη δοκιμή της έκδοσης 1.0 όσο και της έκδοσης 2.0 (συνεισφορά στην προσλαμβανόμενη ή αντιληπτή ασφάλεια). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι γινόταν εύκολα κατανοητή η αιτία που προκαλούσε κάθε φορά την ενεργοποίηση του συναγερμού (νοητική αντιστοιχισή), ενώ ουδείς εκφράστηκε αρνητικά για τη χρήση τους, ή ανέφερε απαράδεκτα υψηλό γνωστικό φορτίο.

10.3.2. Η τεχνική επιβράδυνσης και η τεχνική υποχώρησης του ρομπότ

Οι τεχνικές της *επιβράδυνσης* και της *υποχώρησης* στοχεύουν στη δημιουργία προσαρμοστικής κινηματικής συμπεριφοράς από το ρομπότ, και εστιάζουν στην αποφυγή της σύγκρουσης μεταξύ A-P, χωρίς να πραγματοποιείται διακοπή της κίνησης του ρομπότ (αδιάκοπη συνεργασία).

Η λογική της τεχνικής επιβράδυνσης βασίζεται στην υπόθεση ότι η επιβράδυνση της κίνησης του ρομπότ θα δώσει τον απαιτούμενο χρόνο στον άνθρωπο να αντιληφθεί την πιθανότητα σύγκρουσης (σε συνδυασμό με την ενεργοποίηση κάποιου συναγερμού) και να απομακρυνθεί από την τροχιά του ρομπότ. Η παραπάνω υπόθεση επιβεβαιώθηκε από τα αποτελέσματα. Ακόμα και αν για κάποιο

λόγο ο άνθρωπος δεν απομακρυνθεί, θεωρείται ότι η ταχύτητα του ρομπότ έχει μειωθεί τόσο ώστε να βρίσκεται μέσα στα επιτρεπόμενα όρια επαφής A-P.

Η λογική της τεχνικής υποχώρησης βασίζεται στην υπόθεση ότι από μόνη της η υποχώρηση του ρομπότ αρκεί για να αποφευχθούν συγκρούσεις ή επικίνδυνες επαφές μεταξύ A-P. Θεωρητικά, ακόμα και αν ο χρήστης στέκεται ακίνητος στην ίδια θέση, το ρομπότ θα τροποποιήσει την τροχιά του και θα υποχωρήσει όσες φορές χρειαστεί προκειμένου να τον αποφύγει. Η παραπάνω υπόθεση επιβεβαιώθηκε από τα αποτελέσματα, εντούτοις, είναι επιθυμητό ο χρήστης να αντιδράσει κατά την ενεργοποίηση της τεχνικής υποχώρησης, και να τροποποιήσει κατάλληλα τη θέση του ώστε να μην παρατηρούνται συνεχείς επανενεργοποιήσεις της τεχνικής.

Η αξιολόγηση των δύο προσαρμοστικών τεχνικών (επιβράδυνση-υποχώρηση) έγινε με πείραμα συγκρίσεως το οποίο εξέτασε την επίδραση που έχει η καθμία τεχνική: (i) στην ασφάλεια της συνεργασίας (μετρική: αριθμός συγκρούσεων) και (ii) στην απόδοση της συνεργασίας (μετρικές: χρόνος συνεργασίας, μέση ταχύτητα ρομπότ).

Όσον αφορά την *ασφάλεια*, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας (επιβράδυνση/υποχώρηση) είναι πολύ αποτελεσματικές (σχεδόν μηδενίζεται ο εντοπιζόμενος αριθμός επαφών A-P), αλλά δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για το ποιά από τις δύο τεχνικές είναι πιο αποτελεσματική έναντι της άλλης. Από τις υποκειμενικές προτιμήσεις των χρηστών, προκύπτει οριακό προβάδισμα της τεχνικής επιβράδυνσης, με κριτήριο την προσλαμβανόμενη ασφάλεια.

Όσον αφορά την *απόδοση* της συνεργασίας, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μεταξύ των δύο τεχνικών, η τεχνική υποχώρησης επιβαρύνει περισσότερο την απόδοση της συνεργασίας (και ως προς τον καθαρό χρόνο συνεργασίας και ως προς τη μέση ταχύτητα του ρομπότ) σε σχέση με την τεχνική της επιβράδυνσης. Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνονται και από την ανάλυση των υποκειμενικών προτιμήσεων των χρηστών, όσον αφορά την προσλαμβανόμενη αποτελεσματικότητα (απόδοση) των δύο τεχνικών: οι χρήστες έδειξαν σαφή προτίμηση στην τεχνική επιβράδυνσης έναντι αυτής της υποχώρησης.

10.4. Επίλογος

10.4.1. Συνεισφορά και Πρωτοτυπία της Διδακτορικής Διατριβής

Η παρούσα διδακτορική έρευνα είναι συνθετική και διατομεακή, αφού η Εικονική Πραγματικότητα (ΕΠ) χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης A-P σε συνεργατικά μηχανουργικά καθήκοντα, ενώ συνυπάρχουν και συμπλέκονται επιμέρους στοιχεία της ρομποτικής, της μηχανουργικής τεχνολογίας, των γνωστικών επιστημών και της επιστήμης υπολογιστών.

Η υλοποίηση της διδακτορικής διατριβής ακολούθησε, σε γενικές γραμμές, μια ολοκληρωμένη πορεία, με λογική αρχή, μέση και τέλος, η οποία περιλαμβάνει: την

ανάλυση των αναγκών, τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, τη μελέτη του συνεργατικού καθήκοντος, το σχεδιασμό του συστήματος, το σχεδιασμό της αλληλεπίδρασης, τη δημιουργία των 3D μοντέλων γραφικών, τη συναρμολόγηση όλων των παραπάνω στο ΕΠε, τη διασύνδεση των 3D διεπαφών χρήστη, τον προγραμματισμό των συμβάντων και της αλληλεπίδρασης, το σχεδιασμό και την υλοποίηση των τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας, το σχεδιασμό πειραμάτων, τη διεξαγωγή δοκιμών με χρήστες και την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Το σενάριο εργασίας είναι αρκετά σύνθετο σε σχέση με τα συνήθως αναπαριστώμενα σε ΕΠε και συνίσταται σε ταυτόχρονη, παράλληλη και από κοινού συνεργασία A-P. Ο άνθρωπος, αντιπροσωπευόμενος από το ανθρωποειδές, συνυπάρχει και δουλεύει από κοινού με το ρομποτικό του συνεργάτη, σε ένα καθήκον ανώτερου επιπέδου (όσον αφορά τη συνεργασία) σε σχέση με τα μεμονωμένα βασικά καθήκοντα της παράδοσης (hand-over), της συγκράτησης ή της μεταφοράς, τα οποία συναντώνται σε αντίστοιχες εφαρμογές ΕΠε στη βιβλιογραφία. Ειδικά στο συνεργατικό καθήκον της έκδοσης 2.0, το ρομπότ υποβοηθάει ουσιαστικά τον άνθρωπο, απαλλάσσοντάς τον από τα χαμηλής προστιθέμενης αξίας καθήκοντα και αφήνοντάς του τα λιγότερο κοπιώδη καθήκοντα, τα οποία όμως απαιτούν γνωστικές δεξιότητες.

Συνεπώς, η συνεισφορά της διδακτορικής διατριβής μπορεί να κωδικοποιηθεί στα εξής:

- δημιουργήθηκε ένα πρωτότυπο ΕΠε, το οποίο είναι πλήρως λειτουργικό και μπορεί να προσφέρει έντονη αλληλεπίδραση και εμπλουτισμένη εμπειρία στο χρήστη. Το ΕΠε είναι ρεαλιστικό και περιλαμβάνει τα κινηματικώς λειτουργικά μοντέλα ενός ανθρωποειδούς και ενός βιομηχανικού ρομπότ.
- Το ΕΠε μπορεί να αποτελέσει μια δυναμική πλατφόρμα διερεύνησης της συνεργασίας A-P, πάνω στην οποία μπορούν να γίνουν δοκιμές σε πλήθος παραμέτρων ή τεχνικών που αφορούν τη συνεργασία A-P (ενδεικτικά: τύπος συνεργασίας, τύπος καθήκοντος, τύπος ρομπότ, διαφορετικά προφίλ ταχυτήτων, νέα γνωστικά βοηθήματα, νέες τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας κλπ). Ο υψηλός αυτός βαθμός της ευελιξίας της εφαρμογής, δεν εντοπίζεται σε άλλες, παρεμφερείς εφαρμογές στη βιβλιογραφία.
- Το ΕΠε στη βασική του έκδοση λειτουργεί με τον αισθητήρα Kinect και με την κάσκα στερεοσκοπίας Oculus Rift, όμως προσφέρεται ευελιξία και μπορεί να δεχθεί πλήθος περιφερειακών ΕΠ (κάσκες στερεοσκοπίας, συσκευές ανίχνευσης κίνησης σώματος, χεριού, κεφαλής κλπ)
- Σε συνδυασμό με τις 3D διεπαφές χρήστη και με τη χρήση του εικονικού σώματος του ανθρωποειδούς, το ΕΠε προσφέρει στο χρήστη την εμπειρία εμπύθισης και παρουσίας στον εικονικό κόσμο.
- Η επιτυγχανόμενη αλληλεπίδραση με το χρήστη είναι αόρατη και ανέπαφη, προσφέρει ευχέρεια κινήσεων και γίνεται διαισθητικά και με φυσικότητα.
- Δημιουργήθηκαν δύο πρωτότυπες μεταφορές αλληλεπίδρασης (virtual laying και virtual removal metaphors) και μία νέα τεχνική αλληλεπίδρασης (follow-

my-hand) προκειμένου να αναπαραγάγουν και να υποστηρίξουν τη διαισθητική αλληλεπίδραση του χρήστη με το σύστημα.

- Σχεδιάστηκαν και ενσωματώθηκαν στο ΕΠε γνωστικά βοηθήματα, τα οποία σκοπεύουν στην υποστήριξη της επίγνωσης της κατάστασης, της αντίληψης του κινδύνου και στον εμπλουτισμό της επικοινωνίας του ανθρώπου με το ρομπότ.
- Σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν δύο προσαρμοστικές τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας (επιβράδυνση και υποχώρηση ρομπότ), οι οποίες μπορούν να γενικευτούν και δεν περιορίζονται στο συγκεκριμένο συνεργατικό σενάριο.

Τέλος, όσον αφορά την ουσιαστική συνεισφορά της δημιουργηθείσας εφαρμογής στο ερευνητικό ερώτημα της αποτελεσματικότητας της διαδραστικής ΕΠ σε συνεργατικά καθήκοντα A-P, τα αποτελέσματα των δοκιμών απαντούν θετικά και συγκεκριμένα δείχνουν ότι:

- η κατάσταση της συνεργασίας A-P και τα κυριότερα χαρακτηριστικά αυτής *μπορούν να αναπαραχθούν* με επιτυχία από το διαδραστικό ΕΠε
- το διαδραστικό ΕΠε *γίνεται αποδεκτό* από την πλευρά του χρήστη ως ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τη διερεύνηση της συνεργασίας A-P

10.4.2. Μελλοντικές επεκτάσεις

Στην παρούσα Ενότητα συγκεντρώνονται προτάσεις από επιμέρους τμήματα του κειμένου, τα οποία αφορούν την πληρότητα ή την επεκτασιμότητα του ΕΠε και προσφέρονται για μελλοντική διερεύνηση.

Το δημιουργηθέν ΕΠε είναι ολοκληρωμένο και λειτουργικό, περιλαμβάνει το μοντέλο ενός ανθρωποειδούς (αναπαράσταση του χρήστη) και ενός βιομηχανικού ρομπότ, και προσφέρεται ως μία πλατφόρμα δοκιμών της συνεργασίας A-P. Μπορεί, λοιπόν, να γίνει πληθώρα νέων δοκιμών με χρήστες, με νέα σενάρια εργασίας A-P, νέες τεχνικές ασφάλειας κ.ά. Επίσης μπορούν να γίνουν συγκριτικές δοκιμές των παραμέτρων της συνεργασίας, όπως π.χ. προφίλ ταχύτητας, τροχιά, μορφή ρομπότ, τύπος συνεργασίας κλπ. Για παράδειγμα, παρουσιάζει ενδιαφέρον να γίνουν δοκιμές σε πιο συνεργατικά σενάρια, με εντονότερη αλληλεπίδραση και συνέργεια, π.χ. η από κοινού συναρμολόγηση μηχανολογικών εξαρτημάτων τα οποία απαιτούν συγκεκριμένη σειρά, φορά και προσανατολισμό συγκράτησης για τη συναρμολόγησή τους.

Επίσης, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η δοκιμή διαφορετικών εναλλακτικών τροχιών, οι οποίες θα υπολογίζονται δυναμικά, με βάση διαφορετικά κριτήρια ασφάλειας και με λογική ανάστροφης κινηματικής. Συνεπώς, θα δημιουργηθεί μια πλατφόρμα για πειραματισμό με το δυναμικό υπολογισμό τροχιάς και τις επιπτώσεις του στη συνεργασία A-P.

Τα μέχρι τώρα αποτελέσματα από τη χρήση των τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας που σχετίζονται με την ασφάλεια του χρήστη είναι εξαιρετικά θετικά, αλλά τα κριτήρια ενεργοποίησης και τα χαρακτηριστικά μεγέθη των τεχνικών ασφαλούς

συνεργασίας, πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω. Μία πρόταση είναι η διερεύνηση της χρήσης μετρικών φυσιολογίας (π.χ. καρδιακός ρυθμός, ηλεκτρική αγωγιμότητα δέρματος) ή χρήση συνδυαστικών μετρικών απόδοσης (combined scores) για την επαλήθευση των μέχρι τώρα αποτελεσμάτων που αφορούν στην εμπειρία του χρήστη.

Επίσης, εκκρεμεί η ολοκλήρωση των δοκιμών χρηστών για τη διερεύνηση της δεύτερης ερευνητικής προβληματικής (αποτελεσματικότητα των γνωστικών βοηθημάτων), οι οποίες δεν κατέστη δυνατόν να ολοκληρωθούν και μπορούν να υλοποιηθούν σε επόμενη φάση. Η μέχρι τώρα διερεύνηση της δεύτερης προβληματικής έγινε μόνον όσον αφορά το σκέλος της υποκειμενικής προτίμησης των χρηστών (αυτο-αξιολόγηση) και εκκρεμεί η διεξαγωγή πειραμάτων συγκρίσεως. Στα πειράματα αυτά μπορεί να διερευνηθεί η επίδραση των διαφορετικών γνωστικών βοηθημάτων στη μεταφορά γνώσης (εκπαίδευση), στην ασφάλεια της συνεργασίας και στο γνωστικό φορτίο.

Για την πληρέστερη διερεύνηση της εμπειρίας του χρήστη στο ΕΠε, προτείνονται συγκριτικές δοκιμές με άλλα συστήματα στερεοσκοπικής προβολής (π.χ. με 3D προβολέα). Έχει ενδιαφέρον η διερεύνηση της επίπτωσης της στερεοσκοπίας στην εμπλοκή και την παρουσία του χρήστη, και η διερεύνηση της εκτέλεσης δοκιμών χωρίς τους περιορισμούς κίνησης της κάσκας στερεοσκοπίας (ζαλάδα, κιναισθητικές ανακολουθίες, καλώδια, κλπ)

Η διεξαγωγή πειραμάτων συγκρίσεως με δοκιμές σε πραγματικό περιβάλλον θα ήταν ιδανική για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων που αφορούν την αποτελεσματικότητα των τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας, τη συμπεριφορά του χρήστη (μεταφορά της γνώσης στο πραγματικό καθήκον), αλλά και την ίδια την επάρκεια των δοκιμών σε ΕΠε.

Στη μελλοντική έκδοση του ΕΠε, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην κινηματική του ρομπότ τα ιδιόμορφα σημεία (singularities) και ιδανικά να αποφεύγονται, για την ασφαλέστερη συνεργασία A-P. Αυτό θα μπορούσε να υλοποιηθεί είτε παθητικά (π.χ. να προειδοποιείται ο χρήστης όταν το ρομπότ πλησιάζει ένα ιδιόμορφο σημείο), ή ενεργητικά (να υπολογίζονται τα ιδιόμορφα σημεία στο εικονικό περιβάλλον και να σχεδιάζεται ανάλογα η συνεργατική τροχιά).

Επίσης, με βάση τα ζητήματα που αναδείχθηκαν και αφορούν την αναγνώριση κίνησης του χρήστη, είναι εξαιρετικής σημασίας η επίλυση των παρατηρηθέντων προβλημάτων, ώστε να μειωθεί σε ανεκτά επίπεδα, ή να εξαλειφθεί, η αισθανόμενη δυσφορία και η ζάλη. Όσον αφορά το σχεδιασμό της αναγνώρισης κίνησης, πρέπει να προβλεφθεί η δυνατότητα παραμετροποίησης και προσαρμογής του μεγέθους του ανθρωποειδούς στο μέγεθος του κάθε χρήστη (π.χ. ύψος, μέγεθος σκελετού κλπ) για τη βελτίωση της ποιότητας της αναγνώρισης κίνησης και για την αποφυγή του ανεπιθύμητου τρέμουλου. Ακόμα, πρέπει να διερευνηθεί η χρήση νέων συσκευών (αισθητήρων) που προσφέρουν βελτιωμένες δυνατότητες αναγνώρισης κίνησης (π.χ. Kinect for Xbox One, Leap Motion), ώστε να είναι δυνατή η αναγνώριση και η

παρακολούθηση όλων των κινήσεων και των περιστροφών των χεριών (π.χ. περιστροφές του καρπού και των δακτύλων, οι οποίες δεν υποστηρίζονται στην τρέχουσα έκδοση) και να περιορισθούν κατ' αυτό τον τρόπο οι κιναισθητικές ανακολουθίες.

11.Βιβλιογραφία

- Adams, E. (2015). Out of the cage: Rethinking robotics. Retrieved August 28, 2015, from <http://goo.gl/dVxGNI>
- Akella, P., Peshkin, M., Colgate, E., Wannasuphprasit, W., Nagesh, N., Wells, J., ... Peacock, B. (1999). Cobots for the automobile assembly line. In *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C)* (Vol. 1, pp. 728-733). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ROBOT.1999.770061>
- Alami, R., Bicchi, A., Bischoff, R., Chatila, R., Luca, A. De, & Santis, A. De. (2006). Safe and Dependable Physical Human-Robot Interaction in Anthropic Domains : State of the Art and Challenges. In A. Bicchi, A., De Luca (Ed.), *In Proceedings IROS Workshop on pHRI - Physical Human-Robot Interaction in Anthropic Domains*. Retrieved from <http://homepages.laas.fr/guiochet/telecharge/IROS06workshop.pdf>
- Alami, R., Gharbi, M., Vadant, B., Lallement, R., & Suarez, A. (2014). On human-aware task and motion planning abilities for a teammate robot. In *Human-Robot Collaboration for Industrial Manufacturing Workshop, RSS 2014*.
- André, T., Plégat-Soutjis, F., Camps, J.-F., Amiel, A., Lutz, G., & Morcillo, A. (2003). Utilité, utilisabilité, acceptabilité : interpréter les relations entre trois dimensions de l'évaluation des EIAH. In *Actes de la conférence EIAH 2003 (Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain 2003)* (pp. 391-402). ATIEF/INRP.
- ANSI/RIA R15.06-2012. (2012). *Industrial Robots and Robot Systems - Safety Requirements*.
- Avizienis, A., Laprie, J.-C., Randell, B., & Landwehr, C. (2004). Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 1(1), 11-33. <http://doi.org/10.1109/TDSC.2004.2>
- Barcellini, F. (2015). Vers une construction de la coopération Humains-Robot. Approche de l'ergonomie constructive. In *Séminaire Mines Paris Tech - PSA: Les défis de la collaboration Homme-Robot* (p. 31). Paris, France.
- Bardy, B. G. (2011). Learning new skills in Multimodal Enactive Environments. In *BIO Web of Conferences* (Vol. 1, p. 00008). <http://doi.org/10.1051/bioconf/20110100008>
- Bartneck, C., Kulić, D., Croft, E., & Zoghbi, S. (2009). Measurement Instruments for the Anthropomorphism, Animacy, Likeability, Perceived Intelligence, and Perceived Safety of Robots. *International Journal of Social Robotics*, 1(1), 71-81. <http://doi.org/10.1007/s12369-008-0001-3>
- Bethel, C. L., Salomon, K., Murphy, R. R., & Burke, J. L. (2007). Survey of Psychophysiology Measurements Applied to Human-Robot Interaction. In *ROMAN 2007 - The 16th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication* (pp. 732-737). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ROMAN.2007.4415182>
- Bischoff, R., Kurth, J., Schreiber, G., Koeppe, R., Albu-Schaeffer, A., Beyer, A., ...

- Hirzinger, G. (2010). The KUKA-DLR Lightweight Robot arm - a new reference platform for robotics research and manufacturing. In *Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK)* (pp. 1-8).
- Booch, G., Rumbaugh, J., & Jacobson, I. (2005). *The Unified Modeling Language User Guide* (2nd Editio). Addison-Wesley Professional.
- Bowman, D. A., Kruijff, E., LaViola, J. J., & Poupyrev, I. (2004). *3D User Interfaces: Theory and Practice*. Redwood City, CA, USA: Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- Bowman, D. A., McMahan, R. P., & Ragan, E. D. (2012). Questioning naturalism in 3D user interfaces. *Communications of the ACM*, 55(9), 78. <http://doi.org/10.1145/2330667.2330687>
- Burdea, G., & Coiffet, P. (2003). *Virtual Reality Technology* (2nd ed.). Wiley-Interscience. Retrieved from <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0471360899.html>
- Burkhardt, J.-M., Bardy, B., & Lourdeaux, D. (2003). Immersion , Réalisme et Présence dans la conception et l ' évaluation des Environnements Virtuels. *Psychologie Française*, 48(2), 35-42. Retrieved from <http://benoit-bardy.eu/medias/burkhardt-et-al-psycho-fran-03.pdf>
- Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., & Fuchs, P. (1999). Conception d'un système de RV pour la formation des agents de conduite aux opérations en milieu ferroviaire. In A. Richards & N. Grumbach (Eds.), *Colloque Réalité Virtuelle et Cognition, ENST* (pp. 123-132). Paris, France. Retrieved from <http://hal-ensmp.archives-ouvertes.fr/hal-00786694>
- Cavallo, F., Aquilano, M., Bonaccorsi, M., Mannari, I., Carrozza, M. C., & Dario, P. (2011). Multidisciplinary approach for developing a new robotic system for domiciliary assistance to elderly people. *Conference Proceedings: ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual Conference, 2011*, 5327-30. <http://doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6091318>
- Charoenseang, S., & Tonggoed, T. (2011). Human-Robot Collaboration with Augmented Reality. In C. Stephanidis (Ed.), *HCI International 2011 - Posters' Extended Abstracts* (Vol. 174, pp. 93-97). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. http://doi.org/10.1007/978-3-642-22095-1_19
- Chellali, M.-E.-A. (2009). *Etude des interactions homme-homme pour l'élaboration du référentiel commun dans les environnements virtuels collaboratifs*. UNIVERSITÉ DE NANTES.
- Chellali, R. (2009). Tele-operation and human robots interactions. In *Proc. of 18th IEEE Int. Symp. on Robot & Human Interactive Communication (RO-MAN 2009)*, Toyama, Japan.
- Choi, S., Jung, K., & Noh, S. D. (2015). Virtual reality applications in manufacturing industries: Past research, present findings, and future directions. *Concurrent Engineering*. <http://doi.org/10.1177/1063293X14568814>

- Colgate, J. E., Edward, J., Peshkin, M. A., & Wannasuphprasit, W. (1996). Cobots: Robots For Collaboration With Human Operators.
- Coradeschi, S., Cesta, a., Cortellessa, G., Coraci, L., Gonzalez, J., Karlsson, L., ... Otslund, B. (2013). GiraffPlus: Combining social interaction and long term monitoring for promoting independent living. *2013 6th International Conference on Human System Interactions (HSI)*, 578–585. <http://doi.org/10.1109/HSI.2013.6577883>
- Crison, F., Lecuyer, A., d Huart, D. M., Burkhardt, J., Michel, G., & Dautin, J. (2005). Virtual technical trainer: learning how to use milling machines with multi-sensory feedback in virtual reality. In *IEEE Proceedings. VR 2005. Virtual Reality, 2005.* (pp. 139–322). IEEE. <http://doi.org/10.1109/VR.2005.1492766>
- De Luca, A., & Flacco, F. (2012). Integrated control for pHRI: Collision avoidance, detection, reaction and collaboration. *Proceedings of the IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, 288–295. <http://doi.org/10.1109/BioRob.2012.6290917>
- De Santis, A., & Siciliano, B. (2008). SAFETY ISSUES FOR HUMAN-ROBOT COOPERATION IN MANUFACTURING SYSTEMS. In *VRTest 2008, Tools and Perspectives in Virtual Manufacturing*. Napoli, 10 July 2008 - Caserta, 11 July 2008.
- De Santis, A., Siciliano, B., De Luca, A., & Bicchi, A. (2008). An atlas of physical human-robot interaction. *Mechanism and Machine Theory*, 43(3), 253–270. <http://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2007.03.003>
- Deacon, J. (2005). *Object-oriented analysis and design: a pragmatic approach*. Pearson Addison Wesley.
- Dehais, F., Sisbot, E. A., Alami, R., & Causse, M. (2011). Physiological and subjective evaluation of a human-robot object hand-over task. *Applied Ergonomics*, 42(6), 785–791. <http://doi.org/10.1016/j.apergo.2010.12.005>
- Draper, J. V. (1995). Teleoperators for advanced manufacturing: Applications and human factors challenges. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 5(1), 53–85. <http://doi.org/10.1002/hfm.4530050105>
- Drury, J. L., Scholtz, J., & Yanco, H. A. (2003). Awareness in human-robot interactions. In *SMC'03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme - System Security and Assurance (Cat. No.03CH37483)* (Vol. 1, pp. 912–918). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICSMC.2003.1243931>
- Du, G., & Zhang, P. (2014). Markerless human-robot interface for dual robot manipulators using Kinect sensor. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 30(2), 150–159. <http://doi.org/10.1016/j.rcim.2013.09.003>
- Duffy, V. G., Or, C. K. L., & Lau, V. W. M. (2006). Perception of safe robot speed in virtual and real industrial environments. *Human Factors and Ergonomics In Manufacturing*, 16(4), 369–383.
- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1), 65–

84. <http://doi.org/10.1518/001872095779049499>

- Endsley, M. R. (2011). *Designing for situation awareness: An approach to user-centered design*. CRC Press. Retrieved from https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=eRPBkapAsggC&oi=fnd&pg=PP1&ots=dIKAB5mUIF&sig=cD4geXzoLdhl2wy2YZ3KrU_T994&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Evolver 3D digital avatar website. (2012). Retrieved from www.evolver.com
- Fang, H. C., Ong, S. K., & Nee, A. Y. C. (2014). A novel augmented reality-based interface for robot path planning. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 8(1), 33–42. <http://doi.org/10.1007/s12008-013-0191-2>
- Fuchs, P., Moreau, G., Arnaldi, B., & Guitton, P. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle Volume 4 - Applications de la Réalité Virtuelle*. Paris, France: Les Presses de l'École des Mines de Paris. Retrieved from <http://www.pressesdesmines.com/le-traite-de-la-realite-virtuelle-volume-4-les-applications-de-la-realite-virtuelle.html>
- Fuchs, P., Moreau, G., Burkhardt, J.-M., & Coquillart, S. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle Volume 2 - L'interfaçage, l'immersion et l'interaction en environnement virtuel*. Paris: Les Presses de l'École des Mines de Paris. Retrieved from <http://www.pressesdesmines.com/le-traite-de-la-realite-virtuelle-volume-2-l-interfaçage-l-immersion-et-l-interaction-en-environnement-virtuel.html>
- Gecks, T., & Henrich, D. (2004). Simero: camera supervised workspace for service robots. In *ASER 2004, 2nd Workshop on Advances in Service Robotics, Fraunhofer IPA*. Feldafing, Germany.
- Giesler, B., Steinhaus, P., Walther, M., & Dillmann, R. (2004). Sharing skills: using augmented reality for human-robot collaboration. In A. J. Woods, J. O. Merritt, S. A. Benton, & M. T. Bolas (Eds.), *Proc. SPIE 5291, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI* (pp. 446–453). <http://doi.org/10.1117/12.526689>
- Green, S. A., Chase, J. G., Chen, X., & Billingham, M. (2008). Evaluating the Augmented Reality Human-Robot collaboration system. In *15th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, M2VIP'08* (pp. 521–526).
- Green, S., Billingham, M., Chen, X., & Geoffrey, J. (2008). Human-Robot Collaboration: A Literature Review and Augmented Reality Approach in Design. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 5(1), 1–18. <http://doi.org/10.5772/5664>
- Haddadin, S. (2011). *Towards Safe Robots: Approaching Asimov's 1st Law*. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, Aachen. Retrieved from http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2011/3826/\nhttp://www.mendeley.com/research/towards-safe-robots-approaching-asimovs-1st-law/?utm_source=desktop&utm_medium=1.11&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId={efadca7e-3126-45f3-94c9-8542086f0
- Haddadin, S. (2015). Physical Safety in Robotics. In *Formal Modeling and Verification of*

- Cyber-Physical Systems* (pp. 249–271). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. http://doi.org/10.1007/978-3-658-09994-7_9
- Haddadin, S., Albu-Schaffer, a., & Hirzinger, G. (2009). Requirements for Safe Robots: Measurements, Analysis and New Insights. *The International Journal of Robotics Research*, 28(11-12), 1507–1527. <http://doi.org/10.1177/0278364909343970>
- Haddadin, S., Albu-Schäffer, A., & Hirzinger, G. (2010). Safe Physical Human-Robot Interaction: Measurements, Analysis and New Insights (pp. 395–407). http://doi.org/10.1007/978-3-642-14743-2_33
- Haddadin, S., Khoury, A., Rokahr, T., Parusel, S., Burgkart, R., Bicchi, A., & Albu-Schaffer, A. (2012). On making robots understand safety: Embedding injury knowledge into control. *The International Journal of Robotics Research*, 31(13), 1578–1602. <http://doi.org/10.1177/0278364912462256>
- Haddadin, S., Schaffer, A., & Hirzinger, G. (2007). Safety Evaluation of Physical Human-Robot Interaction via Crash-Testing. *Robotics: Science and Systems Conference (RSS 2007)*. Retrieved from http://www.phriends.org/RSS_07b.pdf
- Haddadin, S., Suppa, M., Fuchs, S., Bodenmüller, T., Albu-Schäffer, A., & Hirzinger, G. (2011). Towards the Robotic Co-Worker (pp. 261–282). http://doi.org/10.1007/978-3-642-19457-3_16
- Hamner, B., Koterba, S., Shi, J., Simmons, R., & Singh, S. (2010). An autonomous mobile manipulator for assembly tasks. *Autonomous Robots*, 28(1), 131–149. <http://doi.org/10.1007/s10514-009-9142-y>
- Helander, M. G. (1990). Ergonomics and safety considerations in the design of robotics workplaces: A review and some priorities for research. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 6(2), 127–149. [http://doi.org/10.1016/0169-8141\(90\)90018-W](http://doi.org/10.1016/0169-8141(90)90018-W)
- Helms, E., Schraft, R. D., & Hagele, M. (2002). rob@work: Robot assistant in industrial environments. In *Proceedings. 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication* (pp. 399–404). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ROMAN.2002.1045655>
- Heyer, C. (2010). Human-robot interaction and future industrial robotics applications. In *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 4749–4754). IEEE. <http://doi.org/10.1109/IROS.2010.5651294>
- Hoffman, G., & Breazeal, C. (2007). Effects of anticipatory action on human-robot teamwork efficiency, fluency, and perception of team. *Proceeding of the ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction - HRI '07*, 1–8. <http://doi.org/10.1145/1228716.1228718>
- Huang, C., Cakmak, M., & Mutlu, B. (2015). Adaptive Coordination Strategies for. In *2015 Robotics: Science and Systems Conference (RSS 2015), July 13-17 2015, Sapienza University of Rome, Italy*.
- Huber, M., Radrich, H., Wendt, C., Rickert, M., Knoll, A., Brandt, T., & Glasauer, S. (2009). Evaluation of a novel biologically inspired trajectory generator in

- human-robot interaction. In *Proceedings - IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication* (pp. 639–644). <http://doi.org/10.1109/ROMAN.2009.5326233>
- Hugues, O., Weistroffer, V., Paljic, A., Fuchs, P., Karim, A. A., Gaudin, T., & Buendia, A. (2015). Determining the Important Subjective Criteria in the Perception of Human-Like Robot Movements Using Virtual Reality. *International Journal of Humanoid Robotics*, (August), 1550033. <http://doi.org/10.1142/S0219843615500334>
- Ikuta, K., Ishii, H., & Nokata, M. (2003). Safety Evaluation Method of Design and Control for Human-Care Robots. *The International Journal of Robotics Research*, 22(5), 281–297. <http://doi.org/10.1177/0278364903022005001>
- Iossifidis, I., Bruckhoff, C., Theis, C., Grote, C., Faubel, C., & Schoner, G. (2002). CORA: An anthropomorphic robot assistant for human environment. In *Proceedings. 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication* (pp. 392–398). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ROMAN.2002.1045654>
- ISO 10218-1:2011. (2011). *Robots and robotic devices -- Safety requirements for industrial robots -- Part 1: Robots*. Retrieved from http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=51330
- ISO 10218-2:2011. (2011). *Robots and robotic devices -- Safety requirements for industrial robots -- Part 2: Robot systems and integration*. Retrieved from http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?ics1=25&ics2=040&ics3=30&csnumber=41571
- Jennett, C., Cox, A. L., Cairns, P., Dhoparee, S., Epps, A., Tijs, T., & Walton, A. (2008). Measuring and defining the experience of immersion in games. *International Journal of Human Computer Studies*, 66(9), 641–661. <http://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2008.04.004>
- Kazerooni, H. (1996). The human power amplifier technology at the University of California, Berkeley. *Robotics and Autonomous Systems*, 19(2), 179–187. [http://doi.org/10.1016/S0921-8890\(96\)00045-0](http://doi.org/10.1016/S0921-8890(96)00045-0)
- Kettner, L. (1995). *A classification scheme of 3d interaction techniques*. Berlin.
- Khan, W. A., Raouf, A., & Cheng, K. (2011). *Virtual Manufacturing*. London: Springer London. <http://doi.org/10.1007/978-0-85729-186-8>
- Khatib, O. (1999). Mobile manipulation: The robotic assistant. *Robotics and Autonomous Systems*, 26(2-3), 175–183. [http://doi.org/10.1016/S0921-8890\(98\)00067-0](http://doi.org/10.1016/S0921-8890(98)00067-0)
- Kilteni, K., Groten, R., & Slater, M. (2012). The Sense of Embodiment in Virtual Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 21(4), 373–387. http://doi.org/10.1162/PRES_a_00124
- Kilteni, K., Maselli, A., Kording, K. P., & Slater, M. (2015). Over my fake body: body ownership illusions for studying the multisensory basis of own-body

perception. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9.
<http://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00141>

- Kosuge, K., Sato, M., & Kazamura, N. (2000). Mobile robot helper. In *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)* (Vol. 1, pp. 583–588). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ROBOT.2000.844116>
- Krüger, J., Lien, T. K., & Verl, A. (2009). Cooperation of human and machines in assembly lines. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(2), 628–646. <http://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.009>
- Kulic, D., & Croft, E. (2007). Physiological and subjective responses to articulated robot motion. *Robotica*, 25(01), 13. <http://doi.org/10.1017/S0263574706002955>
- Kulić, D., & Croft, E. (2007). Pre-collision safety strategies for human-robot interaction. *Autonomous Robots*, 22(2), 149–164. <http://doi.org/10.1007/s10514-006-9009-4>
- Lackey, S. J., Maraj, C. S., & Barber, D. J. (2014). IMMERSION, PRESENCE, AND FLOW IN ROBOT-AIDED ISR SIMULATION-BASED TRAINING. In *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference* (pp. 3584–3595). IEEE Press.
- Lasota, P. A., & Shah, J. A. (2015). Analyzing the Effects of Human-Aware Motion Planning on Close-Proximity Human-Robot Collaboration. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 57, 21–33. <http://doi.org/10.1177/0018720814565188>
- Lenz, C., & Knoll, A. (2014). Mechanisms and capabilities for human robot collaboration. In *The 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication* (pp. 666–671). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ROMAN.2014.6926329>
- Lin, F., Ye, L., Duffy, V., & Su, C.-J. (2002). Developing virtual environments for industrial training. *Information Sciences*, 140(1-2), 153–170. [http://doi.org/10.1016/S0020-0255\(01\)00185-2](http://doi.org/10.1016/S0020-0255(01)00185-2)
- Malm, T., Viitaniemi, J., Latokartano, J., Lind, S., Venho-Ahonen, O., & Schabel, J. (2010). Safety of Interactive Robotics—Learning from Accidents. *International Journal of Social Robotics*, 2(3), 221–227. <http://doi.org/10.1007/s12369-010-0057-8>
- Matsas, E., Batras, D., & Vosniakos, G. (2013a). Beware of the Robot: A Highly Interactive and Immersive Virtual Reality Training Application in Robotic Manufacturing Systems. In C. Emmanouilidis, M. Taisch, & D. Kiritsis (Eds.), *Advances in Production Management Systems. Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services* (Vol. 397, pp. 606–613). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. http://doi.org/10.1007/978-3-642-40352-1_76
- Matsas, E., Batras, D., & Vosniakos, G.-C. (2013b). Beware of the Robot: A Highly Interactive and Immersive Virtual Reality Training Application in Robotic Manufacturing Systems. In C. Emmanouilidis, M. Taisch, & D. Kiritsis (Eds.), *Advances in Production Management Systems. Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services SE* - 76 (Vol. 397, pp. 606–613). Springer Berlin

Heidelberg. http://doi.org/10.1007/978-3-642-40352-1_76

- Matsas, E., & Vosniakos, G.-C. (2015). Design of a virtual reality training system for human-robot collaboration in manufacturing tasks. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1-15. <http://doi.org/10.1007/s12008-015-0259-2>
- Matthias, B. (2015). New safety standards for collaborative robots , ABB YuMi dual-arm robot. In *IROS 2015, Workshop "Robotic co-workers - methods, challenges and industrial test cases."* Hamburg, Germany.
- Mazuryk, T., & Gervautz, M. (1996). *Virtual Reality History, Applications, Technology and Future*. Favoritenstrasse 9-11/186, A-1040 Vienna, Austria. Retrieved from <http://www.cg.tuwien.ac.at/research/publications/1996/mazuryk-1996-VRH/>
- Meguenani, A., Padois, V., Bidaud, P., Meguenani, A., Padois, V., Bidaud, P., ... Bidaud, P. (2015). Control of robots sharing their workspace with humans : an energetic approach to safety. In *IROS 2015, Sep 2015, Hamburg, Germany* (p. 7).
- Mestre, D., Ewald, M., & Maiano, C. (2011). Virtual reality and exercise: behavioral and psychological effects of visual feedback. *Studies in Health Technology and ...*, (October), 4-9. <http://doi.org/10.3233/978-1-60750-766-6-122>
- Mestre, D. R. (2015). On the usefulness of the concept of presence in virtual reality applications. In M. Dolinsky & I. E. McDowall (Eds.), (p. 93920J). <http://doi.org/10.1117/12.2075798>
- Michalos, G., Makris, S., Tsarouchi, P., Guasch, T., Kontovrakis, D., & Chryssolouris, G. (2015). Design Considerations for Safe Human-robot Collaborative Workplaces. *Procedia CIRP*, 37, 248-253. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.014>
- Miles, R. (2012). *Start here! Learn Microsoft Kinect API*. Sebastopol, California: O'Reilly Media Inc.
- Mori, M., MacDorman, K., & Kageki, N. (2012). The Uncanny Valley [From the Field]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19(2), 98-100. <http://doi.org/10.1109/MRA.2012.2192811>
- Nakamura, J., & Csikszentmihalyi, M. (2002). The concept of flow. *Handbook of Positive Psychology*, 89-105.
- Nathanael, D., Vosniakos, G.-C., & Mosialos, S. (2010). Cognitive task analysis for virtual reality training. In *Proceedings of the 28th Annual European Conference on Cognitive Ergonomics - ECCE '10* (p. 241). New York, New York, USA: ACM Press. <http://doi.org/10.1145/1962300.1962350>
- Neuhoefer, J. A., Bernhard, K., & Schlick, C. M. (2009). Embedded Augmented Reality Training System for Dynamic Human-Robot Cooperation. In *NATO RTO-MP-HFM-169. RTO Human Factors and Medicine Panel (HFM) Workshop, RDECOM* (pp. 1-14). Orlando, Florida, USA.
- Nielsen, J. (1993). *Usability Engineering*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann

Publishers Inc.

- Nonaka, S., Inoue, K., Arai, T., & Mae, Y. (2004). Evaluation of human sense of security for coexisting robots using virtual reality. 1st report: evaluation of pick and place motion of humanoid robots. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004* (pp. 2770–2775 Vol.3). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1307480>
- Ogorodnikova, O. (2010). *Human Robot Interaction : The Safety Challenge (An integrated frame work for human safety)*, PhD dissertation. Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Mechanical Engineering, Budapest.
- Ogrinc, M., Likar, N., Petri, T., Gams, A., & Ude, A. (2011). Control and collision avoidance for two Kuka LWR robots operated with the Kinect sensor. In *Proceedings of the RAAD 2011 20th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region* (pp. 5–10). Brno, Czech Republic.
- Or, C. K. L., Duffy, V. G., & Cheung, C. C. (2009). Perception of safe robot idle time in virtual reality and real industrial environments. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(5), 807–812.
- Ore, F. (2015). *HUMAN – INDUSTRIAL ROBOT COLLABORATION SIMULATION , VISUALISATION AND OPTIMISATION OF FUTURE ASSEMBLY WORKSTATIONS HUMAN – INDUSTRIAL ROBOT COLLABORATION*. Mälardalen University, Sweden.
- Ouramdane, N., Otmane, S., Davesne, F., & Mallem, M. (2006). FOLLOW-ME: a new 3D interaction technique based on virtual guides and granularity of interaction. In *Proceedings of the 2006 ACM international conference on Virtual reality continuum and its applications - VRCIA '06* (p. 137). New York, New York, USA: ACM Press. <http://doi.org/10.1145/1128923.1128945>
- Potter, K., Hagen, H., Kerren, A., & Dannenmann, P. (2006). Methods for presenting statistical information: The box plot. *Visualization of Large and Unstructured Data Sets*, 4, 97–106.
- Prothero, J. D., Parker, D. E., Furness III, T. A., & Wells, M. J. (1995). Towards a Robust, Quantitative Measure for Presence. In D. J. Garland & M. R. Endsley (Eds.), *Conference on Experimental Analysis and Measurement of Situational Awareness* (pp. 359–366). Embry-Riddle Aeronautical University Press. Retrieved from <http://www.hitl.washington.edu/publications/p-95-8/>
- Ragaglia, M., Bascetta, L., Rocco, P., & Zanchettin, A. M. (2014a). Integration of perception, control and injury knowledge for safe human-robot interaction. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 1196–1202). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907005>
- Ragaglia, M., Bascetta, L., Rocco, P., & Zanchettin, A. M. (2014b). Towards Safe Human-Robot Interaction: evaluating in real-time the severity of possible collisions in industrial scenarios. In *7th International Workshop on Human-Friendly Robotics (HFR 2014), October 23-24, 2014, Pontedera* (p. 2174).
- Rethink Robotics. (2013). Baxter Robot Overview. Retrieved from <http://goo.gl/fRUqou>

- Rickert, M., Foster, M. E., Giuliani, M., By, T., Panin, G., & Knoll, A. (2007). Integrating Language, Vision and Action for Human Robot Dialog Systems. In *Universal Access in Human-Computer Interaction. Ambient Interaction* (pp. 987–995). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. http://doi.org/10.1007/978-3-540-73281-5_108
- Sadrifaridpour, B., Saeidi, H., Wang, Y., & Burke, J. (2014). Modeling and Control of Trust in Human and Robot Collaborative Manufacturing. In *2014 AAAI Spring Symposium Series, The Intersection of Robust Intelligence and Trust in Autonomous Systems, March 24, 2014 – March 26, 2014* (pp. 64–70). Stanford University. Retrieved from <https://www.aaai.org/ocs/index.php/SSS/SSS14/paper/view/7679>
- Santos, P. G. de, Garcia, E., Sarria, J., Ponticelli, R., & Reviejo, J. (2010). A new manipulator structure for power-assist devices. *Industrial Robot: An International Journal*, 37(5), 452–458. <http://doi.org/10.1108/01439911011063272>
- Schlenoff, C., Pietromartire, A., Kootbally, Z., Balakirsky, S., & Foufou, S. (2013). Ontology-based state representations for intention recognition in human–robot collaborative environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(11), 1224–1234. <http://doi.org/10.1016/j.robot.2013.04.004>
- Schraft, R. D., Helms, E., Hans, M., & Thiemermann, S. (2004). Man-Machine-Interaction and co-operation for mobile and assisting robots. In *Proceedings of Fourth International ICSC Symposium on Engineering of Intelligent Systems (EIS 2004), Madeira, Portugal*.
- Schraft, R. D., Meyer, C., Parlitz, C., & Helms, E. (2005). PowerMate – A Safe and Intuitive Robot Assistant for Handling and Assembly Tasks. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 4074–4079). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570745>
- Schrempf, O. C., Hanebeck, U. D., Schmid, A. J., & Worn, H. (2005). A novel approach to proactive human-robot cooperation. In *ROMAN 2005. IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2005*. (pp. 555–560). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ROMAN.2005.1513838>
- Schuemie, M. J., van der Straaten, P., Krijn, M., & van der Mast, C. A. (2001). Research on presence in virtual reality: a survey. *Cyberpsychology & Behavior: The Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society*, 4(2), 183–201. <http://doi.org/10.1089/109493101300117884>
- Shi, J., Jimmerson, G., Pearson, T., & Menassa, R. (2012). Levels of human and robot collaboration for automotive manufacturing. In *Proceedings of the Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems - PerMIS '12* (p. 95). New York, New York, USA: ACM Press. <http://doi.org/10.1145/2393091.2393111>
- Slater, M. (1999). Measuring Presence: A Response to the Witmer and Singer Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5), 560–565. <http://doi.org/10.1162/105474699566477>
- Slater, M., Usoh, M., & Steed, A. (1994). Depth of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3(2), 130–144. Retrieved from

http://s3.amazonaws.com/publicationslist.org/data/melslater/ref-24/depth_of_presence.pdf

- Slater, M., Usoh, M., & Steed, A. (1995). Taking steps: the influence of a walking technique on presence in virtual reality. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 2(3), 201-219. <http://doi.org/10.1145/210079.210084>
- Slater, M., & Wilbur, S. (1997). A framework for immersive virtual environments (FIVE)... *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 6(6), 603. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=9716&login.asp&site=ehost-live&scope=site>
- Strassmair, C., Taylor, N. K., & Aylett, R. (2014). Human Robot Collaboration in production environments. In *23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication : RO-MAN 2014*.
- Su, J., Qiao, H., Xu, L., & Wang, M. (2015). A method of human-robot collaboration for grinding of workpieces. In *2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)* (pp. 1156-1161). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICMA.2015.7237649>
- Takatalo, J., Kawai, T., Kaistinen, J., Nyman, G., & Häkkinen, J. (2011). User Experience in 3D Stereoscopic Games. *Media Psychology*. <http://doi.org/10.1080/15213269.2011.620538>
- Tan, J. T. C., Duan, F., Zhang, Y., Watanabe, K., Kato, R., & Arai, T. (2009). Human-robot collaboration in cellular manufacturing: Design and development. In *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 29-34). IEEE. <http://doi.org/10.1109/IROS.2009.5354155>
- Unhelkar, V. V., Siu, H. C., & Shah, J. a. (2014). Comparative performance of human and mobile robotic assistants in collaborative fetch-and-deliver tasks. *Proceedings of the 2014 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction - HRI '14*, 82-89. <http://doi.org/10.1145/2559636.2559655>
- Usoh, M., Arthur, K., Whitton, M. C., Bastos, R., Steed, A., Slater, M., & Brooks, F. P. (1999). Walking > walking-in-place > flying, in virtual environments. In *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '99* (pp. 359-364). New York, New York, USA: ACM Press. <http://doi.org/10.1145/311535.311589>
- Usoh, M., Catena, E., Arman, S., & Slater, M. (2000). Using Presence Questionnaires in Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(5), 497-503. <http://doi.org/10.1162/105474600566989>
- Vasic, M., & Billard, A. (2013). Safety Issues in Human-Robot Interactions. In *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 6-10, 2013. Karlsruhe, Germany*.
- Vicentini, F., Matthias, B., & Barattini, P. (2014). Industrial Safety Requirements for Collaborative Robots and Applications. In *European Robotics Forum - ERF 2014 Workshop: Safety in Industrial Robotics: trends, integration and standards, 12-14 March 2014. Rovereto, Italy*. Retrieved from http://www.eu-robotics.net/cms/upload/euRobotics_Forum/ERF2014_presentations/day_2/I

- Vora, J., Nair, S., Gramopadhye, A. K., Duchowski, A. T., Melloy, B. J., & Kanki, B. (2002). Using virtual reality technology for aircraft visual inspection training: presence and comparison studies. *Applied Ergonomics*, 33(6), 559–70. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12507340>
- Vosniakos, G.-C., & Gogouvtis, X. V. (2014). Structured design of flexibly automated manufacturing cells through semantic models and petri nets in a virtual reality environment. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. <http://doi.org/10.1007/s12008-013-0202-3>
- Vosniakos, G.-C., & Matsas, E. (2006). Feasibility issues in robotic milling. In *17th DAAAM Symposium, At Vienna, Austria* (pp. 2–3).
- Weistroffer, V. (2014). *Étude des Conditions d'Acceptabilité de la Collaboration Homme-Robot en utilisant la Réalité Virtuelle*. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Weistroffer, V., Paljic, A., Callebert, L., & Fuchs, P. (2013). A methodology to assess the acceptability of human-robot collaboration using virtual reality. In *Proceedings of the 19th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology - VRST '13* (p. 39). New York, New York, USA: ACM Press. <http://doi.org/10.1145/2503713.2503726>
- Weistroffer, V., Paljic, A., Fuchs, P., Hugues, O., Chodacki, J., Ligot, P., & Morais, A. (2014). Assessing the acceptability of human-robot co-presence on assembly lines: A comparison between actual situations and their virtual reality counterparts. In *The 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication* (pp. 377–384). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ROMAN.2014.6926282>
- Wickens, C. D. (2008). Situation awareness: review of Mica Endsley's 1995 articles on situation awareness theory and measurement. *Human Factors*, 50(3), 397–403. <http://doi.org/10.1518/001872008X288420>.
- Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments Virtual Environments*, 7(3), 225–240. <http://doi.org/10.1162/105474698565686>
- Yamada, Y., Hirasawa, Y., Huang, S. Y., & Umetani, Y. (1996). Fail-safe human/robot contact in the safety space. In *Proceedings 5th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication. RO-MAN'96 TSUKUBA* (pp. 59–64). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ROMAN.1996.568748>
- Yang, U., & Kim, G. J. (2002). Implementation and Evaluation of “Just Follow Me”: An Immersive, VR-Based, Motion-Training System. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 11(3), 304–323. <http://doi.org/10.1162/105474602317473240>
- Zanchettin, A. M., Bascetta, L., & Rocco, P. (2013). Acceptability of robotic manipulators in shared working environments through human-like redundancy resolution. *Applied Ergonomics*, 44(6), 982–989. <http://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.03.028>

Zanchettin, A. M., Ceriani, N. M., Rocco, P., Ding, H., & Matthias, B. (2015). Safety in Human-Robot Collaborative Manufacturing Environments: Metrics and Control. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 1-12. <http://doi.org/10.1109/TASE.2015.2412256>