



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Διδακτορική Διατριβή

*«Εικονικά Συστήματα Κατεργασιών Βασισμένα
σε Ευφυή Αντικείμενα»*

Ξενοφών Β. Γωγουβίτης

Επιβλέπων:

Αναπληρωτής Καθηγητής Γεώργιος-Χριστόφορος Βοσνιάκος

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2010

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση μιας διδακτορικής διατριβής αποτελεί μια επίπονη διαδικασία που απαιτεί μεγάλα αποθέματα υπομονής και επιμονής. Δεδομένου ότι η διαδρομή είναι ως επί το πλείστον μοναχική, η ύπαρξη συνοδοιπόρων αποκτά ιδιαίτερη σημασία· χωρίς αυτούς, το αποτέλεσμα της προσπάθειας δεν θα ήταν το ίδιο. Για αυτό το λόγο, ως ελάχιστη ανταπόδοση, αισθάνομαι την ανάγκη να τους ευχαριστήσω.

Κατ' αρχήν, οφείλω να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή κ. Γεώργιο-Χριστόφορο Βοσνιάκο για όλα όσα μου προσέφερε από την αρχή της συνεργασίας μας μέχρι την ολοκλήρωση της διατριβής. Η εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διατριβής, σε συνδυασμό με την καθοδήγηση και την ουσιαστική βοήθεια, μου επέτρεψαν να εργαστώ απερίσπαστος, παρά τα όποια προβλήματα προέκυπταν από εξωγενείς παράγοντες. Εν ολίγοις, δικαιολόγησε απόλυτα τον τίτλο του *Doktorvater*, και για αυτό τον ευχαριστώ ειλικρινά.

Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω τον Δρ. Στέλιο Μπεκίρο για τις μακροσκελείς συζητήσεις, οι οποίες αποτέλεσαν το έναυσμα για την ανάληψη της παρούσης διδακτορικής διατριβής.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τους φίλους και συνεργάτες από το Εργαστήριο Κατεργασιών των Υλικών, και συγκεκριμένα τους Δρ. Τίτο Γιαννακάκη και Δρ. Πανώριο Μπενάρδο, καθώς και τους κ.κ. Νικόλαο Κοντολάτη και Ηλία Μάτσα, για την άψογη συνεργασία σε σειρά θεμάτων, αλλά και για την υποστήριξη που απλόχερα προσέφεραν. Ομοίως, οφείλω να ευχαριστήσω και τους διπλωματικούς φοιτητές με τους οποίους συνεργάστηκα σε αυτό το διάστημα, για την φρέσκια ματιά τους απέναντι στο αντικείμενο της Μηχανολογίας, αλλά και γιατί μου επέτρεψαν να λειτουργήσω συμβουλευτικά επί του αντικειμένου των διπλωματικών τους εργασιών.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Βασίλειο και Μελίνα, και τον αδερφό μου, Σπύρο, για την διαρκή και ουσιαστική υποστήριξή τους. Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω την σύζυγό μου, Σόνια, που με ανέχτηκε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής, δεχόμενη να εκτελέσει μέρος των πατρικών μου καθηκόντων, τα οποία αμελούσα κατ' εξακολούθηση, απόρροια της απουσίας μου και του άστατου ωραρίου που απαιτούσε η ολοκλήρωση της παρούσης διατριβής.

Στον υιό μου, Βασίλη

Περίληψη

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αφορά στην μοντελοποίηση συστημάτων κατεργασιών σε εικονικά περιβάλλοντα με χρήση ευφυών αντικειμένων. Λόγω της φύσης του αντικειμένου, εκτός από την περιοχή των συστημάτων κατεργασιών, η διατριβή εκτείνεται σε αρκετές ερευνητικές περιοχές.

Κύρια απαίτηση στην ανάλυση ενός συστήματος αποτελεί η κατηγοριοποίηση / ταξινόμηση των αντικειμένων που αποτελούν ένα ΣΚ, ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία μοντέλων για περαιτέρω ανάλυση. Ερευνητική περιοχή που ασχολείται ακριβώς με την ανάλυση των αντικειμένων και την δημιουργία κόσμων είναι η περιοχή των σημασιολογικών μοντέλων. Επίσης σημαντικό ζήτημα αποτελεί η εικονοποίηση του μοντέλου ενός ΣΚ και η διάδραση με τον χρήστη μέσω προηγμένης μορφής διεπιφανειών χρήστη-μηχανής, αντικείμενο που καλύπτει η περιοχή της εικονικής πραγματικότητας. Ακόμα ένα κεντρικό ζήτημα αφορά στην ενσωμάτωση ευφυΐας που πρέπει να έχουν τα αντικείμενα του εικονικού ΣΚ, κατά πόσον δηλαδή θα χρησιμοποιηθούν αλγόριθμοι και για την εκτέλεση ποιών εργασιών εντός του εικονικού συστήματος.

Κύριος στόχος της διατριβής είναι η δημιουργία μιας μεθοδολογίας που συνδυάζει στοιχεία από της προαναφερθείσες περιοχές και η υλοποίησή της, με τελικό αποτέλεσμα μια πιλοτική εφαρμογή που επιτρέπει την ανάλυση και προσομοίωση συστημάτων κατεργασιών μέσω εικονικού περιβάλλοντος. Το τελικό αποτέλεσμα πρέπει αφενός να προσθέτει διαφορετική οπτική στην ανάλυση και προσομοίωση ενός ΣΚ, με έμφαση στην καλύτερη ενσωμάτωση του χρήστη-αναλυτή, αφετέρου να προσβλέπει στην γενίκευση της πρακτικής σε παραπλήσιους τομείς που δύναται να επωφεληθούν. Σε συνδυασμό, δε, με την αρθρωτή δομή της μεθοδολογίας και την κάλυψη διαφορετικών επιπέδων ανάλυσης ενός ΣΚ (σχεδιασμού/ελέγχου), καθώς και της -άνευ ουσιαστικών περιορισμών- επεκτασιμότητας, καθίσταται σαφές ότι ενισχύεται σημαντικά ο ρόλος του χρήστη.

Στο πρώτο κεφάλαιο επιχειρείται μια ανασκόπηση των τμημάτων της ερευνητικής περιοχής, με έμφαση στον τομέα της εικονικής πραγματικότητας και στην χρήση της στην μηχανολογία και, συγκεκριμένα, στα συστήματα κατεργασιών. Επιπροσθέτως,

παρουσιάζεται η δομή της προτεινόμενης μεθοδολογίας που ακολουθεί η διδακτορική διατριβή.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσέγγιση της μοντελοποίησης μέσω σημασιολογικής ανάλυσης. Η προσέγγιση πραγματοποιείται από πάνω-προς-τα-κάτω, δηλαδή από το γενικότερο σημασιολογικό μοντέλο ενός μηχανολογικού εργοστασίου μέχρι τα αντικείμενα που εμφανίζονται σε ένα κύτταρο κατεργασιών. Παράλληλα, παρουσιάζονται τα διαφορετικά εννοιολογικά πλαίσια και ο τρόπος με τον οποίο επιδρούν στις διασυνδέσεις των αντικειμένων.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται λεπτομερώς οι αλγόριθμοι που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά των αντικειμένων. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ο αλγόριθμος της ευθείας και της αντίστροφης κινηματικής ανάλυσης των ρομποτικών βραχιόνων, καθώς και οι αλγόριθμοι που διέπουν τις κατεργασίες που λαμβάνουν χώρα στους τόνους. Επιπροσθέτως, παρουσιάζεται ο αλγόριθμος χωροταξικής τοποθέτησης των αντικειμένων εντός του κυττάρου κατεργασιών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την ανίχνευση συγκρούσεων μεταξύ αντικειμένων. Επεξηγείται πλήρως ο σχετικός αλγόριθμος, ο οποίος κάνει χρήση των οριακών κουτιών που περιβάλλουν τα αντικείμενα, καθώς και ο τρόπος εύρεσης του χώρου σύγκρουσης για τις διαφορετικές υποπεριπτώσεις.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται η προσέγγιση της δυναμικής του συστήματος κατεργασιών μέσω δικτύων *Petri*. Παρουσιάζεται το γενικότερο πλαίσιο των δικτύων, καθώς και οι κανόνες (μορφής *if-then*) που προκύπτουν, καλύπτοντας το συνολικό φάσμα των εργασιών που λαμβάνουν χώρα εντός του κυττάρου κατεργασιών.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το εικονικό περιβάλλον και η διάδραση του χρήστη με αυτό. Περιγράφεται η δομή, τα κυριότερα χαρακτηριστικά, και ο τρόπος λειτουργίας του, ενώ αναλύονται και τα διαφορετικά υποσυστήματα του (σχεδιασμού, λειτουργίας) και ο σχετικός εξοπλισμός.

Στο έβδομο κεφάλαιο περιγράφεται η πιλοτική εφαρμογή που υλοποιήθηκε. Παρουσιάζονται παραδείγματα χρήσης της τόσο στο επίπεδο σχεδιασμού ενός κυττάρου κατεργασιών, όσο και στην χρήση των αντικειμένων του κυττάρου για τυπικές εργασίες, όπως ο χειρισμός του υλικού από ρομποτικούς βραχίονες και η πραγματοποίηση κατεργασίας στους τόνους.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διδακτορικής διατριβής, με μία συνολική αποτίμηση τόσο της μεθοδολογίας όσο και της υλοποίησης των επιμέρους στοιχείων. Η διατριβή καταλήγει με εκτενή παρουσίαση των δυνατοτήτων επέκτασης του συστήματος.

Συμπερασματικά, η διατριβή προτείνει μια γενικευμένη μεθοδολογία μοντελοποίησης αντικειμένων που συναντώνται κατά την ανάλυση συστημάτων κατεργασιών, με έμφαση στον ρόλο του χρήστη εντός ενός εικονικού περιβάλλοντος. Η μεθοδολογία κάνει χρήση διαφορετικών εργαλείων για την δημιουργία του εικονικού κόσμου και την επίλυση προβλημάτων που προκύπτουν κατά την εικονοποίηση λειτουργικών αντικειμένων και την μεταξύ τους αλληλεπίδραση: τα σημασιολογικά μοντέλα προσφέρουν τον απαιτούμενο φορμαλισμό, οι κινηματικοί αλγόριθμοι ενισχύουν την λειτουργικότητα των αντικειμένων, η ανίχνευση συγκρούσεων υποδεικνύει στον χρήστη προβλήματα μεταξύ των αντικειμένων, τα δίκτυα *Petri* καλύπτουν τον τομέα συγχρονισμού των αντικειμένων. Συνολικά, η πιλοτική υλοποίηση ισορροπεί ανάμεσα στην αυτοματοποίηση διαδικασιών και στην ελευθερία επιλογών του χρήστη. Ταυτόχρονα, αποτελεί μια ικανή βάση για περαιτέρω επεκτάσεις είτε μέσω προσθήκης αντικειμένων είτε μέσω διεύρυνσης της εμπύθισης του χρήστη, αλλά και την συμμετοχή περισσότερων χρηστών ταυτόχρονα.

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος ΠΕΝΕΔ 2003 με τίτλο «Καινοτόμα Συστήματα Υποστήριξης Εικονικών Περιβαλλόντων» (κωδικός έργου 03ΕΔ217). Το έργο υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του Μέτρου 8.3 του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανταγωνιστικότητα» του Γ΄ Κοινοτικού Πλαισίου Στήριξης και συγχρηματοδοτήθηκε κατά:

- 80% της Δημοσίας Δαπάνης από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο
- 20% της Δημοσίας Δαπάνης από το Ελληνικό Δημόσιο – Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Ερευνητικό αντικείμενο	1
1.2	Σημασιολογικά μοντέλα.....	2
1.3	Προσομοίωση συστημάτων	4
1.4	Ευφή αντικείμενα	5
1.5	Εικονική πραγματικότητα	6
1.5.1	Ορισμός.....	6
1.5.2	Ιστορική αναδρομή.....	8
1.5.3	Σημερινή κατάσταση.....	11
1.5.4	Εικονική πραγματικότητα στην Μηχανολογία	14
1.5.5	Εικονική πραγματικότητα και συστήματα κατεργασιών	15
1.6	Μεθοδολογία.....	18
2	Σημασιολογικά μοντέλα.....	21
2.1	Εισαγωγή	21
2.2	Γενικό σημασιολογικό μοντέλο.....	21
2.3	Σημασιολογικά μοντέλα κυρίων μηχανών (<i>processing machine ontology</i>)	24
2.4	Σημασιολογικά μοντέλα βοηθητικών μηχανών (<i>handling machine ontology</i>)	25
2.5	Σημασιολογικά μοντέλα περιβάλλοντος (<i>environment ontology</i>).....	28
2.6	Σημασιολογικά μοντέλα εργασιών (<i>process ontology</i>).....	30
2.7	Εννοιολογικά πλαίσια.....	33
2.8	Η χρήση σημασιολογικών μοντέλων	36
3	Κινηματική και χωροταξία του συστήματος κατεργασιών	37
3.1	Ευθεία κινηματική ανάλυση ρομποτικών βραχιόνων 6R.....	37
3.1.1	Εισαγωγή	37

3.1.2	Υλοποίηση	38
3.2	Αντίστροφη κινηματική ανάλυση ρομποτικών βραχιόνων 6R	41
3.2.1	Εισαγωγή	41
3.2.2	Υλοποίηση	43
3.3	Τροχιά κίνησης ρομποτικού βραχίονα	49
3.4	Κινηματική τόνου CNC	51
3.5	Κινηματική παλετών επί μεταφορικών ταινιών	57
3.6	Χωροταξική τοποθέτηση αντικειμένων	60
4	Ανίχνευση συγκρούσεων	67
4.1	Εισαγωγή	67
4.2	Υλοποίηση	68
4.2.1	Έλεγχος I	70
4.2.2	Έλεγχος II	72
4.2.3	Έλεγχος III	73
Παράρτημα Α	76
A.1	Παράδειγμα 1 – Ένας άγνωστος (Κατηγορία I)	76
A.2	Παράδειγμα 2 – Δύο άγνωστοι (Κατηγορία ΙΙΓ)	76
A.3	Παράδειγμα 3 – Τρεις άγνωστοι (Κατηγορία ΙΙΙΒ)	78
A.4	Παράδειγμα 4 – Τρεις άγνωστοι (Κατηγορία ΙΙΙΕ)	80
5	Δυναμική του συστήματος.....	83
5.1	Μοντελοποίηση με δίκτυα <i>Petri</i>	83
5.2	Υλοποίηση	84
5.3	Ιδιότητες συγχρονισμένων δικτύων	87
6	Διάδραση με το εικονικό σύστημα.....	101
6.1	Εισαγωγή	101
6.2	Δομή περιβάλλοντος	101
6.2.1	Μοντελοποίηση αντικειμένων	102

6.2.2	Πυρήνας Εφαρμογών	103
6.2.3	Υπολογιστικό τμήμα.....	106
6.3	Υποσυστήματα διεπαφής.....	107
6.3.1	Παρατηρητήριο (<i>viewer</i>)	108
6.3.2	Υποσύστημα σχεδιασμού (<i>design module</i>).....	111
6.3.3	Υποσύστημα ελέγχου (<i>control module</i>).....	117
6.3.4	Υποσύστημα προσομοίωσης (<i>simulation module</i>)	125
6.3.5	Κάμερες	125
6.4	Εξοπλισμός.....	127
6.5	Επεκτασιμότητα	129
7	Πιλοτική εφαρμογή	133
7.1	Στοιχεία προγράμματος πιλοτικής εφαρμογής.....	133
7.2	Σενάρια χρήσης της εφαρμογής	136
7.2	Σχεδιασμός κυττάρου.....	137
7.3	Χρήση αντικειμένων κυττάρου	145
7.3.1	Εισαγωγή αρχικού υλικού στο σύστημα μέσω μεταφορικών ταινιών 1 & 2	145
7.3.2	Μεταφορά τεμαχίου από θέση εισόδου στον τόρνο 1.....	147
7.3.3	Κατεργασία (κοπή προσώπου & διαμήκης κοπή) του τεμαχίου στον <i>L1</i>	153
7.3.4	Εκφόρτωση του τεμαχίου από τον <i>L1</i> με χρήση του <i>R2</i>	156
7.3.5	Εναλλαγή του τεμαχίου από <i>R2</i> σε <i>R1</i>	156
7.3.6	Φόρτωση του τεμαχίου στον <i>L2</i> με χρήση του <i>R1</i> , κατεργασία του τεμαχίου στον <i>L2</i> , και εκφόρτωση του τεμαχίου από τον <i>L2</i> μέσω του <i>R1</i>	156
7.3.7	Τοποθέτηση του τεμαχίου στην παλέτα εξόδου	156
7.3.8	Έξοδος του τεμαχίου από το σύστημα.....	156
7.4	Η λειτουργία προσομοίωσης (<i>simulation</i>)	159
8	Συμπεράσματα	161
8.1	Εισαγωγή	161

8.2	Η μεθοδολογία	161
8.3	Επιμέρους στοιχεία	162
8.4	Η έμφαση στον χρήστη	164
8.5	Μελλοντικές επεκτάσεις.....	165
	Βιβλιογραφία	169

Εικόνες

Εικόνα 1-1. Virtual Factory Framework (Pedrazzoli, et al., 2007).....	17
Εικόνα 6-1. Παρατηρητήριο (viewer).....	110
Εικόνα 6-2. Επιλογές εικονοποίησης.....	112
Εικόνα 6-3. Διαφορετικοί τρόποι εμφάνισης ενός αντικειμένου.....	113
Εικόνα 6-4. Υποσύστημα σχεδιασμού ρομποτικού βραχίονα	114
Εικόνα 6-5. Υποσύστημα σχεδιασμού τόρνου CNC	115
Εικόνα 6-6. Υποσύστημα σχεδιασμού μεταφορικών ταινιών	116
Εικόνα 6-7. Υποσύστημα σχεδιασμού περιβάλλοντος.....	116
Εικόνα 6-8. Υποσύστημα σχεδιασμού προστατευτικού κιγκλιδώματος.....	117
Εικόνα 6-9. Συνολική εικόνα κυττάρου κατεργασιών	118
Εικόνα 6-10. Οθόνες LCD δεδομένων κίνησης / θέσης βραχίονα (<i>operation</i>)	119
Εικόνα 6-11. Βασικές επιλογές.....	119
Εικόνα 6-12. Χειροκίνητη λειτουργία βραχίονα	120
Εικόνα 6-13. Dragger ρομποτικού βραχίονα.....	121
Εικόνα 6-14. Αυτόματη λειτουργία βραχίονα.....	122
Εικόνα 6-15. Επιλογές εργασιών	122
Εικόνα 6-16. Επιπλέον επιλογές ρομποτικού βραχίονα	123
Εικόνα 6-17. LCD λειτουργίας τόρνου CNC.....	124
Εικόνα 6-18. Χειροκίνητη λειτουργία τόρνου CNC	124
Εικόνα 6-19. Αυτόματη λειτουργία τόρνου CNC	125
Εικόνα 6-20. Στοιχεία κατά την εκτέλεση κοπής	126
Εικόνα 6-21. Λειτουργία μεταφορικών ταινιών	127
Εικόνα 6-22. Μενού χρήσης καμερών.....	128
Εικόνα 6-23. Σταυρόνημα.....	129
Εικόνα 6-24. Γάντι P5.....	131
Εικόνα 6-25. Nintendo Wiimote	131
Εικόνα 7-1. Σχεδιασμός χώρου	138
Εικόνα 7-2. Εισαγωγή ρομποτικών βραχιόνων.....	139
Εικόνα 7-3. Εισαγωγή τόρνων CNC	141
Εικόνα 7-4. Εισαγωγή μεταφορικών ταινιών.....	142
Εικόνα 7-5. Εισαγωγή προστατευτικού κιγκλιδώματος	144

Εικόνα 7-6. Κίνηση στις μεταφορικές ταινίες	146
Εικόνα 7-7. Εκφόρτωση σημείου εισόδου από βραχίονα 1	149
Εικόνα 7-8. Φόρτωση τórνου 1 από βραχίονα 1	152
Εικόνα 7-9. Εύρεση σημείου αναφοράς (<i>Zero Set</i>)	154
Εικόνα 7-10. Κοπή προσώπου και διαμήκης κοπή.....	155
Εικόνα 7-11. Εκφόρτωση βραχίονα 2 από βραχίονα 1.....	157
Εικόνα 7-12. Φόρτωση σημείου εξόδου από βραχίονα 1	158
Εικόνα 7-13. Λειτουργία <i>simulation</i>	159

Πίνακες

Πίνακας 3-1. Παράμετροι D-H	39
Πίνακας 3-2. Υπολογισμός θέσεων έναρξης/λήξης κοπής (μία φάση)	53
Πίνακας 3-3. Μεταβολή διαστάσεων κυλίνδρων ανά φάση (κοπή προσώπου).....	56
Πίνακας 3-4. Υπολογισμός συντεταγμένων τοποθέτησης αντικειμένων κυττάρου.....	61
Πίνακας 3-5. Υπολογισμός διαστάσεων και συντεταγμένων τοποθέτησης ταινιών	62
Πίνακας 3-6. Αρχικές διαστάσεις και τοποθέτηση προστατευτικού κιγκλιδώματος.....	63
Πίνακας 3-7. Υπολογισμός διαστάσεων δομικών στοιχείων.....	63
Πίνακας 3-8. Υπολογισμός συντεταγμένων τοποθέτησης δομικών στοιχείων	64
Πίνακας 4-1. Υποπεριπτώσεις συστημάτων	74
Πίνακας 5-1. Θέσεις/μεταβάσεις γενικού δικτύου	90
Πίνακας 5-2. Θέσεις/μεταβάσεις γενικού δικτύου (συνέχεια).....	91
Πίνακας 5-3. Θέσεις/μεταβάσεις γενικού δικτύου (συνέχεια).....	92
Πίνακας 5-4. Θέσεις/μεταβάσεις γενικού δικτύου (συνέχεια).....	93
Πίνακας 5-5. Θέσεις/μεταβάσεις γενικού δικτύου (συνέχεια).....	94
Πίνακας 5-6. Θέσεις/μεταβάσεις ειδικού δικτύου	96
Πίνακας 5-7. Θέσεις/μεταβάσεις και συνθήκες/γεγονότα/εντολές: Παράδειγμα μετακίνησης ρομποτικού βραχίονα.....	101
Πίνακας 5-8. Αντιστοιχία κανόνων/γεγονότων: Παράδειγμα εισαγωγής τεμαχίου στο σύστημα και ξεφόρτωμα από ρομποτικό βραχίονα.....	102
Πίνακας 6-1. Κίνηση στο εικονικό περιβάλλον	111
Πίνακας 6-2. Χαρακτηριστικά ΠΣΠ	130
Πίνακας 7-1. Περιορισμοί αντικειμένων	136

Σχήματα

Σχήμα 1-1. Intelligent Virtual Manufacturing	2
Σχήμα 1-2. Αποτύπωση της προσέγγισης της διατριβής.....	18
Σχήμα 2-1. Γενικό σημασιολογικό μοντέλο συστήματος κατεργασιών.....	22
Σχήμα 2-2. Δομικό διάγραμμα συστήματος κατεργασιών.....	23
Σχήμα 2-3. Δομικό διάγραμμα τόρνου CNC	24
Σχήμα 2-4. Δομικό διάγραμμα ρομποτικού βραχίονα.....	26
Σχήμα 2-5. Δομικό διάγραμμα μεταφορικής ταινίας.....	27
Σχήμα 2-6. Δομικό διάγραμμα περιβάλλοντος.....	29
Σχήμα 2-7. Δομικό διάγραμμα κατεργασιών.....	31
Σχήμα 2-8. Λεπτομερειακό διάγραμμα κατεργασίας – μηχανής	32
Σχήμα 2-9. Διάγραμμα εννοιολογικών πλαισίων	34
Σχήμα 2-10. Διάγραμμα συνδέσεων εικονικού – πραγματικού ρομποτικού βραχίονα.....	35
Σχήμα 3-1. Βραχίονας έξι βαθμών ελευθερίας.....	37
Σχήμα 3-2. Τοποθέτηση συστημάτων συντεταγμένων	38
Σχήμα 3-3. Μεταφορά συστήματος συντεταγμένων	39
Σχήμα 3-4. Αλγόριθμος γραμμικής κίνησης.....	50
Σχήμα 3-5. Βρόγχος εύρεσης σημείων (κίνηση κατά X)	51
Σχήμα 3-6. Αλγόριθμος κινήσεων κοπής.....	52
Σχήμα 3-7. Βρόγχος εκτέλεσης κίνησης στην θέση ασφαλείας.....	53
Σχήμα 3-8. Βρόγχος εκτέλεσης κίνησης στην θέση-μηδέν	54
Σχήμα 3-9. Βρόγχος εκτέλεσης πάσου κοπής.....	55
Σχήμα 3-10. Αλλαγές διαστάσεων κυλίνδρων (κοπή προσώπου).....	56
Σχήμα 3-11. Γεωμετρικά μεγέθη μεταφορικής ταινίας	57
Σχήμα 3-12. Φάσεις κίνησης παλέτας για μετάβαση από ταινία (A) σε ταινία (B)	59
Σχήμα 3-13 Παράδειγμα τμημάτων τοίχου με άνοιγμα (βόρειος τοίχος)	64
Σχήμα 3-14. Κάτοψη δωματίου & κελιού κατά την αρχική τοποθέτηση των αντικειμένων	65
Σχήμα 4-1. Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου ανίχνευσης συγκρούσεων.....	69
Σχήμα 4-2. Έλεγχος I (περίπτωση A).....	71
Σχήμα 4-3. Έλεγχος I (περίπτωση B)	71
Σχήμα 4-4. Έλεγχος I (περίπτωση Γ)	72
Σχήμα 5-1. Γενικό δίκτυο Petri.....	89
Σχήμα 5-2. Ειδικό δίκτυο Petri.....	95

Σχήμα 5-3. Λεπτομέρεια <i>Petri</i>	102
Σχήμα 6-1. Δομή περιβάλλοντος	103
Σχήμα 6-2. Διάγραμμα ροής μοντελοποίησης αντικειμένων.....	104
Σχήμα 6-3. Πυρήνας εφαρμογών.....	105
Σχήμα 6-4. Παράδειγμα δέντρου γονέα – τέκνων	107
Σχήμα 6-5. Υπολογιστικό τμήμα	108
Σχήμα 7-1. Προγραμματιστική δομή.....	133
Σχήμα 7-2. Παράδειγμα μετάδοσης πληροφοριών χρήστη στο εικονικό αντικείμενο	135
Σχήμα 7-3. Ενέργειες βραχίονα (μεταφορά τεμαχίου εκτός θέσης εισόδου)	148
Σχήμα 7-4. Ενέργειες βραχίονα (μεταφορά τεμαχίου στον τόρνο)	151

1 Εισαγωγή

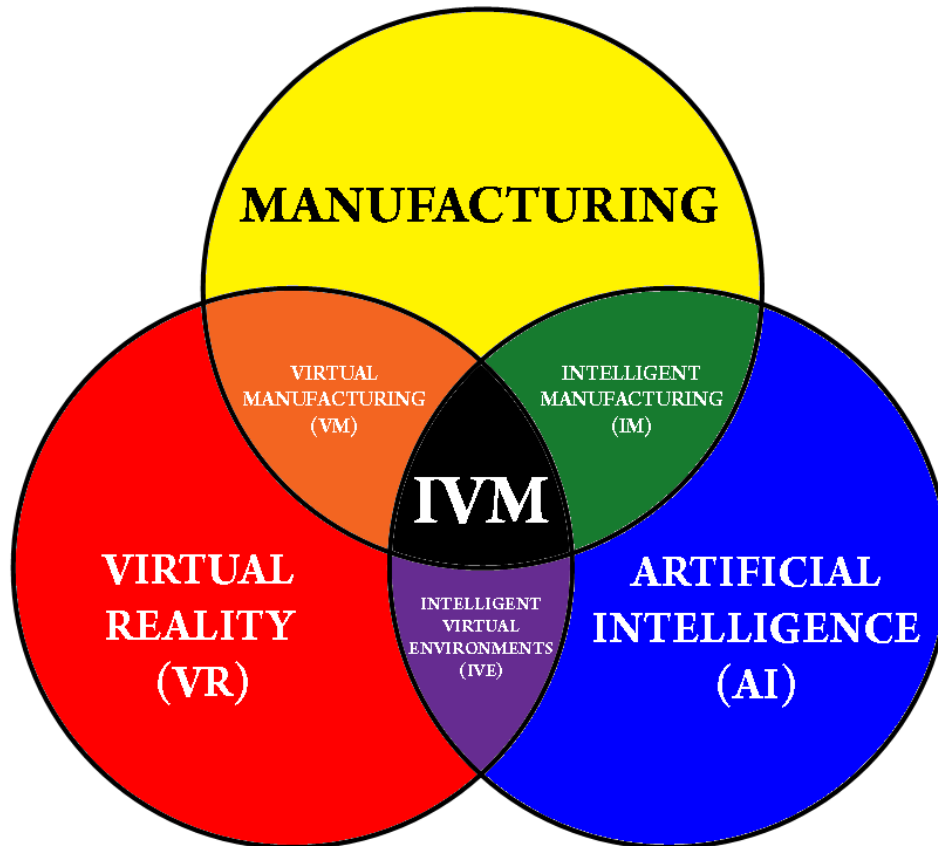
1.1 Ερευνητικό αντικείμενο

Αντικείμενο της παρούσης διατριβής είναι η μοντελοποίηση συστημάτων κατεργασιών με χρήση εικονικών ευφύων αντικειμένων. Η φύση του αντικειμένου είναι πρωτίστως συνεργατική και συνθετική μεταξύ διαφορετικών αντικειμένων. Συνεπώς, η διατριβή εκτείνεται σε αρκετές ερευνητικές περιοχές. Η βασική ερευνητική περιοχή αφορά στον σχεδιασμό και την λειτουργία των συστημάτων κατεργασιών (ΣΚ). Δεδομένης της πολυσυλεκτικότητας της ερευνητικής περιοχής, οι τρόποι προσέγγισης αναφέρονται σε διαφορετικά επίπεδα, που σχετίζονται άμεσα με την αφετηρία της προσέγγισης. Κύριο, όμως, χαρακτηριστικό όλων των επιπέδων είναι η απαίτηση για κατηγοριοποίηση / ταξινόμηση των αντικειμένων που αποτελούν ένα ΣΚ, ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία μοντέλων για περαιτέρω ανάλυση. Ερευνητική περιοχή που ασχολείται ακριβώς με την ανάλυση των αντικειμένων ενός κόσμου είναι η περιοχή των σημασιολογικών μοντέλων.

Επιπροσθέτως, υπάρχουν ακόμα δύο σημαντικά ζητήματα προς διερεύνηση. Κεντρικό ζήτημα είναι η εικονοποίηση του μοντέλου ενός ΣΚ και η διάδραση με τον χρήστη. Ερευνητική περιοχή που ασχολείται με προηγμένες μορφές διεπιφανειών χρήστη-μηχανής είναι η περιοχή της εικονικής πραγματικότητας. Έτερο ζήτημα αφορά στην ευφυΐα που πρέπει να έχουν τα αντικείμενα του εικονικού ΣΚ, κατά πόσον δηλαδή θα χρησιμοποιηθούν αλγόριθμοι και για την εκτέλεση ποιών εργασιών εντός του εικονικού συστήματος. Συνεπώς, το αντικείμενο μπορεί να χαρακτηριστεί ως ο κοινός τόπος μεταξύ Ευφυΐας (*Intelligence, I*), Εικονικότητας (*Virtual, V*) και Κατεργασιών (*Manufacturing, M*), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-1.

Λόγω της συνεχούς αύξησης της επικάλυψης μεταξύ διαφορετικών τομέων των επιστημών, πολλές προσεγγίσεις περιλαμβάνουν στοιχεία από τομείς όπως η επιστήμη των υπολογιστών και η πληροφορική, καθώς τα χαρακτηριστικά του πυρήνα του υπό μελέτη αντικειμένου δεν επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα, επειδή αναφέρονται, τελικά, σε συστήματα γενικότερα. Το γεγονός αυτό αυξάνει μεν το βαθμό δυσκολίας της υλοποίησης, παράλληλα όμως ενισχύει την γενικότητα της μεθοδολογίας της προσέγγισης και την ενσωμάτωση διαφορετικών πρακτικών, στοχεύοντας σε εφαρμογή της – μελλοντικά – είτε στην ίδια περιοχή, αλλά με διαφορετική αφετηρία, είτε σε περιοχές εκτός των ΣΚ. Επιπροσθέτως, η προσέγγιση ενισχύεται άμεσα από την ταχύτατη εξέλιξη των πληροφοριακών συστημάτων, καθιστώντας την υλοποίηση ανοιχτή σε επεμβάσεις / προσθήκες, εφόσον και όποτε αυτό

κριθεί απαραίτητο. Συνεπώς, ο στόχος της διατριβής είναι διττός: αφενός προσθέτει διαφορετική οπτική στην ανάλυση και προσομοίωση ενός ΣΚ, με έμφαση στην καλύτερη ενσωμάτωση του χρήστη-αναλυτή, αφετέρου προσβλέπει στην γενίκευση της πρακτικής σε παραπλήσιους τομείς που δύναται να επωφεληθούν.



Σχήμα 1-1. Intelligent Virtual Manufacturing

1.2 Σημασιολογικά μοντέλα

Διατομεακή περιοχή που ασχολείται κυρίως με την δημιουργία ενός φορμαλισμού ταξινόμησης αντικειμένων εντός συστημάτων (κόσμων) είναι η περιοχή των σημασιολογικών μοντέλων. Η έννοια της οντολογίας ξεκινάει από την φιλοσοφία και υιοθετήθηκε από πολλούς τομείς, κυρίως επιστημών της πληροφορικής και των υπολογιστών, καθώς και παρακλάδια τους, μέχρι της δημιουργίας ιδιαίτερης ερευνητικής περιοχής (*ontology engineering*).

Με τον όρο «σημασιολογικό μοντέλο», εννοούμε έναν τρόπο περιγραφής του κόσμου μέσα από αντικείμενα (*types*), χαρακτηριστικά (*properties*), και σχέσεις (*relationships*). Σκοπός είναι το τελικό μοντέλο να περιγράφει με ικανοποιητική σαφήνεια τον πραγματικό κόσμο

και, κατά κάποιο τρόπο, να συνδέεται με αυτόν. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι περιγραφής και – συνεπώς – και πολλά διαφορετικά μοντέλα, ανάλογα με τον φορμαλισμό που ακολουθείται κάθε φορά, ενώ έχουν δημιουργηθεί ειδικές/συγκεκριμένες οντολογίες για διαφορετικούς τομείς. Κατ’ αυτή την έννοια προκύπτει και ένας διαχωρισμός μεταξύ οντολογιών τομέα (*domain-specific ontology*) και ανώτερων οντολογιών (*upper ontologies*). η δεύτερη περίπτωση οντολογιών περιλαμβάνει στοιχεία που συναντώνται σε πολλούς τομείς και άρα είναι κοινά.

Παρόλο που οι περισσότερες εργασίες που πραγματεύονται οντολογίες περιγράφουν συστήματα που δεν έχουν άμεσα σχέση με τα ΣΚ, η χρησιμότητα των οντολογιών για την περιγραφή ΣΚ είναι προφανής. Ένα ΣΚ είναι ένας κόσμος που αποτελείται από αντικείμενα με χαρακτηριστικά, καταστάσεις, και αλληλεπιδράσεις. Επιπροσθέτως, εάν υπάρχει ένα αρκετά γενικό μοντέλο για να περιγράψει με σαφήνεια αντικείμενα που συναντώνται συνήθως σε ΣΚ, τότε είναι αρκετά εύκολο να περιγραφεί οποιαδήποτε πραγμάτωση (*instance*) οποιουδήποτε ΣΚ, καθώς είναι δυνατό να ελέγχονται τόσο επιμέρους αντικείμενα όσο και το ΣΚ στο σύνολό του. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατός, εν συνεχεία, τόσο ο σχεδιασμός ενός νέου κόσμου, με την απόδοση τιμών σε χαρακτηριστικά των αντικειμένων που σχετίζονται και με την τοποθέτηση τους στον χώρο, όσο και ο έλεγχος λειτουργίας του ΣΚ, μέσω των αλληλεπιδράσεων των αντικειμένων. Ανάλογα, δε, με τις επιλογές που γίνονται σε αυτή την φάση, ορίζεται και το επίπεδο λεπτομέρειας της ανάλυσης, άρα είναι δυνατή η δημιουργία του τρόπου λειτουργίας του ελεγκτή κάθε αντικειμένου, αλλά και του ΣΚ στο σύνολό του.

Ερευνητές του NIST (Schlenoff, et al., 1998) πρότειναν την δημιουργία μιας ουδέτερης, τυποποιημένης γλώσσας για κατηγοριοποίηση διεργασιών (*PSL*), στηριζόμενη στην αντίστοιχη οντολογία, η οποία θα χρησιμοποιηθεί ως ενδιάμεση γλώσσα για την ενσωμάτωση όλων των κατεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην παραγωγική διαδικασία. Πιο πρόσφατες εργασίες (Lin, et al., 2004), στηριζόμενες σε παλαιότερα μοντέλα, δημιούργησαν οντολογίες ειδικά για συστήματα παραγωγής (*MSE Ontology*), επικεντρώνοντας στην διασύνδεση μεταξύ εκτεταμένων περιβαλλόντων παραγωγής με χρήση διαμεσολαβητή (*moderator*), ενισχύοντας την διαθεσιμότητα της καταγεγραμμένης γνώσης και πληροφορίας κάνοντας –ενίοτε– χρήση του διαδικτύου (Lin, et al., 2007). Στο ίδιο πλαίσιο κινήθηκε και η οντολογία MASON (Lemaignan, et al., 2006), ενώ άλλες εργασίες ασχολήθηκαν περισσότερο με την μοντελοποίηση στηριζόμενες στην ανάλυση του

τρίπτυχου δομή-συμπεριφορά-λειτουργία (Goel, et al., 2009), καθώς και με την ενίσχυση της διάχυσης της μηχανολογικής γνώσης/πληροφορίας (Li, et al., 2009).

1.3 Προσομοίωση συστημάτων

Η έννοια της προσομοίωσης αφορά στην αναπαράσταση μιας ή περισσότερων διεργασιών με βάση ένα μοντέλο και βρίσκει εφαρμογή σχεδόν σε όλα τα επιστημονικά πεδία. Όσον αφορά στην προσομοίωση συστημάτων, ο κυριότερος διαχωρισμός που μπορεί να γίνει αφορά στον τρόπο αντιμετώπισης των αλλαγών εντός του συστήματος: τα γεγονότα αντιμετωπίζονται είτε ως συνεχείς διεργασίες (*continuous process simulation*) είτε ως διακριτές μεταβολές (*discrete event simulation*). Στην περίπτωση που το σύστημα που προσομοιώνεται αφορά σε ένα σύστημα κατεργασιών, η συνήθης προσέγγιση είναι η δεύτερη.

Υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις για την προσομοίωση διακριτών γεγονότων ενός συστήματος. Χαρακτηριστικά, αναφέρονται:

- Μηχανές Πεπερασμένων Καταστάσεων (*Finite-state machine, FSM*)
- Στοχαστική διαδικασία (*Stochastic process*)
- Θεωρία αναμονής (*Queuing theory*)
- Δίκτυα Petri (*Petri net*)
- Σύστημα Προδιαγραφών Διακριτών Γεγονότων (*Discrete Event System Specification, DEVS*)

Η προσομοίωση βρίσκει ιδιαίτερο έδαφος εφαρμογής στον χώρο των συστημάτων κατεργασιών. Λόγω της αύξησης της πολυπλοκότητάς των, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερος κοστοβόρα από πλευράς κατασκευής και συντήρησης, απαιτούνται τρόποι ελέγχου της λειτουργίας των στο στάδιο του σχεδιασμού. Τα προβλήματα που υπάρχουν στον τομέα της προσομοίωσης συστημάτων κατεργασιών σχετίζονται τόσο με την δυσκολία απόδοσης όλων των παραμέτρων του συστήματος με ακρίβεια όσο και με την ενσωμάτωση δεδομένων που δεν είναι διαθέσιμα μέσω της ιστορικής ανάλυσης του συστήματος. Επιπροσθέτως, στις περισσότερες περιπτώσεις η προσπάθεια των ερευνητών εντοπίζεται στον τομέα του ελέγχου του συστήματος σε υψηλό επίπεδο, χωρίς να ενσωματώνεται πιστή γραφική αναπαράσταση των αντικειμένων ή δυνατότητα χειρισμού των.

Παράλληλα με την πληθώρα θεωρητικών προσεγγίσεων, αναπτύσσονται και αρκετά πακέτα λογισμικού για προσομοίωση συστημάτων παραγωγής. Ενδεικτικά αναφέρονται τα *Visual8*,

ARENA, ProModel, Simul8, ShowFlow, ενώ αρκετοί οίκοι λογισμικού προσπαθούν να εντάξουν επιμέρους πακέτα σε ένα ενιαίο πλαίσιο, ανάλογα με την οπτική γωνία από την οποία αντιμετωπίζει ο ερευνητής το αντικείμενο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Dassault Systemes (3DS), η οποία κάτω από τον γενικότερο μανδύα του PLM (*Product Lifecycle Management*) συνδυάζει σχεδιαστικό πακέτο αντικειμένων CAD (*Solidworks*), πακέτο CAD-CAM-CAE (*CATIA*), πακέτο προσομοίωσης (*Simulia*), πακέτο τρισδιάστατης απεικόνισης (*3DVIA*), πακέτο ψηφιοποίησης κατασκευαστικών διαδικασιών (*DELMIA*) και πακέτο συνεργατικής δημιουργίας (*ENOVIA*).

1.4 Ευφυή αντικείμενα

Ευφυΐα θεωρείται η δυνατότητα του εγκεφάλου να σκέφτεται, να εκλογικεύει, να αντιλαμβάνεται αφηρημένες έννοιες, να λύνει προβλήματα και να μαθαίνει. Τα παραπάνω προκύπτουν ως αποτέλεσμα της σύνθετης σύνδεσης των νευρώνων του εγκεφάλου που δίνει συνείδηση σε ένα ον. Γενικότερα, ευφυΐα θεωρείται η δυνατότητα να αντιλαμβάνεται κάποιος τον πραγματικό κόσμο γύρω του όπως αυτός υπάρχει. Ήδη από την δεκαετία του 1940 έγιναν προσπάθειες για ανάπτυξη συστημάτων που μιμούνται τις ενέργειες του εγκεφάλου, μεταφέροντας τον όρο της ευφυΐας σε αντικείμενα κατασκευασμένα από τον άνθρωπο. Ο όρος της τεχνητής νοημοσύνης (*artificial intelligence*) επινοήθηκε από τον J. McCarthy το 1956· η εξέλιξη του τομέα στα χρόνια που ακολούθησαν είχε ως συνέπεια να αποτελεί θεμελιώδες κομμάτι της επιστήμης των υπολογιστών. Γενικεύοντας, ένα αντικείμενο μπορεί να θεωρηθεί ευφύες εφόσον δύναται να γνωρίζει πράγματα που το αφορούν σε σχέση με το περιβάλλον στο οποίο εντάσσεται και – ενδεχομένως – να αντιδρά αναλόγως.

Σε ένα ΣΚ, η ευφυΐα μπορεί να αναφέρεται κυρίως σε δύο τομείς. Ο ένας τομέας αφορά στον τρόπο με τον οποίο ένα αντικείμενο εκτελεί μια εργασία, αποτέλεσμα της ικανότητας του ελεγκτή του αντικειμένου να μετατρέπει τις εντολές του χρήστη σε ενέργειες. Ο δεύτερος τομέας αφορά στον τρόπο με τον οποίο συνεργάζονται δύο ή περισσότερα αντικείμενα μεταξύ τους. Σε αυτή την περίπτωση, το ρόλο αυτό αναλαμβάνει να εκτελέσει ο άνθρωπος ή, σε ΣΚ με μεγάλο βαθμό αυτοματοποίησης, ένας κεντρικός ελεγκτής. Ομοίως, σε ένα εικονικό ΣΚ, αυτοί οι δύο τομείς αποτελούν το κομμάτι ευφυΐας που πρέπει να ενσωματωθεί. Υπό αυτό το πρίσμα, ως ευφυΐα μπορεί να οριστεί τόσο η αλγοριθμική υλοποίηση του εικονικού ελεγκτή του κάθε αντικειμένου, όσο και ο έλεγχος λειτουργίας του κυττάρου συνολικά, με βάση και τα σημασιολογικά μοντέλα που ορίζουν ένα κανονιστικό πλαίσιο.

Οι κυριότερες πρόσφατες εργασίες ενσωμάτωσης ευφυΐας σε ΣΚ αφορούν στην χρήση πρακτόρων (*agents*) (Shen, et al., 2006), που επιτρέπουν την μετάβαση των αυτόματων συστημάτων παραγωγής στο επόμενο στάδιο αυτοματοποίησης, αυτό των ολονικών (*holonic*) συστημάτων (Babiceanu, et al., 2006). Η βασική διαφοροποίηση σε συστήματα αυτού του τύπου είναι ο τρόπος αντιμετώπισης των γεγονότων που λαμβάνουν χώρα. Για παράδειγμα, εάν συμβεί κάποια βλάβη κατά την παραγωγική διαδικασία, το σύστημα πέραν της αναγνώρισης του σφάλματος, προχωράει και στην εύρεση λύσης ώστε να μην σταματήσει η παραγωγή. Σε αυτό συμβάλλουν και εργασίες που ενσωματώνουν προχωρημένες θεωρίες ευφυΐας, όπως για παράδειγμα η μέθοδος Ευφυΐας Αποικίας Μυρμηγκιών (Xiang, et al., 2008), που χρησιμοποιείται για βελτιστοποίηση της προσαρμοστικότητας των πρακτόρων εντός ενός συστήματος παραγωγής. Φυσικά, οι εξελίξεις στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης επιτρέπουν την –εν καιρώ– ενσωμάτωσή τους, σε διαφορετικά επίπεδα της παραγωγικής διαδικασίας.

1.5 Εικονική πραγματικότητα

1.5.1 Ορισμός

Η εικονική πραγματικότητα (*virtual reality*) αποτελεί μια ιδιαιτέρως παρεξηγημένη ερευνητική περιοχή, λόγω δυσκολιών που υπάρχουν τόσο στον σαφή ορισμό ακόμα και της έννοιας της, όσο και στο κατά πόσον αντικείμενα εμπίπτουν ή όχι στο συγκεκριμένο πεδίο. Ο όρος είναι από τη φύση του αντιφατικός, καθώς τα δύο συνθετικά του συγκρούονται και δημιουργούνται εύλογα ερωτήματα· πως μπορεί κάτι να είναι ταυτόχρονα πραγματικό και εικονικό; Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα βρίσκεται μόνο εάν οριστούν επαρκώς και οι δύο έννοιες, της εικονικότητας και της πραγματικότητας.

Για τον ορισμό της έννοιας «εικονική», πρέπει να ανατρέξουμε στον τομέα της σύγχρονης φιλοσοφίας. Ο Gilles Deleuze αναφερόμενος στον όρο «*virtual*» υποστηρίζει ότι είναι μια πλευρά της πραγματικότητας που δεν είναι υλιστική, αλλά παρόλα αυτά είναι πραγματική (Deleuze, 2002). Αυτός ο ορισμός ενδεχομένως να μην ξεκαθαρίζει τα πράγματα από μόνος του, αλλά εάν αναγνωσθεί συγκριτικά, μας προσφέρει μια καλύτερη εικόνα. Κάτι το οποίο είναι *εικονικό* (*virtual*) δεν διαφοροποιείται από κάτι που είναι *πραγματικό* (*real*), αλλά από κάτι που είναι *υπαρκτό* (*actual*), ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που κάτι που είναι *πραγματικό* (*real*) διαφοροποιείται από κάτι που είναι *πραγματοποιήσιμο* (*possible*). Πιο πρόσφατες εργασίες, όπως του Denis Berthier, ξεκίνησαν με την ανάλυση της χρήσης του όρου *virtual* στην επιστήμη (πχ. *virtual image*), την τεχνολογία (πχ. *virtual world*) και την ετυμολογία

(πχ. *virtus* -> *virtue* -> *virtual*). Βασιζόμενος στην οντολογική ταξινόμηση των πραγμάτων σε *πραγματοποιήσιμα*, *πραγματικά*, και *δυνητικά*, το *εικονικό* ορίζεται ως αυτό που δεν είναι *πραγματικό* αλλά που έχει όλες τις ιδιότητες του *πραγματικού* (Berthier, 2004).

Ο έτερος όρος, η «πραγματικότητα», αρχικώς εξετάζεται ομοίως βάσει φιλοσοφικών προσεγγίσεων. Ετυμολογικά, η *πραγματικότητα* ορίζεται ως η κατάσταση των πραγμάτων ως αυτά υφίστανται, ανεξαρτήτως εάν μπορούν να παρατηρηθούν ή να κατανοηθούν ή όχι. Υπό αυτό το πρίσμα, η *πραγματικότητα* ενσωματώνει τόσο την έννοια της ύπαρξης όσο και της ανυπαρξίας. Στην σύγχρονη ευρωπαϊκή φιλοσοφία, γίνεται διάκριση μεταξύ τεσσάρων εννοιών της πραγματικότητας για την καλύτερη ερμηνεία του τί αποτελεί ή όχι πραγματικό φαινόμενο, κυρίως βάσει του πληθυσμού που εμπλέκεται στην κρίση ενός πράγματος (*φαινομενολογική πραγματικότητα*, *αλήθεια*, *γεγονός*, *αξίωμα*). Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας, μας ενδιαφέρουν οι δύο πρώτες περιπτώσεις, όπου δηλαδή ένα υποκείμενο (ή έστω ένας μικρός αριθμός υποκειμένων) παρατηρεί ένα αντικείμενο. Συνεπώς, πρέπει να ορίσουμε επαρκώς την έννοια της *αντίληψης*, ώστε να προκύψει η έννοια της *πραγματικότητας* υπό δοσμένες συνθήκες.

Με τον όρο *αντίληψη* εννοούμε την συνειδητοποίηση ή/και την κατανόηση πληροφοριών προερχομένων από αισθητήρια όργανα. Η διαδικασία εκτελείται μέσω του εγκεφάλου και το αποτέλεσμα της επεξεργασίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (προηγούμενες εγγεγραμμένες εμπειρίες, κοινωνικοί παράγοντες κλπ). Ο τομέας της ψυχολογίας έχει ασχοληθεί επισταμένως με την ποσοτικοποίηση της σχέσης μεταξύ της έντασης των ερεθισμάτων και της επίδρασης στον άνθρωπο (Weber-Fechner). Σύμφωνα με το René Descartes, «πατέρα» της παθητικής αντίληψης, η διαδικασία που ακολουθείται έχει ως εξής: περιβάλλον → είσοδος δεδομένων (αισθήσεις) → επεξεργασία (εγκέφαλος) → έξοδος δεδομένων (αντίδραση). Παρόλο που αρκετοί ερευνητές από διάφορους χώρους (φιλόσοφοι, ψυχολόγοι, νευρολόγοι) έχουν στηριχθεί στην παραπάνω άποψη, νεώτερες εργασίες, όπως του Richard L. Gregory, υποστηρίζουν ότι η σχέση μεταξύ των δεδομένων εισόδου, της επεξεργασίας, και των δεδομένων εξόδου είναι δυναμική και, συνεπώς, η αντίληψη είναι ενεργητική.

Ο άνθρωπος έχει στην διάθεσή του πέντε κύριες αισθήσεις και περίπου δέκα δευτερεύουσες για να λάβει ερεθίσματα από το περιβάλλον και στην συνέχεια να τα επεξεργαστεί για να καταλήξει σε ένα συμπέρασμα. Κυριότερη αίσθηση, κατά γενική ομολογία, είναι η όραση, καθώς η πλειονότητα των ερευνών δείχνει πως χωρίς την όραση η αντίληψη του ανθρώπου μειώνεται δραματικά. Πέραν, όμως, των ερεθισμάτων και του τρόπου που αυτά

μεταφέρονται στον άνθρωπο, σημαντικότερο ρόλο διαδραματίζει η πρότερη εμπειρία του υποκειμένου. Έχει παρατηρηθεί ότι ο άνθρωπος αδυνατεί να καταλάβει οποιαδήποτε νέα πληροφορία χωρίς να στηριχθεί σε πληροφορίες που ήδη γνωρίζει και είναι καταγεγραμμένες στον εγκέφαλό του. Κάθε φορά που ο ανθρώπινος εγκέφαλος έρχεται αντιμέτωπος με νέες πληροφορίες, ανατρέχει σε ήδη γνωστές πληροφορίες, προσπαθώντας να δημιουργήσει σχέσεις που θα τον βοηθήσουν να κατανοήσει. Συνεπώς, η προϋπάρχουσα γνώση είναι εκείνη που δημιουργεί την πραγματικότητα.

Βάσει των παραπάνω, ο όρος «εικονική πραγματικότητα» θα μπορούσε, στην γενική του μορφή, να ερμηνευτεί ως εξής:

***Εικονική πραγματικότητα** είναι η αντίληψη που έχει ο άνθρωπος, μέσω των αισθήσεών του και της εγκεφαλικής επεξεργασίας, για ένα περιβάλλον το οποίο δεν είναι υπαρκτό αλλά διαθέτει όλες τις ιδιότητες του πραγματικού.*

Άρα, σκοπός είναι η δημιουργία ενός τεχνητού περιβάλλοντος, ώστε το υποκείμενο να δεχθεί ερεθίσματα τα οποία, μέσω της εγκεφαλικής επεξεργασίας, θα προξενήσουν αντιδράσεις όμοιες με αυτές που θα είχε εάν το περιβάλλον ήταν υπαρκτό.

1.5.2 Ιστορική αναδρομή

Η προέλευση της έννοιας της εικονικής πραγματικότητας εντοπίζεται στον χώρο της τέχνης. Αρχικά, ο τομέας εφαρμογής ήταν η ζωγραφική, όπου σκοπός ήταν η δημιουργία ενός έργου 360° μοιρών, που θα έδινε στον θεατή την αίσθηση ενός τρισδιάστατου χώρου που τον περιβάλλει (Baldassarre Peruzzi «*Sala delle Prospettive*», 1515-17). Η πρώτη εμφάνιση του όρου «εικονική πραγματικότητα» εντοπίζεται στις αρχές του 20^{ου} αιώνα στο βιβλίο του Antonin Artaud «*Το θέατρο και το είδωλό του*» (Artaud, 1938), όπου χρησιμοποιείται ο όρος *la réalite virtuelle* για να περιγραφεί το θέατρο, ως ένας τόπος όπου «χαρακτήρες, αντικείμενα, και εικόνες δέχονται την φαντασμαγορική δύναμη αληθινά ουτοπικών εσωτερικών δραμάτων». Επέκταση αυτής της σκέψης ήταν η εργασία του Morton Heilig, ο οποίος ασχολήθηκε με την ιδέα του εμπειρικού θεάτρου (*experience theatre*) την δεκαετία του '50 (Heilig, 1955). Αποτέλεσμα των εργασιών του ήταν η συσκευή *Sensorama* (1962). Το 1968 κατασκευάστηκε το πρώτο κράνος εικονικής/ενισχυμένης πραγματικότητας (VR/AR HMD) από το δίδυμο Ivan Sutherland / Bob Sproull. Λόγω της ιδιομορφίας της συσκευής (στήριξη μεταλλικού βραχίονα ανίχνευσης των κινήσεων της κεφαλής στην οροφή), πήρε το όνομα «*Δαμόκλειος Σπάθη*» (*Sword of Damocles*). Στα μέσα της δεκαετίας του '70, εμφανίστηκε ο –παραπλήσιος– όρος

«τεχνητή πραγματικότητα» (*artificial reality*), ο οποίος αποδίδεται στον Myron Krueger του εργαστηρίου *VIDEOPLACE* (Πανεπιστήμιο του Κονέκτικατ), σκοπός του οποίου ήταν δημιουργία ενός περιβάλλοντος τεχνητής πραγματικότητας, το οποίο θα αντιδρούσε στις κινήσεις και τις δράσεις του χρήστη χωρίς την χρήση ειδικών γυαλιών και γαντιών. Για την υλοποίησή του, χρησιμοποιούνταν κάμερες, προβολείς οθόνης και ειδικός εξοπλισμός που κατέγραφε τις κινήσεις χρηστών σε διαφορετικά δωμάτια και τις μετέφερε σε ανθρωποειδή (*avatars*). Το 1977 δημιουργήθηκε στο MIT μια εικονική προσομοίωση της πόλης του Άσπεν, η οποία ονομάστηκε *Aspen Movie Map*. Θεωρήθηκε από τις πρώτες επιτυχημένες προσπάθειες στον τομέα των υπερμέσων (*hypermedia*), καθώς ο χρήστης είχε την δυνατότητα να περιηγηθεί στην πόλη με τρεις τρόπους.

Στις αρχές της δεκαετίας του '80, ο όρος «εικονική πραγματικότητα» (ΕΠ) ξεκίνησε να χρησιμοποιείται ευρέως χάρη στον Jaron Lanier, ιδρυτή της εταιρείας *VPL Research*, με αντικείμενο την δημιουργία και προώθηση εφαρμογών ΕΠ. Για την εκτέλεση των εφαρμογών, δημιουργήθηκαν οι πρώτες συσκευές ΕΠ (*DataGlove, Eyephone, AudioSphere, Isaac, Body Electric*), καθώς και ένα ολοκληρωμένο σύστημα ΕΠ (*Reality Built for 2, RB2*). Την ίδια περίοδο, ερευνητές εργαζόμενοι στην αμυντική βιομηχανία, (Thomas A. Furness/Wright-Patterson) και στην αεροδιαστημική (Michael McGreevy/NASA), εργάζονταν σε διαφορετικές μορφές εφαρμογών ΕΠ. Ο πρώτος εστίαζε στην δημιουργία ενός εικονικού πιλοτηρίου, με σκοπό την υποβοήθηση των πιλότων, καθώς το πραγματικό πιλοτήριο γινόταν όλο και πιο πολύπλοκο και δύσχρηστο λόγω της συνεχούς εξέλιξής του. Ο δεύτερος ήταν ο δημιουργός του πρώτου εικονικού περιβάλλοντος, (*Virtual Visual Environment Display system, VIVED*), το οποίο είχε – σχετικά – χαμηλό κόστος, μεγάλο εύρος θέασης, στερεοφωνικό ήχο, κράνος, και ανιχνευτή κίνησης. Στην συνέχεια, κάνοντας χρήση συσκευών άλλων ερευνητών, ο McGreevy δημιούργησε ένα ολοκληρωμένο σύστημα ΕΠ, καθώς και το αντίστοιχο λογισμικό. Το σύστημα χρησιμοποιήθηκε για εφαρμογές εξερεύνησης ανάγλυφου πλανητών, υπολογιστική ρευστομηχανική, και τηλερομποτική διαστημικών σταθμών.

Με το πέρασμα του χρόνου, και με εμφανή καθυστέρηση, ξεκίνησε και η ακαδημαϊκή κοινότητα να ασχολείται ενεργά με το αντικείμενο της ΕΠ. Κυριότερος λόγος αυτής της καθυστέρησης ήταν τόσο το γεγονός ότι η περιοχή της ΕΠ δεν ήταν σαφώς ορισμένη, όσο και το ότι απαιτούνται επιστήμονες από αρκετούς διαφορετικούς κλάδους για να μπορεί μια εφαρμογή να χρισθεί ως «εφαρμογή ΕΠ». Η επιστημονική κοινότητα έδωσε διάφορους ορισμούς για το τι είναι ΕΠ. Συνοψίζοντας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι:

Εικονική πραγματικότητα είναι ένα τεχνητό τρισδιάστατο περιβάλλον, φτιαγμένο σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, στο οποίο ο χρήστης εμβυθίζεται και αλληλεπιδρά σε πραγματικό χρόνο μέσω κατάλληλων διεπιφανειών.

Παράλληλα, αναπτύχθηκαν και νέες περιοχές, κοντινές με την περιοχή της ΕΠ. Έτσι, εμφανίσθηκαν οι έννοιες της επαυξημένης πραγματικότητας (*Augmented Reality, AR*) και της μικτής πραγματικότητας (*Mixed Reality, MR*). Ο διαχωρισμός μεταξύ των δύο γίνεται στην βάση του περιβάλλοντος· στην πρώτη περίπτωση, προστίθενται στον φυσικό κόσμο εικονικά αντικείμενα και πληροφορίες, ενώ στην δεύτερη περίπτωση, σε ένα εικονικό περιβάλλον προστίθενται δεδομένα και στοιχεία από τον πραγματικό κόσμο. Σημειώνεται ότι λόγω της αντιφατικότητας που προκαλείται από την χρήση του όρου «πραγματικότητα», η επιστημονική κοινότητα πρόσφατα προωθεί την χρήση του όρου «εικονικά περιβάλλοντα» για τη περιγραφή όλων των τύπων των εφαρμογών. Μία εφαρμογή μπορεί να χαρακτηριστεί ως εφαρμογή ΕΠ εφόσον περιλαμβάνει: α) έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή (ή ένα σύστημα ηλεκτρονικών υπολογιστών), υπεύθυνο για την δημιουργία του εικονικού περιβάλλοντος και της επεξεργασίας των επιμέρους πληροφοριών, τόσο μέσω λογισμικού (*software*) όσο και εξαρτημάτων του (*hardware*) και β) συσκευές για την επικοινωνία μεταξύ του ανθρώπου και του υπολογιστή, οι οποίες επιτρέπουν την εκμετάλλευση των αισθήσεων του, με τελικό αποτέλεσμα την μερική ή ολική εμβύθισή του.

Πέραν κάποιων εργασιών που αντιμετώπισαν ολιστικά το αντικείμενο (Burdea, et al., 2003), οι υπόλοιποι θα μπορούσαν να χωριστούν στις ακόλουθες κατηγορίες (ενδεικτικές δημοσιεύσεις):

- Συσκευές εισόδου: (Cutler, et al., 1997), (Hightower, et al., 2000), (Latoschik, et al., 1998), (Agrawala, et al., 1997), (Ribo, et al., 2001)
- Συσκευές εξόδου: (Cliburn, et al., 2005), (Courter, et al., 2010), (Biocca, 1997), (Bolas, et al., 1994), (Turner, et al., 1998)
- Η/Υ για ΕΠ: (Moreland, et al., 2001), (Pandzic, et al., 2008), (Fairen, et al., 2004), (Regan, et al., 1994)
- Μοντελοποίηση αντικειμένων: (Funkhouser, et al., 1993), (Zhao, et al., 2003)
- Προγραμματισμός/λογισμικό για ΕΠ: (Belousov, et al., 1999), (Roehl, 1995), (Sowizral, et al., 1999)

1.5.3 Σημερινή κατάσταση

Σήμερα, ο χώρος της εικονικής πραγματικότητας, έχοντας ξεπεράσει τις παιδικές ασθένειες, αλλά και τις υπερβάλλουσες προσδοκίες, δείχνει να σταθεροποιείται τόσο από πλευράς εξοπλισμού / δυνατοτήτων όσο και από πλευράς εφαρμογών. Σημαντικό ρόλο σε αυτή την εξέλιξη διαδραμάτισε η αλματώδης αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και – κυριότερα – της ανάπτυξης των γραφικών υποσυστημάτων. Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω ήταν και η πτώση του κόστους: χαρακτηριστικά, στις αρχές του 2000, ένας απλός προσωπικός ηλεκτρονικός υπολογιστής (Pentium III) είχε παραπλήσιες δυνατότητες με έναν, κατά πολύ, ακριβότερο υπολογιστή της *Silicon Graphics (Infinite Reality 2)*, τουλάχιστον σε ότι αφορά την απόδοση σε πολύγωνα/sec. Δεδομένου του κορεσμού της ισχύος των κεντρικών επεξεργαστών (CPU) (Hennessy, et al., 2007), η βιομηχανία των υπολογιστών στράφηκε στην ανάπτυξη των γραφικών υποσυστημάτων με εντυπωσιακά αποτελέσματα, τόσο από πλευράς επιδόσεων όσο και κόστους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η τεχνολογία *CUDA* της *NVIDIA*, μία προσέγγιση ετερογενούς πολυπύρηνης επεξεργασίας, που επιτρέπει την διαχείριση περισσότερων πληροφοριών από το γραφικό υποσύστημα, με αύξηση στις ταχύτητες της τάξης του 20-200x. Ταυτόχρονα, η προώθηση της φιλοσοφίας του υπολογιστικού νέφους/πλέγματος (*cloud/grid computing*) δημιούργησε ακόμα μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ, ξεπερνώντας τον «τοίχο» της ισχύος των επεξεργαστών σε τοπικό επίπεδο.

Πέραν της προόδου της υπολογιστικής ισχύος, σημαντικά βήματα έγιναν και στον τομέα των συσκευών αλληλεπίδρασης. Σε ότι αφορά στις οπτικές συσκευές, στον τρόπο δηλαδή με τον οποίο ο εικονικός κόσμος προβάλλεται στον χρήστη, προχώρησε η ανάπτυξη τριών διαφορετικών συστημάτων, με διαφοροποιήσεις τόσο από πλευράς κόστους όσο και υλοποίησης. Η πρώτη κατηγορία είναι η κατηγορία των κρανών (*head mounted displays*), όπου ο επιτυγχάνεται αρκετά ικανοποιητικός βαθμός εμπύθισης του χρήστη. Στην κατηγορία αυτή αναπτύχθηκαν και κράνη με χρήση μόνο για το ένα μάτι του χρήστη, κυρίως για εφαρμογές επαγγελματικής πραγματικότητας. Στην δεύτερη κατηγορία, και λόγω της αλματώδους αύξησης της τεχνολογίας *LCD*, αναπτύχθηκαν οθόνες μεγάλων διαστάσεων (*Large Displays*), οι οποίες τοποθετούνται απέναντι από τον χρήστη δημιουργώντας μια μεγάλη επιφάνεια στην οποία προβάλλεται ο εικονικός κόσμος. Στην τρίτη κατηγορία ανήκουν τα συστήματα τύπου κιβωτός (*Cave Automatic Virtual Environment, CAVE*), τα οποία χρησιμοποιούν οπίσθιους προβολείς και επιφάνειες δημιουργώντας ένα δωμάτιο μέσα στο οποίο περιηγείται ο χρήστης.

Στον τομέα του ήχου, η βιομηχανία της οικιακής διασκέδασης φρόντισε να αναπτύξει αρκετά την αντίστοιχη τεχνολογία – κυρίως – για την παρακολούθηση ταινιών, με αποτέλεσμα οι εφαρμογές ΕΠ να επωφεληθούν παραπλεύρως. Έτσι, το σύστημα *stereo* πέρασε από διάφορες φάσεις (2.1, 5.1, 7.1) και κατέληξε να προσφέρει με αρκετή πιστότητα τρισδιάστατο ήχο (*surround*), με χρήση περισσότερων ηχείων και καναλιών. Αντίστοιχα αναπτύχθηκε και το λογισμικό, ώστε να είναι δυνατό να ρυθμίζεται το σημείο της πηγής του ήχου και ο τρόπος μετάδοσης του στον εικονικό κόσμο.

Ο τρίτος πυλώνας στον τομέα των συσκευών ΕΠ είναι οι απτικές συσκευές. Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται οι συσκευές που προσφέρουν απτική ανάδραση στον χρήστη. Τέτοιες συσκευές είναι τα γάντια (*gloves*) και συσκευές ανάδρασης δύναμης (*force feedback*). Στην πρώτη κατηγορία, έχουν πλέον εξελιχθεί αρκετά οι συσκευές γαντιών με περισσότερους αισθητήρες πίεσης και κάμψης, ώστε οι κινήσεις του χεριού του χρήστη να μπορούν να καταγράφονται και να εντάσσονται πλήρως στο εικονικό περιβάλλον. Στην δεύτερη κατηγορία, έχουν γίνει σημαντικά βήματα για εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως στην περίπτωση χειρισμού ρομποτικών βραχιόνων ή ιατρικών μηχανημάτων.

Επιπροσθέτως, ο χώρος της ΕΠ κάνει εκτεταμένη χρήση αισθητήρων από άλλες επιστημονικές περιοχές για την δημιουργία των εικονικών κόσμων. Κυριότερη κατηγορία αισθητήρων που χρησιμοποιούνται είναι η κατηγορία των ανιχνευτών κίνησης (*trackers*), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να αλλάζει δυναμικά η τοποθεσία και ο προσανατολισμός του χρήστη ή άλλων αντικειμένων. Ανάλογα, γίνεται πλέον και εκτεταμένη χρήση καμερών, όπου με χρήση τεχνικών ανάλυσης εικόνας, κινούμενης ή μη, είτε μεταβάλλεται δυναμικά το εικονικό περιβάλλον είτε λαμβάνονται αποφάσεις για την κατάσταση του συστήματος.

Με την βελτίωση των υποδομών ΕΠ, αυξήθηκαν και οι αντίστοιχες εφαρμογές. Οι τομείς που αναπτύχθηκαν παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία, δείγμα των πολλαπλών οφελών της τεχνολογίας, αλλά και της προσαρμοστικότητάς της. Στις τέχνες, με την ευρύτερη έννοια του όρου, σημαντικά βήματα έχουν γίνει στους τομείς της αρχαιολογίας και της μουσειολογίας. Ερευνητές έχουν εργαστεί επισταμένως με την αναπαράσταση τόσο μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς όσο και έργων μεγάλης καλλιτεχνικής σημασίας. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και στον τομέα της ψυχαγωγίας. Ο διαχωρισμός που υφίσταται σε αυτό τον τομέα αφορά στον χώρο που είναι τοποθετημένες οι συσκευές ΕΠ. Έτσι, για την προσωπική ψυχαγωγία του ανθρώπου εντός της οικίας του, χρησιμοποιούνται σχετικά χαμηλού κόστους συσκευές και βιντεοπαιχνίδια (*Nintendo Wii*), ενώ στον τομέα της μαζικής

ψυχαγωγίας, είναι αρκετά τα παραδείγματα χρήσης εφαρμογών ΕΠ σε θεματικά πάρκα (*Disney*), ήδη από τα τέλη τις προηγούμενης δεκαετίας.

Ένας άλλος τομέας που πλέον χρησιμοποιεί εφαρμογές ΕΠ είναι η εκπαίδευση. Οι σύγχρονες προσεγγίσεις στην εκπαίδευση (*constructivist, constructionist, situated*) ενισχύονται ιδιαιτέρως από την ΕΠ, λόγω της διαδραστικής της φύσης. Σε συνδυασμό, δε, με την χρήση του διαδικτύου, η εκπαίδευση μέσω αποστάσεως αναπτύσσεται όλο και περισσότερο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων ερευνών είναι τα *Cybermath, Newton/Maxwell World*, και *NICE*. Και στα τρία παραδείγματα, η χρήση ΕΠ βοήθησε ιδιαίτερα τους μαθητές/φοιτητές να κατανοήσουν έννοιες που ήταν δυσνόητες, μέσω της οπτικοποίησής των.

Ακριβώς αυτό το πλεονέκτημα της οπτικοποίησης αποτέλεσε το έναυσμα για την δημιουργία και την ανάπτυξη ενός ολόκληρου τομέα, της οπτικοποίησης πληροφοριών (*information visualization*). Κύριο αντικείμενο του τομέα είναι η ανάπτυξη νέων τεχνικών περιγραφής και απεικόνισης πληροφοριών κατά τρόπο τέτοιο ώστε να γίνονται ευκολότερα κατανοητές. Υποκατηγορία αποτελεί η οπτικοποίηση ογκομετρικών δεδομένων (*volumetric data visualization*), όπως τα δεδομένα σεισμικών δραστηριοτήτων καθώς και δεδομένα που προκύπτουν από αξονικούς/μαγνητικούς τομογράφους (*CT/MRI*). Οι κλασσικές μέθοδοι αναπαράστασης μέσω επιφανειών αδυνατούν να αντιμετωπίσουν τα δύο βασικά προβλήματα (απουσία ορίων μεταξύ των δεδομένων κάθε 2Δ επιπέδου, ανάγκη παρουσίασης των δεδομένων στον χώρο), συνεπώς εργασίες κοντινές σε τεχνολογίες ΕΠ εμφανίστηκαν για την εύρεση λύσεων.

Δύο διαμετρικά αντίθετοι τομείς που επωφελήθηκαν και συγχρόνως ανέπτυξαν εφαρμογές ΕΠ είναι η ιατρική και η αμυντική βιομηχανία. Στην ιατρική, η ΕΠ χρησιμοποιείται σε δύο περιοχές: στην εκπαίδευση και πιστοποίηση των ιατρών (ανατομία, διάγνωση, χειρουργικές επεμβάσεις), και στην αποκατάσταση των ασθενών (περιπτώσεις φοβιών, διαταραχών/συνδρόμων). Στον αντίποδα, η αμυντική βιομηχανία αναπτύσσει εφαρμογές ΕΠ για τους τρεις κλάδους (στρατό ξηράς, αεροπορία, ναυτικό) για την εκπαίδευση τόσο στρατιωτών, σε ατομικό επίπεδο, όσο και αξιωματικών, σε επίπεδο διοίκησης με κυριότερες εφαρμογές να αφορούν σε εξομοιωτές οπλικών συστημάτων, καθώς και σε συστήματα διασυνδεδεμένων εφαρμογών (*joint*).

1.5.4 Εικονική πραγματικότητα στην Μηχανολογία

Ο τομέας της μηχανολογίας αποτελεί ένα πεδίο στο οποίο η ΕΠ έχει βρει εκτεταμένη εφαρμογή. Η ανάπτυξη των τεχνολογιών CAx, σε συνδυασμό με την συνεχή ανάγκη για μείωση του κόστους, ώθησε την βιομηχανία να αναπτύξει εφαρμογές ΕΠ. Με την χρήση Η/Υ για σχεδιασμό στις τρεις διαστάσεις να είναι πλέον δεδομένη, η βιομηχανία προχώρησε στην ανάπτυξη εφαρμογών με σκοπό την αντικατάσταση του σχεδιασμού σε μία οθόνη με τον σχεδιασμό στον χώρο αυτό καθ' αυτό. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν συσκευές εισαγωγής δεδομένων που κινούνται στον χώρο (πχ. *3D mouse*) αλλά και περιβαλλόντων τύπου CAVE για την προβολή των αντικειμένων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η εφαρμογή *FreeForm* της εταιρείας *SensAble Technologies*. Επικουρικά, αρκετές εργασίες ασχολούνται με την συνεργασία περισσότερων σχεδιαστών σε διαφορετικές τοποθεσίες και σε πραγματικό χρόνο (Kanai, et al., 1997) σε ένα ενιαίο εικονικό περιβάλλον. Πέραν του σημαντικά χαμηλότερου κόστους σε σχέση με την δημιουργία ενός κανονικού πρωτότυπου, οι σχεδιαστές έχουν στην διάθεσή τους περισσότερα εργαλεία επέμβασης στο μοντέλο, μειώνοντας δραστικά τον χρόνο που απαιτείται για αλλαγές, ενώ έχουν σαφώς πιο ολοκληρωμένη εικόνα του τελικού αντικειμένου.

Στην φάση δημιουργίας ενός νέου αντικειμένου που αποτελείται από επιμέρους τμήματα, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η συναρμολόγηση / αποσυναρμολόγηση των τμημάτων. Ο σχεδιαστής φροντίζει η διαδικασία της συναρμολόγησης να είναι δυνατή βάσει των ανοχών μεταξύ των τμημάτων, ενώ εργάζεται σχετικώς και για την σειρά εναλλαγής των τμημάτων. Μέσω της ΕΠ, ο σχεδιαστής έχει πλέον στην διάθεση του περισσότερες πληροφορίες και μπορεί να επαληθεύσει την διαδικασία ή να προβεί στις απαιτούμενες αλλαγές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το σύστημα VADE του Πανεπιστημίου της Ουάσινγκτον (Jayram, et al., 1999). Ο χρήστης χρησιμοποιεί κράνος και γάντι με ανάδραση επαφής (*CyberTouch*) και αλληλεπιδρά με εικονικά αντικείμενα που προκύπτουν από αρχεία. Ο χρήστης βλέπει εάν είναι δυνατή ή όχι η συναρμολόγηση και τροποποιεί αντιστοίχως τις διαστάσεις των επιμέρους τμημάτων του αντικειμένου. Δεν είναι τυχαίο ότι ένα τέτοιο σύστημα (*VITAL*) ανέπτυξε και χρησιμοποίησε και η BMW (μελέτη πρότυπου R75).

Στον τομέα της εργονομικής ανάλυσης, η χρήση ΕΠ και ανθρωποειδών (*avatars*) προσέφερε νέες δυνατότητες και πληροφορίες. Παρόλο που σε αρκετές περιπτώσεις είναι ακόμα απαραίτητη η χρήση και φυσικών μοντέλων, ένας συνδυασμός μεταξύ των δύο χρησιμοποιήθηκε σε αρκετές περιπτώσεις, κυρίως από την αυτοκινητοβιομηχανία και την

αεροπορική βιομηχανία. Σε πολλές περιπτώσεις, αναπτύχθηκε περαιτέρω το ανθρωποειδές *JACK*, το οποίο, μετά από κατάλληλες τροποποιήσεις, χρησιμοποιήθηκε για ανάλυση των φορτίων που αναπτύσσονται στην περιοχή της μέσης (*Task Analysis Toolkit*, (SIEMENS)). Στο ίδιο πλαίσιο κινήθηκε και η *Bombardier*, η οποία χρησιμοποίησε τροποποιημένες εκδόσεις του *JACK* για εργονομική ανάλυση διαδικασιών συναρμολόγησης και εκπαίδευσης προσωπικού.

Λόγω της διαδραστικής φύσης των εφαρμογών ΕΠ, ο τομέας της εκπαίδευσης για μηχανολογικές εφαρμογές δραστηριοποιείται έντονα, καθώς ωφελείται πολλαπλά. Κυρίως έχουν αναπτυχθεί εφαρμογές για την εκπαίδευση τεχνιτών σε διαδικασίες συντήρησης, αλλά και σε συνθήκες παραγωγής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της δεύτερης περίπτωσης είναι το μοντέλο γραμμής παραγωγής που δημιούργησε η *Adams Consulting* για λογαριασμό της *Motorola* (Delaney, 1994), όπου απεδείχθη ότι οι χειριστές που εκπαιδεύθηκαν στην εικονική γραμμή παραγωγής έκαναν έξι φορές λιγότερα λάθη σε σχέση με αυτούς που εκπαιδεύθηκαν στην πραγματική γραμμή παραγωγής. Στην κατηγορία εκπαιδευτικών εφαρμογών για εργασίες συντήρησης, πρωτοπόρες είναι η αεροπορική βιομηχανία όπως η *BOEING* (Nash, 1997), και η αυτοκινητοβιομηχανία, όπως η *BMW* (Zachman, 1998), καθώς οι εργασίες συντήρησης συνήθως είναι αρκετά πολύπλοκες και απαιτούν πολλές πληροφορίες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι τεχνίτες είχαν πρόσβαση στις πληροφορίες μέσω συστημάτων επαυξημένης πραγματικότητας (*AR*), με σημαντικότερες μειώσεις κόστους.

1.5.5 Εικονική πραγματικότητα και συστήματα κατεργασιών

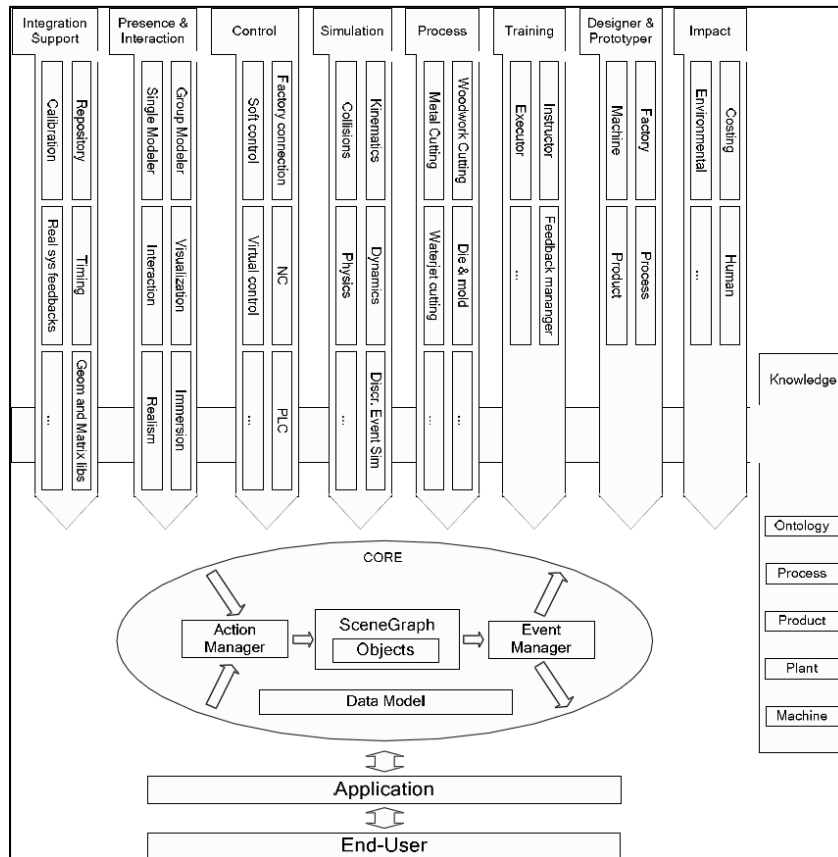
Κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος κατεργασιών, ανεξαρτήτως μεγέθους, λαμβάνουν χώρα δύο διαδικασίες: α) η επιλογή και προσαρμογή των μηχανημάτων και β) η προσομοίωση της ροής υλικού. Σε περιπτώσεις όπου το μέγεθος του συστήματος είναι σχετικά μικρό, οι διαδικασίες είναι σχετικά εύκολες. Όσο όμως το μέγεθος του συστήματος μεγαλώνει, τόσο δυσκολότερες γίνονται. Αυτές οι δυσκολίες μπορούν να αντιμετωπιστούν μέσω εφαρμογών ΕΠ. Ο σχεδιαστής είναι σε θέση και να τοποθετήσει τα μηχανήματα στον χώρο, ώστε να επιλέξει την καλύτερη δυνατή χωροθέτηση, αλλά και να προσομοιώσει παραγωγικές διαδικασίες. Παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής είναι η εργασία του Ινστιτούτου *Fraunhofer*, όπου έγινε προσομοίωση ενός ολόκληρου εργοστασίου (Schraft, et al., 1997). Μία εφαρμογή που περιελάμβανε ένα είδος εικονικού πάγκου εργασίας (*virtual workbench*) προτάθηκε από τον Michael Weyrich (Weyrich, et al., 1999)· ο χρήστης αλληλεπιδρούσε με εικονικά αντικείμενα μηχανολογικού ενδιαφέροντος μέσω ενός 6D pen και ενός γαντιού, ενώ τα αντικείμενα προβάλλονταν στερεοσκοπικά. Η κύρια χρήση της εφαρμογής αφορούσε

στην δημιουργία εικονικών πρωτοτύπων, αλλά και του κυττάρου παραγωγής των. Παράλληλα, άλλοι ερευνητές (Whyte, 2001) προχώρησαν σε εφαρμογές με διττή χρήση: αφενός χρησιμοποιήθηκαν για να εντοπιστούν σφάλματα στην αλληλουχία των διαδικασιών, χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερος ρεαλισμός των αντικειμένων, αφετέρου οι ίδιες εφαρμογές, εμπλουτισμένες με περισσότερα φωτορεαλιστικά στοιχεία, χρησιμοποιήθηκαν για παρουσίαση των εργοστασίων σε ευρύ κοινό με χαμηλότερο επίπεδο τεχνικών γνώσεων.

Με το είδος των εικονικών εργοστασίων (*virtual factory*) ασχολήθηκαν όλο και περισσότεροι ερευνητές, από διαφορετική οπτική γωνία. Η δημοσίευση (Mueller-Wittig, et al., 2002) ασχολείται με την δημιουργία ενός πλαισίου για την εικονοποίηση μιας πραγματικής γραμμής συναρμολόγησης ηλεκτρονικών εξαρτημάτων με σκοπό την καλύτερη επόπτευση της προσομοίωσης και την βελτιστοποίησή της. Τους περιορισμούς των παραδοσιακών στρατηγικών προσομοίωσης σε σχέση με τα εικονικά περιβάλλοντα αντιμετωπίζει η δημοσίευση (Zhai, et al., 2002), υποστηρίζοντας ότι η φύση της προσομοίωσης αλλάζει εφόσον πλέον αναφέρεται σε ένα εικονικό περιβάλλον. Η δημοσίευση (Min, et al., 2002) εξετάζει ειδικά με την λήψη δεδομένων από το πραγματικό περιβάλλον (σε επίπεδο τόσο εργαλείων όσο και μηχανών) και την εισαγωγή τους στο εικονικό περιβάλλον, επιτρέποντας κατ' αυτό τον τρόπο την χρήση του όχι μόνο στο στάδιο του αρχικού σχεδιασμού, αλλά και μετέπειτα, κατά την διάρκεια ζωής του κυττάρου.

Η ενίσχυση της έννοιας του ευέλικτου κυττάρου παραγωγής (*agile manufacturing*) μέσω εικονικής πραγματικότητας, στα πλαίσια του έργου *VIR-ENG*, περιγράφονται στην δημοσίευση (Moore, et al., 2003). Το έργο ανέλυσε τα συστήματα παραγωγής μέσω τριών διαφορετικών επιπέδων (σχεδιασμού/προσομοίωσης, ελέγχου λειτουργίας, μετάδοσης πληροφοριών) με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός ενιαίου πλαισίου. Ως περίπτωση δοκιμής χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο κυττάρων συναρμολόγησης εξαρτημάτων αυτοκινητοβιομηχανίας. Τελικός σκοπός ήταν η χρήση του εικονικού περιβάλλοντος στην φάση του σχεδιασμού των πραγματικών κυττάρων, η ενσωμάτωση των πραγματικών δεδομένων στο μοντέλο, και τελικώς η παρακολούθηση της γραμμής σε πραγματικό χρόνο μέσω του εικονικού περιβάλλοντος. Αντίστοιχη εργασία παρουσιάζει η δημοσίευση (Hibino, et al., 2006), η οποία συνδέει πραγματικό και εικονικό εργοστάσιο με σκοπό την προσομοίωση του ελέγχου λειτουργίας τους. Μέσω του προτεινόμενου πλαισίου, είναι δυνατή η προσομοίωση και η αξιολόγηση του συνολικού ελέγχου του κυττάρου στην φάση του σχεδιασμού, δηλαδή προ της υλοποίησής του, λαμβάνοντας όμως υπόψη δεδομένα από πραγματικά αντικείμενα εφόσον αυτά ήδη υφίστανται.

Η σημασία δημιουργίας ενός ενιαίου πλαισίου για εικονικά εργοστάσια συνοψίζεται στην δημοσίευση (Pedrazzoli, et al., 2007), η οποία προχωράει ένα βήμα παραπάνω παρουσιάζοντας μια εκδοχή ενός τέτοιου πλαισίου. Το πλαίσιο αντιμετωπίζει ένα εργοστάσιο ολιστικά και προσομοιώνει μεγάλο πλήθος ενεργειών που λαμβάνουν χώρα εντός του, δημιουργώντας και την κατάλληλη εικονοποίηση. Σκοπός του είναι η λήψη των βέλτιστων αποφάσεων στον βέλτιστο χρόνο, συνυπολογίζοντας την απαιτούμενη συνεργατικότητα μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών.



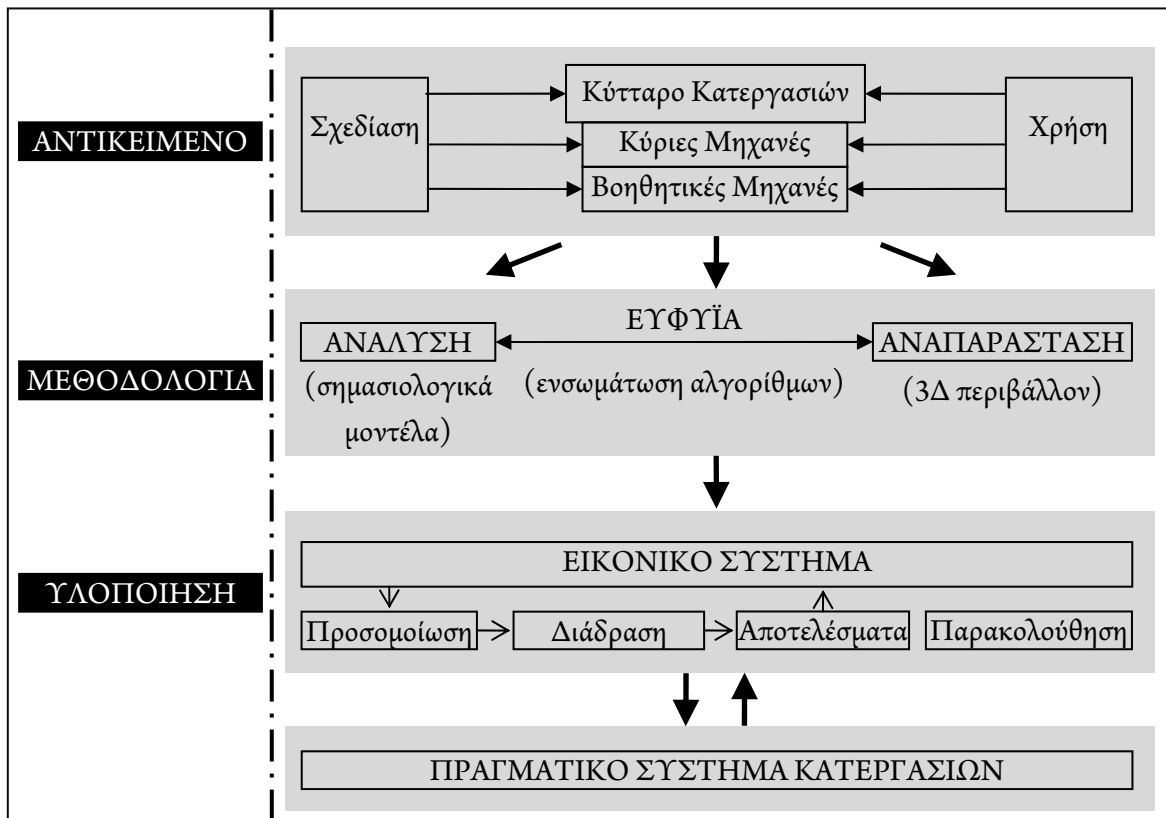
Εικόνα 1-1. Virtual Factory Framework (Pedrazzoli, et al., 2007)

Η αυξανόμενη χρήση ρομποτικών βραχιόνων και – γενικότερα – αυτόματων διατάξεων διαχείρισης υλικού ώθησε τους ερευνητές να αναπτύξουν εφαρμογές για την καλύτερη αξιοποίησή τους. Σε αυτό το πλαίσιο, εφαρμογές ΕΠ δημιουργήθηκαν τόσο για τον χειρισμό / προγραμματισμό ρομποτικών βραχιόνων, όσο και για την παρακολούθηση της λειτουργίας τους. Βασικότερη διαφορά της χρήσης ΕΠ είναι ο χειρισμός του βραχίονα να γίνεται μέσω κινήσεων του χεριού του χειριστή αντί της χρησιμοποίησης του εκπαιδευτικού χειριστηρίου (*teaching pendant*) ή του προγραμματισμού «εκτός γραμμής» (*off-line programming*). Επιπροσθέτως, ο χειρισμός του βραχίονα μπορεί να γίνει από απόσταση,

χωρίς να είναι απαραίτητη η ταυτόχρονη παρουσία χειριστή-βραχίονα στον ίδιο χώρο (Burdea, 1999), σημαντικό πλεονέκτημα σε περιπτώσεις όπου ο χώρος εργασίας του βραχίονα παρουσιάζει κινδύνους για τον χειριστή. Εργασίες αυτού του τύπου έχουν πραγματοποιηθεί τόσο στην Ευρώπη (Strommer, et al., 1993) όσο και στην Ιαπωνία (Yanagihara, et al., 1996), αλλά και στην Αμερική, ειδικά για εργασίες όπου υπάρχει σημαντική χρονική διαφορά μεταξύ βραχίονα και χειριστή, όπως η αποστολή του *Mars Pathfinder*. Σε παρόμοιες εργασίες (Li, et al., 2000) παρουσιάστηκε η εκπαίδευση ενός ρομποτικού βραχίονα μέσω εικονικής πραγματικότητας, κάνοντας χρήση και ανίχνευσης δυναμικών δεδομένων, όπως η δύναμη που ασκείται όταν ο βραχίονας έρθει σε επαφή με κάποιο αντικείμενο.

1.6 Μεθοδολογία

Η διδακτορική διατριβή, όπως προαναφέρθηκε, εντάσσεται στον χώρο των Ευφών Εικονικών Συστημάτων Παραγωγής. Αναλυτικά, τα ζητήματα που αντιμετωπίστηκαν έχουν ως εξής (Σχήμα 1-2):



Σχήμα 1-2. Αποτύπωση της προσέγγισης της διατριβής

- Ακριβής ορισμός του προς διερεύνηση αντικείμενου, δηλαδή ενός στερεοτυπικού συστήματος κατεργασιών που πάντοτε αποτελείται από κύριες και δευτερεύουσες μηχανές, εξεταζόμενου από πλευράς σχεδιασμού και ελέγχου λειτουργίας του.
- Ανάλυση των ΣΚ με βάση σημασιολογικά μοντέλα, από την οποία προέκυψαν τα αντικείμενα που αποτελούν τον κόσμο του ΣΚ, οι μεταξύ τους σχέσεις, οι καταστάσεις που συναντώνται, και τα αξιώματα που διέπουν τον κόσμο.
- Καθορισμός των τομέων που πρέπει να ενισχυθούν με ευφυΐα μέσω δημιουργίας κατάλληλων αλγορίθμων.
- Τρισδιάστατη μοντελοποίηση των αντικειμένων και καθορισμός όλων των παραμέτρων που αφορούν στην διεπιφάνεια χρήστη – Η/Υ.
- Κατασκευή εικονικού συστήματος ως σύνθεση των παραπάνω.

Οι λύσεις και οι επιλογές υλοποίησης των παραπάνω ζητημάτων αλληλοεξαρτώνται. Για παράδειγμα, η επιλογή μιας αντικειμενοστραφούς γλώσσας προγραμματισμού για την υλοποίηση του εικονικού συστήματος προτιμήθηκε λόγω της ανάλυσης μέσω σημασιολογικών μοντέλων, ενώ αυτή η επιλογή επηρέασε άμεσα τόσο τον τρόπο που έγινε η τρισδιάστατη μοντελοποίηση των αντικειμένων, όσο και την υλοποίηση των αλγορίθμων ευφυΐας. Σημειώνεται ότι τα αναπτυσσόμενα μοντέλα δεν εξαντλούν κατά κανένα τρόπο το χώρο αναφοράς των ΣΚ, αλλά αναπτύσσονται με στόχο, χωρίς βλάβη της γενικότητας, να επιδειχθεί η συγκεκριμένη προσέγγιση.

2 Σημασιολογικά μοντέλα

2.1 Εισαγωγή

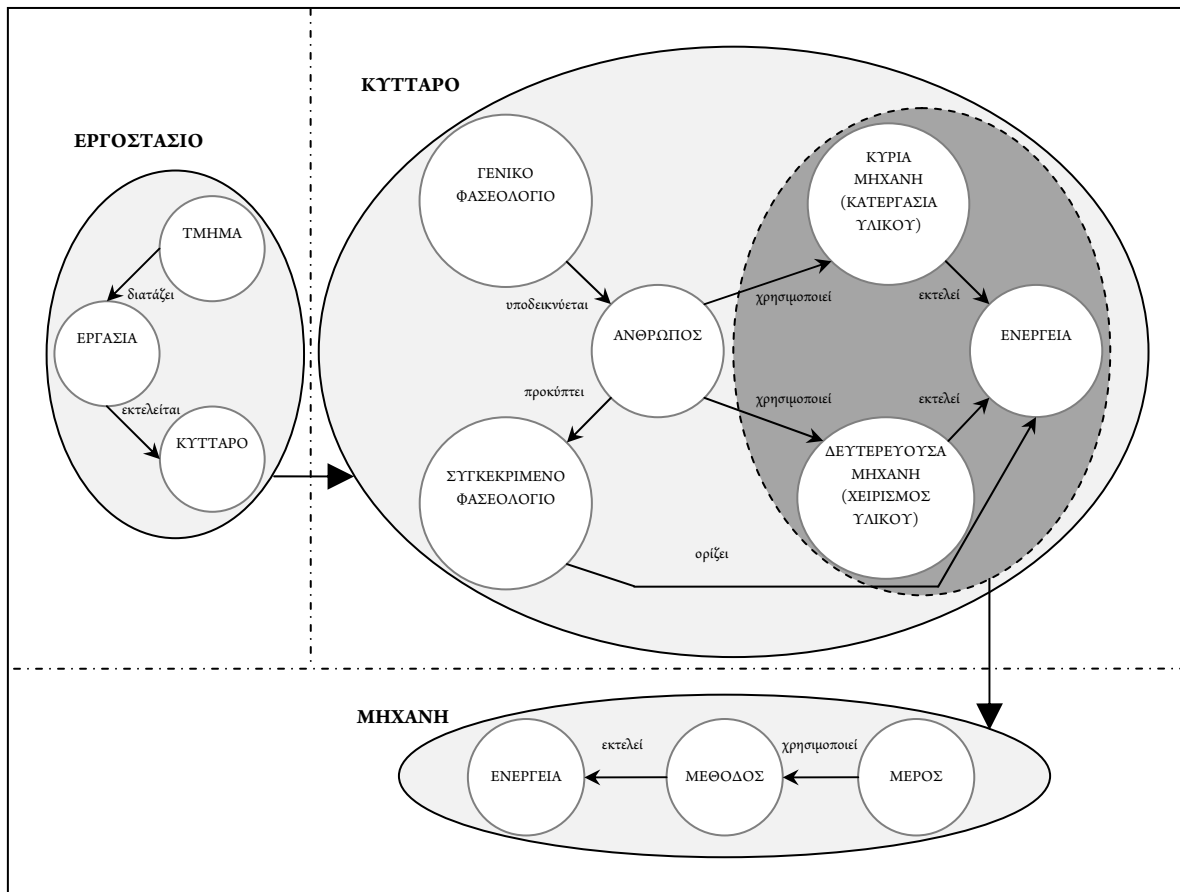
Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται περιγραφή ενός κυττάρου κατεργασιών μέσω σηματολογικών μοντέλων. Το κύτταρο κατεργασιών αποτελεί αντιπροσωπευτικό – στο πλαίσιο αυτής της εργασίας – σύστημα κατεργασιών με μικρό σχετικά μέγεθος, χωρίς όμως βλάβη της γενικότητας. Η μοντελοποίηση έγινε από πάνω-προς-τα-κάτω, δηλαδή από το πιο γενικό μοντέλο προς το πιο ειδικό. Για τα τυπικά στοιχεία του κυττάρου, εξετάστηκαν όλα τα αντικείμενα και τα χαρακτηριστικά αυτών, τόσο για να υφίσταται ένας ικανός φορμαλισμός περιγραφής, όσο και για να διαπιστωθούν οι μεταξύ των αντικειμένων σχέσεις, βήμα απαραίτητο για την δημιουργία αλληλεπίδρασης τόσο μεταξύ των αντικειμένων, όσο και σε σχέση με τον χρήστη. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι έπρεπε να δημιουργηθούν οντολογίες που να περιγράφουν τις κατεργασίες, τις μηχανές (κατεργασίας και διαχείρισης υλικού), αλλά και εννοιολογικά πλαίσια που να προσφέρουν καλύτερη εικόνα τόσο των συνδέσεων μεταξύ αντικειμένων της ίδιας οντολογίας όσο και της σύνδεσης διαφορετικών οντολογιών.

2.2 Γενικό σηματολογικό μοντέλο

Καταρχήν δημιουργήθηκε μια γενική οντολογία που αφορά στο σύνολο των αντικειμένων που αποτελούν ένα μηχανολογικό εργοστάσιο. Το γενικό μοντέλο μπορεί να περιγραφεί ως εξής (Σχήμα 2-1):

- Σε ένα εργοστάσιο, κάθε τμήμα ζητάει την εκτέλεση μιας εργασίας από ένα κύτταρο.
- Ο επιβλέπων του κυττάρου λαμβάνει ένα γενικό φασεολόγιο, από το οποίο προκύπτει ένα πιο συγκεκριμένο φασεολόγιο, βάσει των υφιστάμενων μηχανών, αλλά και του χρονικού προγραμματισμού του κυττάρου.
- Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται κύριες μηχανές (κατεργασία υλικού) και δευτερεύουσες μηχανές (διαχείριση υλικού) για να εκτελεστούν οι εργασίες του φασεολογίου.
- Κάθε μηχανή αποτελείται από μέρη, τα οποία κάνουν χρήση τυποποιημένων μεθόδων για την εκτέλεση των επιμέρους εργασιών.

Η αρχική οντολογία δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας τα απολύτως βασικά στοιχεία μιας οντολογίας: δεν έγινε, δηλαδή, χρήση κάποιας τυπικής γλώσσας για την αναπαράσταση, αλλά ένας καταρχήν σχεδιασμός των βασικών κλάσεων και των μεταξύ τους σχέσεων.

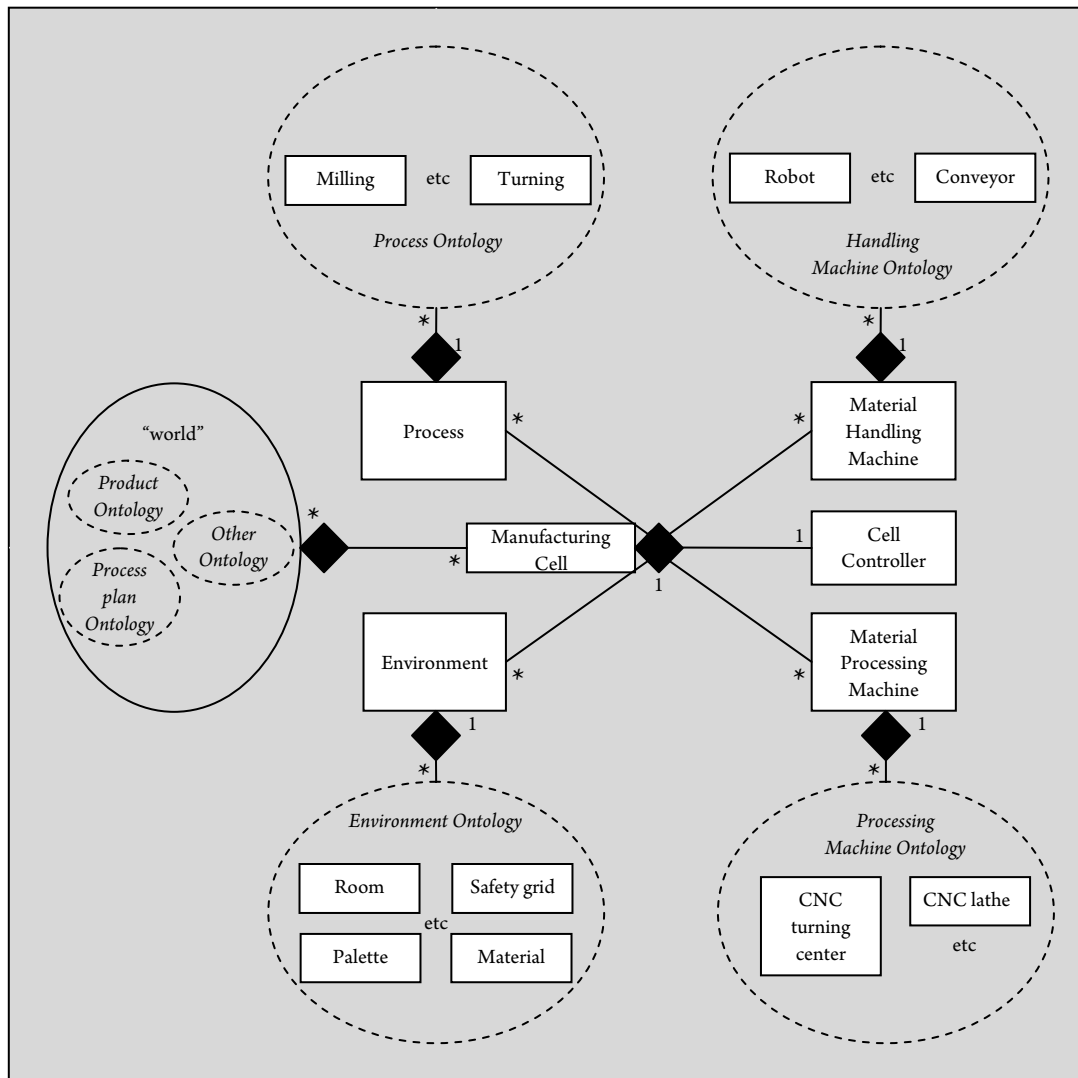


Σχήμα 2-1. Γενικό σημασιολογικό μοντέλο συστήματος κατεργασιών

Η γενική οντολογία διασφαλίζει ότι όλα τα αντικείμενα μπορούν να πραγματοποιηθούν (instanced). Οι διαφορετικές πραγματώσεις, όμως, της οντολογίας οφείλουν να περιέχουν πολύ περισσότερα δεδομένα, συγκεκριμένα για κάθε αντικείμενο. Συνεπώς, και παρόλο που υπάρχουν ομοιότητες μεταξύ των διαφορετικών πραγματώσεων, είναι αδύνατο να έχουμε μια συγκεκριμενοποιημένη οντολογία (*specific-oriented*) η οποία να καλύπτει όλα τα πιθανά αντικείμενα. Για αυτό το λόγο, η γενική οντολογία δύναται να καλύπτει το σύνολο ενός συστήματός, αλλά ταυτόχρονα δημιουργούνται συγκεκριμένες (υπό-)οντολογίες για τα διαφορετικά αντικείμενα του κυττάρου.

Στο Σχήμα 2-2 παρουσιάζεται η ίδια οντολογία με ένα δομικό διάγραμμα (διάγραμμα κλάσεων) κατά UML. Στο διάγραμμα παρουσιάζονται οι σχέσεις (*relations*) μεταξύ των κλάσεων μέσω συνδέσμων (*links*). Η ύπαρξη του γεμάτου ρόμβου υποδηλώνει την εξάρτηση

μεταξύ των κλάσεων ως σύνθεση (*composition*), μια ισχυρότερη μορφή συσχέτισης (*association*). Ουσιαστικά, η κλάση που έχει τον ρόμβο είναι η περικλείουσα κλάση (*container*) και κατέχει (*owns*) την κλάση που ακολουθεί. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι εάν καταστραφεί, καταστρέφονται και οι κλάσεις που ακολουθούν, έχουν δηλαδή την ίδια διάρκεια ζωής.

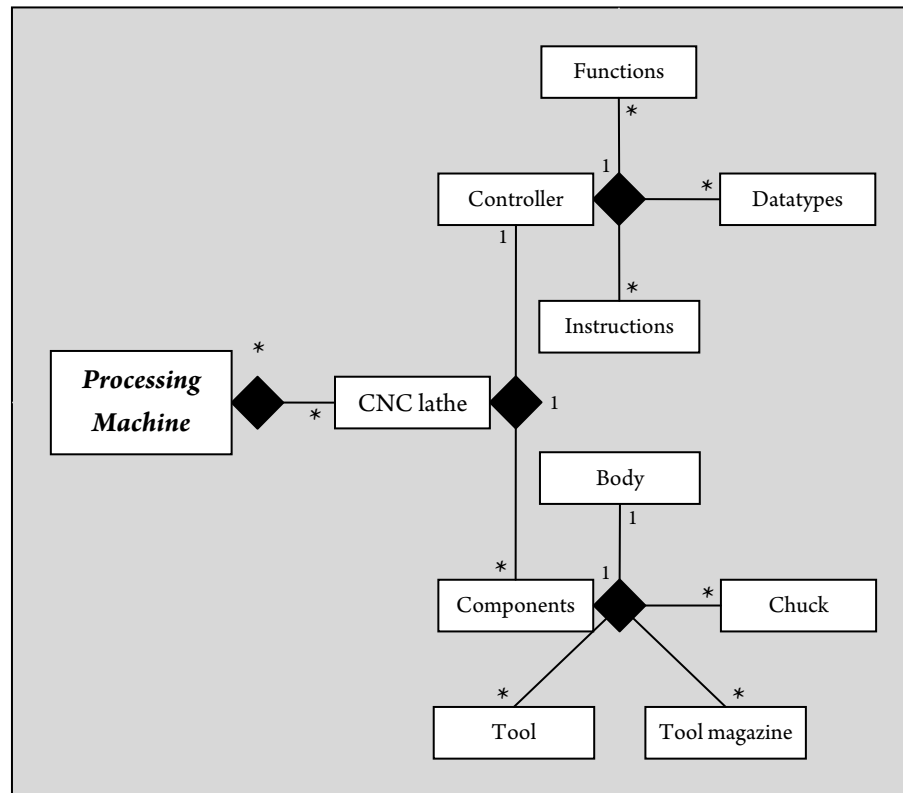


Σχήμα 2-2. Δομικό διάγραμμα συστήματος κατεργασιών

Η σήμανση στις δύο άκρες του συνδέσμου με έναν αριθμό (π.χ. 1) , έναν αστερίσκο (*) ή ένα εύρος αριθμών (π.χ. 1 ... *) υποδηλώνει την πολλαπλότητα (multiplicity), δηλαδή πόσα αντικείμενα του ενός άκρου αντιστοιχούν σε πόσα αντικείμενα του άλλου άκρου. Στο παράδειγμα, ένα κύτταρο (*manufacturing cell*) περικλείει πολλές κατεργασίες (*process*) αλλά μόνο έναν ηλεκτή κυττάρου (*cell controller*).

2.3 Σημαιολογικά μοντέλα κυρίων μηχανών (*processing machine ontology*)

Ως παράδειγμα κύριας μηχανής που συναντάται συχνά σε κύτταρα κατεργασιών χρησιμοποιήθηκε ο τόννος CNC, για τον οποίο δημιουργήθηκε σημαιολογικό μοντέλο. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-3, ισχύουν τα εξής:



Σχήμα 2-3. Δομικό διάγραμμα τόννου CNC

- Ο τόννος ανήκει στην κατηγορία των μηχανών κατεργασίας υλικού.
- Κάθε τόννος αποτελείται από τα μέρη (*components*) και τον ελεγκτή (*controller*).
- Τα μέρη του τόννου αποτελούνται από το τσωκ (*chuck*), το εργαλειοφορείο (*tool magazine*), το εργαλείο (*tool*), και τα λοιπά μέρη του σώματος (*body*).
- Ο ελεγκτής αποτελείται από τις εντολές (*instructions*), τις λειτουργίες (*functions*), και τα είδη δεδομένων (*datatypes*).

Κάθε κλάση έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά (*attributes*), όπως είναι αναμενόμενο. Για παράδειγμα η κλάση που αφορά στα μέρη του τόννου (*components*) έχει ως χαρακτηριστικά το μέγεθος, τη θέση, και τον προσανατολισμό, χαρακτηριστικά που διατηρούν και οι

τέσσερις υποκλάσεις (τσωκ – εργαλειοφορείο – εργαλείο – σώμα). Επιπλέον, η κάθε υποκλάση έχει περαιτέρω χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα η κλάση του τσωκ (*chuck*) έχει ως χαρακτηριστικά το εύρος ταχύτητας περιστροφής και το εύρος διαμέτρων υλικού που μπορεί να συγκρατήσει, αλλά και χαρακτηριστικά σχετικά με την κατάσταση του τσωκ σε κάθε δεδομένη στιγμή (π.χ. *currentSpeed*).

Επιπρόσθετα χαρακτηριστικά της οντολογίας αφορούν στην τοποθέτηση του αντικειμένου στον χώρο. Για παράδειγμα, η υπερ-κλάση CNC lathe έχει χαρακτηριστικά θέσης (*posX*, *posY*, *posZ*) και προσανατολισμού (*orientAngle*), οι τιμές των οποίων συνδέονται με τον ελεγκτή σχεδιασμού του κυττάρου, μέσω κατάλληλου αλγόριθμου, με αποτέλεσμα την τοποθέτηση του αντικειμένου στον χώρο.

Ο ελεγκτής του τόνου μοντελοποιήθηκε κατά τρόπο τέτοιο ώστε να μπορούν να αναπαρασταθούν οι εντολές που λαμβάνει ένας ελεγκτής (G-κώδικας), και εν συνεχεία να προκύψουν οι σχέσεις μεταξύ ελεγκτή – κινούμενων μερών, όπως περιγράφεται αναλυτικότερα στην παράγραφο 2.6. Αυτό μοντελοποιείται ουσιαστικά από τις κλάσεις του ελεγκτή· η κλάση *instructions* αφορά στις εντολές που μπορεί να λάβει, ενώ η κλάση *functions* αναφέρεται στις εσωτερικές εντολές, δηλαδή στους αλγόριθμους που εκτελούνται, για την μετατροπή των εξωτερικών εντολών σε εσωτερικές κινήσεις. Σημαντικό χαρακτηριστικό του ελεγκτή είναι η κατάσταση (*state*) της μηχανής, η οποία προκύπτει από τα επιμέρους χαρακτηριστικά των άλλων κλάσεων, καθώς αυτές οι πληροφορίες μεταφέρονται στον κεντρικό ελεγκτή του κυττάρου ως δεδομένα εισόδου στον αλγόριθμο αποφάσεων.

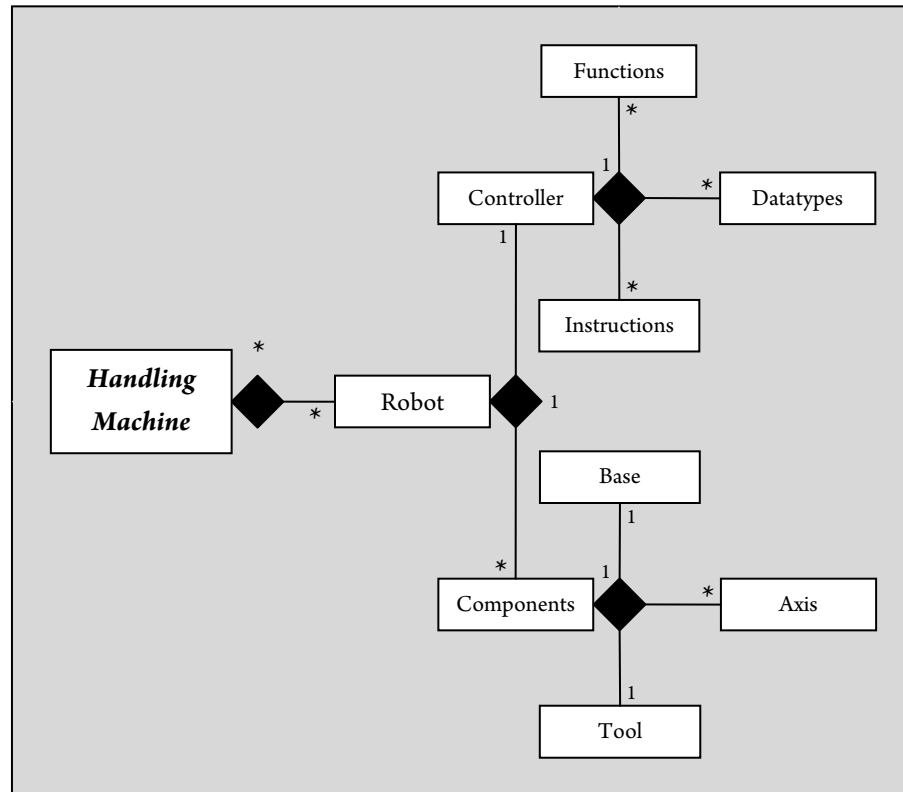
2.4 Σημασιολογικά μοντέλα βοηθητικών μηχανών (*handling machine ontology*)

Κύρια παραδείγματα βοηθητικών μηχανών που υπάρχουν μέσα σε ένα κύτταρο αφορούν σε ρομποτικούς βραχίονες και μεταφορικές ταινίες. Για αυτά τα δύο είδη μηχανών δημιουργήθηκαν σημασιολογικά μοντέλα, στηριζόμενα στα πραγματικά μοντέλα των μηχανών.

Όσον αφορά στους ρομποτικούς βραχίονες, ισχύει το Σχήμα 2-4, σύμφωνα με το οποίο:

- Ο ρομποτικός βραχίονας ανήκει στην κατηγορία των μηχανών χειρισμού υλικού.
- Κάθε ρομποτικός βραχίονας αποτελείται από τα μέρη (*components*) και τον ελεγκτή (*controller*).

- Τα μέρη του ρομποτικού βραχίονα αποτελούνται από την βάση (*base*), τις αρθρώσεις (*axis*), και την αρπάγη (*tool*).
- Ο ελεγκτής αποτελείται από τις εντολές (*instructions*), τις λειτουργίες (*functions*), και τα δεδομένα (*datatypes*).



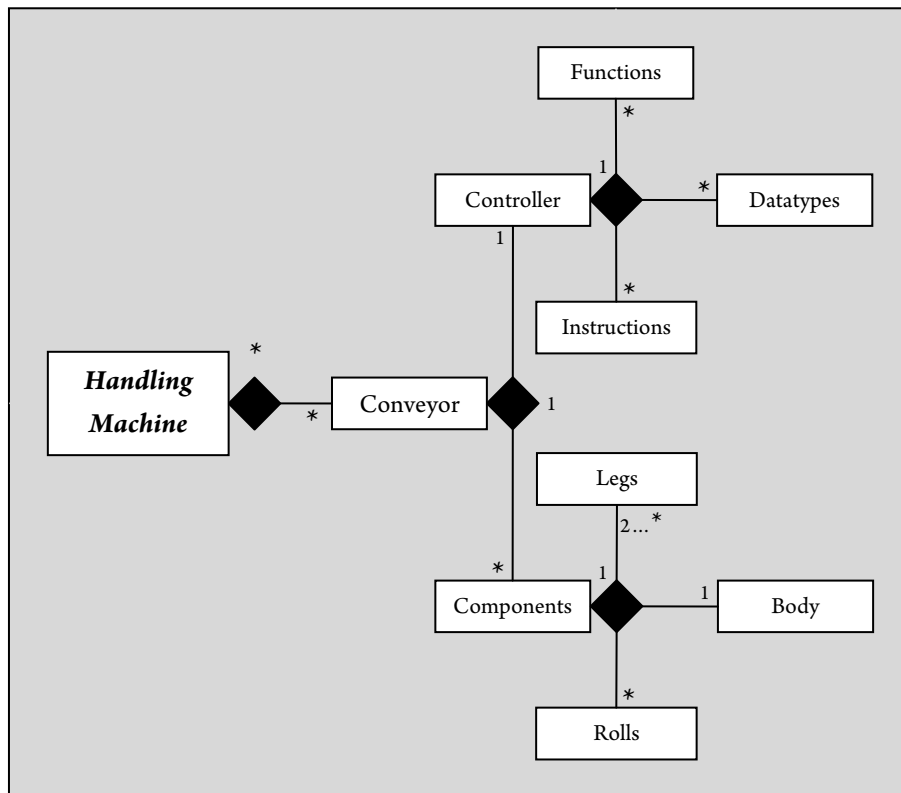
Σχήμα 2-4. Δομικό διάγραμμα ρομποτικού βραχίονα

Κάθε κλάση έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά (*attributes*). Για παράδειγμα η κλάση που αφορά στα μέρη του βραχίονα (*components*) έχει ως χαρακτηριστικά το μέγεθος, την θέση, και τον προσανατολισμό, χαρακτηριστικά που διατηρούν και οι τρεις υποκλάσεις (βάση – αρθρώσεις – εργαλείο). Επιπλέον, η κάθε υποκλάση έχει περαιτέρω χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα η κλάση των αρθρώσεων (*axis*) που έχει ως χαρακτηριστικά το εύρος γωνιών κίνησης, την μέγιστη ταχύτητα κίνησης, τον άξονα περιστροφής κ.α.

Αντίστοιχα με την οντολογία του CNC τόρνου, η υπερ-κλάση *robot* έχει χαρακτηριστικά, οι τιμές των οποίων ορίζονται από τον αλγόριθμο τοποθέτησης του κεντρικού ελεγκτή, με αποτέλεσμα την τοποθέτηση του αντικειμένου στον χώρο .

Ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιήθηκε ο ελεγκτής του βραχίονα, είναι τέτοιος ώστε να μπορούν να μοντελοποιηθούν οι εντολές που λαμβάνει ένας ελεγκτής (π.χ. μέσω της γλώσσας προγραμματισμού του βραχίονα), και εν συνεχεία να προκύψουν οι σχέσεις μεταξύ ελεγκτή – κινούμενων μερών του βραχίονα. Ο ελεγκτής του βραχίονα λαμβάνει τιμές σχετικά με την κίνηση του βραχίονα (π.χ. θέση-στόχος, ταχύτητα κίνησης, τύπος κίνησης κλπ) και εκτελεί αλγόριθμο για την επίτευξή της. Κατά την εκτέλεση του αλγόριθμου, τροποποιούνται κατάλληλα οι τιμές των χαρακτηριστικών των αρθρώσεων (*axis*) της οντολογίας ώστε να πραγματοποιηθεί η κίνηση. Αντίστοιχες αποφάσεις λαμβάνει και σε σχέση με το εργαλείο (*tool*) του βραχίονα, τροποποιώντας τις τιμές των χαρακτηριστικών της ώστε να ανοίγει και να κλείνει κατάλληλα σε σχέση με το αντικείμενο που επιχειρεί να χειριστεί. Αντίστοιχα με τον μοντέλο του τόνου CNC, οι εξωτερικές εντολές αποτελούν τμήμα της κλάσης *instructions*, ενώ οι αλγόριθμοι αποτελούν τμήμα της κλάσης *functions*. Ομοίως, η κατάσταση της μηχανής αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό του ελεγκτή, η τιμή του οποίου εξαρτάται από τις τιμές των χαρακτηριστικών των επιμέρους κλάσεων και μεταφέρεται συνεχώς στον κεντρικό ελεγκτή του κυττάρου.

Αντίστοιχο σημασιολογικό μοντέλο δημιουργήθηκε και για τις μεταφορικές ταινίες.



Σχήμα 2-5. Δομικό διάγραμμα μεταφορικής ταινίας

Σύμφωνα με το Σχήμα 2-5, ισχύουν τα εξής:

- Η μεταφορική ταινία ανήκει στην κατηγορία των μηχανών χειρισμού υλικού.
- Κάθε μεταφορική ταινία αποτελείται από τα μέρη (*components*) και τον ελεγκτή (*controller*).
- Τα μέρη της μεταφορικής ταινίας αποτελούνται από τα πόδια (*legs*), το σώμα (*body*), και τους κυλίνδρους κίνησης (*roll*).
- Ο ελεγκτής αποτελείται από τις εντολές (*instructions*), τις λειτουργίες (*functions*), και τα δεδομένα (*datatypes*).

Κάθε κλάση έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά, ενώ υφίστανται αλληλοσυσχετισμοί μεταξύ των κλάσεων. Για παράδειγμα, η τιμή του χαρακτηριστικού που αναφέρεται στο μήκος της υπερκλάσης *conveyor* καθορίζει την τιμή του χαρακτηριστικού *quantity* της κλάσης *roll*, σε συνδυασμό με την τιμή του χαρακτηριστικού *diameter* της ίδιας κλάσης. Ομοίως με τις προηγούμενες οντολογίες, η υπερ-κλάση διαθέτει χαρακτηριστικά, οι τιμές των οποίων καθορίζουν το σημείο τοποθέτησης του αντικειμένου στον χώρο, όπως ορίζει ο ελεγκτής του κυττάρου μέσω του αντίστοιχου αλγόριθμου.

Αναφορικά με τον ελεγκτή της μεταφορικής ταινίας, ακολουθείται αλγόριθμος σχετικά με την εκτέλεση κινήσεων. Ο αλγόριθμος ελέγχει την περιστροφή των κυλίνδρων της ταινίας, ρυθμίζοντας την τιμή της ταχύτητας, αλλά και τη φορά της κίνησης. Οι πληροφορίες αυτές μεταδίδονται και στον κεντρικό ελεγκτή του εικονικού κυττάρου, ώστε να ρυθμιστεί η κίνηση της παλέτας μεταφοράς του υλικού, εφόσον αυτή βρίσκεται επάνω σε κάποια μεταφορική ταινία.

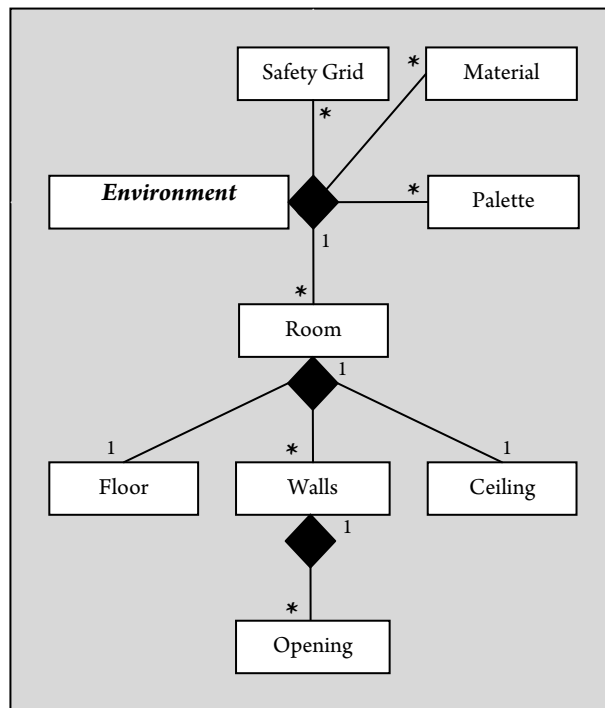
2.5 Σημαιολογικά μοντέλα περιβάλλοντος (*environment ontology*)

Με τον όρο «περιβάλλον» αναφερόμαστε στις οντότητες εντός του κυττάρου κατεργασιών που δεν ανήκουν σε κάποια από τις υπόλοιπες κατηγορίες. Το περιβάλλον αποτελείται καταρχήν από τα στοιχεία του προστατευτικού κιγκλιδώματος, τα δομικά στοιχεία του δωματίου (δάπεδο, οροφή, τοίχοι), τις παλέτες μεταφοράς υλικού, καθώς και το ίδιο το υλικό.

Όσον αφορά στα στοιχεία του προστατευτικού κιγκλιδώματος, τα χαρακτηριστικά τους σχετίζονται με τις γεωμετρικές τους διαστάσεις (ύψος, μήκος), τον τύπο τους (κανονικό, με άνοιγμα, με πόρτα) και το σημείο τοποθέτησής τους (συντεταγμένες X,Y, προσανατολισμός). Οι τιμές των χαρακτηριστικών μεταβάλλονται από τον κεντρικό

ελεγκτή του κυττάρου μέσω κατάλληλου αλγόριθμου τοποθέτησης, ενώ δεν υπάρχει αλληλοσυσχετισμός μεταξύ τους σχετικά με την τοποθέτηση.

Όσον αφορά στα δομικά στοιχεία του χώρου, τα χαρακτηριστικά τους σχετίζονται με τις γεωμετρικές τους διαστάσεις (μήκος, πλάτος, ύψος) και το σημείο τοποθέτησής τους. Τα γεωμετρικά στοιχεία του χώρου επηρεάζουν τις τιμές των αντίστοιχων χαρακτηριστικών των δομικών στοιχείων μέσω αλγόριθμου του κεντρικού ελεγκτή. Επιπροσθέτως, οι τοίχοι διαθέτουν την υποκλάση *opening*, η οποία υποδηλώνει την ύπαρξη ανοίγματος στον τοίχο και διαθέτει ξεχωριστά χαρακτηριστικά.



Σχήμα 2-6. Δομικό διάγραμμα περιβάλλοντος

Η παλέτα μεταφοράς του υλικού αποτελεί ξεχωριστή οντότητα στο κύτταρο, κυρίως λόγω της αλληλεπίδρασης με άλλα αντικείμενα του κυττάρου. Τα χαρακτηριστικά που αφορούν στις γεωμετρικές διαστάσεις της επηρεάζουν τις διαστάσεις των μεταφορικών ταινιών από τις οποίες περνάει, ενώ – αντίστροφα – η θέση της στον χώρο εξαρτάται άμεσα από τις μεταφορικές ταινίες. Υπάρχει, δηλαδή, ουσιαστική σύνδεση μεταξύ της κινηματικής των ταινιών και της κινηματικής της παλέτας.

Ομοίως αποτελεί ξεχωριστή οντότητα και το υλικό που διακινείται εντός του κυττάρου κατεργασιών. Η οντότητα διαθέτει χαρακτηριστικά σχετικά με τις γεωμετρικές διαστάσεις (μήκος, διάμετρος) και χαρακτηριστικά σχετικά με την θέση και τον προσανατολισμό. Τα

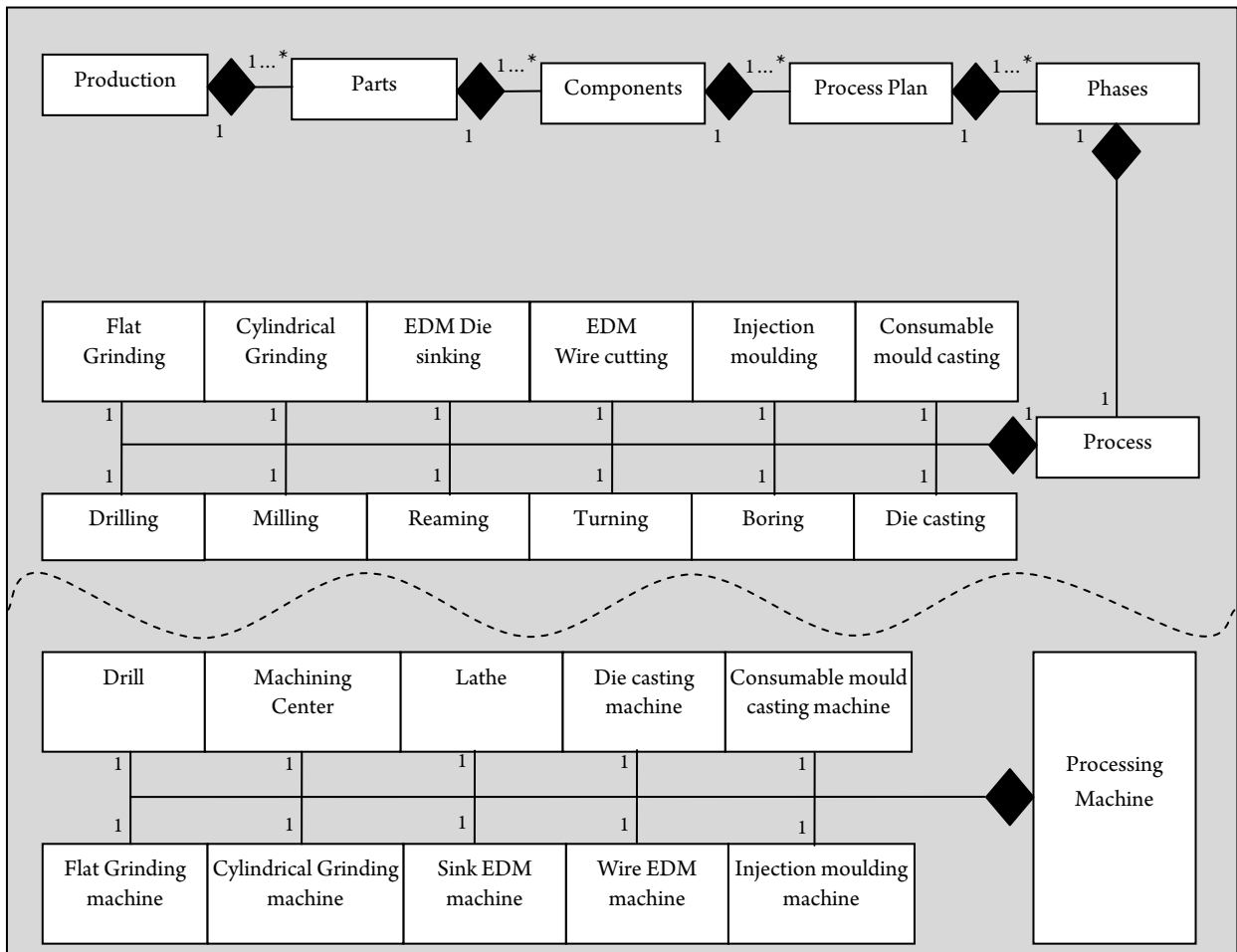
πρώτα επηρεάζουν τις τιμές των χαρακτηριστικών των διαστάσεων της παλέτας, ενώ μεταβάλλονται από τον κεντρικό ελεγκτή, μέσω αλγορίθμου, εάν πληρούνται κατάλληλες συνθήκες (π.χ. εκτέλεση κοπής από τον τόρνο). Οι τιμές που αφορούν στα χαρακτηριστικά της θέσης της οντότητας μεταβάλλονται από τον κεντρικό ελεγκτή, εφόσον πραγματοποιείται κάποια μετακίνηση (π.χ. επί μεταφορικής ταινίας ή μέσω του ρομποτικού βραχίονα). Οι τιμές των χαρακτηριστικών χρησιμοποιούνται αντίστοιχα για να ληφθούν αποφάσεις που αφορούν σε άλλες οντολογίες: για παράδειγμα, ο ελεγκτής ελέγχει συνεχώς την θέση και τον προσανατολισμό του υλικού σε σχέση με την θέση και τον προσανατολισμό ενός ρομποτικού βραχίονα ώστε, εάν ταυτίζονται, σε ενδεχόμενο κλείσιμο της αρπάγης και κίνηση του βραχίονα, να μεταβληθούν και οι τιμές των χαρακτηριστικών θέσης του υλικού (αφού πλέον μετακινείται λόγω του βραχίονα).

2.6 Σημασιολογικά μοντέλα εργασιών (*process ontology*)

Το σημασιολογικό μοντέλο των εργασιών εντός ενός κυττάρου κατεργασιών είναι ιδιαίτερος σημαντικός, καθώς αποτελεί τον συνδυαστικό κρίκο μεταξύ των μηχανών του κυττάρου και των εντολών που έρχονται από τα υπόλοιπα τμήματα του εργοστασίου, ενώ σχετίζεται άμεσα και με την μετατροπή του αρχικού υλικού σε τελικό τεμάχιο μέσω του φασεολογίου. Συνεπώς, απαιτείται σημασιολογικό μοντέλο για κάθε κατεργασία που δύναται να λάβει χώρα εντός του κυττάρου και σύνδεσή της με τα σημασιολογικά μοντέλα των μηχανών. Το γενικό σημασιολογικό μοντέλο σύνδεσης τεμαχίου – φασεολογίου – κατεργασιών – μηχανών φαίνεται στο Σχήμα 2-7. Το σχήμα περιγράφεται ως εξής:

«Το τμήμα παραγωγής ορίζει μια παραγωγή (*production*) η οποία αποτελείται από αντικείμενα (*parts*). Τα αντικείμενα αποτελούνται από τμήματα (*components*), για το καθένα από τα οποία υπάρχει ένα (ή περισσότερα) φασεολόγιο(-α) (*process plan(s)*). Το φασεολόγιο αποτελείται από φάση(-εις) (*phases*) και η κάθε φάση αποτελείται από κάποια κατεργασία (*process*), συμπεριλαμβανομένου του εκάστοτε χειρισμού του υλικού. Κάθε κατεργασία μπορεί να εκτελεστεί από κάποια (-ες) μηχανή(-ες) (*machine(-s)*) εντός του κυττάρου.»

Η σύνδεση μεταξύ κατεργασιών και μηχανών δεν είναι πάντα 1-προς-1· για παράδειγμα, κατεργασία χύτευσης πλαστικού με έγχυση γίνεται πάντα με αντίστοιχη μηχανή (*injection moulding machine*), ενώ ένα κέντρο κατεργασιών εκτελεί φρεζάρισμα (*milling*), αλλά μπορεί –δυστυχώς– να εκτελέσει και διάτρηση (*drilling*), γλύφανση (*reaming*), και εσωτερική τόννευση (*boring*), εφόσον διαθέτει τα κατάλληλα εργαλεία.

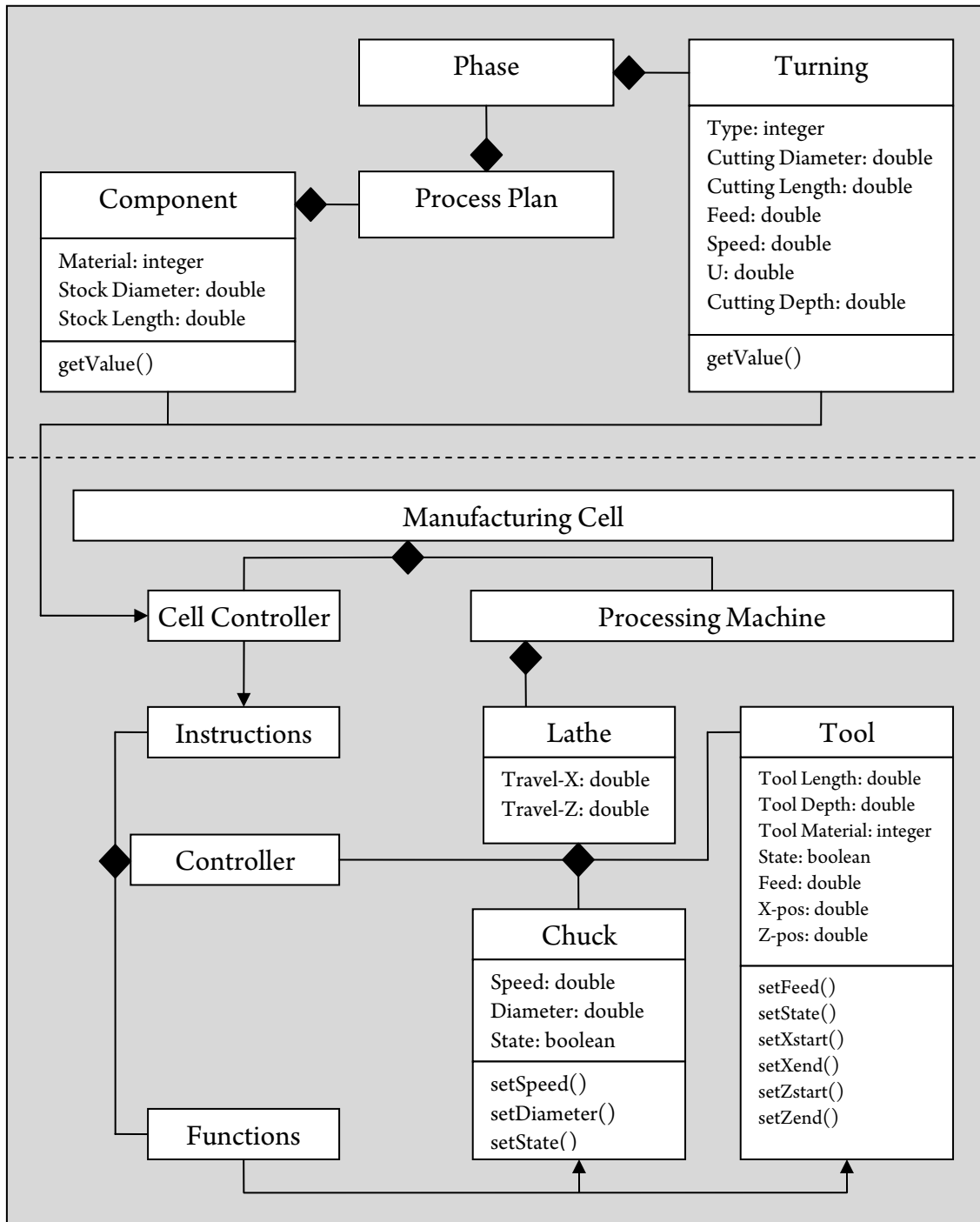


Σχήμα 2-7. Δομικό διάγραμμα κατεργασιών

Στο παράδειγμα που επιλέχθηκε, οι εργασίες που λαμβάνουν χώρα αναφέρονται στην κατεργασία σε τόρνο και τον αντίστοιχο χειρισμό υλικού από ρομποτικούς βραχίονες και μεταφορικές ταινίες. Για αυτό το λόγο, έχει σημασία να είναι επαρκώς ορισμένες οι εν λόγω εργασίες και η σύνδεσή τους με τις αντίστοιχες μηχανές. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-8, τα χαρακτηριστικά της οντότητας της κατεργασίας (π.χ. ο τύπος της κοπής, η πρόωση, η ταχύτητα, η διάμετρος κοπής) συλλέγονται (μέσω της μεθόδου *getValue()* σε κάθε αντικείμενο), προωθούνται στον ελεγκτή του κυττάρου, εν συνεχεία στον ελεγκτή της μηχανής, και από εκεί στα επιμέρους τμήματα της μηχανής (π.χ. η πρόωση στο εργαλείο μέσω της μεθόδου *setFeed()*, η ταχύτητα περιστροφής και η διάμετρος στο τσawk μέσω των μεθόδων *setSpeed()* και *setDiameter()*).

Ο ελεγκτής της μηχανής εκτελεί αλγόριθμο βάσει των δεδομένων εισαγωγής (δεδομένα της κατεργασίας) για να λάβει αποφάσεις σχετικά με την εκτέλεση κινήσεων του εργαλείου,

ώστε να πραγματοποιηθεί η κοπή. Σύμφωνα με την παρούσα μοντελοποίηση, τα δεδομένα εισαγωγής αποτελούν κομμάτι της κλάσης *instructions*, ενώ οι αποφάσεις που λαμβάνονται αποτελούν κομμάτι της κλάσης *functions* του ελεγκτή.



Σχήμα 2-8. Λεπτομερειακό διάγραμμα κατεργασίας – μηχανής

2.7 Εννοιολογικά πλαίσια

Η ποικιλία εφαρμογών σχετικών με ένα κύτταρο κατεργασιών οφείλεται στην ύπαρξη πολλών εννοιολογικών πλαισίων. Με τον όρο «εννοιολογικό πλαίσιο» (*context*) αναφερόμαστε στον διαφορετικό τρόπο σύνδεσης των κλάσεων μεταξύ τους και στις σχέσεις (*relations*) που προκύπτουν. Ιδιαίτερο ρόλο διαδραματίζει ο τρόπος με τον οποίο ο εικονικός ελεγκτής συνδέεται τόσο με τα εικονικά αντικείμενα όσο και με τον πραγματικό ελεγκτή και, κατ' επέκταση, με τα αντικείμενα του φυσικού κόσμου.

Σημειώνονται τέσσερα διαφορετικά εννοιολογικά πλαίσια για κύτταρα κατεργασιών (Σχήμα 2-9):

- Σχεδιασμού (*design*)
- Εκπαίδευσης (*training*)
- Παρακολούθησης (*monitoring*)
- Λειτουργίας εξ αποστάσεως (*tele-operation*)

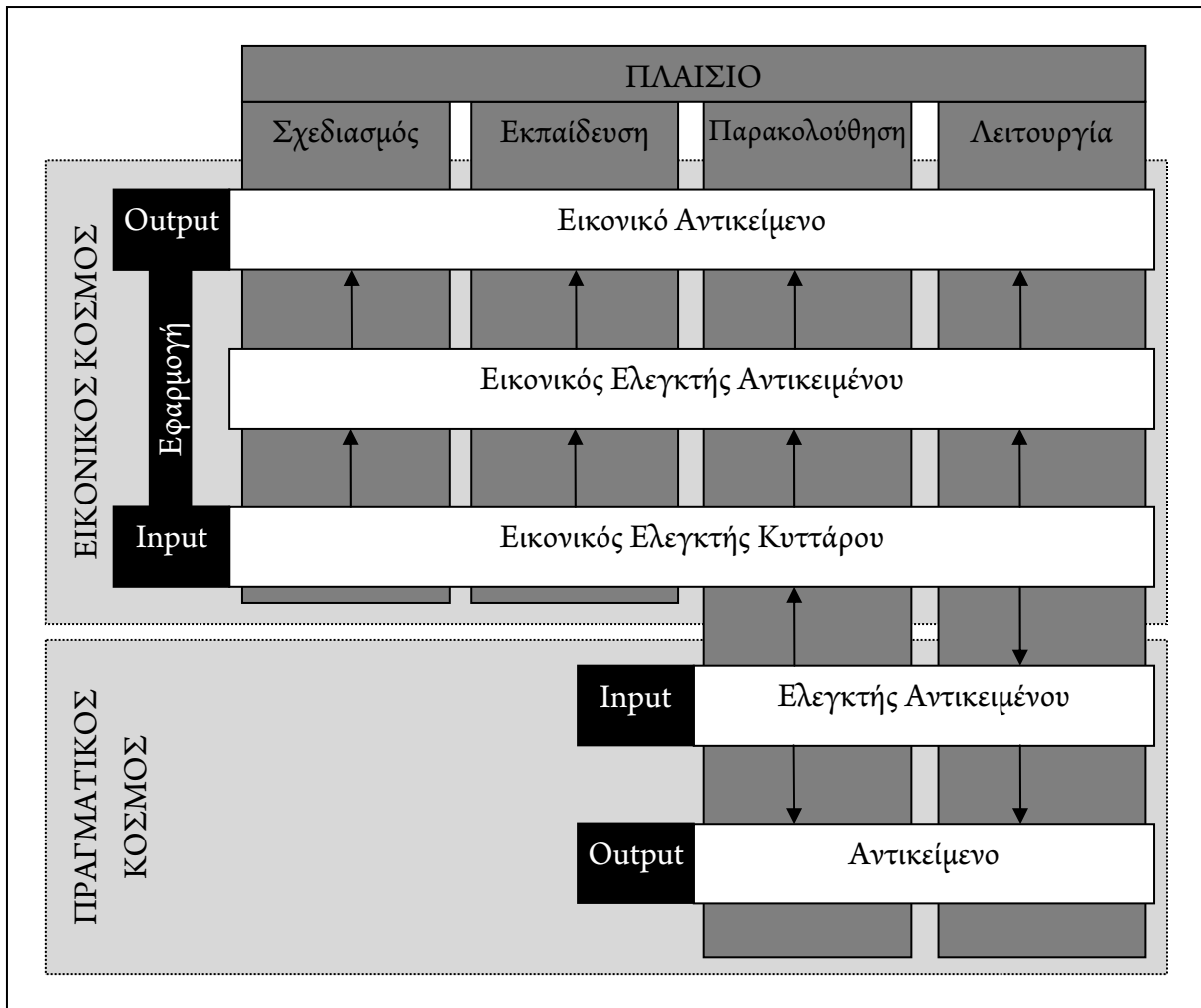
Στην πρώτη περίπτωση, το πλαίσιο αφορά στον σχεδιασμό ενός κυττάρου κατεργασιών. Ο ελεγκτής του κάθε εικονικού αντικειμένου δεν εμπλέκεται σε καμία περίπτωση, καθώς τα αντικείμενα του κυττάρου παραμένουν στατικά. Αντίθετα, ο ελεγκτής του εικονικού κυττάρου έχει ως βασική λειτουργία την δημιουργία και την σωστή τοποθέτηση των αντικειμένων, είτε μέσω συμβουλευτικών επιλογών είτε μέσω αυτόματων ενεργειών, επεμβαίνοντας στην χωροθέτηση των αντικειμένων.

Στην δεύτερη περίπτωση, το πλαίσιο αφορά στην εκπαίδευση ενός χειριστή με εικονικά αντικείμενα. Δεδομένου ότι τα εικονικά αντικείμενα είναι πλέον δυναμικά, ο ελεγκτής του κάθε εικονικού αντικειμένου λειτουργεί παρόμοια με τον πραγματικό ελεγκτή, δεχόμενος εντολές από τον χρήστη και μεταβιβάζοντας τις εντολές αυτές στα εικονικά αντικείμενα. Σε αυτή την περίπτωση, ο εικονικός ελεγκτής του κυττάρου χρησιμοποιείται μόνον ως ενδιάμεσος (*mediator*) μεταξύ του χρήστη και των εικονικών ελεγκτών.

Στην τρίτη περίπτωση, το πλαίσιο αφορά στην παρακολούθηση (και εξ αποστάσεως) ενός πραγματικού κυττάρου κατεργασιών. Σε αυτό το πλαίσιο, ο εικονικός ελεγκτής δέχεται σήματα από τους ελεγκτές των πραγματικών αντικειμένων, τα οποία μετατρέπει σε εντολές για τους ελεγκτές των εικονικών αντικειμένων. Ο χρήστης δεν μπορεί να επέμβει (ούτε στα εικονικά ούτε στα πραγματικά αντικείμενα), δύναται όμως να επιλέγει τι είδους

πληροφορίες επιθυμεί να λαμβάνει κατά την παρακολούθηση, αναλόγως του επιπέδου λεπτομέρειας (*level-of-detail*).

Στην τέταρτη περίπτωση, το πλαίσιο αφορά στον έλεγχο ενός κυττάρου εξ αποστάσεως. Σε αυτό το πλαίσιο, ο εικονικός ελεγκτής έχει διπλή ιδιότητα: αφενός δέχεται εντολές από τον χρήστη, τις οποίες στη συνέχεια μεταφέρει στους ελεγκτές των εικονικών αντικειμένων (και κατ' επέκταση και στα εικονικά αντικείμενα), αφετέρου μεταφέρει τις ίδιες εντολές στους ελεγκτές των πραγματικών αντικειμένων, με αποτέλεσμα την εκτέλεση τους στον πραγματικό κόσμο.

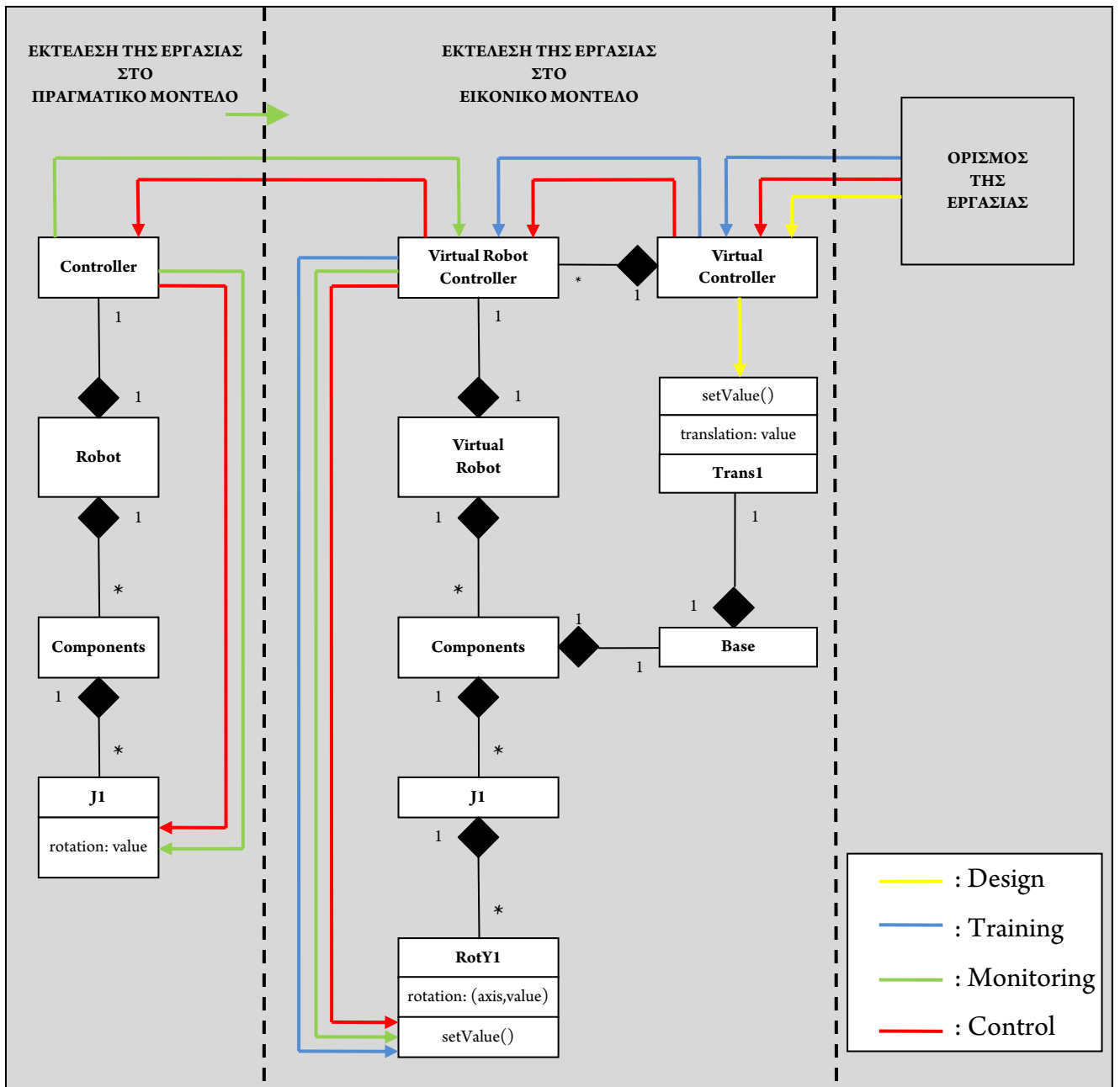


Σχήμα 2-9. Διάγραμμα εννοιολογικών πλαισίων

Συγκεντρωτικά, αναφορικά με τα εννοιολογικά πλαίσια παρατηρούμε τις εξής διαφορές:

- Κύρια διαφορά είναι η ύπαρξη ή μη σύνδεσης μεταξύ πραγματικού και εικονικού κόσμου.

- Η ροή των πληροφοριών είναι πάντα ίδια μεταξύ των ελεγκτών και των αντικειμένων (ανεξαρτήτως κόσμου), αλλά όχι μεταξύ εικονικού και πραγματικού ελεγκτή.
- Το είδος της πληροφορίας που μεταφέρεται διαφέρει από πλαίσιο σε πλαίσιο.



Σχήμα 2-10. Διάγραμμα συνδέσεων εικονικού – πραγματικού ρομποτικού βραχίονα

Συνεπώς, το είδος του πλαισίου ορίζει μια σειρά παραμέτρων σε σχέση με τα σημασιολογικά μοντέλα των αντικειμένων. Για να γίνει πιο σαφές, παρατίθεται ένα απλό παράδειγμα ενός ρομποτικού βραχίονα όπου φαίνονται οι διαφορετικές συνδέσεις / δεδομένα αναλόγως του πλαισίου (Σχήμα 2-10).

2.8 Η χρήση σημασιολογικών μοντέλων

Τα σημασιολογικά μοντέλα αποτελούν το πρώτο βήμα στην προσπάθεια ανάλυσης των αντικειμένων ενός κυττάρου κατεργασιών και στην δημιουργία κατάλληλων μοντέλων για χρήση από τις εφαρμογές. Η χρήση οντολογιών προσφέρει την δυνατότητα για έναν φορμαλισμό που αφ' ενός επιτρέπει μια ολοκληρωμένη ανάλυση και αφ' ετέρου δίνει την δυνατότητα για χρήση τέτοιων μοντέλων περαιτέρω από συναφείς περιοχές. Επιπρόσθετα, δίνει την δυνατότητα επέκτασης των υφιστάμενων μοντέλων και χρήση τους μέσω βάσεων δεδομένων, εφόσον το αντικείμενο αντιμετωπιστεί με διαφορετική προσέγγιση (π.χ. ανταλλαγή δεδομένων με συγκεκριμένο φορμαλισμό μέσω διαδικτύου).

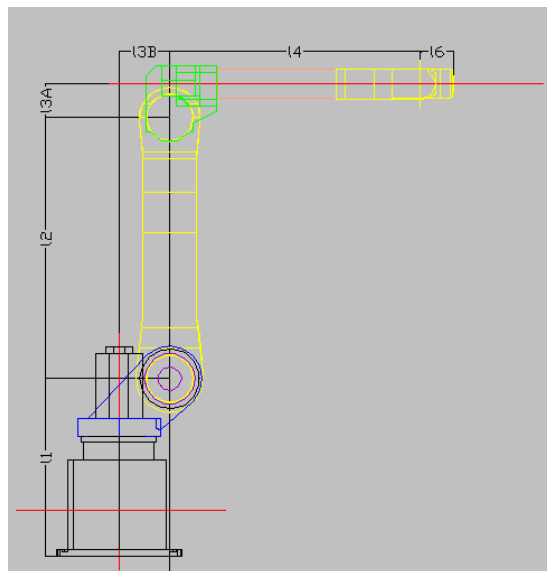
3 Κινηματική και χωροταξία του συστήματος κατεργασιών

3.1 Ευθεία κινηματική ανάλυση ρομποτικών βραχιόνων 6R

3.1.1 Εισαγωγή

Ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται και εισάγονται αντικείμενα εντός του εικονικού χώρου δημιουργεί συγκεκριμένες ανάγκες και αντίστοιχα -προς επίλυση- προβλήματα. Ένα από τα θέματα που πρέπει να επιλυθούν είναι η θέση και ο προσανατολισμός των τμημάτων ενός 6R ρομποτικού βραχίονα. Η επιλογή του συγκεκριμένου αντικειμένου έγινε διότι οι ρομποτικοί βραχίονες αποτελούν τον κύριο εκπρόσωπο αυτοματοποιημένης και ευέλικτης διαχείρισης υλικού, η κατηγορία, δε, των 6R είναι η πλέον διαδεδομένη σε κύτταρα κατεργασιών, όπου εξυπηρετούν τις εργαλειομηχανές. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού έγινε ευθεία κινηματική ανάλυση και δημιουργήθηκε ο κατάλληλος αλγόριθμος υπολογισμού.

Στο Σχήμα 3-1 φαίνεται ένας τυπικός ρομποτικός βραχίονας έξι βαθμών ελευθερίας.



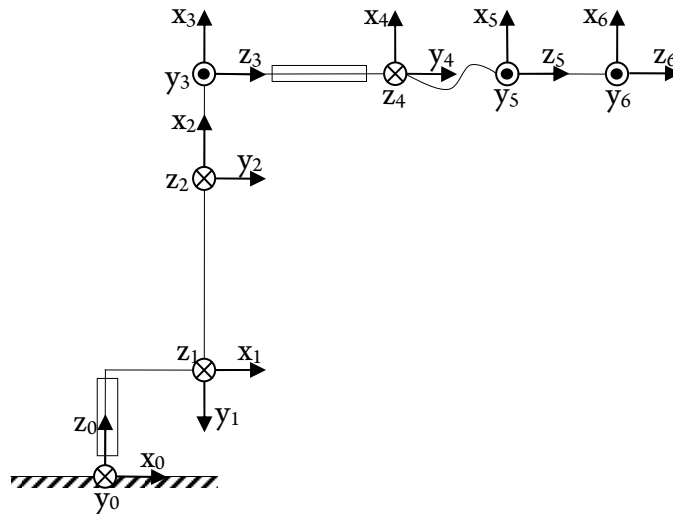
Σχήμα 3-1. Βραχίονας έξι βαθμών ελευθερίας

3.1.2 Υλοποίηση

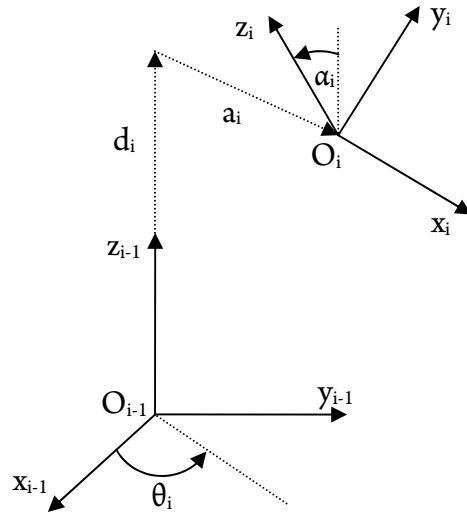
Ακολουθήθηκε η μέθοδος Denavit-Hartenberg για τον υπολογισμό των ομογενών μετασχηματισμών T , οι οποίοι συνδέουν τη θέση και τον προσανατολισμό ενός συνδέσμου με του προηγούμενου. Η μέθοδος περιλαμβάνει έξι βήματα:

1. Διαδοχική αρίθμηση των συνδέσμων και των αρθρώσεων (όπου η βάση είναι ο σύνδεσμος 0 και το τελικό άκρο ο σύνδεσμος $N=6$).
2. Ανάθεση συστημάτων συντεταγμένων στους συνδέσμους ($O_i; x_i, y_i, z_i$).
3. Προσδιορισμός των συντεταγμένων αρθρώσεων (q_i).
4. Καθορισμός των κινηματικών παραμέτρων των συνδέσμων (περιστροφή θ_i , μετατόπιση d_i , μετατόπιση a_i , περιστροφή α_i).
5. Ορισμός πινάκων μετασχηματισμών των συνδέσμων.
6. Υπολογισμός του ευθύ πίνακα μετασχηματισμού.

Στο Σχήμα 3-2 φαίνεται η τοποθέτηση των συστημάτων συντεταγμένων (βήμα 1 & βήμα 2), ενώ στο Σχήμα 3-3 ο τρόπος μεταφοράς ενός $\Sigma\Sigma$ στο επόμενο $\Sigma\Sigma$ (βήμα 4).



Σχήμα 3-2. Τοποθέτηση συστημάτων συντεταγμένων



Σχήμα 3-3. Μεταφορά συστήματος συντεταγμένων

Με βάση τα στοιχεία που φαίνονται στα σχήματα 1-3 (μήκη / περιστροφές) δημιουργήθηκε ο Πίνακας 3-1 με τις κινηματικές παραμέτρους D-H.

	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	q_1	l_1	l_{3B}	$-\frac{\pi}{2}$
2	$q_2 - \frac{\pi}{2}$	0	l_2	0
3	q_3	0	l_{3A}	$-\frac{\pi}{2}$
4	q_4	l_4	0	$\frac{\pi}{2}$
5	q_5	0	0	$-\frac{\pi}{2}$
6	q_6	l_6	0	0

Πίνακας 3-1. Παράμετροι D-H

Η μετακίνηση κάθε ΣΣ στο επόμενο εκφράζεται από έναν ομογενή πίνακα μετασχηματισμού της μορφής:

$$\begin{aligned}
 A_i(q_i) &= {}^{i-1}T_i = \text{Trans}(0,0, d_i) * \text{Rot}(z, \theta_i) * \text{Trans}(a_i, 0, 0) * \text{Rot}(x, \alpha_i) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Συνεπώς, οι πίνακες A_i ($i = 1 \div 6$) (βήμα 5):

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & 0 & -\sin q_1 & l_{3B} \cos q_1 \\ \sin q_1 & 0 & \cos q_1 & l_{3B} \sin q_1 \\ 0 & -1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \sin q_2 & \cos q_2 & 0 & l_2 \sin q_2 \\ -\cos q_2 & \sin q_2 & 0 & -l_2 \cos q_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos q_3 & 0 & -\sin q_3 & l_{3A} \cos q_3 \\ \sin q_3 & 0 & \cos q_3 & l_{3A} \sin q_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_4 = \begin{bmatrix} \cos q_4 & 0 & \sin q_4 & 0 \\ \sin q_4 & 0 & -\cos q_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} \cos q_5 & 0 & -\sin q_5 & 0 \\ \sin q_5 & 0 & \cos q_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_6 = \begin{bmatrix} \cos q_6 & -\sin q_6 & 0 & 0 \\ \sin q_6 & \cos q_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Η τοποθέτηση του εργαλείου ως προς το $\Sigma\Sigma$ της βάσης δίνεται από τον ευθύ πίνακα μετασχηματισμού (βήμα 6):

$${}^0T_N = \prod_{i=1}^N A_i(q_i) = \left[\begin{array}{c|c} {}^0R_N & {}^0p_N \\ \hline 0^T & 1 \end{array} \right] \xrightarrow{N=6}$$

$${}^0T_6(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6) = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

όπου:

- $n_x = s_1(c_5 c_6 s_4 + c_4 s_6) + c_1(c_4 c_5 c_6 s_{23} + c_{23} c_6 s_5 - s_{23} s_4 s_6)$
- $n_y = c_6(c_5(c_3 c_4 s_1 s_2 + c_2 c_4 s_1 s_3 - c_1 s_4) + c_{23} s_1 s_5) - (c_1 c_4 + s_1 s_{23} s_4) s_6$
- $n_z = -c_6 s_{23} s_5 + c_{23}(c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6)$
- $s_x = c_6(c_4 s_1 - c_1 s_{23} s_4) - (c_5 s_1 s_4 + c_1(c_4 c_5 s_{23} + c_{23} s_5)) s_6$
- $s_y = c_1(-c_4 c_6 + c_5 s_4 s_6) - s_1(c_6 s_{23} s_4 + (c_3 c_4 c_5 s_2 + c_2 c_4 c_5 s_3 + c_{23} s_5) s_6)$

- $s_z = s_2(c_6s_3s_4 + (c_4c_5s_3 + c_3s_5)s_6 + c_2(s_3s_5s_6 - c_3(c_6s_4 + c_4c_4s_6)))$
- $a_x = c_1c_2c_3c_5 - (c_1c_4s_2c_3 + s_1s_4)s_5$
- $a_y = c_2c_3c_5s_1 - (c_3c_4s_1s_2 + c_2c_4s_1s_3 - c_1s_4)s_5$
- $a_z = -c_3(c_5s_2 + c_2c_4s_5) + s_3(-c_2c_5 + c_4s_2s_5)$
- $p_x = -l_6s_1s_4s_5 + c_1(l_{3B} + c_{23}(l_4 + l_6c_5) + (l_2 + l_{3A}c_3)s_2 + l_{3A}c_2s_3 - l_6c_4s_2c_3s_5)$
- $p_y = l_6c_1s_4s_5 + s_1(l_{3B} + c_{23}(l_4 + l_6c_5) + l_{3A}c_2s_3 - l_6c_2c_4s_3s_5 + s_2(l_2 + c_3(l_{3A} - l_6c_4s_5)))$
- $p_z = l_1 - c_3(l_4 + l_6c_5)s_2 - l_{3A}s_2s_3 + l_6c_4s_2s_3s_5 + c_2(l_2 - (l_4 + l_6c_5)s_3 + c_3(l_{3A} - l_6c_4s_5))$

[σημ.: $s_i = \sin(q_i)$, $c_i = \cos(q_i)$]

Συνεπώς, με βάση τις γωνίες των αρθρώσεων ($q_1 \div q_6$) προκύπτουν οι συντεταγμένες του άκρου του ρομποτικού βραχίονα (p_x, p_y, p_z) και το μητρώο προσανατολισμού. Στην μηδενική θέση ($q_1 \div q_6 = 0$), προκύπτει:

$${}^0T_6 = \left[\begin{array}{ccc|c} 0 & 0 & 1 & l_{3B} + l_4 + l_6 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & l_1 + l_2 + l_{3A} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

που συμφωνεί απόλυτα και με το Σχήμα 3-1.

3.2 Αντίστροφη κινηματική ανάλυση ρομποτικών βραχιόνων 6R

3.2.1 Εισαγωγή

Στην παράγραφο §3.1 παρουσιάστηκε ο τρόπος υπολογισμού του προσανατολισμού και της θέσης του άκρου ενός ρομποτικού βραχίονα 6R με βάση τις τιμές των γωνιών των επιμέρους αρθρώσεων. Στην παρούσα παράγραφο θα αντιμετωπιστεί το αντίστροφο πρόβλημα: ποιές είναι οι τιμές των γωνιών των αρθρώσεων ώστε το ρομποτικό εργαλείο να τοποθετηθεί σε μια συγκεκριμένη θέση με έναν συγκεκριμένο προσανατολισμό; Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς:

- ο υπολογισμός της λύσης είναι σχετικά δύσκολος
- δεν υπάρχει πάντα λύση
- όταν υπάρχει λύση, δεν είναι απαραίτητως μονοσήμαντη
- πολλές φορές η λύση δεν είναι ούτε κλειστής μορφής ούτε αναλυτική

Ο υπολογισμός της λύσης είναι σχετικά δύσκολος καθώς η επίλυση αφορά σε σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων. Στην γενική περίπτωση ενός 6R ρομποτικού βραχίονα προκύπτουν δώδεκα εξισώσεις με έξι αγνώστους· από το μητρώο μετασχηματισμού, μόνον τρεις εξισώσεις είναι ανεξάρτητες, οπότε μαζί με τις εξισώσεις από την στήλη της θέσης, καταλήγουμε σε έξι εξισώσεις με έξι αγνώστους. Οι εξισώσεις αυτές είναι υπερβατικές μη γραμμικές, συνεπώς η επίλυσή τους είναι δύσκολη. Σε αρκετές περιπτώσεις όμως, όπως και στην υπό εξέταση περίπτωση, αρκετές παράμετροι DH (d_i και a_i) είναι μηδενικές, ενώ οι παράμετροι a_i είναι είτε 0 είτε $\pm 90^\circ$, συνεπώς η επίλυση γίνεται ευκολότερη.

Η ύπαρξη ή μη λύσης εξαρτάται άμεσα από το κατά πόσον η ζητούμενη θέση και ο ζητούμενος προσανατολισμός βρίσκονται εντός του χώρου εργασίας του ρομποτικού βραχίονα. Ως χώρος εργασίας ορίζεται το σύνολο των σημείων που μπορεί να προσεγγίσει το άκρο του βραχίονα. Ο χώρος που μπορεί να προσεγγίσει με τουλάχιστον έναν προσανατολισμό ονομάζεται προσιτός (*reachable*), ενώ ο χώρος που το άκρο του βραχίονα μπορεί να προσεγγίσει με οποιονδήποτε προσανατολισμό ονομάζεται επιδέξιος (*dextrous*) και είναι υποσύνολο του προσιτού χώρου εργασίας. Συνεπώς, εάν η ζητούμενη θέση/προσανατολισμός είναι εντός του επιδέξιου χώρου εργασίας, τότε υπάρχει λύση.

Επιπροσθέτως, ένας βραχίονας 6R έχει μεγάλο επιδέξιο χώρο εργασίας, άρα για μια θέση/προσανατολισμό προκύπτουν πολλαπλές λύσεις, γεγονός το οποίο υποστηρίζεται και από την μη γραμμικότητα του συστήματος εξισώσεων. Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να είναι δυνατή η επιλογή μίας και μόνον λύσης. Συνήθως επιλέγεται η «κοντινότερη» λύση, η λύση δηλαδή που απαιτεί την μικρότερη – συνολικά – κίνηση των αρθρώσεων. Αυτό προϋποθέτει την γνώση των τιμών των γωνιών των αρθρώσεων στην τρέχουσα κατάσταση, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των λύσεων. Η παραπάνω πρόταση ισχύει μόνον στις περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν υφίσταται κάποιο φυσικό εμπόδιο ανάμεσα στην τρέχουσα κατάσταση και στην ζητούμενη, περίπτωση κατά την οποία ενδέχεται να αλλάξει η επιλογή των τελικών γωνιών των αρθρώσεων.

Ενδεικτική βιβλιογραφία σχετικά με την αντίστροφη κινηματική ανάλυση με διάφορα εργαλεία: (Manocha, et al., 1994), (Chapelle, et al., 2001), (Chapelle, et al., 2004), (Bingul, et al., 2005), (Porta, et al., 2005).

3.2.2 Υλοποίηση

Για την εύρεση λύσης κλειστής μορφής στην αντίστροφη κινηματική ανάλυση, γίνεται χρήση της αρχής της απόπλεξης/αποσύζευξης (*decoupling*), η οποία επιτρέπει τον διαχωρισμό του προβλήματος σε δύο προβλήματα κατώτερης τάξης για τα οποία υπάρχει λύση κλειστής μορφής. Σύμφωνα, δε, με τον Pieper (Pieper, 1968), δύο κατηγορίες ρομποτικών βραχιόνων αποπλέκονται:

- βραχίονες με τρεις οποιουσδήποτε γραμμικούς άξονες, και
- βραχίονες με τρεις οποιουσδήποτε περιστροφικούς άξονες συντεμνόμενους σε κοινό σημείο

Η οικογένεια ρομποτικών βραχιόνων που εξετάζεται ανήκει στην δεύτερη κατηγορία, καθώς τρεις διαδοχικοί περιστροφικοί άξονες (4, 5, και 6) τέμνονται σε ένα σημείο, το σημείο του καρπού (*wrist*). Η θέση αυτού του σημείου είναι συνάρτηση μόνο των υπολειπόμενων αρθρώσεων (1, 2, και 3) και μπορεί να υπολογιστεί από την επιθυμητή θέση/προσανατολισμό (μέσω του πίνακα-στόχου). Συνεπώς, μπορούν να υπολογιστούν οι τιμές των τριών πρώτων αρθρώσεων και στην συνέχεια οι τιμές των υπόλοιπων τριών. Αναλυτικά:

3.2.2.1 Βήμα 1^ο – υπολογισμός q_1, q_2, q_3

Εφόσον είναι γνωστός ο πίνακας-στόχος 0T_6 , τότε η θέση του καρπού $p_w (= {}^0p_4)$ δίνεται ως:

$$p_w = {}^0p_6 - d_6 a \rightarrow \begin{cases} p_{wx} = p_x - a_x l_6 \\ p_{wy} = p_y - a_y l_6 \end{cases}$$

Έχοντας υπολογίσει τις συντεταγμένες (X,Y) του καρπού, μπορούμε να υπολογίσουμε την γωνία q_1 , έχοντας υπόψη τις ακόλουθες υποπεριπτώσεις:

- Για $p_{wy} = 0$,
 $q_{11} = 0$
 $q_{19} = \pi/2$
- Για $p_{wx} = 0$ και $p_{wy} > 0$,
 $q_{11} = \pi/2$
 $q_{19} = -\pi/2$
- Για $p_{wy} = 0$ και $p_{wy} < 0$,
 $q_{11} = -\pi/2$
 $q_{19} = \pi/2$
- Για $p_{wy} \neq 0$ και $p_{wx} \neq 0$,
 $q_{11} = \text{ATAN2}(p_{wy}, p_{wx})$
 $q_{19} = \text{ATAN2}(-p_{wy}, -p_{wx})$

Για τις γωνίες q_{1j} των διαφορετικών συνδυασμών, ισχύει $q_{12} \div q_{18} = q_{11}$ και $q_{110} \div q_{116} = q_{19}$.

Με βάση τις q_1 , μπορεί να υπολογιστεί ο πίνακας A_1 και συνεπώς η σχέση του καρπού γίνεται:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_1(l_{3B} + l_4c_{23} + l_2s_2 + l_{3A}s_{23}) = p_{wx} \\ s_1(l_{3B} + l_4c_{23} + l_2s_2 + l_{3A}s_{23}) = p_{wy} \\ l_1 + l_2c_2 + l_{3A}c_{23} - l_4s_{23} = p_{wz} \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\left\{ \begin{array}{l} c_1(l_4c_{23} + l_2s_2 + l_{3A}s_{23}) = p_{wx} - c_1l_{3B} = p_{kx} \\ s_1(l_4c_{23} + l_2s_2 + l_{3A}s_{23}) = p_{wy} - s_1l_{3B} = p_{ky} \\ l_2c_2 + l_{3A}c_{23} - l_4s_{23} = p_{wz} - l_1 = p_{kz} \end{array} \right\} \stackrel{\wedge_2}{\Rightarrow}$$

$$\begin{aligned} l_2^2 + l_{3A}^2 + l_4^2 + 2l_2l_{3A}c_3 - 2l_2l_4s_3 &= p_{kx}^2 + p_{ky}^2 + p_{kz}^2 \Rightarrow \\ 2l_2l_{3A}c_3 - 2l_2l_4s_3 &= p_{kx}^2 + p_{ky}^2 + p_{kz}^2 - l_2^2 - l_{3A}^2 - l_4^2 \end{aligned}$$

Η τελευταία σχέση είναι της μορφής:

$$a \cos \theta + b \sin \theta = c$$

Αντικαθιστώντας τα $\cos \theta$ και $\sin \theta$:

$$u = \tan \frac{\theta}{2}, \quad \cos \theta = \frac{1-u^2}{1+u^2}, \quad \sin \theta = \frac{2u}{1+u^2}$$

Προκύπτει μία εξίσωση 2^{ου} βαθμού:

$$a(1 - u^2) + 2bu = c(1 + u^2) \Rightarrow (a + c)u^2 - 2bu + (c - a) = 0$$

Οι λύσεις ως προς u είναι:

$$u = \frac{b \pm \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}}{a + c}$$

Επομένως, η θ υπολογίζεται:

$$\theta = \text{atan2}(2u, 1 - u^2)$$

Στην προκειμένη περίπτωση, ισχύει:

$$a = 2l_2l_{3A}, \quad b = -2l_2l_4, \quad c = p_{kx}^2 + p_{ky}^2 + p_{kz}^2 - l_2^2 - l_{3A}^2 - l_4^2$$

Άρα, για κάθε γωνία q_1 υπολογίζονται δύο τιμές για την q_3 . Συνεπώς, στην προκειμένη περίπτωση θα προκύψουν τέσσερις τιμές, οπότε και ισχύει:

$$q_{1_1} \Rightarrow \begin{cases} q_{3_1} = q_{3_2} = q_{3_3} = q_{3_4} \\ q_{3_5} = q_{3_6} = q_{3_7} = q_{3_8} \end{cases}$$

$$q_{1_9} \Rightarrow \begin{cases} q_{3_9} = q_{3_{10}} = q_{3_{11}} = q_{3_{12}} \\ q_{3_{13}} = q_{3_{14}} = q_{3_{15}} = q_{3_{16}} \end{cases}$$

Με γνωστή την τιμή της γωνίας q_3 , από την εξίσωση του p_{kz} υπολογίζεται η γωνία q_2 :

$$l_2 c_2 + l_{3A} c_{23} - l_4 s_{23} = p_{kz} \Rightarrow l_2 c_2 + l_{3A} c_2 c_3 - l_{3A} s_2 s_3 - l_4 s_2 c_3 - l_4 c_2 s_3$$

$$= p_{kz} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (l_2 + l_{3A} c_3 - l_4 s_3) c_2 + (-l_{3A} s_3 - l_4 c_3) s_2 = p_{kz}$$

Ομοίως με τον υπολογισμό της γωνίας q_3 , προκύπτει σχέση της μορφής [$\text{acos}\theta + b\text{sin}\theta = c$], οπότε υπολογίζεται η γωνία q_2 , λαμβάνοντας υπόψη ότι:

$$q_{1_1} \begin{cases} q_{3_1} \Rightarrow \begin{cases} q_{2_1} = q_{2_2} \\ q_{2_3} = q_{2_4} \end{cases} \\ q_{3_5} \Rightarrow \begin{cases} q_{2_5} = q_{2_6} \\ q_{2_7} = q_{2_8} \end{cases} \end{cases}$$

$$q_{1_9} \begin{cases} q_{3_9} \Rightarrow \begin{cases} q_{2_9} = q_{2_{10}} \\ q_{2_{11}} = q_{2_{12}} \end{cases} \\ q_{3_{13}} \Rightarrow \begin{cases} q_{2_{13}} = q_{2_{14}} \\ q_{2_{15}} = q_{2_{16}} \end{cases} \end{cases}$$

3.2.2.2 Βήμα 2° – υπολογισμός q_4, q_5, q_6

Με γνωστές τις τιμές για τις γωνίες q_1, q_2, q_3 , το υποσύστημα του αγκώνα έχει υπολογιστεί και, συνεπώς, μπορεί να υπολογιστεί και ο πίνακας 0T_3 . Στην συνέχεια, μπορεί να υπολογιστεί ο πίνακας 3T_6 , από τον οποίο θα προκύψουν οι γωνίες q_4, q_5, q_6 :

$${}^3T_6 = {}^3T_0 {}^0T_6 = ({}^0T_3)^{-1} {}^0T_6 = \begin{bmatrix} N_x & S_x & A_x & P_x \\ N_y & S_y & A_y & P_y \\ N_z & S_z & A_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

όπου:

$${}^3T_6 = \begin{bmatrix} c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6 & -c_6 s_4 - c_4 c_5 s_6 & -c_4 s_5 & -l_6 c_4 s_5 \\ c_5 c_6 s_4 + c_4 s_6 & c_4 c_6 - c_5 s_4 s_6 & -s_4 s_5 & -l_6 s_4 s_5 \\ c_6 s_5 & -s_5 s_6 & c_5 & l_4 + l_6 c_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3T_0 = ({}^0T_3)^{-1} = \begin{bmatrix} c_1 s_{23} & s_1 s_{23} & c_{23} & -l_{3A} - l_2 c_3 - l_1 c_{23} - l_{3B} s_{23} \\ s_1 & -c_1 & 0 & 0 \\ c_1 c_{23} & c_{23} s_1 & -s_{23} & -l_{3B} c_{23} + l_2 s_3 + l_1 s_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Συνεπώς:

- $N_x = n_x c_1 s_{23} + n_y s_1 s_{23} + n_z c_{23} = c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6$
- $N_y = n_x s_1 - n_y c_1 = c_5 c_6 s_4 + c_4 s_6$
- $N_z = n_x c_1 c_{23} + n_y s_1 c_{23} - n_z s_{23} = c_6 s_5$
- $S_x = s_x c_1 s_{23} + s_y s_1 s_{23} + s_z c_{23} = -c_6 s_4 - c_4 c_5 s_6$
- $S_y = s_x s_1 - s_y c_1 = c_4 c_6 - c_5 s_4 s_6$
- $S_z = s_x c_1 c_{23} + s_y s_1 c_{23} - s_z s_{23} = -s_5 s_6$
- $A_x = a_x c_1 s_{23} + a_y s_1 s_{23} + a_z c_{23} = -c_4 s_5$
- $A_y = a_x s_1 - a_y c_1 = -s_4 s_5$
- $A_z = a_x c_1 c_{23} + a_y s_1 c_{23} - a_z s_{23} = c_5$
- $P_x = p_x c_1 s_{23} + p_y s_1 s_{23} + p_z c_{23} - l_{3A} - l_2 c_3 - l_1 c_{23} - l_{3B} s_{23} = -l_6 c_4 s_5$
- $P_y = p_x s_1 - p_y c_1 = -l_6 s_4 s_5$
- $P_z = p_x c_1 c_{23} + p_y s_1 c_{23} - p_z s_{23} - l_{3B} c_{23} + l_2 s_3 + l_1 s_{23} = l_4 + l_6 c_5$

Για τον υπολογισμό της q_5 , μέσω του A_z :

$$q_5 = ATAN2\left(\pm\sqrt{1 - A_z^2}, A_z\right)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι:

$$q_{1_1} \Rightarrow \begin{cases} q_{3_1} \Rightarrow \begin{cases} q_{2_1} \Rightarrow \begin{cases} q_{5_1} \\ q_{5_2} \end{cases} \\ q_{2_3} \Rightarrow \begin{cases} q_{5_3} \\ q_{5_4} \end{cases} \end{cases} \\ q_{3_5} \Rightarrow \begin{cases} q_{2_5} \Rightarrow \begin{cases} q_{5_5} \\ q_{5_6} \end{cases} \\ q_{2_7} \Rightarrow \begin{cases} q_{5_7} \\ q_{5_8} \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

$$q_{1_9} \Rightarrow \begin{cases} q_{3_9} \Rightarrow \begin{cases} q_{2_9} \Rightarrow \begin{cases} q_{5_9} \\ q_{5_{10}} \end{cases} \\ q_{2_{11}} \Rightarrow \begin{cases} q_{5_{11}} \\ q_{5_{12}} \end{cases} \end{cases} \\ q_{3_{13}} \Rightarrow \begin{cases} q_{2_{13}} \Rightarrow \begin{cases} q_{5_{13}} \\ q_{5_{14}} \end{cases} \\ q_{2_{15}} \Rightarrow \begin{cases} q_{5_{15}} \\ q_{5_{16}} \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

Ο υπολογισμός της q_6 (κατά αντιστοιχία με την q_5) μέσω των S_z και N_z και της γωνίας q_5 :

$$q_6 = ATAN2\left(-\frac{S_z}{s_5}, \frac{N_z}{s_5}\right), \text{ για } s_5 \neq 0.$$

Ο υπολογισμός της q_4 (κατά αντιστοιχία με την q_5) μέσω των A_y και A_x και της γωνίας q_5 :

$$q_4 = ATAN2\left(-\frac{A_y}{s_5}, -\frac{A_x}{s_5}\right), \text{ για } s_5 \neq 0.$$

Εάν $s_5 = 0$, τότε δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός των q_4 και q_6 ξεχωριστά (λόγω συγγραμικότητας των αξόνων κίνησής τους)· μπορεί να υπολογισθεί μόνον το άθροισμα τους (q_{46} , μέσω των N_y και N_x) ή η διαφορά τους (q_{6-4} , μέσω των N_y και S_y):

- $A_z = 1 \Rightarrow \begin{cases} N_y = c_4 s_6 + s_4 c_6 = s_{46} \\ N_x = c_4 c_6 - s_4 s_6 = c_{46} \end{cases} \Rightarrow q_{46} = ATAN2(N_y, N_x) \xrightarrow{q_4=0} q_{46} = q_6$
- $A_z = -1 \Rightarrow \begin{cases} N_y = c_4 s_6 + s_4 c_6 = s_{6-4} \\ S_y = c_4 c_6 + s_4 s_6 = c_{6-4} \end{cases} \Rightarrow q_{6-4} = ATAN2(N_y, S_y) \xrightarrow{q_4=0} q_{6-4} = q_6$

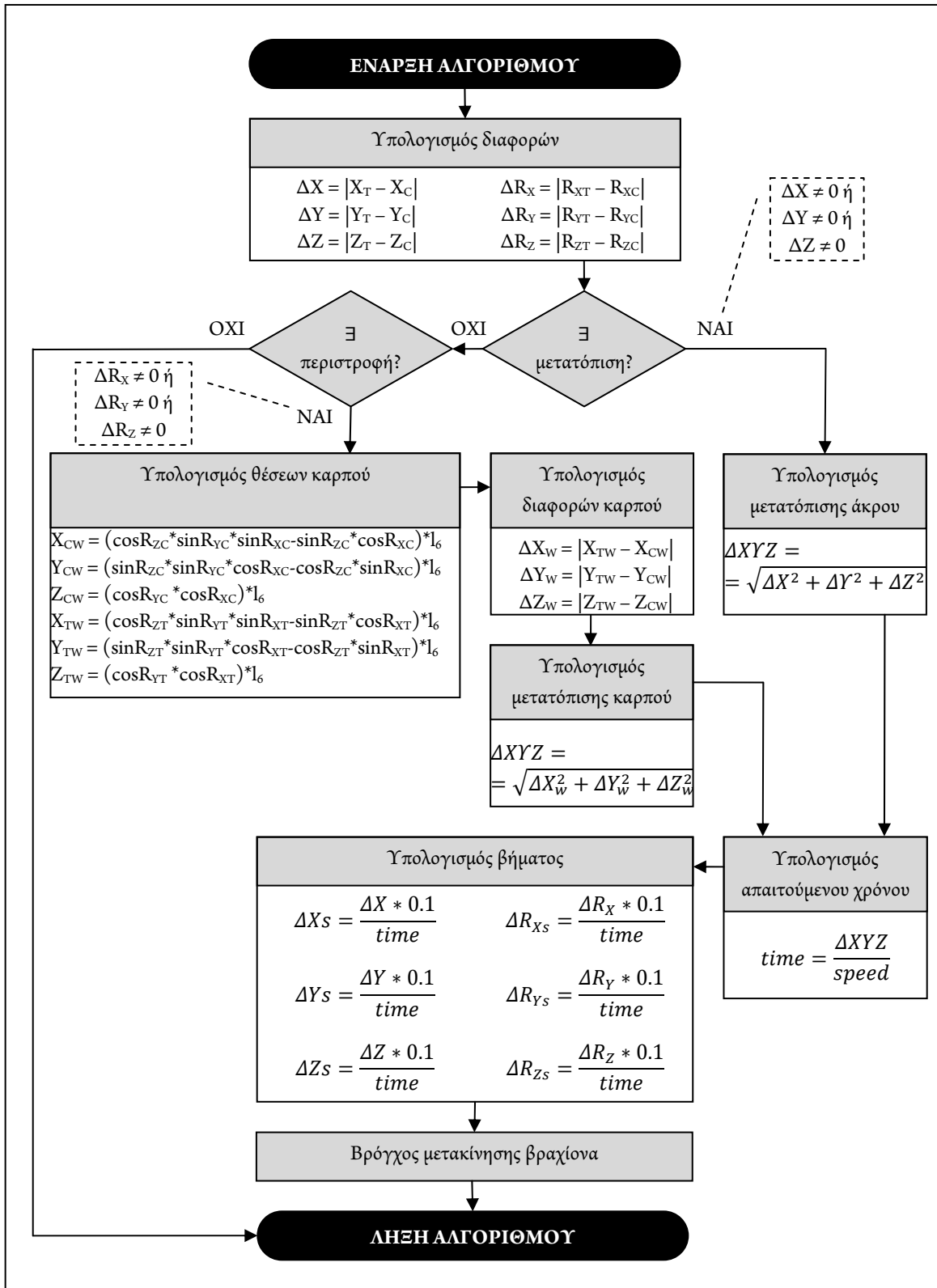
Άρα, υπολογίζονται οι συνδυασμοί γωνιών (q_{ij} , $i = 1 \div 6$, $j = 1 \div 16$), ενώ η συνολική ροή υπολογισμού είναι:

3.3 Τροχιά κίνησης ρομποτικού βραχίονα

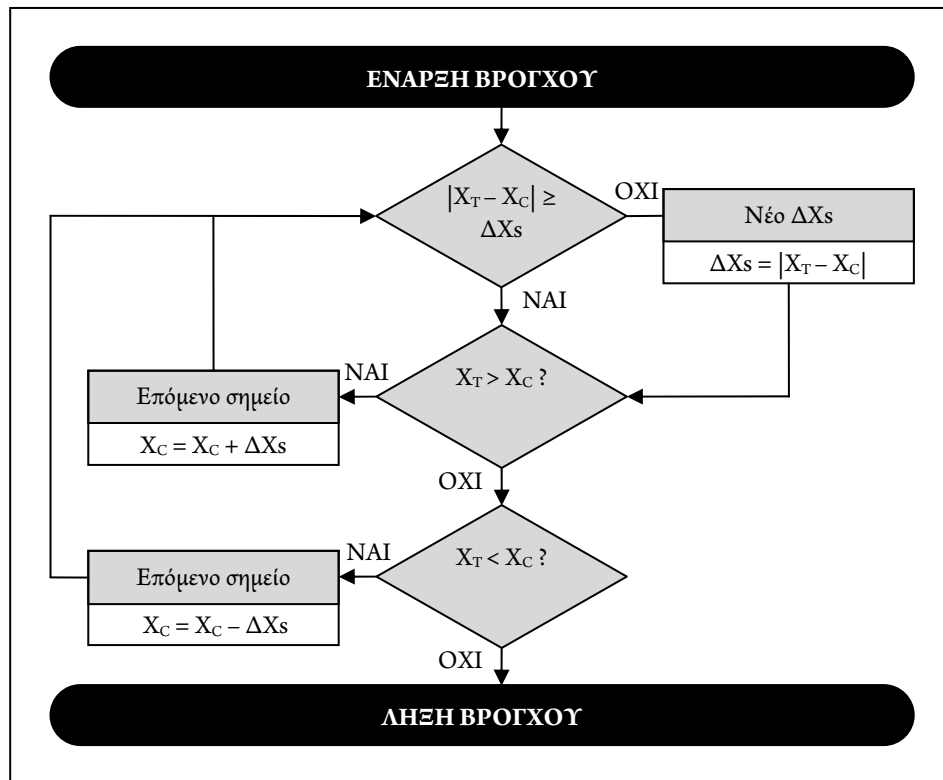
Η κίνηση των ρομποτικών βραχιόνων 6R γίνεται με δύο τρόπους: είτε κινείται μεμονωμένα κάποια άρθρωση, οπότε εκτελείται κυκλική κίνηση, είτε κινείται το άκρο του βραχίονα γραμμικά. Στην περίπτωση χειροκίνητης λειτουργίας, και οι δύο επιλογές είναι δυνατές, καθώς η κίνηση εκτελείται βηματικά· συνηθέστερη πρακτική είναι η χρήση μιας αναλογικής κλίμακας μετατοπίσεως των αξόνων η οποία ορίζει και την ταχύτητα της κίνησης. Στην περίπτωση αυτόματης λειτουργίας, όταν δηλαδή ζητείται από το βραχίονα να μετακινηθεί από την θέση του σε μία θέση-στόχο, η τροχιά που θα ακολουθήσει ο βραχίονας εξαρτάται από το είδος της κίνησης. Εάν δοθεί με τιμές γωνιών των αρθρώσεων, τότε η τροχιά που θα διαγράψει το άκρο του βραχίονα γίνεται στον χώρο των αρθρώσεων και υλοποιείται με γραμμική παρεμβολή εξαρτώμενη από την γωνία και την ταχύτητα της κάθε άρθρωσης. Σε αυτή την περίπτωση εκτελείται ο αλγόριθμος της ευθείας κινηματικής ανάλυσης.

Εάν δοθούν συντεταγμένες X, Y, Z και προσανατολισμός R_x, R_y, R_z , για την θέση-στόχο, ζητηθεί δηλαδή κίνηση του άκρου στον καρτεσιανό χώρο, τότε πραγματοποιείται γραμμική κίνηση. Σε αυτή την περίπτωση, ακολουθείται ο αλγόριθμος υπολογισμού (Σχήμα 3-4). Αρχικά υπολογίζονται οι διαφορές μεταξύ του σημείου στο οποίο βρίσκεται το άκρο και της θέσης-στόχου. Το επόμενο βήμα ελέγχει εάν υπάρχει μετατόπιση του άκρου ή μόνο περιστροφή· στην πρώτη περίπτωση, προχωράει στον υπολογισμό της συνολικής μετατόπισης μέσω των διαφορών κατά X, Y, Z , ενώ στην δεύτερη περίπτωση υπολογίζει την μετατόπιση που απαιτείται να κάνει ο καρπός του βραχίονα ώστε το άκρο να παραμείνει στην ίδια θέση αλλά να αλλάξει ο προσανατολισμός. Εν συνεχεία υπολογίζεται ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την κίνηση (συναρτήσει της ταχύτητας) και οι τιμές του βήματος (τυπικά, κάθε 100ms).

Στο Σχήμα 3-5 φαίνεται ο βρόγχος που εκτελείται αμέσως μετά (εδώ μόνο για κίνηση στον X), ο οποίος υπολογίζει κάθε φορά το επόμενο ενδιάμεσο σημείο της τροχιάς. Ο έλεγχος που πραγματοποιείται στην αρχή του βρόγχου, αν δηλαδή η απόσταση μεταξύ του σημείου στο οποίο βρίσκεται ο βραχίονας (X_C) και του σημείου-στόχου (X_T) είναι μεγαλύτερη του βήματος, είναι απαραίτητος λόγω των στρογγυλοποιήσεων που πραγματοποιούνται στον υπολογισμό του χρόνου και, κατ' επέκταση, των βηματικών μετατοπίσεων. Χωρίς αυτόν τον έλεγχο, ο βρόγχος θα ήταν ατέρμονος καθώς, πλην εξαιρετικών περιπτώσεων, τα νέο σημείο που θα υπολόγιζε θα είχε συντεταγμένες είτε μικρότερες είτε μεγαλύτερες του σημείου-στόχου. Ο βρόγχος εκτελείται για όλες τις παραμέτρους (X, Y, Z, R_x, R_y, R_z).



Σχήμα 3-4. Αλγόριθμος γραμμικής κίνησης



Σχήμα 3-5. Βρόγχος εύρεσης σημείων (κίνηση κατά X)

Για κάθε νέο ενδιαμέσο σημείο-βήμα που προκύπτει από τον βρόγχο, εκτελείται ο αλγόριθμος της αντίστροφης κινηματικής για την εύρεση των κατάλληλων γωνιών των αρθρώσεων, ούτως ώστε ο βραχίονας να εκτελέσει την κίνηση.

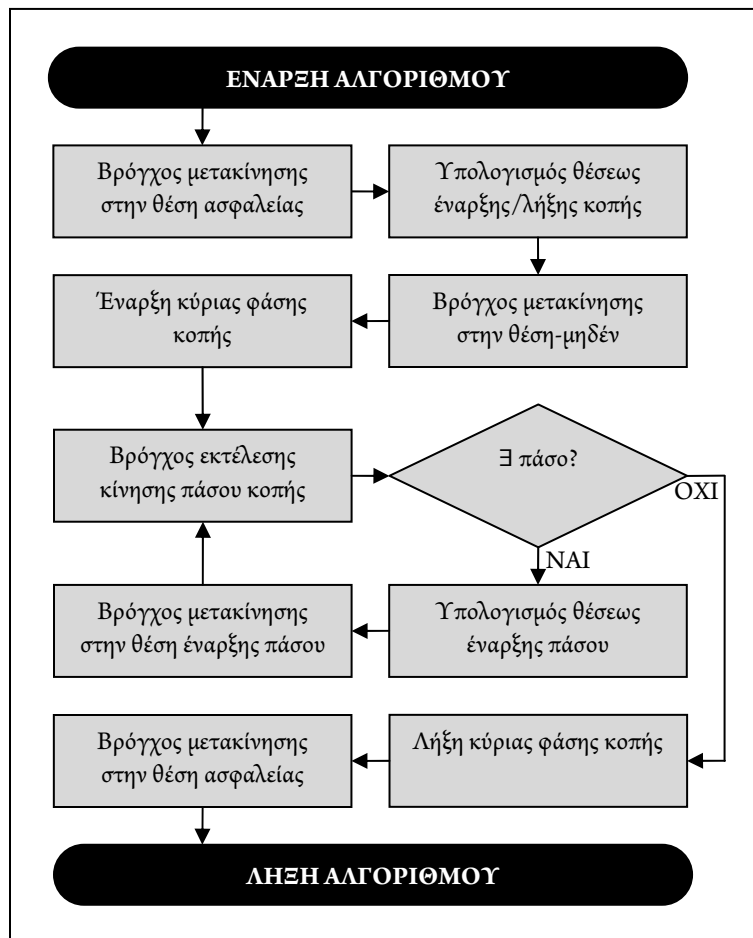
3.4 Κινηματική τόννου CNC

Όπως σημειώθηκε και στο αντίστοιχο σημασιολογικό μοντέλο, τα τμήματα ενός CNC τόννου που έχουν κινηματικό ενδιαφέρον είναι το τσωκ, ο μύλος των εργαλείων, και – κυρίως – το κοπτικό εργαλείο. Η κινηματική του μύλου των εργαλείων είναι ιδιαίτερος απλή, καθώς αφορά μόνο σε περιστροφή γύρω από τον X σε προκαθορισμένες θέσεις (π.χ. για μύλο 8 εργαλείων, κάθε 45°), συνεπώς δεν απαιτείται κάποιος αλγόριθμος.

Η κινηματική του τσωκ είναι επίσης απλή, καθώς το τσωκ περιστρέφεται επίσης γύρω από τον X. Η επιλογή που υπάρχει αφορά στην ταχύτητα περιστροφής και στο αν το τσωκ περιστρέφεται ή όχι. Επιπρόσθετα, υπάρχει η δυνατότητα χειροκίνητης περιστροφής βηματικά. Μία ακόμα λειτουργία του τσωκ αφορά στο αν είναι κλειστό ή ανοιχτό, αν δηλαδή συγκρατεί κάποιο τεμάχιο ή όχι. Η μοναδική σχετική απαίτηση αφορά στην γνώση της

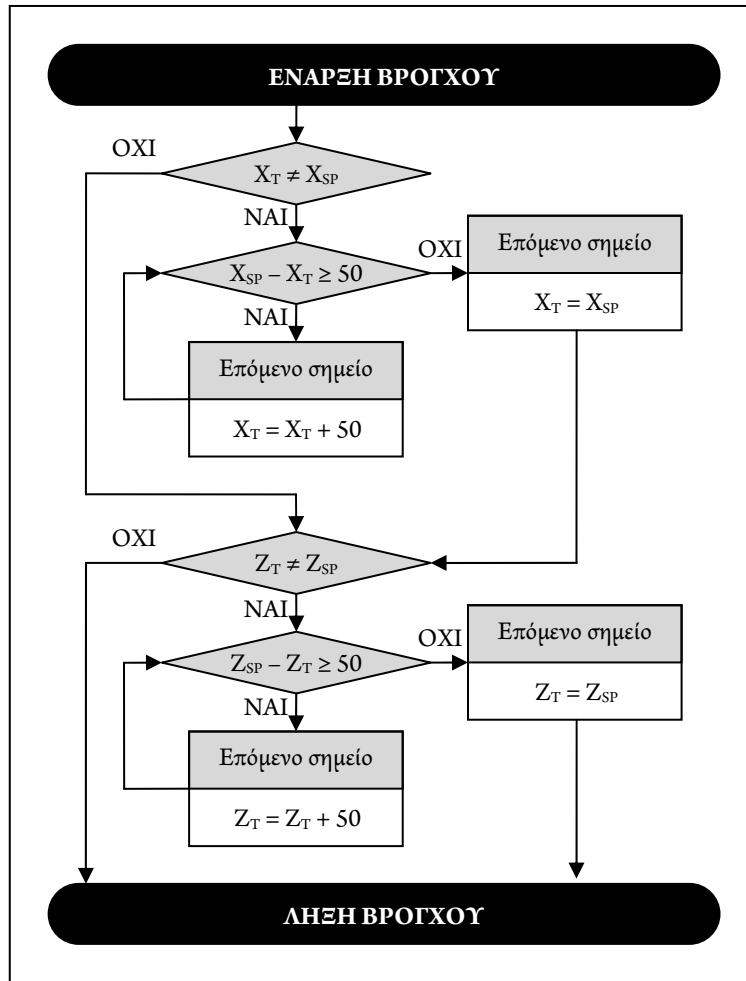
διαμέτρου του τεμαχίου, ώστε το τσωκ να μην κλείσει λιγότερο ή περισσότερο. Ομοίως με τον μύλο των εργαλείων, δεν απαιτείται κάποιος ιδιαίτερος αλγόριθμος υπολογισμού.

Όσον αφορά στην κίνηση του κοπτικού εργαλείου, αυτή εκτελείται σε δύο άξονες, X και Z αντίστοιχα. Στην χειροκίνητη λειτουργία, δεν απαιτείται κάποιος αλγόριθμος για την κίνηση του εργαλείου, καθώς το εργαλείο μετακινείται είτε στον ένα είτε στον άλλο άξονα. Στην αυτόματη λειτουργία, απαιτείται αλγόριθμος ο οποίος να ελέγχει την κίνηση, διότι η αυτή εξαρτάται από το είδος κοπής που εκτελεί η εργαλειομηχανή. Ο αλγόριθμος φαίνεται στο Σχήμα 3-6.



Σχήμα 3-6. Αλγόριθμος κινήσεων κοπής

Αρχικά εκτελείται βρόγχος μετακίνησης του εργαλείου από την θέση του (X_T, Z_T) στην θέση ασφαλείας (X_{SP}, Z_{SP}) (\cdot), η οποία ουσιαστικά είναι η μεγαλύτερη δυνατή απόσταση από το τσωκ. Η κίνηση εκτελείται γραμμικά σε κάθε άξονα, πρώτα στον X και στην συνέχεια στον Z, οπότε η τελική τροχιά είναι διαφορετική αναλόγως σε ποιο σημείο βρίσκεται το εργαλείο όταν ξεκινάει την κίνηση.



Σχήμα 3-7. Βρόγχος εκτέλεσης κίνησης στην θέση ασφαλείας

Στην συνέχεια, υπολογίζονται οι θέση έναρξης και λήξης της κοπής, ανάλογα με το είδος της κοπής. Ο Πίνακας 3-2 παρουσιάζει παράδειγμα για κοπή προσώπου. Η θέσεις εξαρτώνται από πέντε παράγοντες: την θέση-μηδέν, το είδος κοπής, το μήκος κοπής, το βάθος κοπής, και την τελική διάμετρο του τεμαχίου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση κοπής προσώπου, το βάθος κοπής αναφέρεται στον άξονα Z.

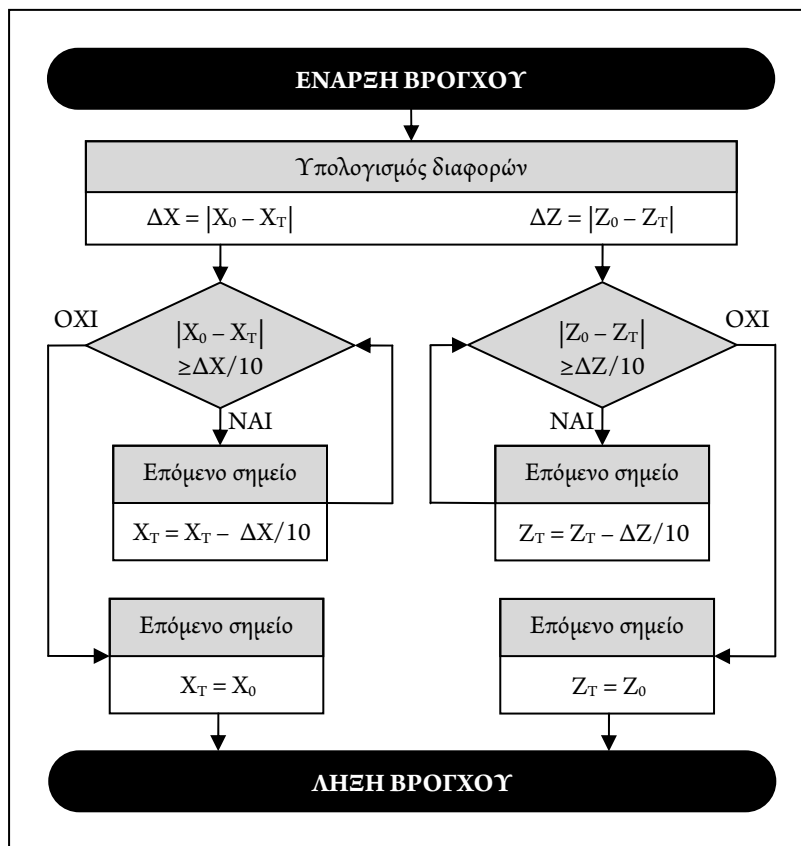
Κοπή προσώπου			
Συνθήκη	Θέση	X	Z
$cd \geq Z_E - Z_0 $	S	X_0	$Z_0 - cd$
	E	0	$Z_0 + cl$
$cd < Z_E - Z_0 $	S	X_0	Z_{E1}
	E	0	$Z_0 + cl$

Πίνακας 3-2. Υπολογισμός θέσεων έναρξης/λήξης κοπής (μία φάση)

όπου: cd = βάθος κοπής (cutting depth),
 cl = μήκος κοπής (cutting length)
 fd = τελική διάμετρος τεμαχίου (final diameter)
 X, Z = οι άξονες κίνησης,
 Δείκτης 0 = θέση-μηδέν,
 Δείκτης S = σημείο έναρξης κοπής,
 Δείκτης E = σημείο λήξης κοπής

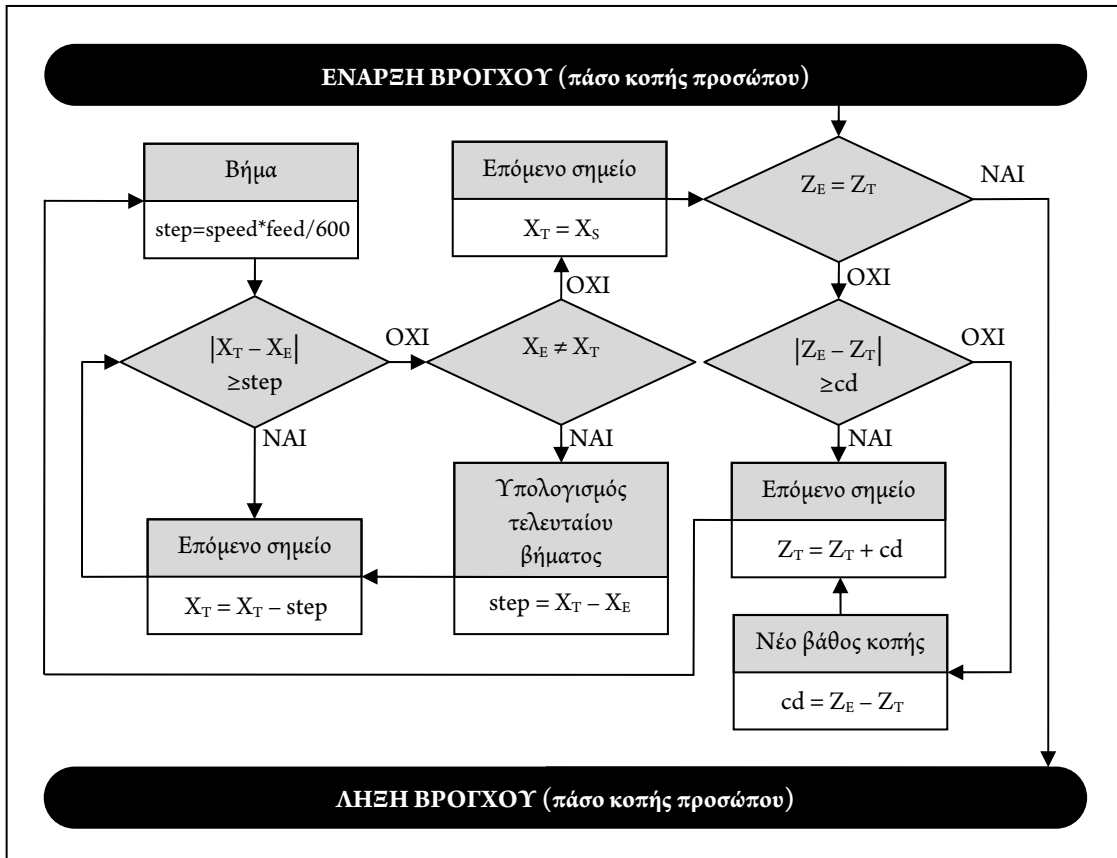
Αναφορικά με την θέση-μηδέν, η τιμή του X_0 είναι ίση με την αρχική διάμετρο του τεμαχίου, ενώ η τιμή του Z_0 σχετίζεται με το μήκος του αρχικού τεμαχίου.

Για την μετακίνηση στην θέση-μηδέν εκτελείται βρόγχος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-8. Η κίνηση εκτελείται γραμμικά ταυτόχρονα και στους δύο άξονες και διαρκεί 1 sec (10 βήματα των 100ms).



Σχήμα 3-8. Βρόγχος εκτέλεσης κίνησης στην θέση-μηδέν

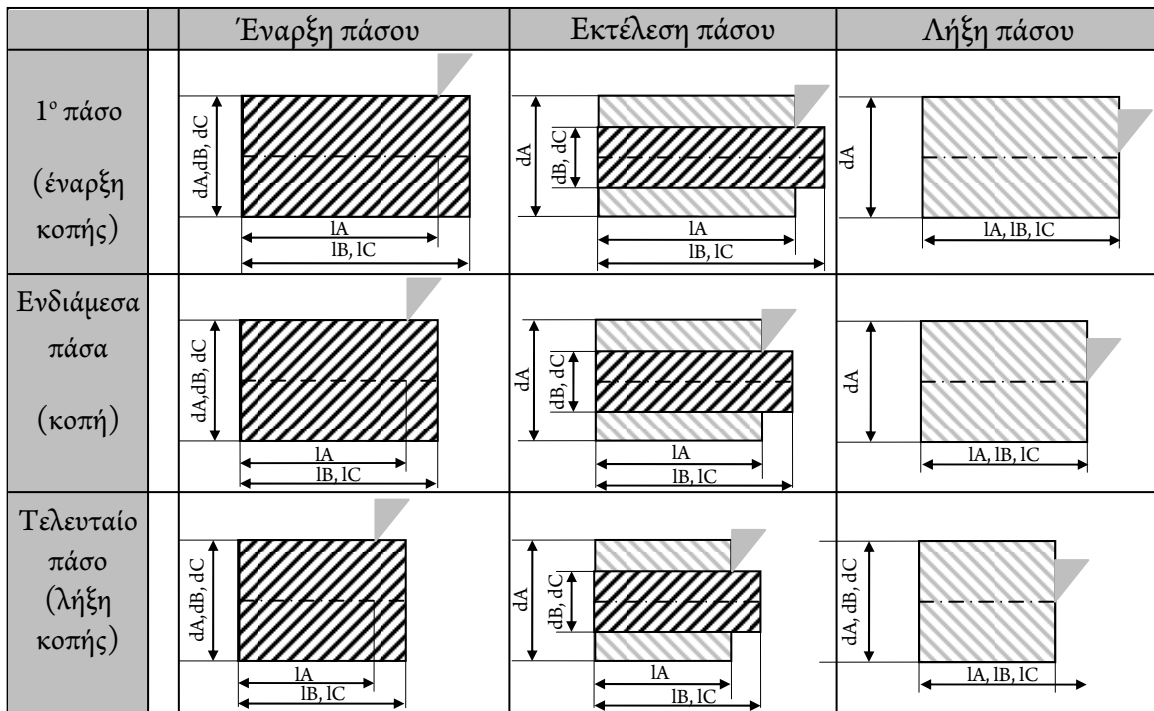
Στο επόμενο στάδιο ξεκινάει η κύρια φάση της κοπής, η οποία εκτελείται σε πάσα μέσω βρόγχου. Στο Σχήμα 3-9 φαίνεται παράδειγμα για κοπή προσώπου.



Σχήμα 3-9. Βρόγχος εκτέλεσης πάσου κοπής

Σε κάθε πάσο, η κίνηση εκτελείται ξεχωριστά στους δύο άξονες. Στην περίπτωση της κοπής προσώπου, στην έναρξη του πρώτου πάσου, το κοπτικό εργαλείο κινείται στον άξονα Z και στην συνέχεια εκτελεί κοπή στον άξονα X. Το τέλος του πάσου ορίζεται όταν το κοπτικό εργαλείο έχει ολοκληρώσει τις απαιτούμενες κινήσεις στον άξονα X. Στην συνέχεια, εξετάζεται εάν έχουν ολοκληρωθεί οι κινήσεις στον άξονα Z, αν δηλαδή υπάρχει επόμενο πάσο ή όχι. Εάν όχι, εκτελείται πάλι ο βρόγχος μέχρι να καλυφθεί η παραπάνω συνθήκη. Όταν σταματήσει να εκτελείται ο βρόγχος, ολοκληρώνεται η κύρια φάση της κοπής. Σε αυτό το σημείο, το κοπτικό εργαλείο μετακινείται στην θέση ασφαλείας, όπως και στην αρχή του αλγορίθμου.

Σχετικά με την εικονοποίηση της κοπής, τον τρόπο αποβολής του υλικού δηλαδή, η αρχική μπάρας υλικού αποτελείται ουσιαστικά από πολλαπλά κομμάτια. Σε κάθε βήμα της κοπής, με βάση την κίνηση του κοπτικού εργαλείου, μεταβάλλονται τόσο το μήκος όσο και η διάμετρος των κομματιών ώστε να προκύπτει η εικόνα του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Το Σχήμα 3-10 και ο Πίνακας 3-3 παρουσιάζουν ένα παράδειγμα των αλλαγών που προκαλούνται στις διαστάσεις τριών κυλίνδρων κατά την διάρκεια κοπής προσώπου.



Σχήμα 3-10. Αλλαγές διαστάσεων κυλίνδρων (κοπή προσώπου)

Φάσεις	Κύλινδροι	Διάμετρος κυλίνδρου			Μήκος κυλίνδρου		
		A	B	C	A	B	C
1 ^ο πάσο (έναρξη κοπής)	Έναρξη		$dB_1 = dC_1 = d_i$		$lA_1 = l_i - cd$	$lB_1 = lC_1 = l_i$	
	Εκτέλεση	$dA_1 = d_i$	$0 < dB_1 = dC_1 < d_i$				
	Λήξη		$dB_1 = dC_1 = 0$				
Ενδιάμεσα πάσα (κοπή)	Έναρξη		$dB_2 = dC_2 = d_i$		$lA_2 = lA_1 - cd$	$lB_2 = lC_2 = lA_1$	
	Εκτέλεση	$dA_2 = dA_1$	$0 < dB_2 = dC_2 < d_i$				
	Λήξη		$dB_2 = dC_2 = 0$				
Τελευταίο Πάσο (λήξη κοπής)	Έναρξη		$dB_3 = dC_3 = d_i$		$lA_3 = l_F$	$lB_3 = lC_3 = lA_2$	
	Εκτέλεση	$dA_3 = dA_2$	$0 < dB_3 = dC_3 < d_i$				
	Λήξη		$dB_3 = dC_3 = d_i$				

Πίνακας 3-3. Μεταβολή διαστάσεων κυλίνδρων ανά φάση (κοπή προσώπου)

όπου: cd = βάθος κοπής

l_i, l_F = αρχικό / τελικό μήκος

d_i, d_F = αρχική / τελική διάμετρος

δείκτες 1, 2, 3 = 1^ο πάσο, ενδιάμεσα πάσα, τελευταίο πάσο

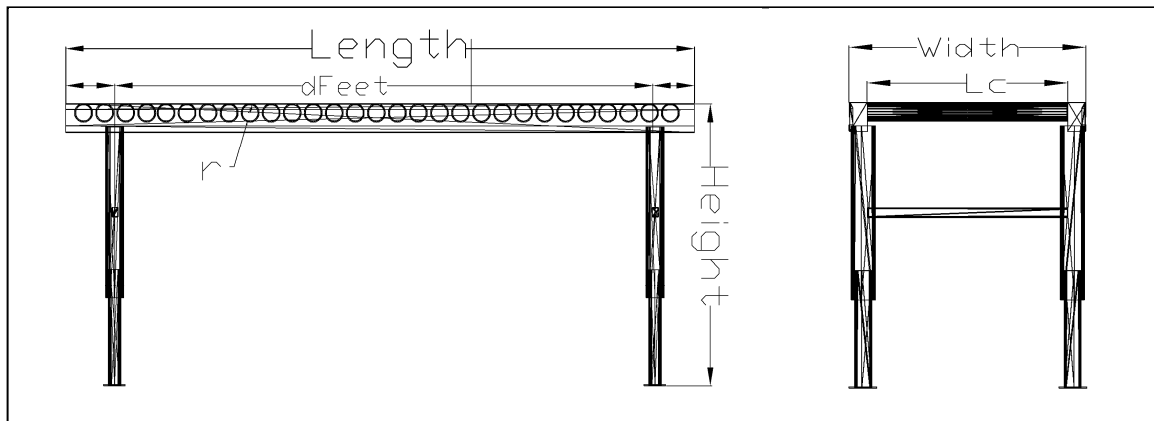
Οι αλλαγές στις τιμές των μηκών κατά την διάρκεια της κοπής γίνονται με βάση το σημείο στο οποίο βρίσκεται το κοπτικό εργαλείο του τόρνου, εξαρτώνται δηλαδή από την πρόωση του εργαλείου.

Εκτός από τις μεταβολές στις διαστάσεις κατά την διάρκεια της κοπής, μεταβάλλεται και το σημείο τοποθέτησης του κέντρου βάρους του αντικειμένου· αλλάζουν δηλαδή οι τιμές στον αντίστοιχο κόμβο μετατόπισης (*translation node*), καθώς η αριστερή άκρη των κυλίνδρων πρέπει να βρίσκεται συνεχώς στο ίδιο σημείο (στην προκειμένη περίπτωση, εντός του τρωκ του τόνου).

3.5 Κινηματική παλετών επί μεταφορικών ταινιών

Οι μεταφορικές ταινίες αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα μηχανών διαχείρισης υλικού που συναντάται εντός ενός κυττάρου κατεργασιών. Για το λόγο αυτό, έπρεπε να αναλυθεί η γεωμετρία τους και η κινηματική τους, κυρίως όσον αφορά στον τρόπο με τον οποίο μεταφέρεται μια παλέτα με υλικό σε ένα δίκτυο ταινιών.

Κάθε μεταφορική ταινία ορίζεται από τρία γεωμετρικά μεγέθη: μήκος, πλάτος, ύψος. Το μήκος της ταινίας ορίζει τον αριθμό των κυλίνδρων (λόγω σταθερής ακτίνας r_c) που υφίστανται, συνεπώς είναι σχετικά τυποποιημένο. Τυποποιημένο είναι και το πλάτος της ταινίας, το οποίο εξαρτάται από το μήκος των κυλίνδρων (L_c). Με βάση το μήκος της ταινίας ορίζεται και ο αριθμός των ποδιών στα οποία στηρίζεται η ταινία, σύμφωνα με το ελάχιστο δυνατό μήκος (d_{Feet}) που μπορεί να στηρίξει ένα ζεύγος ποδιών χωρίς να προκύπτουν προβλήματα (σταθερότητα, βέλος κάμψης κλπ.). Στο Σχήμα 3-11 φαίνονται τα γεωμετρικά μεγέθη που ορίζουν μια μεταφορική ταινία.



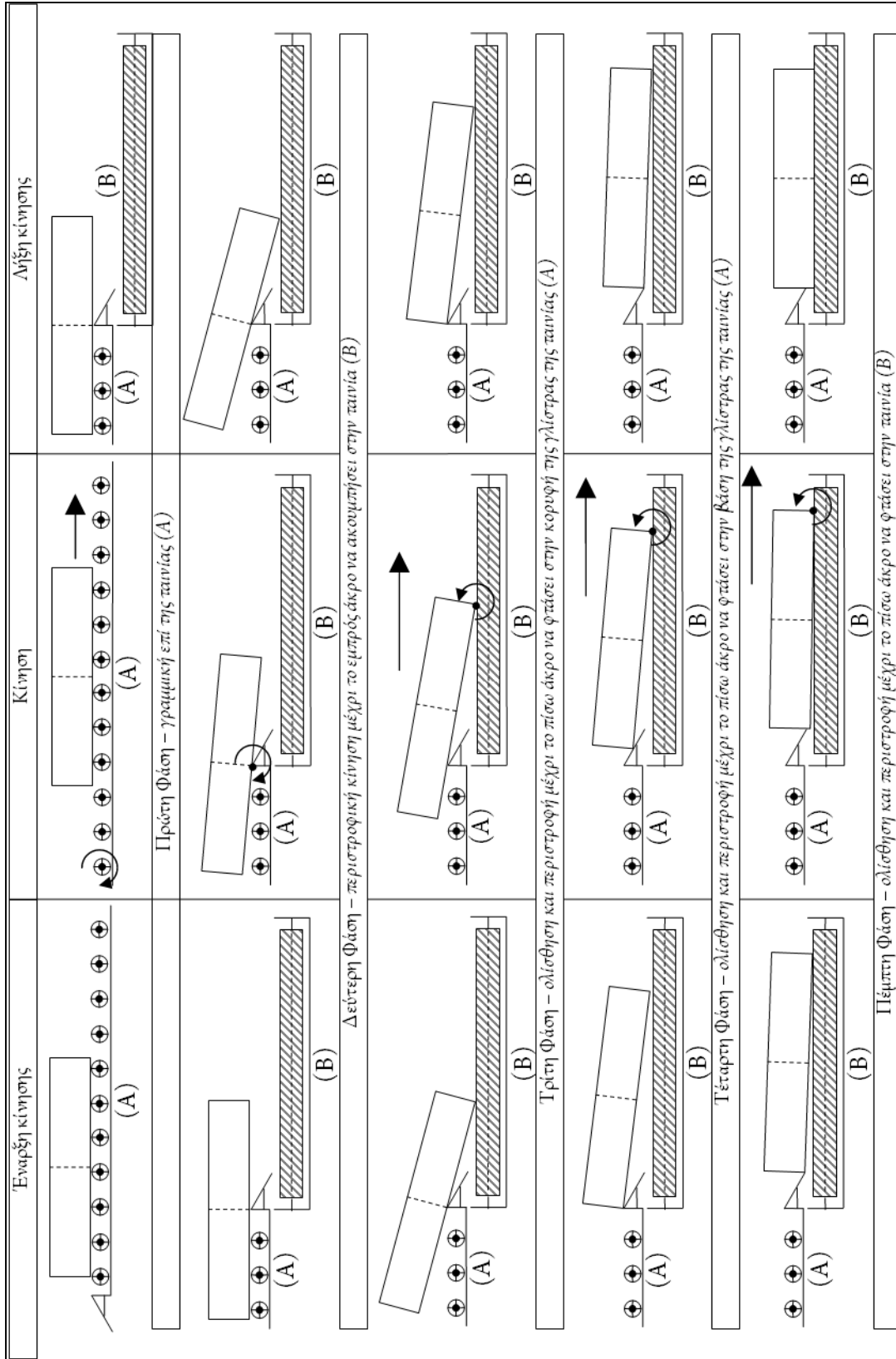
Σχήμα 3-11. Γεωμετρικά μεγέθη μεταφορικής ταινίας

Η κινηματική της μεταφορικής ταινίας αφορά στην τιμή της γραμμικής ταχύτητας (σε m/sec), στην κατεύθυνση της κίνησης, και στο κατά πόσον η μεταφορική ταινία λειτουργεί ή όχι. Η κατεύθυνση της κίνησης είναι είτε προς το ένα άκρο της ταινίας (*αρχή*) είτε προς το άλλο (*τέλος*). Αν η κίνηση γίνεται προς το τέλος της ταινίας, χαρακτηρίζεται ως *ευθεία* (*forward*), ενώ αν κινείται προς την αρχή της χαρακτηρίζεται ως *αντίστροφη* (*reverse*).

Η ταινία στα δύο άκρα διαθέτει ελάσματα υπό κλίση (γλίστρες) που επιτρέπουν τη μετάβαση του μεταφερόμενου αντικειμένου στην επόμενη ταινία. Η μετάβαση πραγματοποιείται μέσω της βαρύτητας, και ξεκινάει όταν το κέντρο βάρους του αντικειμένου φτάσει στην κορυφή της γλίστρας. Η κίνηση ενός αντικειμένου (π.χ. παλέτας) στην μεταφορική ταινία μπορεί να χωριστεί σε πέντε φάσεις (Σχήμα 3-12). Αναλυτικά:

- Στην πρώτη φάση, το αντικείμενο κινείται πάνω στην αρχική ταινία (Α) μέσω των κυλίνδρων που περιστρέφονται.
- Στην δεύτερη φάση, εκτελείται περιστροφική κίνηση του αντικειμένου, έως ότου η εμπρός άκρη του αντικειμένου συναντήσει την επιφάνεια της επόμενης μεταφορικής ταινίας (Β).
- Στην τρίτη φάση, ξεκινάει ολίσθηση του αντικειμένου, με ταυτόχρονη περιστροφή, μέχρις ότου η πίσω άκρη του αντικειμένου φτάσει στο σημείο κορυφής της γλίστρας.
- Στην τέταρτη φάση, εκτελείται πάλι ολίσθηση και περιστροφή του αντικειμένου, κίνηση η οποία ολοκληρώνεται όταν η πίσω άκρη του αντικειμένου φτάσει στην βάση της γλίστρας.
- Στην πέμπτη – και τελευταία – φάση το αντικείμενο πέφτει στην μεταφορική ταινία (Β) (εκτελείται περιστροφή και ολίσθηση) και είναι πλέον έτοιμο να μετακινηθεί μέσω των κυλίνδρων αυτής.

Προφανώς, εάν δεν υπάρχει μεταφορική ταινία να «υποδεχθεί» την παλέτα, αλλάζουν οι φάσεις 2÷5 και η παλέτα καταλήγει στο έδαφος. Αντίθετα, αν αντί μεταφορικής ταινίας υπάρχει κάποιο άλλο αντικείμενο (π.χ. τραπέζι υποδοχής) στο οποίο καταλήγει η παλέτα, ακολουθούνται οι ίδιες φάσεις, με μόνη διαφορά ότι μετά την ολοκλήρωση της πέμπτης φάσης η παλέτα είναι πλέον στατική.



Σχήμα 3-12. Φάσεις κίνησης παλέτας για μετάβαση από ταινία (A) σε ταινία (B)

3.6 Χωροταξική τοποθέτηση αντικειμένων

Η αυτόματη τοποθέτηση των αντικειμένων στον χώρο του εικονικού κυττάρου γίνεται σύμφωνα με έναν αλγόριθμο, ο οποίος έχει ως αφετηρία την θέση των ρομποτικών βραχιόνων, καθώς απαιτείται κάποιο αρχικό σταθερό σημείο με το οποίο θα συσχετίζονται τα υπόλοιπα αντικείμενα σειριακά. Αναλυτικά:

- Αρχικά υπολογίζονται οι τιμές των παραμέτρων $D13A$ και DXX . Για τον υπολογισμό τους, με δεδομένο ότι οι ρομποτικοί βραχίονες τοποθετούνται αντικριστά, χρησιμοποιούνται οι μεταβλητές που αφορούν στο μήκος των βραχιόνων στον άξονα $Υ$, δηλαδή τα μεγέθη l_4 , l_6 και l_{3B} , σύμφωνα με τους τύπους:
 - $XX_1 = l_4 + l_6 + l_{3B}$ και $XX_2 = l_{42} + l_{62} + l_{3B2}$
- Στην συνέχεια, προκύπτουν υποπεριπτώσεις:
 - Αν υπάρχουν και οι δύο βραχίονες, τότε:
 - Αν $XX_1 > XX_2$, τότε $DXX = XX_2$, αλλιώς $DXX = XX_1$
 - $D13A = (l_{3A} + l_{3A2}) / 2$
 - Αν υπάρχει μόνον ο βραχίονας 1, τότε:
 - $DXX = XX_1$
 - $D13A = 150$
 - Αν υπάρχει μόνον ο βραχίονας 2, τότε:
 - $DXX = XX_2$
 - $D13A = 150$
- Στην συνέχεια, υπολογίζονται οι θέσεις που αφορούν στους τόνους, καθώς και οι θέσεις των χώρων αναμονής.
- Τέλος, υπολογίζονται οι θέσεις εισόδου και εξόδου της παλέτας.

Ο Πίνακας 3-4 παρουσιάζει τους υπολογισμούς των θέσεων των αντικειμένων. Ο αλγόριθμος τοποθετεί αρχικά τα αντικείμενα κατά τρόπο τέτοιο ώστε οι ρομποτικοί βραχίονες να μπορούν να εξυπηρετήσουν όλες τις θέσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί υλικό (θέση εισόδου, τσικ τόνων, θέσεις αναμονής, θέση εξόδου), καθώς και να μην υπάρχουν συγκρούσεις στις κινήσεις των ρομποτικών βραχιόνων. Οι τιμές αυτές είναι περιοριστικές σε ότι αφορά στα αντικείμενα που πρόκειται να εισαχθούν, υπό την έννοια ότι στις συντεταγμένες που υπολογίζονται τοποθετείται το σημείο αναφοράς του κάθε αντικειμένου. Για παράδειγμα, το σημείο αναφοράς των ρομποτικών βραχιόνων βρίσκεται στο κέντρο του πάτου της βάσης. Όταν εισαχθεί ο βραχίονας στο σύστημα, ο αλγόριθμος τοποθετεί το

σημείο αναφοράς του βραχίονα στις συντεταγμένες του πίνακα, συνεπώς, εάν πρόκειται να εισαχθεί ένας βραχίονας με διαφορετικό σημείο αναφοράς, το αποτέλεσμα της τοποθέτησης δεν θα είναι σωστό. Το ίδιο ισχύει για όλα τα αντικείμενα, άρα το σημείο αναφοράς πρέπει να ορίζεται με τον ίδιο τρόπο για να είναι λειτουργικός ο αλγόριθμος.

	X	Y	Z	Orientation
Ρομπ. Βραχίονας-1 (R1)	Dl3A	-DXX/2+500+110	0	90°
Ρομπ. Βραχίονας-2 (R2)	-Dl3A	DXX/2+500-110	0	-90°
Τόρνος-1 (L1)	DXX	500	956.46	-90°
Θέση αναμονής-1 (WIP1)	L1X – 465	L1Y + 412	470	-
Τόρνος-2 (L2)	-DXX	500	956.46	90°
Θέση αναμονής-2 (WIP2)	L2X + 465	L2Y – 412	470	-
Θέση εισόδου (INP)	L1X – 300	L1Y + 765	651	-
Θέση εξόδου (OUTP)	L2X+300	L2Y – 765	711	-

Πίνακας 3-4. Υπολογισμός συντεταγμένων τοποθέτησης αντικειμένων κυττάρου

Για την δημιουργία του δικτύου μεταφορικών ταινιών προκύπτουν αντίστοιχα σαφείς κανόνες που πρέπει να ισχύουν ώστε να μην δημιουργείται κανένα πρόβλημα στην μετάβαση της παλέτας από την μία ταινία στην επόμενη. Οι κανόνες αφορούν στα γεωμετρικά στοιχεία της ταινίας στην οποία μεταβαίνει η παλέτα (ύψος, πλάτος), αλλά και στα στοιχεία θέσης.

Ο αλγόριθμος τοποθέτησης που υλοποιήθηκε αφορά στον υπολογισμό των θέσεων για την δημιουργία ενός δικτύου μεταφορικών ταινιών για την προσαγωγή της παλέτας με το αρχικό υλικό και την απαγωγή της παλέτας με το τελικό τεμάχιο. Το υποδίκτυο της προσαγωγής αποτελείται από δύο μεταφορικές ταινίες (#1, #2) που καταλήγουν σε κατάλληλο τραπέζι (#3), ενώ το υποδίκτυο της απαγωγής αποτελείται από τέσσερις μεταφορικές ταινίες (#4, #5, #6, #7) που καταλήγουν σε κατάλληλο τραπέζι (#8). Τα τραπέζια θεωρούνται ως οντολογίες υποκατηγορία των μεταφορικών ταινιών. Δεδομένου ότι υπάρχει αλληλοσυσχετισμός μεταξύ των θέσεων των μεταφορικών ταινιών, ο υπολογισμός γίνεται σε βήματα.

Η σειρά των υπολογισμών, είναι:

- Υποδίκτυο Προσαγωγής – M.T.#3 → M.T.#2 → M.T.#1
- Υποδίκτυο Απαγωγής – M.T.#4 → M.T.#5 → M.T.#6 → M.T.#7 → M.T.#8

Ο Πίνακας 3-5 παρουσιάζει, ως παράδειγμα, τον συσχετισμό μεταξύ των μεταφορικών ταινιών του συστήματος προσαγωγής. Αντίστοιχα προκύπτουν οι συσχετισμοί του συστήματος απαγωγής.

Υποδίκτυο προσαγωγής			
Μεταφορική ταινία #3			Είδος: τραπέζι
Μήκος:	L_3	Γωνία:	θ_3
Πλάτος:	W_3	X:	$X_3 = INPX - \cos(a+\theta_3)*E$
Ύψος:	$H_3 = INPZ - 113$	Υ:	$Y_3 = INPY - \sin(a+\theta_3)*E$
Μεταφορική ταινία #2			Είδος: κανονική
Μήκος:	L_2	Γωνία:	$\theta_2 = \theta_3$
Πλάτος:	W_2	X:	$X_2 = X_3 - \cos(90^\circ - \theta_3)*(L_3 - 2)$
Ύψος:	$H_2 = H_3 + 11$	Υ:	$Y_2 = Y_3 - \sin(90^\circ - \theta_3)*(L_3 - 2)$
Μεταφορική ταινία #1			Είδος: κανονική
Μήκος:	L_1	Γωνία:	$\theta_1 = \theta_2 + 90^\circ$
Πλάτος:	W_1	X:	$X_1 = X_2 - \tan\theta_2*(Y_1 - Y_2 - \sin\theta_2*$ $((P_W - P_L)/2 - 31)) + \cos\theta_2*((P_W - P_L)/2 - 31))$
Ύψος:	$H_1 = H_2 + 63$	Υ:	$Y_2 \leq Y_1 \leq Y_2 + \sin(90^\circ - \theta_2)*(L_2 - W_1) + \sin\theta_2*$ $((P_W - P_L)/2 - 31))$

Πίνακας 3-5. Υπολογισμός διαστάσεων και συντεταγμένων τοποθέτησης ταινιών

όπου:

- $P_W =$ πλάτος παλέτας
- $P_L =$ μήκος παλέτας
- $E = \sqrt{66^2 + \left(\frac{P_W}{2}\right)^2}$
- $a = \text{atan}\left(\frac{66*2}{P_W}\right)$ (οι μεταβλητές E και a σχετίζονται επίσης με τις διαστάσεις της παλέτας)

Με αντίστοιχο τρόπο, εκτελείται αλγόριθμος για την τοποθέτηση του προστατευτικού κιγκλιδώματος (*safety grid*) που περικλείει το κύτταρο (*cell*), αποτελούμενο από 8 τεμάχια (2 για κάθε πλευρά). Στην περίπτωση του δεν υπάρχει αλληλοσυσχετισμός μεταξύ των τεμαχίων· κάθε τεμάχιο μπορεί να έχει διαφορετικό μήκος/ύψος/προσανατολισμό και τοποθέτηση. Η αρχική τοποθέτηση, όμως, γίνεται κατά τρόπο τέτοιο ώστε να μην υπάρχουν «κενά» στο κιγκλιδωμά και το κύτταρο να περικλείεται πλήρως, ενώ ταυτόχρονα

διασφαλίζονται τα κατάλληλα ανοίγματα για μην υπάρχει πρόβλημα με τις μεταφορικές ταινίες.

#	Είδος	Γεωμετρία		Τοποθέτηση		
		Μήκος	Ύψος	X	Υ	Γωνία
1	Κανονικό	3000	3000	-3000	-3000	0
2	Με άνοιγμα	3000	3000	0	-3000	0
3	Κανονικό	3000	3000	-3000	0	90
4	Κανονικό	2000	3000	-3000	2000	90
5	Κανονικό	3000	3000	3000	-3000	-90
6	Κανονικό	2000	3000	3000	2000	90
7	Με άνοιγμα	3000	3000	-3000	2000	0
8	Με πόρτα	3000	3000	0	2000	0

Πίνακας 3-6. Αρχικές διαστάσεις και τοποθέτηση προστατευτικού κιγκλιδώματος

Τέλος, αντίστοιχος αλγόριθμος υπάρχει για την τοποθέτηση των δομικών στοιχείων (τοίχοι, ανοίγματα, δάπεδο, οροφή) που σχηματίζουν το δωμάτιο (room). Οι διαστάσεις του δωματίου (μήκος/πλάτος/ύψος) και οι συντεταγμένες του κέντρου του ορίζουν καταρχήν τις διαστάσεις του δαπέδου και της οροφής, καθώς και των 4 τοίχων (), αλλά και τα σημεία τοποθέτησης (). Ο Πίνακας 3-7 παρουσιάζει, ως παράδειγμα, τον ορισμό των διαστάσεων του βόρειου τοίχου, ενώ ο Πίνακας 3-8 τον υπολογισμό των σημείων τοποθέτησης.

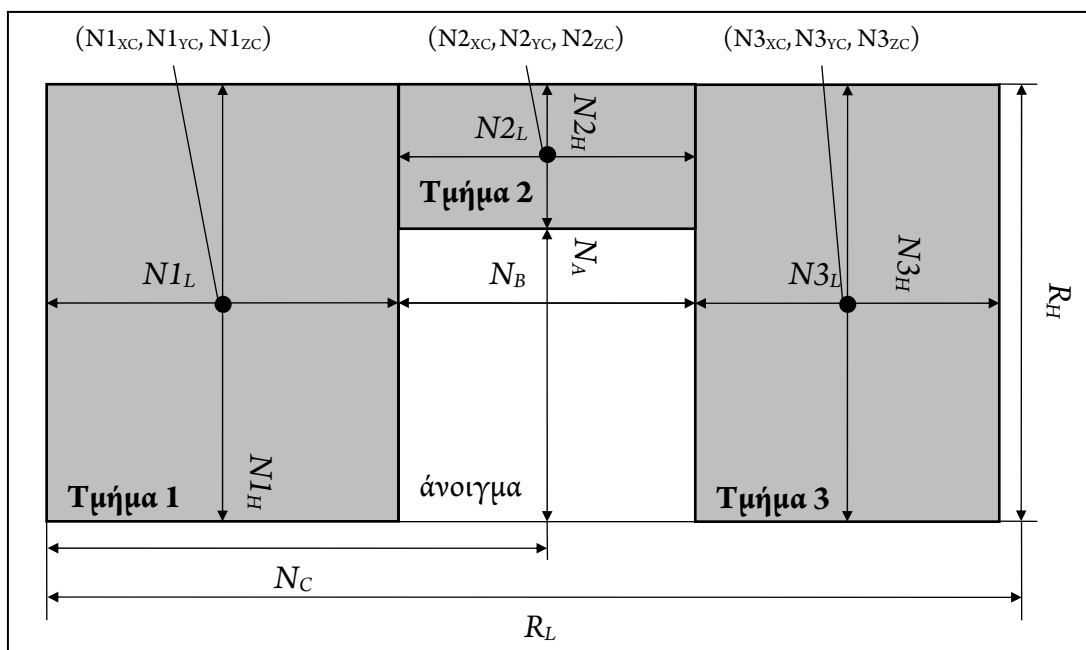
Τμήμα	Γεωμετρία		
	Μήκος	Πλάτος	Ύψος
Δωμάτιο			
-	R_L	R_W	R_H
Δάπεδο			
-	$F_L = R_L$	$F_W = R_W$	$F_H = 0$
Οροφή			
-	$C_L = R_L$	$C_W = R_W$	$C_H = 0$
Βόρειος Τοίχος (N)			
1	$N1_L = N_C - \frac{N_B}{2}$	$N1_W = 300$	$N1_H = R_H$
2	$N2_L = N_B$	$N2_W = 300$	$N2_H = R_H - N_A$
3	$N3_L = R_L - N_C - \frac{N_B}{2}$	$N3_W = 300$	$N3_H = R_H$

Πίνακας 3-7. Υπολογισμός διαστάσεων δομικών στοιχείων

Τοποθέτηση			
Τμήμα	X	Y	Z
Δωμάτιο			
-	R_{XC}	R_{YC}	-
Δάπεδο			
-	$F_{XC} = R_{XC}$	$F_{YC} = R_{YC}$	0
Οροφή			
-	$C_{XC} = R_{XC}$	$C_{YC} = R_{YC}$	$C_{ZC} = R_H$
Βόρειος Τοίχος (N)			
1	$N1_{XC} = R_{XC} - \frac{R_L}{2} + \frac{N1_L}{2}$	$N1_{YC} = R_{YC} - \frac{R_W}{2} + \frac{N1_W}{2}$	$N1_{ZC} = \frac{R_H}{2}$
2	$N2_{XC} = N1_{XC} + \frac{N1_L}{2} + \frac{N2_L}{2}$	$N2_{YC} = N1_{YC}$	$N2_{ZC} = N1_{ZC} + \frac{N_A}{2}$
3	$N3_{XC} = N2_{XC} + \frac{N2_L}{2} + \frac{N3_L}{2}$	$N3_{YC} = N2_{YC}$	$N3_{ZC} = N2_{ZC} - \frac{N_A}{2}$

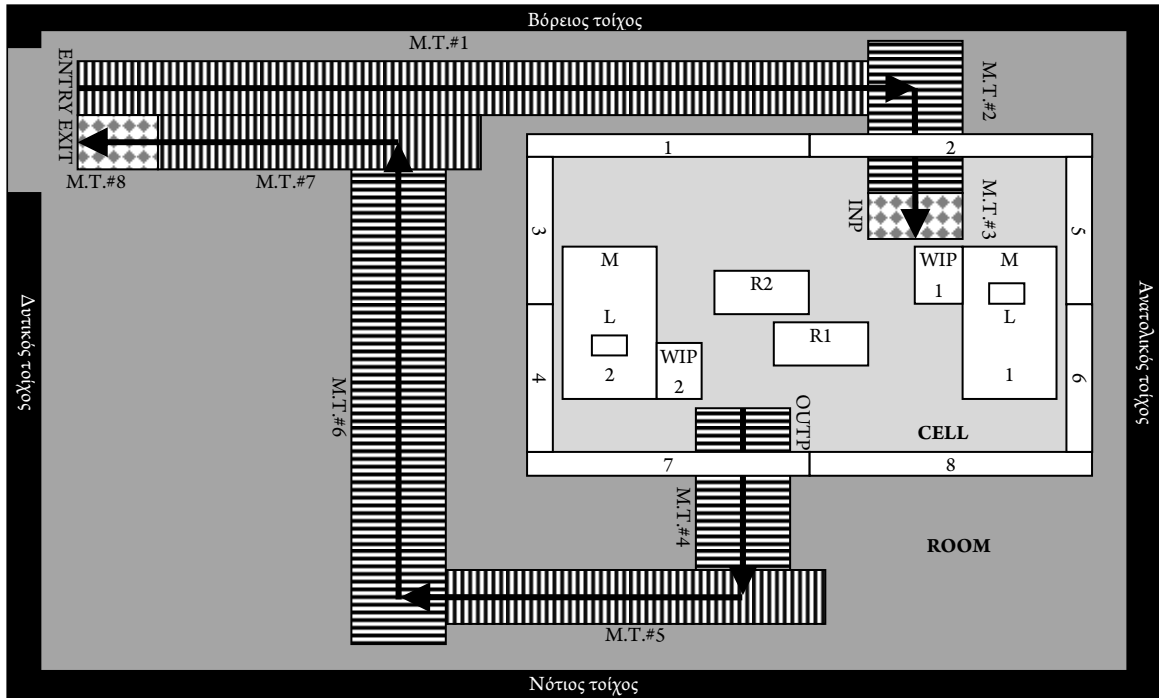
Πίνακας 3-8. Υπολογισμός συντεταγμένων τοποθέτησης δομικών στοιχείων

Κάθε τοίχος αποτελείται από τρία τμήματα, ώστε να είναι δυνατή η ύπαρξη ανοιγμάτων, υποδηλώνοντας κάποια πόρτα, σύμφωνα και με το Σχήμα 3-13 (παράδειγμα για τον βόρειο τοίχο).



Σχήμα 3-13. Παράδειγμα τμημάτων τοίχου με άνοιγμα (βόρειος τοίχος)

Στο Σχήμα 3-14 φαίνονται σε κάτοψη τα αντικείμενα του κελιού και του δωματίου, όπως αυτά τοποθετούνται στις αρχικές τους θέσεις μέσω των προαναφερθέντων αλγορίθμων, καθώς και η διαδρομή που ακολουθεί η παλέτα όταν κινείται μέσω του δικτύου των μεταφορικών ταινιών.



Σχήμα 3-14. Κάτοψη δωματίου & κελιού κατά την αρχική τοποθέτηση των αντικειμένων

4 Ανίχνευση συγκρούσεων

4.1 Εισαγωγή

Η δυνατότητα γρήγορης και ακριβούς ανίχνευσης συγκρούσεων (*collision detection*) μεταξύ αντικειμένων εντός ενός εικονικού χώρου αποτελεί ανάγκη σε περιπτώσεις προγραμμάτων CAD (Lin, et al., 1998), προσομοίωσης (Kolb, et al., 2004), γραφικών (Hubbard, 1995), ρομποτικής (Kuffner, et al., 2002), αλλά και βιντεοπαιχνιδιών. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η ανίχνευση γίνεται μέσω κατάλληλων αλγορίθμων και βιβλιοθηκών με διαφορετικές μεθοδολογίες, διατηρώντας όμως κάποια κοινά χαρακτηριστικά (όπως για παράδειγμα ότι ο έλεγχος για σύγκρουση γίνεται πάντα μεταξύ δύο αντικειμένων). Σε αρκετές περιπτώσεις, ειδικά σε σύγχρονες εφαρμογές με μηχανές μοντελοποίηση φυσικής (*physics engine*), το ενδιαφέρον εστιάζεται στο αποτέλεσμα που έχει η σύγκρουση στα αντικείμενα που συγκρούονται (*collision response*), εφόσον αυτά είναι παραμορφώσιμα.

Το βασικό στοιχείο που διαφοροποιεί τις μεθοδολογίες αφορά στον τρόπο αντιμετώπισης των αντικειμένων που ελέγχονται για σύγκρουση και, πιο συγκεκριμένα, στο είδος του οριακού όγκου (*bounding box*) που λαμβάνεται υπόψη για την προσέγγιση του αντικειμένου. Έτσι, ο οριακός όγκος που περιβάλλει το προς έλεγχο αντικείμενο μπορεί να είναι σφαίρα, ευθυγραμμισμένο οριακό κουτί ως προς άξονα (EAOK) (*axis-aligned bounding box, AABB*) (Zachmann, et al., 1995), προσανατολισμένο οριακό κουτί (ΠΟΚ) (*oriented bounding box, OBB*) (Gottschalk, et al., 1996), κυρτό περίβλημα ή πολύτοπα διακριτού προσανατολισμού (*k-dops*) (Klosowski, et al., 1998). Επιπροσθέτως, οι οριακοί όγκοι συνήθως οργανώνονται ιεραρχικά (*bounding volume hierarchies, BVH*) με την μορφή δένδρου, δημιουργώντας μεγαλύτερους οριακούς όγκους και αυξάνοντας κατ' αυτό τον τρόπο την ταχύτητα του αλγορίθμου.

Αντίστοιχα, δημιουργήθηκαν και βιβλιοθήκες ανίχνευσης συγκρούσεων, όπως η I-COLLIDE (Cohen, et al., 1995), η RAPID (Gottschalk, 1997), η V-COLLIDE (Hudson, et al., 1997), και η SOLID (Bergen, 2004). Η I-COLLIDE κάνει χρήση κυρτών πολυέδρων και σύγκριση περιοχών Voronoi, η RAPID χρησιμοποιεί OBBs και αρχικά μοντέλα υπό μορφή τριγωνικού επιφανειακού πλέγματος, η V-COLLIDE χρησιμοποιεί μη δομημένα πολύγωνα, ενώ η SOLID χρησιμοποιεί AABBs και τον αλγόριθμο GJK (Gilbert, et al., 1988) για αντικείμενα μη κυρτών πολυγώνων.

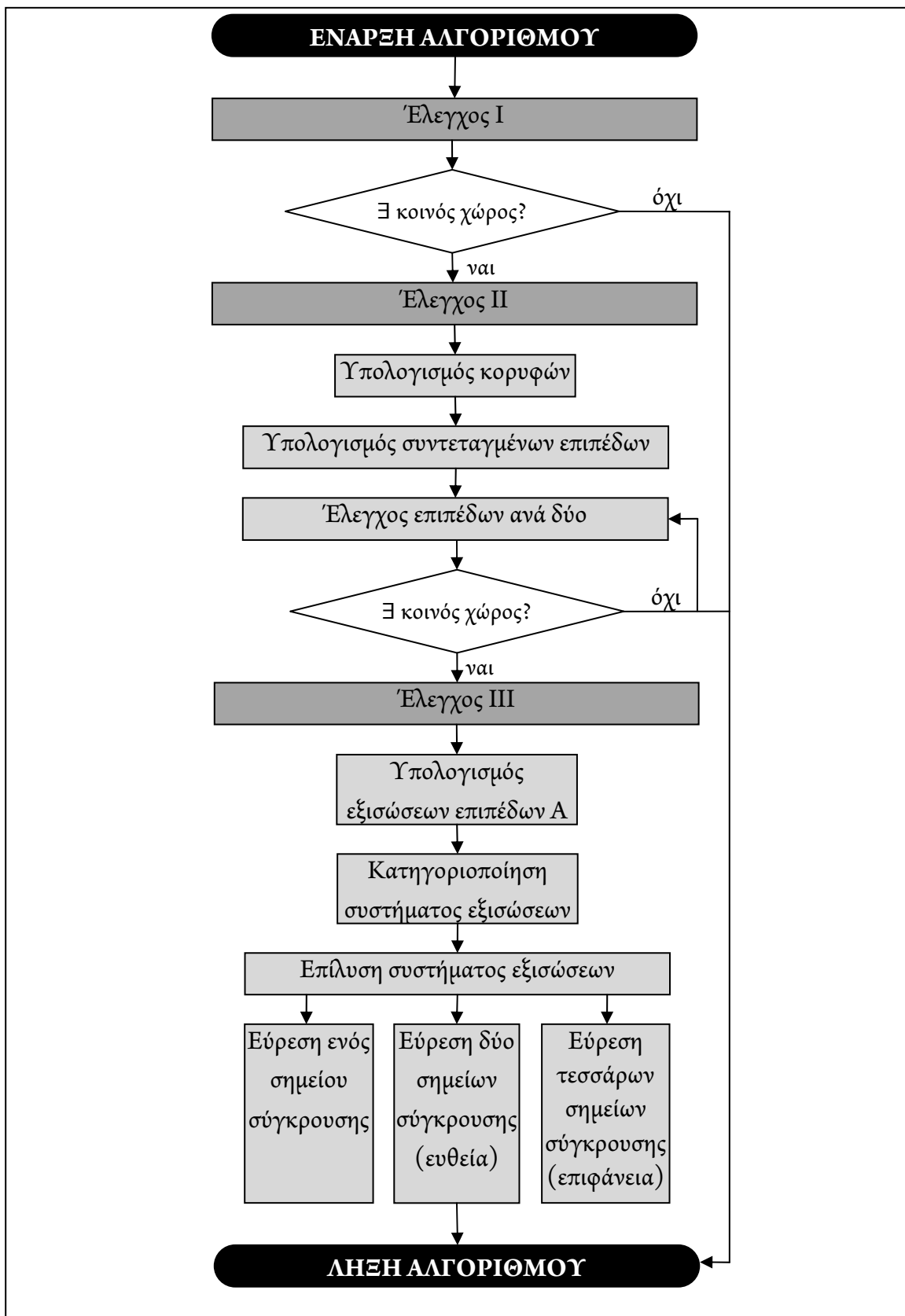
4.2 Υλοποίηση

Η ανάγκη για την δημιουργία ενός αλγόριθμου ανίχνευσης προέκυψε – κυρίως – λόγω της ύπαρξης ρομποτικών βραχιόνων στο εικονικό περιβάλλον. Στη χρήση του ρομποτικού βραχίονα από τον χειριστή ενδέχεται να μην είναι ικανοποιητική η πληροφορία της σύγκρουσης μόνον μέσω του οπτικού αποτελέσματος, συνεπώς έπρεπε να υφίσταται ένας τρόπος ειδοποίησης του χρήστη ότι έχει υπάρξει σύγκρουση με κάποιο άλλο αντικείμενο κατά την διάρκεια κάποιας κίνησης. Ο αλγόριθμος ανίχνευσης που δημιουργήθηκε αφορά σε άκαμπτα αντικείμενα και έκανε χρήση τόσο των ευθυγραμμισμένων ως προς άξονα οριακών κουτιών (ΕΑΟΚ) όσο και των προσανατολισμένων οριακών κουτιών (ΠΟΚ). Η επιλογή αυτή έγινε κυρίως διότι το περιβάλλον προγραμματισμού διαθέτει για τα αντικείμενα που περιέχονται εντός του κόσμου συγκεκριμένα στοιχεία. Για κάθε αντικείμενο που εισάγεται στον κόσμο, διατίθεται ένα προσανατολισμένο οριακό κουτί για το οποίο όμως είναι γνωστές μόνο οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές σε κάθε άξονα, καθώς και οι συντεταγμένες του κέντρου του.

Το λογικό διάγραμμα του αλγόριθμου φαίνεται στο Σχήμα 4-1. Ο αλγόριθμος εκτελεί σειριακά τρεις ελέγχους. Στον πρώτο έλεγχο, υπολογίζονται τα οριακά κουτιά ευθυγραμμισμένα ως προς τους άξονες και ελέγχεται εάν υπάρχει πιθανότητα σύγκρουσης. Εάν δεν υπάρχει, ο αλγόριθμος τελειώνει. Εάν υπάρχει πιθανότητα, προχωράει σε δεύτερο έλεγχο, οποίος υπολογίζει τα προσανατολισμένα οριακά κουτιά των αντικειμένων. Στην συνέχεια ελέγχει τα επίπεδα των κουτιών ανά δύο. Εάν δεν προκύψει πιθανότητα σύγκρουσης σε κάποιο από τα ζευγάρια των επιπέδων, ο αλγόριθμος τελειώνει. Εάν προκύψει πιθανότητα, ο αλγόριθμος προχωράει στο τρίτο και τελευταίο έλεγχο, όπου υπολογίζει και επιλύει το σύστημα εξισώσεων για τα υπό εξέταση επίπεδα. Ως αποτέλεσμα προκύπτουν τα σημεία σύγκρουσης των αντικειμένων.

Ο αλγόριθμος έχει μεγάλη ταχύτητα εκτέλεσης, λόγω των διαφορετικών επιπέδων ελέγχου που διαθέτει. Κατά αυτόν τον τρόπο, τα αποτελέσματά του δίνονται σε πραγματικό χρόνο, συστατικό το οποίο είναι απαραίτητο για την ομαλή διεξαγωγή κινήσεων σε ένα περιβάλλον.

Αναλυτικά, η διαδικασία που ακολουθεί ο αλγόριθμος για να ανιχνεύσει την σύγκρουση μεταξύ δύο αντικειμένων παρουσιάζεται στις παραγράφους §4.2.1-4.2.3.



Σχήμα 4-1. Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου ανίχνευσης συγκρούσεων

4.2.1 Έλεγχος I

- Με βάση τα προαναφερθέντα δεδομένα (μέγιστες/ελάχιστες τιμές άξονα και συντεταγμένες κέντρου), υπολογίζονται τα συνολικά μήκη ενός μεγαλύτερου κουτιού, για το κάθε ένα από τα δύο αντικείμενα, στους τρεις άξονες, δηλαδή:
 - $AX = \text{abs}(A_{\text{max}X} - A_{\text{min}X}), BX = \text{abs}(B_{\text{max}X} - B_{\text{min}X})$
 - $AY = \text{abs}(A_{\text{max}Y} - A_{\text{min}Y}), BY = \text{abs}(B_{\text{max}Y} - B_{\text{min}Y})$
 - $AZ = \text{abs}(A_{\text{max}Z} - A_{\text{min}Z}), BZ = \text{abs}(B_{\text{max}Z} - B_{\text{min}Z})$

Συνεπώς, υπολογίζεται ένα οριακό κουτί ευθυγραμμισμένο ως προς τους άξονες (ΕΑΟΚ).

- Υπολογίζεται το συνολικό επιτρεπόμενο μήκος σε κάθε άξονα. Ως τέτοιο ορίζεται το μήκος που δημιουργείται εάν τα αντικείμενα εφάπτονται, δηλαδή:
 - $AB_{\text{max}X} = AX + BX$
 - $AB_{\text{max}Y} = AY + BY$
 - $AB_{\text{max}Z} = AZ + BZ$
- Υπολογίζονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές για κάθε άξονα μεταξύ των δύο αντικειμένων και το πραγματικό μήκος που δημιουργείται από αυτά τα σημεία, δηλαδή:
 - $AB_{\text{nmax}X} = \max(A_{\text{max}X}, B_{\text{max}X})$
 - $AB_{\text{nmin}X} = \min(A_{\text{min}X}, B_{\text{min}X})$
 - $AB_{\text{n}X} = \text{abs}(AB_{\text{nmax}X} - AB_{\text{nmin}X})$
 - $AB_{\text{nmax}Y} = \max(A_{\text{max}Y}, B_{\text{max}Y})$
 - $AB_{\text{nmin}Y} = \min(A_{\text{min}Y}, B_{\text{min}Y})$
 - $AB_{\text{n}Y} = \text{abs}(AB_{\text{nmax}Y} - AB_{\text{nmin}Y})$
 - $AB_{\text{nmax}Z} = \max(A_{\text{max}Z}, B_{\text{max}Z})$
 - $AB_{\text{nmin}Z} = \min(A_{\text{min}Z}, B_{\text{min}Z})$
 - $AB_{\text{n}Z} = \text{abs}(AB_{\text{nmax}Z} - AB_{\text{nmin}Z})$

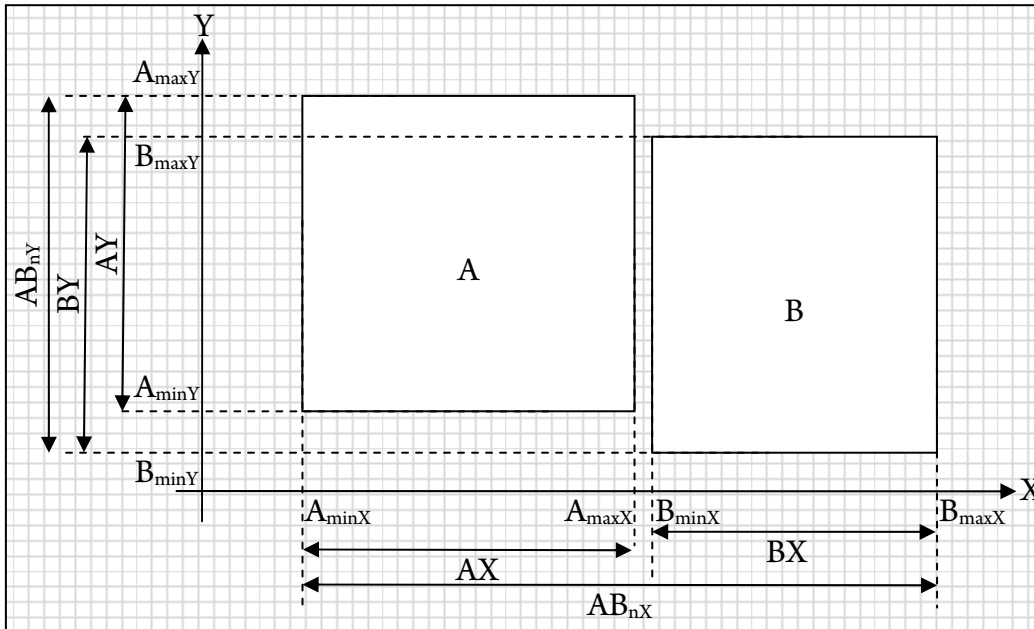
- Υπόθεση:

AN ισχύει $AB_{\text{n}X} \leq AB_{\text{max}X}$ και $AB_{\text{n}Y} \leq AB_{\text{max}Y}$ και $AB_{\text{n}Z} \leq AB_{\text{max}Z}$,

$TOTE$ υπάρχει πιθανότητα σύγκρουσης (άρα, έλεγχος 2^{ov} επιπέδου).

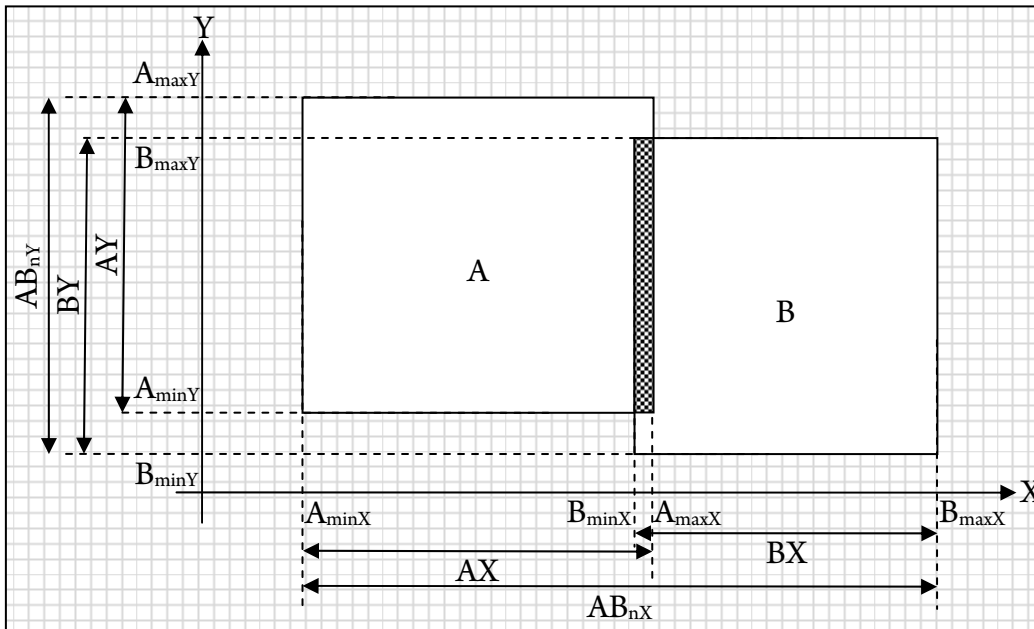
Στα σχήματα 4-2 ÷ 4-4 φαίνονται τρεις περιπτώσεις για δύο αντικείμενα A και B, στις δύο διαστάσεις.

Στην πρώτη περίπτωση, ισχύει $AB_{nX} > AX+BX$ και $AB_{nY} < AY+BY$, οπότε, σύμφωνα με την παραπάνω υπόθεση, δεν υπάρχει πιθανότητα σύγκρουσης.



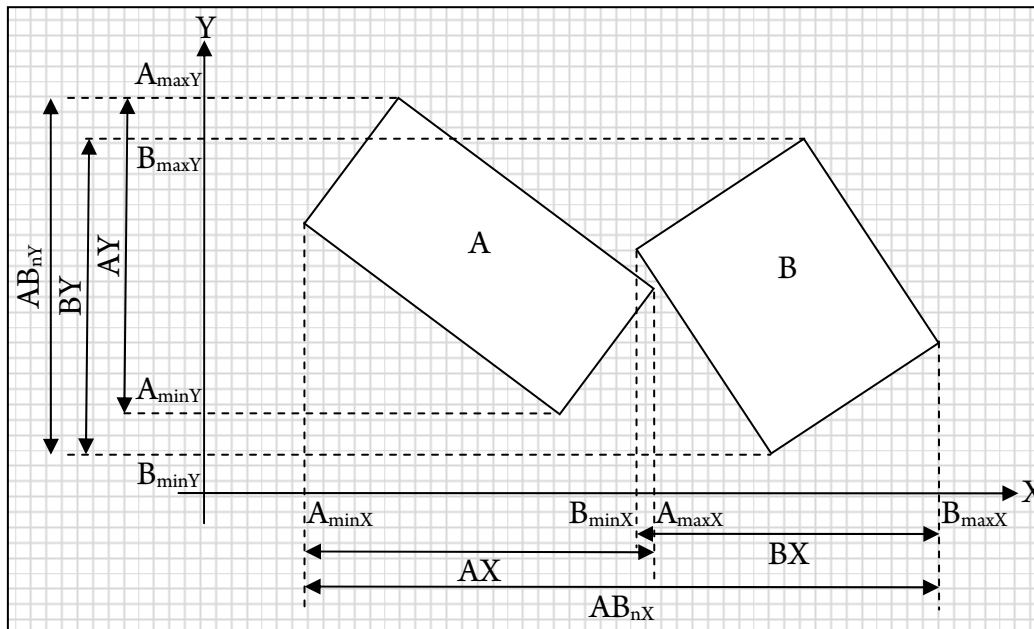
Σχήμα 4-2. Έλεγχος I (περίπτωση A)

Στην δεύτερη περίπτωση, ισχύει $AB_{nX} < AX+BX$ και $AB_{nY} < AY+BY$, συνεπώς υπάρχει πιθανότητα σύγκρουσης. Στην προκειμένη περίπτωση, φαίνεται και η περιοχή σύγκρουσης.



Σχήμα 4-3. Έλεγχος I (περίπτωση B)

Στην τρίτη περίπτωση, ισχύει $AB_{nX} < AX+BX$ και $AB_{nY} < AY+BY$, συνεπώς υπάρχει πιθανότητα σύγκρουσης. Στην προκειμένη περίπτωση, όμως, δεν υπάρχει σύγκρουση.



Σχήμα 4-4. Έλεγχος I (περίπτωση Γ)

Λόγω ύπαρξης περιπτώσεων σαν την περίπτωση του παραπάνω σχήματος (Σχήμα 4-4), ο αλγόριθμος προχωράει στον έλεγχο II για επιβεβαίωση ύπαρξης σύγκρουσης ή όχι.

4.2.2 Έλεγχος II

- Εύρεση των συντεταγμένων των οκτώ κορυφών των κουτιών των αντικειμένων A και B και δημιουργία δύο πινάκων ($A_C [8][3]$ και $B_C [8][3]$). Για τον υπολογισμό των συντεταγμένων, χρησιμοποιούνται τα μητρώα προσανατολισμού και οι αρχικές διαστάσεις των κουτιών, οπότε και προκύπτουν προσανατολισμένα οριακά κουτιά (ΠΟΚ).
- Δημιουργία δύο πινάκων με τις συντεταγμένες των σημείων που δημιουργούν τα έξι διαφορετικά επίπεδα κάθε αντικειμένου ($A_{123456}[6][3][3]$ και $B_{123456}[6][3][3]$).
- Δημιουργία δύο πινάκων για κάθε αντικείμενο με τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές κάθε άξονα σε κάθε επίπεδο ($A_{123456max}[6][3]$, $A_{123456min}[6][3]$, και $B_{123456max}[6][3]$, $B_{123456min}[6][3]$).
- Μετατροπή των παραπάνω 6×3 πινάκων σε πίνακες 36×3 ($AA_{123456max}[36][3]$, $AA_{123456min}[36][3]$, και $BB_{123456max}[36][3]$, $BB_{123456min}[36][3]$) για σύγκριση επιπέδων ανά δύο.

- Δημιουργία δύο νέων 36x3 πινάκων ($AB_{123456len}[36][3]$ και $AB_{123456len2}[36][3]$), όπου ισχύει (για $s=0\div35$ και $t=0\div2$):
 - $AB_{123456len}[s][t] = \text{abs}(AA_{123456max}[s][t] - AA_{123456min}[s][t]) + \text{abs}(BB_{123456max}[s][t] - BB_{123456min}[s][t])$
 - $AB_{123456len2}[s][t] = \text{abs}(\max(AA_{123456max}[s][t], BB_{123456max}[s][t]) - \min(AA_{123456min}[s][t], BB_{123456min}[s][t]))$

Ο πρώτος πίνακας δίνει το πραγματικό μήκος ενώ ο δεύτερος το μήκος που θα προέκυπτε εάν τα επίπεδα εφάπτονταν (σε αντιστοιχία με τον ορισμό του ελέγχου I).

- Υπόθεση:

AN

$$AB_{123456len2}[s][0] \leq AB_{123456len}[s][0] \text{ και}$$

$$AB_{123456len2}[s][1] \leq AB_{123456len}[s][1] \text{ και}$$

$$AB_{123456len2}[s][2] \leq AB_{123456len}[s][2]$$

TOTE

υπάρχει πιθανότητα σύγκρουσης (τομής) των επιπέδων [s] και πρέπει να ελεγχθούν (άρα, έλεγχος III).

4.2.3 Έλεγχος III

- Καταρχήν, για τα επίπεδα [s] που πρέπει να γίνει έλεγχος, υπολογίζονται τα στοιχεία των εξισώσεων επιπέδου μέσω των οριζουσών, δηλαδή:
 - $A_a[s] = (A_{123456}[Ak][1][1] - A_{123456}[Ak][0][1]) * (A_{123456}[Ak][2][2] - A_{123456}[Ak][0][2]) - (A_{123456}[Ak][1][2] - A_{123456}[Ak][0][2]) * (A_{123456}[Ak][2][1] - A_{123456}[Ak][0][1])$
 - $A_b[s] = -((A_{123456}[Ak][1][0] - A_{123456}[Ak][0][0]) * (A_{123456}[Ak][2][2] - A_{123456}[Ak][0][2]) - (A_{123456}[Ak][1][2] - A_{123456}[Ak][0][2]) * (A_{123456}[Ak][2][0] - A_{123456}[Ak][0][0]))$
 - $A_c[s] = (A_{123456}[Ak][1][0] - A_{123456}[Ak][0][0]) * (A_{123456}[Ak][2][1] - A_{123456}[Ak][0][1]) - (A_{123456}[Ak][1][1] - A_{123456}[Ak][0][1]) * (A_{123456}[Ak][2][0] - A_{123456}[Ak][0][0])$
 - $A_d[s] = -A_{123456}[Ak][0][0] * A_a[s] - A_{123456}[Ak][0][1] * A_b[s] - A_{123456}[Ak][0][2] * A_c[s]$
 - $B_a[s] = (B_{123456}[Bk][1][1] - B_{123456}[Bk][0][1]) * (B_{123456}[Bk][2][2] - B_{123456}[Bk][0][2]) - (B_{123456}[Bk][1][2] - B_{123456}[Bk][0][2]) * (B_{123456}[Bk][2][1] - B_{123456}[Bk][0][1])$

- $B_b[s] = - ((B_{123456}[Bk][1][0] - B_{123456}[Bk][0][0]) * (B_{123456}[Bk][2][2] - B_{123456}[Bk][0][2]) - (B_{123456}[Bk][1][2] - B_{123456}[Bk][0][2]) * (B_{123456}[Bk][2][0] - B_{123456}[Bk][0][0]))$
 - $B_c[s] = (B_{123456}[Bk][1][0] - B_{123456}[Bk][0][0]) * (B_{123456}[Bk][2][1] - B_{123456}[Bk][0][1]) - (B_{123456}[Bk][1][1] - B_{123456}[Bk][0][1]) * (B_{123456}[Bk][2][0] - B_{123456}[Bk][0][0])$
 - $B_d[s] = - B_{123456}[Bk][0][0] * B_a[s] - B_{123456}[Bk][0][1] * B_b[s] - B_{123456}[Bk][0][2] * B_c[s]$
- Έχοντας πλέον τις εξισώσεις επιπέδου για κάθε ένα από τα επίπεδα A και B ($A_a[s]*X+A_b[s]*Y+A_c[s]*Z+A_d[s]=0$ και $B_a[s]*X+B_b[s]*Y+B_c[s]*Z+B_d[s]=0$), πρέπει κάθε φορά να επιλυθεί ένα σύστημα δύο εξισώσεων με τρεις αγνώστους. Εφόσον υπάρχει λύση εντός των ορίων των επί εξέταση επιπέδων, τότε υπάρχει σύγκρουση.
 - Τα υπό εξέταση συστήματα εξισώσεων μπορούν να πινακοποιηθούν ανάλογα με την ύπαρξη ή μη κάποιων όρων εκ των $A_a, A_b, A_c, B_a, B_b, B_c$. Από την πινακοποίηση προκύπτουν σαράντα εννιά υποπεριπτώσεις (Πίνακας 4-1):

		B						
		a	b	c	ab	bc	ac	abc
A	a	X	X_A, Y_B	X_A, Z_B	X, Y_B	X_A, Y_B, Z_B	X, Z_B	X, Y_B, Z_B
	b	X_B, Y_A	Y	Y_A, Z_B	X_B, Y	Y, Z_B	X_B, Y_A, Z_B	X_B, Y, Z_B
	c	X_B, Z_A	Y_B, Z_A	Z	X_B, Y_B, Z_A	Y_B, Z	X_B, Z	X_B, Y_B, Z
	ab	X, Y_A	X_A, Y	X_A, Y_A, Z_B	X, Y	X_A, Y, Z_B	X, Y_A, Z_B	X, Y, Z_B
	bc	X_B, Y_A, Z_A	Y, Z_A	Y_A, Z	X_B, Y, Z_A	Y, Z	X_B, Y_A, Z	X_B, Y, Z
	ac	X, Z_A	X_A, Y_B, Z_A	X_A, Z	X, Y_B, Z_A	X_A, Y_B, Z	X, Z	X, Y_B, Z
	abc	X, Y_A, Z_A	X_A, Y, Z_A	X_A, Y_A, Z	X, Y, Z_A	X_A, Y, Z	X, Y_A, Z	X, Y, Z

Πίνακας 4-1. Υποπεριπτώσεις συστημάτων

- Όσον αφορά την κατηγοριοποίηση των συστημάτων, παρατηρούνται τα εξής:
 - Τα συστήματα με έναν άγνωστο (Κατηγορία I – τρεις υποπεριπτώσεις, βλ. Παράρτημα A, παράδειγμα A.1).
 - Τα συστήματα με δύο αγνώστους (είκοσι μία υποπεριπτώσεις) χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- σε αυτά που η εξίσωση του κάθε επιπέδου περιέχει μόνον ένα άγνωστο (Κατηγορία ΙΙΑ – έξι υποπεριπτώσεις),
 - σε αυτά όπου η μία εξίσωση περιέχει έναν άγνωστο και η δεύτερη εξίσωση δυο αγνώστους (Κατηγορία ΙΙΒ – δώδεκα υποπεριπτώσεις), και
 - σε αυτά όπου και οι δύο εξισώσεις περιέχουν και τους δύο αγνώστους (Κατηγορία ΙΙΓ – τρεις υποπεριπτώσεις, βλ. Παράρτημα Α, παράδειγμα Α.2).
- Τα συστήματα με τρεις αγνώστους (είκοσι πέντε υποπεριπτώσεις) χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες:
- σε αυτά όπου η εξίσωση του ενός επιπέδου περιέχει έναν άγνωστο και η εξίσωση του άλλου επιπέδου τους άλλους δύο (Κατηγορία ΙΙΙΑ – έξι υποπεριπτώσεις),
 - σε αυτά όπου η εξίσωση του ενός επιπέδου περιέχει έναν άγνωστο και η εξίσωση του άλλου επιπέδου τρεις αγνώστους (Κατηγορία ΙΙΙΒ – έξι υποπεριπτώσεις, βλ. Παράρτημα Α, παράδειγμα Α.3),
 - σε αυτά όπου κάθε μία από τις δύο εξισώσεις περιέχει δύο αγνώστους (Κατηγορία ΙΙΙΓ – έξι υποπεριπτώσεις),
 - σε αυτά όπου η εξίσωση του ενός επιπέδου περιέχει δύο αγνώστους και του άλλου επιπέδου τρεις αγνώστους (Κατηγορία ΙΙΙΔ – έξι υποπεριπτώσεις), και
 - σε αυτά όπου και οι δύο εξισώσεις περιέχουν τρεις αγνώστους (Κατηγορία ΙΙΙΕ – μία υποπερίπτωση, βλ. Παράρτημα Α, παράδειγμα Α.4).

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται παραδείγματα για τον τρόπο υπολογισμού των παραπάνω υποπεριπτώσεων.

Παράρτημα Α

Ακολουθούν παραδείγματα για τον τρόπο υπολογισμού των υποπεριπτώσεων ανίχνευσης συγκρούσεων.

A.1 Παράδειγμα 1 – Ένας άγνωστος (Κατηγορία I)

- Έστω ότι τα δύο επίπεδα που ελέγχονται περιγράφονται από τις εξισώσεις επιπέδων:

$$A_a * X_A + A_d = 0 \text{ και } B_a * X_B + B_d = 0$$

- Από την εξίσωση επιπέδου του Α, υπολογίζεται το X_A , ενώ από την εξίσωση επιπέδου του Β, υπολογίζεται το X_B .

- $X_A = \frac{-A_d}{A_a}$

- $X_B = \frac{-B_d}{B_a}$

- Εάν $X_A \neq X_B$, δεν υπάρχει σύγκρουση. Εάν $X_A = X_B = X$, υπάρχει σύγκρουση.
- Εάν υπάρχει σύγκρουση, υπολογίζεται ο χώρος στον οποίο αυτή συμβαίνει. Ο χώρος αυτός είναι μια επιφάνεια, η οποία ορίζεται από τέσσερις κορυφές, με συντεταγμένες:

- $X_1 = X$

$$Y_1 = \min (AA_{123456\max}[s][1], BB_{123456\max}[s][1])$$

$$Z_1 = \min (AA_{123456\max}[s][2], BB_{123456\max}[s][2])$$

- $X_2 = X$

$$Y_2 = \max (AA_{123456\min}[s][1], BB_{123456\min}[s][1])$$

$$Z_2 = \min (AA_{123456\max}[s][2], BB_{123456\max}[s][2])$$

- $X_3 = X$

$$Y_3 = \min (AA_{123456\max}[s][1], BB_{123456\max}[s][1])$$

$$Z_3 = \max (AA_{123456\min}[s][2], BB_{123456\min}[s][2])$$

- $X_4 = X$

$$Y_4 = \max (AA_{123456\min}[s][1], BB_{123456\min}[s][1])$$

$$Z_4 = \max (AA_{123456\min}[s][2], BB_{123456\min}[s][2])$$

A.2 Παράδειγμα 2 – Δύο άγνωστοι (Κατηγορία ΙΙΓ)

- Έστω ότι τα δύο επίπεδα που ελέγχονται περιγράφονται από τις εξισώσεις επιπέδων:

$$A_a * X + A_b * Y + A_d = 0 \quad \text{και} \quad B_a * X + B_b * Y + B_d = 0$$

- Από τις δύο εξισώσεις, υπολογίζονται τα κάθετα διανύσματα:

$$\circ n_A = A_a * i + A_b * j + A_c * k$$

$$\circ n_B = B_a * i + B_b * j + B_c * k$$

- Εξωτερικό γινόμενο $n_A \times n_B$:

$$\circ n_A \times n_B = \begin{vmatrix} i & j & k \\ A_a & A_b & A_c \\ B_a & B_b & B_c \end{vmatrix} =$$

$$\underbrace{(A_b * B_c - B_b * A_c)}_{\alpha} * i - \underbrace{(A_a * B_c - B_a * A_c)}_{\beta} * j +$$

$$\underbrace{(A_a * B_b - B_a * A_b)}_{\gamma} * k$$

όπου λόγω $A_c = B_c = 0$, προκύπτουν:

$$\blacksquare \alpha = 0$$

$$\blacksquare \beta = 0$$

$$\blacksquare \gamma = A_a * B_b - B_a * A_b$$

- Για $Z = 0$, ισχύει:

$$\circ Y = \frac{-A_a * B_d + B_a * A_d}{A_a * B_b - B_a * A_b} = L$$

$$\circ X = \frac{-A_d - A_b * K}{A_a} = M$$

- Ισχύει:

$$\circ \frac{X-M}{\alpha} = \frac{Y-L}{-\beta} = \frac{Z}{\gamma} = \lambda$$

- Συνεπώς, οι εξισώσεις της γραμμής τομής των δύο επιπέδων είναι:

$$\circ X = M$$

$$\circ Y = L$$

$$\circ Z = \gamma * \lambda$$

- Ελέγχεται εάν τα X και Y βρίσκονται εντός των ορίων του κοινού χώρου, δηλαδή:

$$\circ AA_{123456min}[s][0] \leq M \leq AA_{123456max}[s][0] \quad \text{και}$$

$$BB_{123456min}[s][0] \leq M \leq BB_{123456max}[s][0] \quad \text{και}$$

$$AA_{123456min}[s][1] \leq L \leq AA_{123456max}[s][1] \quad \text{και}$$

$$BB_{123456min}[s][1] \leq L \leq BB_{123456max}[s][1]$$

- Εάν ισχύει το παραπάνω, τότε υπάρχει σύγκρουση. Εάν κάτι από τα παραπάνω δεν ισχύει, τότε δεν υπάρχει σύγκρουση.
- Εάν υπάρχει σύγκρουση, υπολογίζεται ο χώρος στον οποίο αυτή συμβαίνει. Ο χώρος αυτός είναι η ευθεία που υπολογίστηκε παραπάνω, όπου για το Z ισχύει:
 - $Z_1 = \min (AA_{123456\max}[s][2], BB_{123456\max}[s][2])$
 - $Z_2 = \max (AA_{123456\min}[s][2], BB_{123456\min}[s][2])$
 - Συνεπώς, για λ με τιμές ανάμεσα σε $\frac{Z_1}{\gamma}$ και $\frac{Z_2}{\gamma}$ υπολογίζονται όλα τα σημεία του χώρου σύγκρουσης.

A.3 Παράδειγμα 3 – Τρεις άγνωστοι (Κατηγορία IIIB)

- Έστω ότι τα δύο επίπεδα που ελέγχονται περιγράφονται από τις εξισώσεις επιπέδων:

$$A_a * X + A_d = 0 \text{ και } B_a * X + B_b * Y_B + B_c * Z_B + B_d = 0$$

- Από τις δύο εξισώσεις, υπολογίζονται τα κάθετα διανύσματα:

- $n_A = A_a * i + A_b * j + A_c * k$

- $n_B = B_a * i + B_b * j + B_c * k$

- Εξωτερικό γινόμενο $n_A \times n_B$:

- $$n_A \times n_B = \begin{vmatrix} i & j & k \\ A_a & A_b & A_c \\ B_a & B_b & B_c \end{vmatrix} =$$

$$\underbrace{(A_b * B_c - B_b * A_c)}_{\alpha} * i - \underbrace{(A_a * B_c - B_a * A_c)}_{\beta} * j +$$

$$\underbrace{(A_a * B_b - B_a * A_b)}_{\gamma} * k$$

όπου λόγω $A_b = A_c = 0$, προκύπτουν:

- $\alpha = 0$
- $\beta = A_a * B_c$
- $\gamma = A_a * B_b$

- Από την εξίσωση επιπέδου του A, υπολογίζεται το X

- $X_A = \frac{-A_d}{A_a} = M$

- Για $X = M$ και $Z = K = 0$ ισχύει:

- $Y = \frac{-B_d - B_a * M}{B_b} = L$

- Ισχύει:

- $\frac{X-M}{\alpha} = \frac{Y-L}{-\beta} = \frac{Z-K}{\gamma} = \lambda$

- Συνεπώς, οι εξισώσεις της γραμμής τομής των δύο επιπέδων είναι:

- $X = M$
- $Y = -\beta * \lambda + L$
- $Z = \gamma * \lambda$
- Πρέπει να υπολογιστούν οι τιμές του λ οι οποίες ορίζουν τον χώρο στον οποίο λαμβάνει χώρα η σύγκρουση. Για να υπολογιστούν, πρέπει να βρεθούν τα σημεία στα οποία η ευθεία τέμνει μία ή περισσότερες από τις ακμές των δύο επιπέδων. Για παράδειγμα, η μία ακμή του επιπέδου Α έχει εξισώσεις:
 - $X = \lambda_{A12} * \alpha_{A12} + X_1$
 - $Y = \lambda_{A12} * \beta_{A12} + Y_1$
 - $Z = \lambda_{A12} * \gamma_{A12} + Z_1$
 - όπου: $\alpha_{A12} = X_2 - X_1$
 - $\beta_{A12} = Y_2 - Y_1$
 - $\gamma_{A12} = Z_2 - Z_1$
- Επιλύοντας το σύστημα (πχ. ως προς Y και Z) προκύπτει το λ :
 - $\lambda = \frac{\gamma_{A12} * Y_1 - \beta_{A12} * Z_1 - L * \gamma_{A12}}{-\beta * \gamma_{A12} - \beta_{A12} * \gamma}$
- Η διαδικασία γίνεται και για τις οκτώ ακμές (τέσσερις ανά επίπεδο). Για κάθε λ που υπολογίζεται, υπολογίζονται και οι συντεταγμένες του αντίστοιχου σημείου. Κάθε σημείο που προκύπτει, ελέγχεται εάν είναι εντός των ορίων των υπό εξέταση επιπέδων. Ο έλεγχος γίνεται ως εξής:
 - Έστω ότι βρίσκεται ένα σημείο $S (X_s, Y_s, Z_s)$.
 - Υπολογίζεται το άθροισμα των εμβαδών των τεσσάρων τριγώνων που δημιουργεί το σημείο S με τις ανά δύο διαδοχικές κορυφές του κάθε επιπέδου:

$$\begin{aligned}
 & \blacksquare E_{A12345} = E_{A145} + E_{A125} + E_{A235} + E_{A345} = \\
 & \quad \sqrt{s_{A145} * (s_{A145} - m_{A14}) * (s_{A145} - m_{A15})(s_{A145} - m_{A45})} + \\
 & \quad \sqrt{s_{A125} * (s_{A125} - m_{A12}) * (s_{A125} - m_{A15})(s_{A125} - m_{A25})} + \\
 & \quad \sqrt{s_{A235} * (s_{A235} - m_{A23}) * (s_{A235} - m_{A25})(s_{A235} - m_{A35})} + \\
 & \quad \sqrt{s_{A345} * (s_{A345} - m_{A34}) * (s_{A345} - m_{A35})(s_{A345} - m_{A45})} \\
 & \blacksquare E_{B12345} = E_{B145} + E_{B125} + E_{B235} + E_{B345} = \\
 & \quad \sqrt{s_{B145} * (s_{B145} - m_{B14}) * (s_{B145} - m_{B15})(s_{B145} - m_{B45})} + \\
 & \quad \sqrt{s_{B125} * (s_{B125} - m_{B12}) * (s_{B125} - m_{B15})(s_{B125} - m_{B25})} + \\
 & \quad \sqrt{s_{B235} * (s_{B235} - m_{B23}) * (s_{B235} - m_{B25})(s_{B235} - m_{B35})} + \\
 & \quad \sqrt{s_{B345} * (s_{B345} - m_{B34}) * (s_{B345} - m_{B35})(s_{B345} - m_{B45})}
 \end{aligned}$$

όπου:

- m , το μήκος, (πχ. $m_{A14} = \text{abs}[(X_1, Y_1, Z_1) - (X_4, Y_4, Z_2)]$)
- s , η ημιπερίμετρος, (πχ. $s_{A145} = \frac{m_{A14} + m_{A45} + m_{A15}}{2}$)

○ Ομοίως, υπολογίζονται τα εμβαδά των επιπέδων Α και Β:

$$\begin{aligned} \blacksquare E_A &= E_{A123} + E_{A134} = \\ &\sqrt{s_{A123} * (s_{A123} - m_{A12}) * (s_{A123} - m_{A13})(s_{A123} - m_{A23})} + \\ &\sqrt{s_{A134} * (s_{A134} - m_{A13}) * (s_{A134} - m_{A14})(s_{A134} - m_{A34})} \\ \blacksquare E_B &= E_{B123} + E_{B134} = \\ &\sqrt{s_{B123} * (s_{B123} - m_{B12}) * (s_{B123} - m_{B13})(s_{B123} - m_{B23})} + \\ &\sqrt{s_{B134} * (s_{B134} - m_{B13}) * (s_{B134} - m_{B14})(s_{B134} - m_{B34})} \end{aligned}$$

- Εάν $E_A = E_{A12345}$ και $E_B = E_{B12345}$, τότε το σημείο βρίσκεται εντός των ορίων και αποτελεί σημείο σύγκρουσης.
- Εάν $E_A \neq E_{A12345}$ ή $E_B \neq E_{B12345}$, τότε το σημείο βρίσκεται εκτός των ορίων ενός εκ των δύο επιπέδων, συνεπώς δεν αποτελεί σημείο σύγκρουσης.

- Από τα οκτώ σημεία που υπολογίζονται, υπάρχουν δύο περιπτώσεις: είτε να βρεθεί ένα μόνο σημείο που να πληρεί τις προϋποθέσεις, οπότε ο χώρος σύγκρουσης είναι σημείο (με λ_5 και συντεταγμένες X_5, Y_5, Z_5) και όχι ευθεία, είτε να βρεθούν δύο σημεία, τα οποία ορίζουν την αρχή και το τέλος της ευθείας (με λ_5 και συντεταγμένες X_5, Y_5, Z_5 και με λ_6 και συντεταγμένες X_6, Y_6, Z_6). Συνεπώς, τα σημεία σύγκρουσης είναι όλα τα σημεία με τιμές του λ μεταξύ των τιμών λ των δύο σημείων ($\lambda_5 \leq \lambda \leq \lambda_6$ ή $\lambda_5 \geq \lambda \geq \lambda_6$) και αντίστοιχες συντεταγμένες.

A.4 Παράδειγμα 4 – Τρεις άγνωστοι (Κατηγορία ΙΙΙΕ)

- Έστω ότι τα δύο επίπεδα που ελέγχονται περιγράφονται από τις εξισώσεις επιπέδων:

$$A_a * X + A_b * Y + A_c * Z + A_d = 0 \quad \text{και} \quad B_a * X + B_b * Y + B_c * Z + B_d = 0$$

- Από τις δύο εξισώσεις, υπολογίζονται τα κάθετα διανύσματα:

- $n_A = A_a * i + A_b * j + A_c * k$

- $n_B = B_a * i + B_b * j + B_c * k$

- Εξωτερικό γινόμενο $n_A \times n_B$:

- $$n_A \times n_B = \begin{vmatrix} i & j & k \\ A_a & A_b & A_c \\ B_a & B_b & B_c \end{vmatrix} =$$
$$\underbrace{(A_b * B_c - B_b * A_c)}_{\alpha} * i - \underbrace{(A_a * B_c - B_a * A_c)}_{\beta} * j +$$
$$\underbrace{(A_a * B_b - B_a * A_b)}_{\gamma} * k$$

- Για $X = M = 0$:

- $Z = \frac{B_b * A_d - A_b * B_d}{A_b * B_c - B_b * A_c} = K$

- $Y = \frac{-A_d - A_c * K}{A_b} = L$

- Ισχύει:

- $\frac{X-M}{\alpha} = \frac{Y-L}{-\beta} = \frac{Z-K}{\gamma} = \lambda$

- Συνεπώς, οι εξισώσεις της γραμμής τομής των δύο επιπέδων είναι:

- $X = \alpha * \lambda$

- $Y = -\beta * \lambda + L$

- $Z = \gamma * \lambda + K$

- Ομοίως με το παράδειγμα 3, πρέπει να βρεθούν τα σημεία στα οποία η ευθεία τέμνει μία ή περισσότερες από τις ακμές των δύο επιπέδων. Επιλύοντας τα συστήματα, προκύπτουν σημεία τα οποία δίνουν τον χώρο σύγκρουσης.

5 Δυναμική του συστήματος

5.1 Μοντελοποίηση με δίκτυα Petri

Το 1962, ο γερμανός μαθηματικός Carl Adam Petri παρουσίασε στην διατριβή του ένα μαθηματικό μοντέλο γενικής φύσεως για την περιγραφή σχέσεων μεταξύ καταστάσεων και γεγονότων (Petri, 1962). Στην συνέχεια, εξέλιξε αυτό το μοντέλο, δημιουργώντας τη θεωρία του δικτύου (Petri, 1976). Το μοντέλο ονομάστηκε δίκτυο Petri (ΔΡ) και χρησιμοποιείται από μηχανικούς για την μοντελοποίηση δυναμικών συστημάτων διακριτών γεγονότων, κυρίως στους τομείς του αυτόματου ελέγχου, της επιστήμης των υπολογιστών και της επιχειρησιακής έρευνας. Τα ΔΡ, τόσο μέσω του βαθμού αφαίρεσης όσο και μέσω επεκτάσεων, δημιουργούν ένα μοντέλο με ιδιαίτερο εύρος εφαρμογής και κατανόησης σε διαφορετικούς χώρους. Ορίζουν, δηλαδή, ένα εννοιολογικό πλαίσιο στο οποίο διαφορετικοί φορμαλισμοί είναι δυνατό να συνδυαστούν λόγω – και μέσω – απλών αρχών και εννοιών. Συνεπώς, επιτρέπει με σαφήνεια, αλλά και απλότητα, την συνέργεια μεταξύ των διαφορετικών φορμαλισμών σε πρακτικό και εννοιολογικό επίπεδο, ανεξαρτήτως των ιδιαιτεροτήτων του κάθε φορμαλισμού.

Επιπροσθέτως, η μαθηματική αρτιότητα των ΔΡ επιτρέπει την προσέγγιση τους με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, διατηρώντας πάντα ως βάσεις την κεντρικότητα των επικοινωνιών και την τοποθέτηση των αντικειμένων. Κατηγορίες ΔΡ μπορούν να προσεγγιστούν καθαρά αξιωματικά, επεκτείνοντας την Θεωρία των Αυτομάτων, μέσω Συστημάτων Πρόσθεσης Διανυσμάτων (VAS) (Ginzburg, et al., 1980), γραμμικής λογικής (LL) (Girard, 1987), ή κάνοντας χρήση της θεωρίας των γράφων (Bondy, et al., 1976). Η σημαντικότητα των ΔΡ ανάγεται στην ικανότητα τους να μοντελοποιούν τις σχέσεις μεταξύ διαφορετικών υποσυστημάτων σε επίπεδο συγχρονισμού και συγκρούσεων, σε συνθήκες δηλαδή ανταγωνισμού και συνεργασίας των διαφορετικών αντικειμένων.

Τα αρχικά ΔΡ αποτελούνταν από ένα δίκτυο με θέσεις και μεταβάσεις (*place/transition net*, *P/T-net*) και δεν περιείχαν κουπόνια, ήταν δηλαδή άνευ σήμανσης, με αποτέλεσμα να είναι γενικευμένα και με πεπερασμένη χωρητικότητα. Το ίδιο δίκτυο όταν είχε σήμανση ονομάστηκε σύστημα (*P/T-system*). Η πλέον διαδεδομένη μορφή ΔΡ είναι τα συνήθη ΔΡ, μια υποκατηγορία των αρχικών δικτύων που δεν είναι ούτε γενικευμένα ούτε πεπερασμένης χωρητικότητας. Η μετατροπή ενός γενικευμένου ΔΡ σε σύννηθες γίνεται με μια σειρά μεθόδων. Το βασικό ΔΡ, ανεξαρτήτως αν είναι γενικευμένο ή σύννηθες, είναι αυτόνομο ένα μοντέλο τέτοιου τύπου που περιγράφει ένα δοσμένο σύστημα επιτρέπει μια ποιοτική ανάλυση των λειτουργικών διεργασιών του συστήματος. Με βάση την ερμηνεία συγκεκριμένων χαρακτηριστικών, προκύπτουν υποκατηγορίες της γενικής μορφής

των ΔΡ, όπως γράφοι κατάστασης, γράφοι γεγονότων, ΔΡ μη συγκρούσεων, ΔΡ ελευθερίας επιλογής, και «καθαρά» ΔΡ. Όσον αφορά την χρήση ΔΡ για διακριτά γεγονότα, αυτά χρησιμοποιούνται ιδιαιτέρως σε περιπτώσεις ποσοτικής ανάλυσης ενός συστήματος, όσο και για αξιολόγηση του ελέγχου και της απόδοσης του.

Στην πορεία, και λόγω του αυξανόμενου ενδιαφέροντος της επιστημονικής κοινότητας, προτάθηκαν αρκετές ερμηνείες και επεκτάσεις της αρχικής ιδέας, δημιουργώντας νέες κατηγορίες ΔΡ. Στα αυτόνομα ΔΡ, προτάθηκαν δίκτυα όπως τα γενικευμένα ΔΡ, τα ΔΡ πεπερασμένης χωρητικότητας, τα έγχρωμα ΔΡ, τα εκτεταμένα και τα ΔΡ με προτεραιότητες. Στην συνέχεια, προέκυψαν τα μη αυτόνομα ΔΡ, τα οποία χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα συγχρονισμένα ΔΡ και τα χρονικά/στοχαστικά ΔΡ. Η πρώτη κατηγορία επιτρέπει την μοντελοποίηση της εξέλιξης ενός συστήματος βάσει εξωτερικών παραγόντων χαρακτηριστικότερο παράδειγμα χρήσης τέτοιων ΔΡ είναι η περιγραφή λογικών ελεγκτών (*Grafcet*) (David, 1995) και συστημάτων πραγματικού χρόνου. Η δεύτερη κατηγορία λαμβάνει υπόψη την έννοια του χρόνου (σταθερού ή στοχαστικού) και είναι η καλύτερη για αξιολόγηση επιδόσεων ενός συστήματος (συστήματα επεξεργασίας δεδομένων, συστημάτων παραγωγής, κλπ.) Στην συνέχεια, εμφανίστηκαν τα ΔΡ συνεχούς ροής, τα οποία απετέλεσαν σημαντική καινοτομία καθώς δεν περιέγραφαν πλέον συστήματα διακριτών γεγονότων και, ακριβώς γι αυτό το λόγο, δυσκόλεψαν την επιστημονική κοινότητα στην αποδοχή τους ως δίκτυα Petri. Τελικώς, αναγνωρίστηκαν ως υποπερίπτωση των ΔΡ και στην συνέχεια προέκυψαν τα υβριδικά ΔΡ, τα οποία περιλαμβάνουν στο μοντέλο τους τόσο διακριτά όσο και συνεχή γεγονότα. Ερευνητές από τους χώρους του αυτόματου ελέγχου και της επιστήμης των υπολογιστών έδειξαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για ΔΡ αυτού του τύπου, με αποτέλεσμα την αυξανόμενη χρήση τους.

5.2 Υλοποίηση

Για την δημιουργία του μοντέλου ελέγχου ενός κυττάρου κατεργασιών απαιτούνται δύο ΔΡ· ένα δίκτυο που θα αφορά στον συνολικό έλεγχο του κυττάρου (γενικό ΔΡ) και ένα δίκτυο που θα αφορά σε συγκεκριμένες ενέργειες των αντικειμένων του κυττάρου (ειδικό ΔΡ). Άρα, στην μοντελοποίηση του γενικού ΔΡ λαμβάνονται υπόψη οι ενέργειες σε ανώτερο – ιεραρχικά – επίπεδο, ενώ στην μοντελοποίηση του ειδικού ΔΡ αναλύονται οι θέσεις/μεταβάσεις με περισσότερη λεπτομέρεια, λαμβάνοντας υπόψη όμως και στοιχεία του γενικού δικτύου, όπου αυτό απαιτείται.

Για την δημιουργία των θέσεων/μεταβάσεων του γενικού δικτύου, ακολουθείται η εξής προσέγγιση:

- Όσον αφορά θέσεις που σχετίζονται με τις κύριες μηχανές, μια μηχανή μπορεί να είναι διαθέσιμη, να φορτώνεται, να είναι φορτωμένη, να κατεργάζεται, να είναι έτοιμη για ξεφόρτωμα, και να ξεφορτώνεται.

- Όσον αφορά θέσεις που σχετίζονται με τους ρομποτικούς βραχίονες, ο βραχίονας μπορεί να είναι διαθέσιμος, να φορτώνει, και να ξεφορτώνει μια μηχανή.
- Όσον αφορά θέσεις που σχετίζονται με την μεταφορική ταινία, αντιμετωπίζεται ως κύρια μηχανή, μπορεί δηλαδή να είναι διαθέσιμη, να φορτώνεται, να είναι φορτωμένη, και να «λειτουργεί» (όπου με τον όρο «λειτουργεί» εννοείται ότι η μηχανή εκτελεί το έργο για το οποίο είναι κατασκευασμένη, ήτοι να μεταφέρει το τεμάχιο στην έξοδο).
- Οι αντίστοιχες μεταβάσεις υποδηλώνουν έναρξη και λήξη της ενέργειας (πχ. έναρξη φόρτωσης, λήξη φόρτωσης κοκ).

Η σημαντική διαφοροποίηση από ένα απλό ΔΡ αφορά στην ύπαρξη γεγονότων (*events*) στις μεταβάσεις. Ένα κλασσικό ΔΡ είναι αυτόνομο, που σημαίνει ότι λειτουργεί χωρίς κάποια εξωτερική παρέμβαση, στηριζόμενο στην βασική αρχή ότι μια μετάβαση είτε είναι ενεργοποιήσιμη (*enabled/firable*), όταν υπάρχουν όλα τα απαιτούμενα κουπόνια, είτε όχι, ενώ η ενεργοποίησή της είναι άμεση οι έννοιες δηλαδή «ενεργοποιήσιμη» και «ενεργοποιείται» είναι ταυτόσημες. Στην προκειμένη περίπτωση, το δίκτυο δεν είναι αυτόνομο, αλλά χρειάζεται εξωτερική παρέμβαση για την εκτέλεση τμημάτων του. Αυτό συμβαίνει καθώς με κάποια δεδομένη σήμανση είναι δυνατή η ταυτόχρονη ενεργοποίηση δύο ή περισσότερων μεταβάσεων, ενώ στη πραγματικότητα επιθυμούμε να ενεργοποιηθεί μόνον μία. Προκύπτει, λοιπόν, μια διαφοροποίηση στην κατηγοριοποίηση των μεταβάσεων· οι μεταβάσεις συνδέονται με ένα γεγονός και μπορούν να είναι ενεργοποιήσιμες ή όχι, ανάλογα με την ύπαρξη ή μη κουπονιών, αλλά η ενεργοποίηση συμβαίνει μόνο όταν συμβεί και το συνδεδεμένο γεγονός. Ισχύει δηλαδή το εξής:

μία μετάβαση ενεργοποιείται ΑΝ είναι ενεργοποιήσιμη και ΟΤΑΝ συμβεί το συνδεδεμένο γεγονός

Παράδειγμα τέτοιας περίπτωσης αποτελεί η φόρτωση μίας μηχανής από έναν ρομποτικό βραχίονα όταν είναι διαθέσιμοι και οι δύο ρομποτικοί βραχίονες. Την απόφαση για το ποιά μετάβαση θα ενεργοποιηθεί (στο παράδειγμα, ποιος ρομποτικός βραχίονας θα χρησιμοποιηθεί) την λαμβάνει ο κεντρικός ελεγκτής του κυττάρου, μέσω ενός αλγόριθμου επιλογής, οπότε και προκύπτει το αντίστοιχο γεγονός και, κατ' επέκταση, ενεργοποιείται η αντίστοιχη μετάβαση.

Τα μη αυτόνομα ΔΡ που χρησιμοποιούμε ονομάζονται συγχρονισμένα (*synchronized*) και κάθε μετάβαση συνδέεται με ένα γεγονόσαν το γεγονός αφορά σε μία εξωτερική αλλαγή, τότε το γεγονός είναι εξωτερικό και συμβολίζεται με E, ενώ εάν αφορά σε μία εσωτερική αλλαγή, ονομάζεται εσωτερικό και συμβολίζεται με e. Τα εσωτερικά γεγονότα περιγράφονται και ως γεγονότα που συμβαίνουν πάντα (*always occuring events*), συνεπώς μία μετάβαση που συνδέεται με ένα τέτοιο γεγονός και είναι ενεργοποιήσιμη, ενεργοποιείται άμεσα. Σημειώνεται ότι όλα τα γεγονότα δεν έχουν διάρκεια.

Επέκταση των συγχρονισμένων ΔΡ αποτελούν τα διερμηνευτικά ΔΡ (*interpreted PN*)· ανάλογα με το πλαίσιο μέσα στο οποίο επιθυμεί κάποιος να χρησιμοποιήσει ένα ΔΡ, προκύπτει και η αντίστοιχη ερμηνεία του δικτύου. Στην προκειμένη περίπτωση, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο ΔΡ στο οποίο βασικό ρόλο παίζει ο έλεγχος (*control*), συνεπώς το δίκτυο ερμηνεύεται με βάση τον έλεγχο (*control interpreted PN*). Αυτός ο τύπος δικτύου στηρίζεται στην μοντελοποίηση του M. Moalla και προτάθηκε από τους R. David και H. Alla. Σύμφωνα με αυτή την μοντελοποίηση, εκτός από θέσεις/μεταβάσεις/κουπόνια και γεγονότα, προστίθενται και επιπλέον χαρακτηριστικά τόσο στις μεταβάσεις όσο και στις θέσεις, επιτυγχάνοντας καλύτερη επικοινωνία μεταξύ ΔΡ και περιβάλλοντος μέσω εισόδων/εξόδων. Οι εισοδοί που λαμβάνει το ΔΡ στις μεταβάσεις του χωρίζονται σε γεγονότα (*events, E_j*) και συνθήκες Boolean (*conditions, C_j^e*). Οι έξοδοι που στέλνει το ΔΡ στο περιβάλλον στις θέσεις του είναι Boolean σχετιζόμενες με την σήμανση (Boolean, *A_i*), γεγονότα λόγω αλλαγής στην σήμανση της θέσης (*events, B_i*), κρουστικά γεγονότα (*impulse events*), και μεταβλητές – αριθμητικές ή boolean – που προκύπτουν από κάποιον υπολογισμό (*variables, V_k*) που γίνεται στο τμήμα επεξεργασίας (*data processing part*). Επιπροσθέτως, το ΔΡ στέλνει εντολές εκτέλεσης (*operation orders, O_i*) στο τμήμα επεξεργασίας και λαμβάνει συνθήκες Boolean (*conditions, C_j^o*) από το τμήμα. Συνεπώς, η παραπάνω πρόταση γίνεται:

μία μετάβαση ενεργοποιείται AN είναι ενεργοποιήσιμη και AN οι συνθήκες C_j^e ικανοποιούνται OTAN συμβεί το συνδεδεμένο γεγονός

Στο Σχήμα 5-1 φαίνεται το γενικό δίκτυο Petri, ενώ στους Πίνακες 5-1 ÷ 5-5 αναλύονται οι θέσεις, οι μεταβάσεις, και τα γεγονότα.

Όπως προαναφέρθηκε, το ειδικό δίκτυο έρχεται να καλύψει τα κενά σε επίπεδο λεπτομέρειας. Για παράδειγμα, στο γενικό δίκτυο η φόρτωση ενός τεμαχίου από την είσοδο του συστήματος παρουσιάζεται με μια μετάβαση (έναρξη φόρτωσης), μια θέση (φόρτωση), μία ακόμα μετάβαση (λήξη φόρτωσης) και μια θέση (ρομποτικός βραχίονας φορτωμένος). Στο ειδικό δίκτυο, η παραπάνω διαδικασία απαιτεί την ύπαρξη περισσότερων θέσεων/μεταβάσεων, ώστε να είναι απόλυτα σαφές από ποιες καταστάσεις περνάει ο ρομποτικός βραχίονας και το υλικό. Έτσι, ο ρομποτικός βραχίονας κατά την έναρξη της φόρτωσης – πρέπει να – βρίσκεται στην θέση 0 (*R1 @ HOME*), ενώ στην συνέχεια προσεγγίζει την αποθήκη εισόδου (*R1 is moving close to INP from HOME, R1 is close to INP, R1 moving in INP, R1 @ INP*), πιάνει το τεμάχιο (*R1 is grabbing*), και εκτελεί κίνηση ξανά προς την θέση 0 (*R1 moving close to INP from in INP, R1 @ close to INP, R1 moving home from close to INP, R1 @ HOME*).

Στο Σχήμα 5-2 φαίνεται το ειδικό δίκτυο που αφορά στην είσοδο ενός τεμαχίου στο σύστημα, την φόρτωσή του στην μηχανή 1 από τον ρομποτικό βραχίονα 1, την κατεργασία του, το ξεφόρτωμα της μηχανής, την μεταφορά του τεμαχίου στην ταινία, και την έξοδό του από το σύστημα. Στο σχήμα φαίνονται και κάποιες θέσεις του γενικού δικτύου ενσωματωμένες, για δύο λόγους: πρώτον, για

καλύτερη σύνδεση μεταξύ του γενικού και του ειδικού δικτύου και δεύτερον, για την λειτουργία του δικτύου ως συγχρονισμένο δίκτυο ελέγχου. Ομοίως με το γενικό δίκτυο, στον Πίνακα 5-6 περιγράφονται οι θέσεις/μεταβάσεις του ειδικού δικτύου. Στο Σχήμα 5-3 φαίνονται με περισσότερη λεπτομέρεια και τα υπόλοιπα στοιχεία (συνθήκες, γεγονότα, εντολές) για την κίνηση του ρομποτικού βραχίονα από μία θέση σε μία άλλη, ενώ ο Πίνακας 5-7 επεξηγεί τα παραπάνω.

Το ειδικό δίκτυο Petri είναι αυτό από το οποίο προκύπτουν και οι διάφοροι κανόνες (*rules*) με την μορφή *if-then*, για χρήση εντός του προγραμματιστικού περιβάλλοντος. Η αντιστοιχία προκύπτει ως εξής: για την ενεργοποίηση μιας μετάβασης, απαιτείται οι θέσεις που καταλήγουν στην μετάβαση να έχουν κουπόνι και να ικανοποιούνται οι όποιες συνθήκες ενώ (*if*) έχουν κουπόνι και ικανοποιούνται οι συνθήκες, τότε (*then*) είναι ενεργοποιήσιμη η μετάβαση, και ενεργοποιείται όταν (*when*) συμβεί και το συνδεδεμένο γεγονός, οπότε και μεταφέρονται τα κουπόνια στις επόμενες θέσεις. Ο Πίνακας 5-8 δείχνει ακριβώς αυτή την αντιστοιχία για ένα κομμάτι του ειδικού δικτύου (την εισαγωγή του τεμαχίου στο σύστημα και το ξεφόρτωμα της εισόδου από τον ρομποτικό βραχίονα).

Δεδομένου ότι όλα τα αντικείμενα του κόσμου αντιστοιχούν σε σημασιολογικά μοντέλα, απαιτείται το ίδιο να ισχύει και για τα δίκτυα Petri. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της ένταξης του αλγόριθμου που περιλαμβάνει τους κανόνες που προέκυψαν και ο οποίος αποτελεί – ουσιαστικά – κομμάτι του ελεγκτή του κυττάρου. Ο κεντρικός ελεγκτής του κυττάρου παρακολουθεί συνεχώς την κατάσταση κάθε αντικειμένου, λαμβάνοντας πληροφορίες από τους επιμέρους ελεγκτές και, βάσει του αλγόριθμου, ορίζει ποιες ενέργειες επιτρέπονται και ποιες όχι.

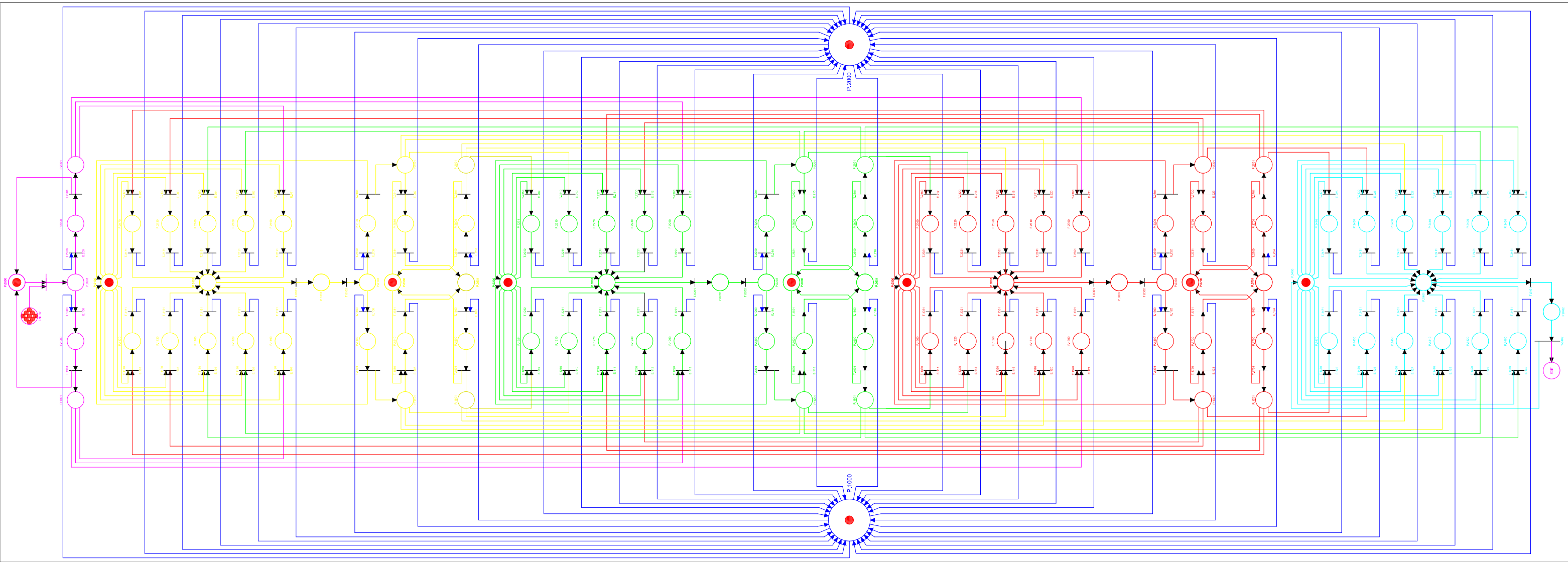
5.3 Ιδιότητες συγχρονισμένων δικτύων

Όσον αφορά τις ιδιότητες ενός συγχρονισμένου δικτύου, σε αντιστοιχία με τις ιδιότητες ενός απλού ΔΡ, παρατηρείται ότι:

- Αμεσότητα / Σταθερότητα: βασική απαίτηση για ένα συγχρονισμένο ΔΡ είναι να διαθέτει σταθερότητα ή ετοιμότητα. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε σταθερή δυνατή σήμανση και για κάθε εξωτερικό γεγονός, οι μεταβάσεις που ενεργοποιούνται από το γεγονός περιέχουν πεπερασμένο αριθμό EFS (*elementary firing sequence*, μία ακολουθία ταυτόχρονων ενεργοποιήσεων μεταβάσεων λόγω ταυτόχρονων γεγονότων). Εάν ο αριθμός των EFS είναι πάντα μικρότερος ή ίσος από k , τότε το ΔΡ είναι k -σταθερό / k -άμεσο.
- Φραγή: το δίκτυο είναι φραγμένο αν για κάθε σταθερή δυνατή σήμανση, όλες οι θέσεις είναι φραγμένες. Εννοείται ότι το συγχρονισμένο ΔΡ είναι φραγμένο και για όλες τις ενδιάμεσες σημάνσεις.
- Ασφάλεια: ένα φραγμένο δίκτυο είναι ασφαλές όταν είναι 1-φραγμένο.
- Ζωτικότητα: μία μετάβαση ενός σταθερού συγχρονισμένου ΔΡ είναι ζωντανή εάν, για κάθε σταθερή δυνατή σήμανση, υπάρχει μια ακολουθία εξωτερικών γεγονότων που κάνουν την

μετάβαση ενεργοποιήσιμη και έτοιμη να ενεργοποιηθεί σε κάποια από τις ενεργοποιήσεις που προκύπτουν από τα γεγονότα της ακολουθίας.

Για να θεωρηθεί ένα ΔΡ ως δίκτυο ελέγχου, θα πρέπει να είναι υποχρεωτικά συγχρονισμένο με εξωτερικά γεγονότα, σταθερό, ασφαλές και ντετερμινιστικό. Επιπροσθέτως, αλλά όχι απαραίτητα, να διαθέτει ένα τμήμα επεξεργασίας δεδομένων, η κατάσταση του οποίου ορίζεται από ένα σύνολο μεταβλητών V . Η κατάσταση του τμήματος πρέπει να μεταβάλλεται σύμφωνα με τις εργασίες O_i , οι οποίες σχετίζονται με τις θέσεις, και οι οποίες καθορίζουν και τις εξόδους C_j^o προς το ΔΡ. Παράλληλα, το δίκτυο πρέπει να δέχεται Boolean C_j^e από το περιβάλλον και να στέλνει Boolean εντολές A_i και κρουστικές εντολές-γεγονότα B_i , σχετικές με τις θέσεις, προς το περιβάλλον.



Σχήμα 5-1. Γενικό δίκτυο *Petri*

EVENT	Transition	Position	Meaning	Event	Transition	Position	Meaning
-		P.1000	R1 is "available"	-		P.2000	R2 is "available"
-		P.0901	IN is LOADED				
E.100	T.1900		R1 starts unloading IN	E.200	T.2900		R2 starts unloading IN
-		P.1900	R1 unloading IN	-		P.2900	R2 unloading IN
-	T.1901		R1 finishes unloading IN	-	T.2901		R2 finishes unloading IN
-		P.0900	IN is UNLOADED				
		P.1901	R1 has UNLOADED IN			P.2901	R2 has UNLOADED IN

Σ

Πίνακας 5-1. Θέσεις/μεταβάσεις γενικού δικτύου

EVENT	Transition	Position	Meaning	Event	Transition	Position	Meaning
-		P.0100	ML1 is available				
E.101	T.1190		R1 starts loading ML1 from IN	E.201	T.2190		R2 starts loading ML1 from IN
-		P.1190	R1 loading ML1 from IN	-		P.2190	R2 loading ML1 from IN
-	T.1191		R1 finishes loading ML1 from IN	-	T.2191		R2 finishes loading ML1 from IN
E.102	T.1120		R1 starts loading ML1 from ML2	E.202	T.2120		R2 starts loading ML1 from ML2
-		P.1120	R1 loading ML1 from ML2	-		P.2120	R2 loading ML1 from ML2
-	T.1121		R1 finishes loading ML1 from ML2	-	T.2121		R2 finishes loading ML1 from ML2
E.103	T.1130		R1 starts loading ML1 from MC	E.203	T.2130		R2 starts loading ML1 from MC
-		P.1130	R1 loading ML1 from MC	-		P.2130	R2 loading ML1 from MC
-	T.1131		R1 finishes loading ML1 from MC	-	T.2131		R2 finishes loading ML1 from MC
E.104	T.1160		R1 starts loading ML1 from WIPL2	E.204	T.2160		R2 starts loading ML1 from WIPL2
-		P.1160	R1 loading ML1 from WIPL2	-		P.2160	R2 loading ML1 from WIPL2
-	T.1161		R1 finishes loading ML1 from WIPL2	-	T.2161		R2 finishes loading ML1 from WIPL2
E.105	T.1170		R1 starts loading ML1 from WIPMC	E.205	T.2170		R2 starts loading ML1 from WIPMC
-		P.1170	R1 loading ML1 from WIPMC	-		P.2170	R2 loading ML1 from WIPMC
-	T.1171		R1 finishes loading ML1 from WIPMC	-	T.2171		R2 finishes loading ML1 from WIPMC
-		P.0101	ML1 is loaded				
-	T.0101		ML1 starts processing				
-		P.0102	ML1 processing				
-	T.0102		ML1 finishes processing				
-		P.0103	ML1 is ready to be unloaded				
E.106	T.1100		R1 starts unloading ML1	E.206	T.2100		R2 starts unloading ML1
-		P.1100	R1 is unloading ML1	-		P.2100	R2 is unloading ML1
-	T.1101		R1 finishes unloading ML1	-	T.2101		R2 finishes unloading ML1
-		P.1101	R1 has UNLOADED ML1	-		P.2101	R2 has UNLOADED ML1
E.107	T.1510		R1 starts loading WIPL1 from ML1	E.207	T.2510		R2 starts loading WIPL1 from ML1
-		P.1510	R1 loading WIPL1 from ML1	-		P.2510	R2 loading WIPL1 from ML1
-	T.1511		R1 finishes loading WIPL1 from ML1	-	T.2511		R2 finishes loading WIPL1 from ML1
-		P.0501	WIPL1 is loaded				
E.108	T.1500		R1 starts unloading WIPL1	E.208	T.2500		R2 starts unloading WIPL1
-		P.1500	R1 unloading WIPL1	-		P.2500	R2 unloading WIPL1
-	T.1500		R1 finishes unloading WIPL1	-	T.2500		R2 finishes unloading WIPL1
-		P.1501	R1 has UNLOADED WIPL1	-		P.2501	R2 has UNLOADED WIPL1
-		P.0500	WIPL1 is unloaded				

Πίνακας 5-2. Θέσεις/μεταβάσεις γενικού δικτύου (συνέχεια)

EVENT	Transition	Position	Meaning	Event	Transition	Position	Meaning
-		P.0200	ML2 is available				
E.109	T.1250		R1 starts loading ML2 from WIPL1	E.209	T.2250		R2 starts loading ML2 from WIPL1
-		P.1250	R1 loading ML2 from WIPL1	-		P.2250	R2 loading ML2 from WIPL1
-	T.1251		R1 finishes loading ML2 from WIPL1	-	T.2251		R2 finishes loading ML2 from WIPL1
E.110	T.1210		R1 starts loading ML2 from ML1	E.210	T.2210		R2 starts loading ML2 from ML1
-		P.1210	R1 loading ML2 from ML1	-		P.2210	R2 loading ML2 from ML1
-	T.1211		R1 finishes loading ML2 from ML1	-	T.2211		R2 finishes loading ML2 from ML1
E.111	T.1270		R1 starts loading ML2 from WIPMC	E.211	T.2270		R2 starts loading ML2 from WIPMC
-		P.1270	R1 loading ML2 from WIPMC	-		P.2270	R2 loading ML2 from WIPMC
-	T.1271		R1 finishes loading ML2 from WIPMC	-	T.2271		R2 finishes loading ML2 from WIPMC
E.112	T.1230		R1 starts loading ML2 from MC	E.212	T.2230		R2 starts loading ML2 from MC
-		P.1230	R1 loading ML2 from MC	-		P.2230	R2 loading ML2 from MC
-	T.1231		R1 finishes loading ML2 from MC	-	T.2231		R2 finishes loading ML2 from MC
E.113	T.1290		R1 starts loading ML2 from IN	E.213	T.2290		R2 starts loading ML2 from IN
-		P.1290	R1 loading ML2 from IN	-		P.2290	R2 loading ML2 from IN
-	T.1291		R1 finishes loading ML2 from IN	-	T.2291		R2 finishes loading ML2 from IN
-		P.0201	ML2 is loaded				
-	T.0201		ML2 starts processing				
-		P.0202	ML2 processing				
-	T.0202		ML2 finishes processing				
-		P.0203	ML2 is ready to be unloaded				
E.114	T.1200		R1 starts unloading ML2	E.214	T.2200		R2 starts unloading ML2
-		P.1200	R1 is unloading ML2	-		P.2200	R2 is unloading ML2
-	T.1201		R1 finishes unloading ML2	-	T.2201		R2 finishes unloading ML2
-		P.1201	R1 has UNLOADED ML2	-		P.2201	R2 has UNLOADED ML2
E.115	T.1620		R1 starts loading WIPL2 from ML2	E.215	T.2620		R2 starts loading WIPL2 from ML2
-		P.1620	R1 loading WIPL2 from ML2	-		P.2620	R2 loading WIPL2 from ML2
-	T.1621		R1 finishes loading WIPL2 from ML2	-	T.2621		R2 finishes loading WIPL2 from ML2
-		P.0601	WIPL2 is loaded				
E.116	T.1600		R1 starts unloading WIPL2	E.216	T.2600		R2 starts unloading WIPL2
-		P.1600	R1 unloading WIPL2	-		P.2600	R2 unloading WIPL2
-	T.1601		R1 finishes unloading WIPL2	-	T.2601		R2 finishes unloading WIPL2
-		P.1601	R1 has UNLOADED WIPL2	-		P.2601	R2 has UNLOADED WIPL2
-		P.0600	WIPL2 is unloaded				

ML2

Πίνακας 5-3. Θέσεις/μεταβάσεις γενικού δικτύου (συνέχεια)

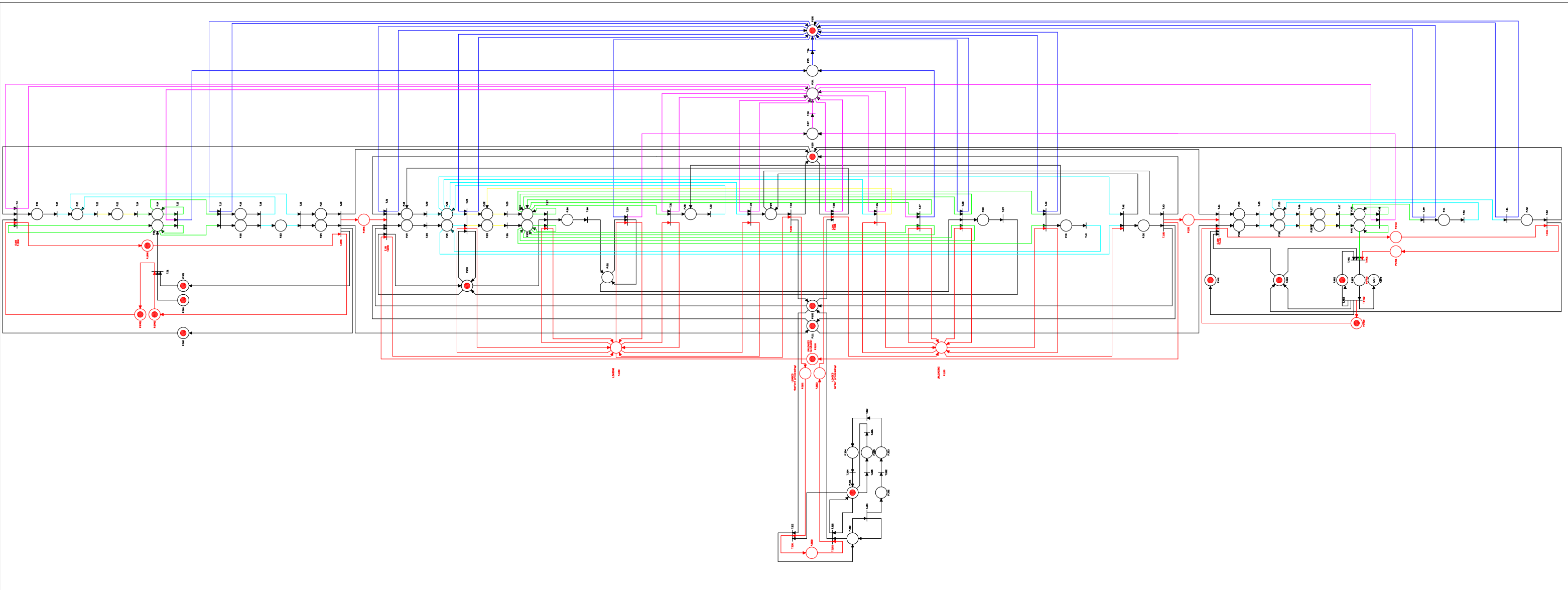
EVENT	Transition	Position	Meaning	Event	Transition	Position	Meaning
-		P.0300	MC is available				
E.117	T.1360		R1 starts loading MC from WIPL2	E.217	T.2360		R2 starts loading MC from WIPL2
-		P.1360	R1 loading MC from WIPL2	-		P.2360	R2 loading MC from WIPL2
-	T.1361		R1 finishes loading MC from WIPL2	-	T.2361		R2 finishes loading MC from WIPL2
E.118	T.1320		R1 starts loading MC from ML2	E.218	T.2320		R2 starts loading MC from ML2
-		P.1320	R1 loading MC from ML2	-		P.2320	R2 loading MC from ML2
-	T.1321		R1 finishes loading MC from ML2	-	T.2321		R2 finishes loading MC from ML2
E.119	T.1350		R1 starts loading MC from WIPL1	E.219	T.2350		R2 starts loading MC from WIPL1
-		P.1350	R1 loading MC from WIPL1	-		P.2350	R2 loading MC from WIPL1
-	T.1351		R1 finishes loading MC from WIPL1	-	T.2351		R2 finishes loading MC from WIPL1
E.120	T.1310		R1 starts loading MC from ML1	E.220	T.2310		R2 starts loading MC from ML1
-		P.1310	R1 loading MC from ML1	-		P.2310	R2 loading MC from ML1
-	T.1311		R1 finishes loading MC from ML1	-	T.2311		R2 finishes loading MC from ML1
E.121	T.1390		R1 starts loading MC from IN	E.221	T.2390		R2 starts loading MC from IN
-		P.1390	R1 loading MC from IN	-		P.2390	R2 loading MC from IN
-	T.1391		R1 finishes loading MC from IN	-	T.2391		R2 finishes loading MC from IN
-		P.0301	MC is loaded				
-	T.0301		MC starts processing				
-		P.0302	MC processing				
-	T.0302		MC finishes processing				
-		P.0303	MC is ready to be unloaded				
E.122	T.1300		R1 starts unloading MC	E.222	T.2300		R2 starts unloading MC
-		P.1300	R1 is unloading MC	-		P.2300	R2 is unloading MC
-	T.1301		R1 finishes unloading MC	-	T.2301		R2 finishes unloading MC
-		P.1301	R1 has UNLOADED MC	-		P.2301	R2 has UNLOADED MC
E.123	T.1730		R1 starts loading WIPMC from MC	E.223	T.2730		R2 starts loading WIPMC from MC
-		P.1730	R1 loading WIPMC from MC	-		P.2730	R2 loading WIPMC from MC
-	T.1731		R1 finishes loading WIPMC from MC	-	T.2731		R2 finishes loading WIPMC from MC
-		P.0701	WIPMC is loaded				
E.124	T.1700		R1 starts unloading WIPMC	E.224	T.2700		R2 starts unloading WIPMC
-		P.1700	R1 unloading WIPMC	-		P.2700	R2 unloading WIPMC
-	T.1701		R1 finishes unloading WIPMC	-	T.2701		R2 finishes unloading WIPMC
-		P.0700	WIPMC is unloaded				

MC

Πίνακας 5-4. Θέσεις/μεταβάσεις γενικού δικτύου (συνέχεια)

EVENT	Transition	Position	Meaning	Event	Transition	Position	Meaning
-		P.0400	C is available				
E.125	T.1470		R1 starts loading C from WIPMC	E.225	T.2470		R2 starts loading C from WIPMC
-		P.1470	R1 loading C from WIPMC	-		P.2470	R2 loading C from WIPMC
-	T.1471		R1 finishes loading C from WIPMC	-	T.2471		R2 finishes loading C from WIPMC
E.126	T.1430		R1 starts loading C from MC	E.226	T.2430		R2 starts loading C from MC
-		P.1430	R1 loading C from MC	-		P.2430	R2 loading C from MC
-	T.1431		R1 finishes loading C from MC	-	T.2431		R2 finishes loading C from MC
E.127	T.1450		R1 starts loading C from WIPL1	E.227	T.2450		R2 starts loading C from WIPL1
-		P.1450	R1 loading C from WIPL1	-		P.2450	R2 loading C from WIPL1
-	T.1451		R1 finishes loading C from WIPL1	-	T.2451		R2 finishes loading C from WIPL1
E.128	T.1410		R1 starts loading C from ML1	E.228	T.2410		R2 starts loading C from ML1
-		P.1410	R1 loading C from ML1	-		P.2410	R2 loading C from ML1
-	T.1411		R1 finishes loading C from ML1	-	T.2411		R2 finishes loading C from ML1
E.129	T.1420		R1 starts loading C from ML2	E.229	T.2420		R2 starts loading C from ML2
-		P.1420	R1 loading C from ML2	-		P.2420	R2 loading C from ML2
-	T.1421		R1 finishes loading C from ML2	-	T.2421		R2 finishes loading C from ML2
E.130	T.1460		R1 starts loading C from WIPL2	E.230	T.2460		R2 starts loading C from WIPL2
-		P.1460	R1 loading C from WIPL2	-		P.2460	R2 loading C from WIPL2
-	T.1461		R1 finishes loading C from WIPL2	-	T.2461		R2 finishes loading C from WIPL2
-		P.0401	C is loaded				
-	T.0401		C starts processing				
-		P.0402	C processing				
-	T.0402		C finishes processing				

Πίνακας 5-5. Θέσεις/μεταβάσεις γενικού δικτύου (συνέχεια)



Σχήμα 5-2. Ειδικό δίκτυο *Petri*

GENERAL				SPECIFIC			
Event	Transition	Position	Meaning	Event	Transition	Position	Meaning
-		P.1000	R1 is "available"			P.101	R EMPTY
						P.100	R1 @ HOME
						P.900	INP SAFE SPACE
						P.901	INP QUANTITY
						P.000	ENTRY
					T.01		IT arrives at INP
-		P.0901	IN is LOADED			P.01	IT is @ INP
E.100	T.1900		R1 starts unloading IN	E.100	T.11		R1 starts moving close to INP from HOME
					T.12	P.11	R1 is moving close to INP from HOME
							R1 stops moving close to INP from HOME
					T.13	P.12	R1 is close to INP
							R1 starts moving to INP
					T.14	P.13	R1 moving to INP
							R1 stops moving to INP
					T.15	P.14	R1 is @ INP
							R1 starts GRABBING in INP
					T.16	P.15	R1 GRABBING
							R1 finishes GRABBING in INP
					T.17	P.102	R1 HOLD
							R1 & IT start moving close to INP from IN
						P.16	R1 moving close to INP from IN
						P.02	IT moving close to INP from IN
					T.18		R1 & IT stop moving close to INP
						P.03	IT is close to INP
					T.19		R1 & IT start moving to HOME from CLOSE to INP
						P.17	R1 moving to HOME from CLOSE to INP
						P.04	IT moving to HOME from CLOSE to INP
-	T.1901		R1 finishes unloading IN		T.20		R1 & IT stop moving HOME from CLOSE to INP
						P.111	IT @ HOME

Πίνακας 5-6. Θέσεις/Μεταβάσεις ειδικού δικτύου

GENERAL			SPECIFIC				
Event	Transition	Position	Meaning	Event	Transition	Position	Meaning
-		P.0100	ML1 is available			P.200	MACH SAFE SPACE
						P.210	CHK EMPTY
E.101	T.1190		R1 starts loading ML1 from IN	T.21			R1 & IT start moving close to CHK1 from HOME
						P.18	R1 moving close to CHK1
						P.19	IT moving close to CHK1
				T.22			R1 stop moving close to CHK1
				T.23			IT stop moving close to CHK1
						P.20	R1 is close to CHK1
						P.21	IT is close to CHK1
				T.24			R1 & IT start moving in CHK1
						P.22	R1 moving in CHK1
						P.23	IT moving in CHK1
				T.25			R1 stop moving in CHK1
				T.26			IT stop moving in CHK2
						P.24	R1 is in CHK1
						P.25	IT is in CHK1
			R1 loading ML1 from IN	T.27			CHK1 starts GRABBING
						P.26	CHK1 is GRABBING
				T.28			CHK1 stops GRABBING
						P.211	CHK HOLD
				T.29			R1 starts UNGRABBING in CHK1
						P.27	R1 is UNGRABBING
				T.30			R1 stops UNGRABBING in CHK1
				T.31			R1 starts moving close to CHK1 from IN CHK1
						P.28	R1 moving close to CHK1 from IN CHKO
				T.32			R1 stops moving close to CHK1 from IN CHK1
				T.33			R1 starts moving to HOME from close to CHK1
						P.29	R1 moving to HOME from close to CHK1
-	T.1191		R1 finishes loading ML1 from IN	T.34			R1 stops moving to HOME from close to CHK1

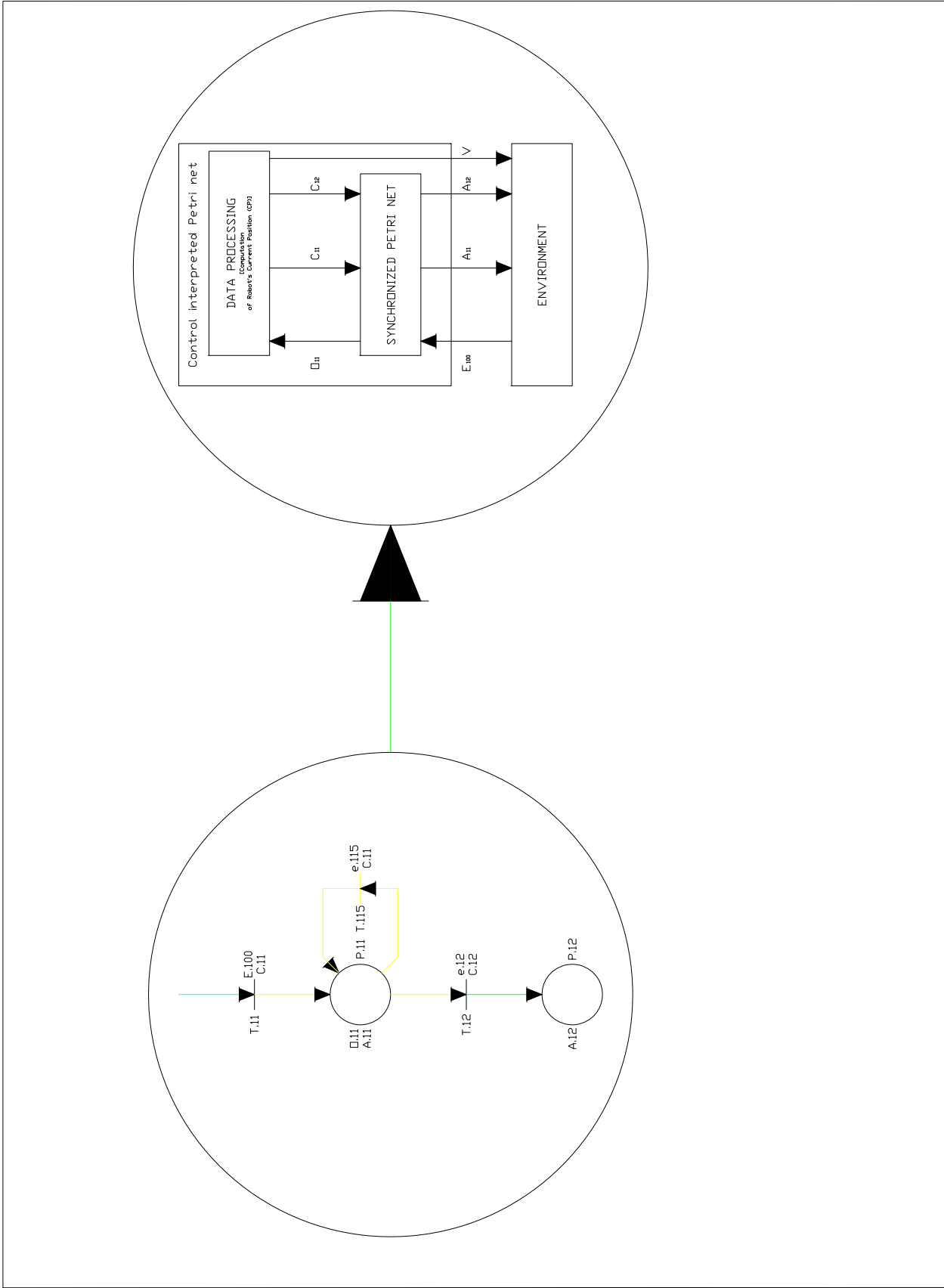
Πίνακας 5-6. Θέσεις/Μεταβάσεις ειδικού δικτύου (συνέχεια)

GENERAL			SPECIFIC			
Event	Transition	Position	Event	Transition	Position	Meaning
				T.211		CHK start REVOLVING
					P.212	CHK REVOLVING
				T.212		CHK stop REVOLVING
				T.301		TOOL start cutting/moving
					P.302	TOOL cutting/moving
				T.302		TOOL stop cutting/moving
					P.303	TOOL end of cutting
				T.303		TOOL start moving HOME
					P.304	TOOL moving HOME
				T.304		TOOL stop moving HOME
					P.301	TOOL at HOME
				T.305		TOOL start CHANGING
					P.305	TOOL CHANGING
						TOOL STOP CHANGING
E.106	T.1100			T.35		R1 starts moving close to CHK1 from HOME
				T.36		R1 starts moving IN CHK1
				T.37		R1 starts GRABBING in CHK1
				T.38		CHK1 starts UNGRABBING
					P.30	CHK1 is UNGRABBING
				T.39		CHK1 stops UNGRABBING
				T.40		R1 & IT start moving close to CHK1 from IN CHK1
					P.31	IT moving close to CHK1 from IN CHK1
				T.41		IT stop moving close to CHK1 from IN CHK1
				T.42		R1 & IT start moving to HOME from CLOSE to CHK1
					P.32	IT moving to home from CLOSE to CHK1
				T.43		IT stops moving to HOME from CLOSE to CHK1

Πίνακας 5-6. Θέσεις/Μεταβάσεις ειδικού δικτύου (συνέχεια)

GENERAL				SPECIFIC			
Event	Transition	Position	Meaning	Event	Transition	Position	Meaning
						P.402	CONV IDLE
						P.400	CONV SAFE SPACE
						P.401	CONV CAPACITY
					T.44		R1 & IT start moving close to CONV from HOME
E.128	T.1410		R1 starts loading C from ML1			P.33	R1 moving close to CONV from HOME
						P.34	IT moving close to CONV from HOME
					T.45		R1 & IT stop moving close to CONV
						P.35	R1 is close to CONV
						P.36	IT is close to CONV
					T.46		R1 & IT start moving in CONV
						P.37	R1 moving in CONV
						P.38	IT moving in CONV
					T.47		R1 & IT stop moving in CONV
						P.39	R1 is in CONV
						P.40	IT is in CONV
					T.48		R1 starts UNGRABBING in CONV
					T.49		R1 starts moving close to CONV from IN CONV
						P.41	R1 moving close to CONV from IN CONV
					T.50		R1 stops moving close to CONV from IN CONV
					T.51		R1 starts moving to HOME from CLOSE to CONV
						P.42	R1 moving HOME from CLOSE to CONV
					T.52		R1 stops moving HOME from CLOSE to CONV
	T.1411		R1 finishes loading C from ML1				CONV starts moving IT to EXIT
	T.0401		C starts processing			P.403	CONV moving IT to EXIT
		P.0402	C processing				CONV stops moving IT to EXIT
	T.0402		C finishes processing			P.999	IT in EXIT

Πίνακας 5-6. Θέσεις/Μεταβάσεις ειδικού δικτύου (συνέχεια)



Σχήμα 5-3. Λεπτομέρεια Petri

Event	T / P	Meaning	Conditions (C)			Operation orders (O)			Outputs (A)		Variables (A)	
			FROM dp TO pn	FROM dp TO pn	FROM dp TO pn	FROM pn TO dp	FROM pn TO dp	FROM pn TO environment	FROM dp TO environment	FROM pn TO environment	FROM dp TO environment	
E.100	T.11	R1 starts moving close to INP from HOME	C.11	$R_{CP} \neq R_{TP}$	Robot's current position is different from target position						V.1	R_{CP}
	P.11	R1 is moving close to INP from HOME				O.11	$R_{CP} = R_{CP} + u^*t$	Move to a new position, closer to target position	A.11	Robot is moving		
e.115	T.115	Stop moving / restart moving	C.11	$R_{CP} \neq R_{TP}$	Robot's current position is different from target position						V.1	R_{CP}
e.12	T.12	R1 stops moving close to INP from HOME	C.12	$R_{CP} = R_{TP}$	Robot's current position is target position						V.1	R_{CP}
	P.12	R1 is close to INP							A.12	Robot is not moving		

Πίνακας 5-7. Θέσεις/μεταβάσεις και συνθήκες/γεγονότα/εντολές: Παράδειγμα μετακίνησης ρομποτικού βραχίονα

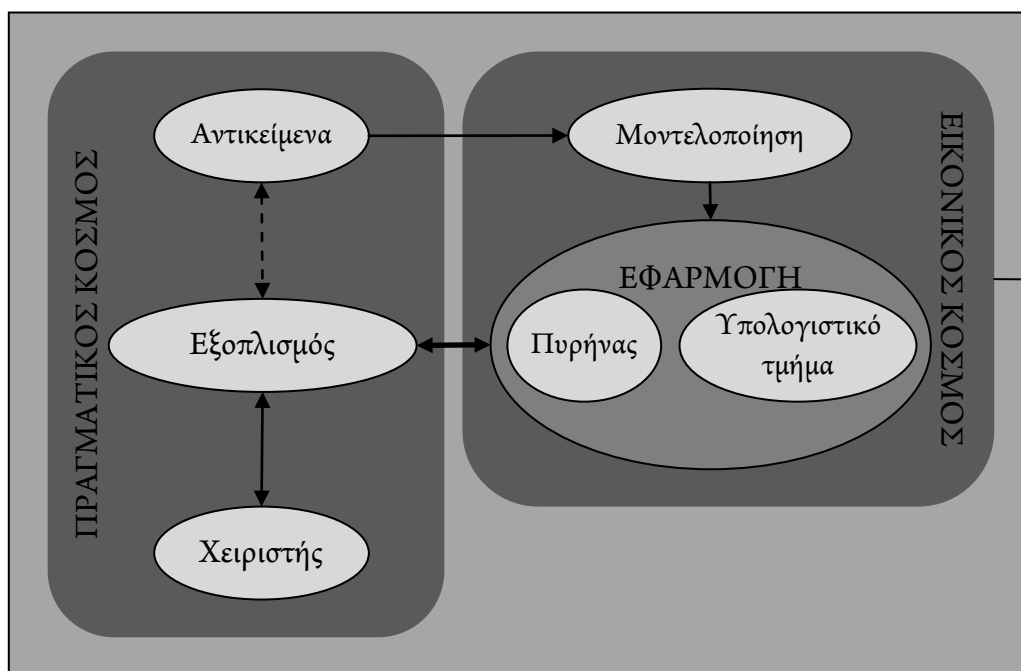
6 Διάδραση με το εικονικό σύστημα

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται τα ζητήματα που αφορούν στο εικονικό περιβάλλον. Καλύπτονται οι κύριες πτυχές της ανάπτυξης και δοκιμής, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στον τρόπο με τον οποίο ενσωματώθηκαν τα στοιχεία των προηγούμενων κεφαλαίων, ενώ γίνεται εκτενής παρουσίαση του τρόπου χρήσης της πιλοτικής εφαρμογής.

6.2 Δομή περιβάλλοντος

Στο Σχήμα 6-1 παρουσιάζεται η δομή του περιβάλλοντος που προτείνεται, καθώς και ο τρόπος που τα επιμέρους στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους.



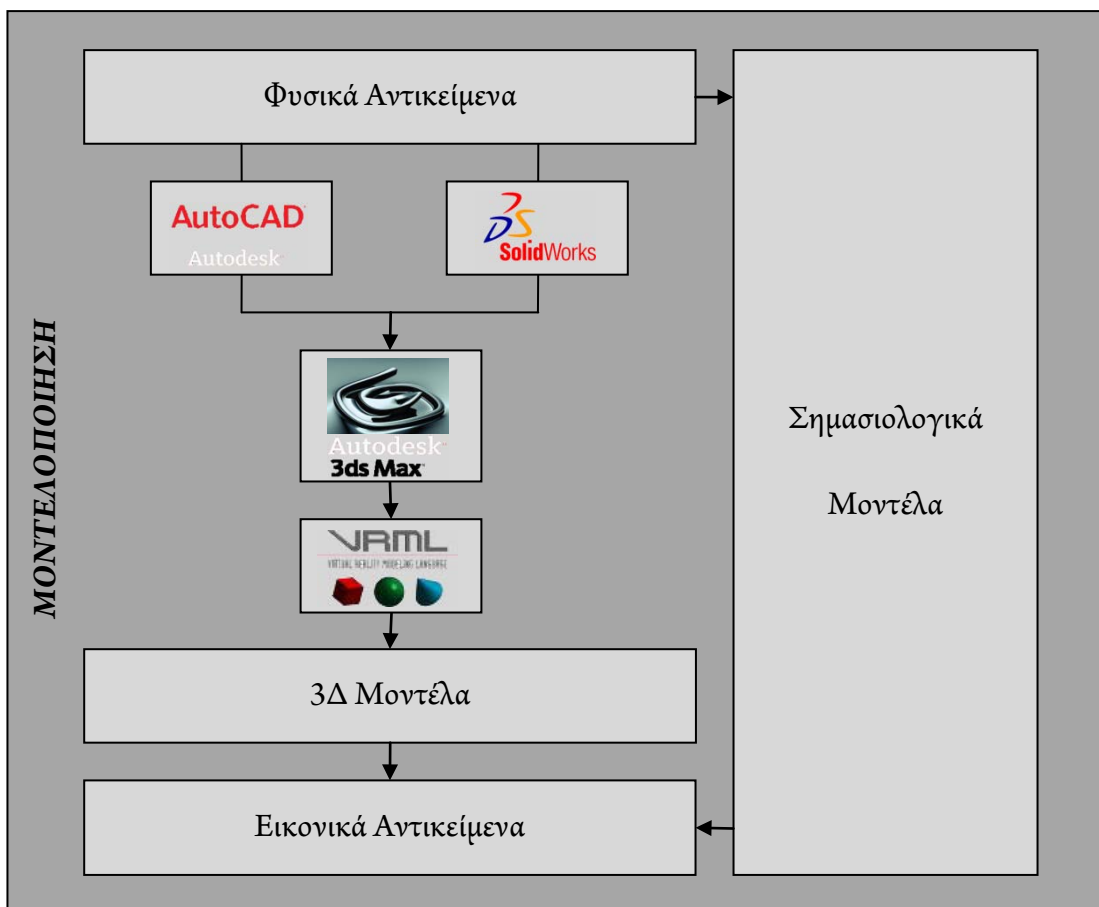
Σχήμα 6-1. Δομή περιβάλλοντος

Τα αντικείμενα που επιλέχθηκε να μοντελοποιηθούν αφορούσαν σε ρομποτικούς βραχίονες, τórνους, μεταφορικές ταινίες, καθώς και κάποια περιφερειακά αντικείμενα για πιστότερη αναπαράσταση του εικονικού κόσμου. Ο χρήστης χειρίζεται τα εικονικά αντικείμενα μέσω

εξοπλισμού που συνδέεται με την εφαρμογή, ενώ γίνεται χρήση κατάλληλων αλγορίθμων (υπολογιστικό τμήμα) που ορίζουν την συμπεριφορά των αντικειμένων.

6.2.1 Μοντελοποίηση αντικειμένων

Η μοντελοποίηση των αντικειμένων γίνεται για χρήση εντός του εικονικού κόσμου της εφαρμογής. Η διαδικασία της μοντελοποίησης αποτελείτο από δύο τμήματαένα τμήμα αφορούσε στην δημιουργία τρισδιάστατων γεωμετρικών μοντέλων και ένα τμήμα αφορούσε στην ένταξη των λειτουργικών χαρακτηριστικών στα γεωμετρικά μοντέλα, δημιουργώντας τα τελικά εικονικά αντικείμενα. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6-2, για την δημιουργία των γεωμετρικών μοντέλων χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο λογισμικό CAD (*Autocad* της *Autodesk* και *Solidworks* της *Dassault Systèmes*), ενώ στην συνέχεια μέσω λογισμικού γραφικών (*3ds Max* της *Autodesk*) δημιουργήθηκαν τα τελικά αντικείμενα σε μορφή *VRML/X3d* (αρχεία *.wrl*).



Σχήμα 6-2. Διάγραμμα ροής μοντελοποίησης αντικειμένων

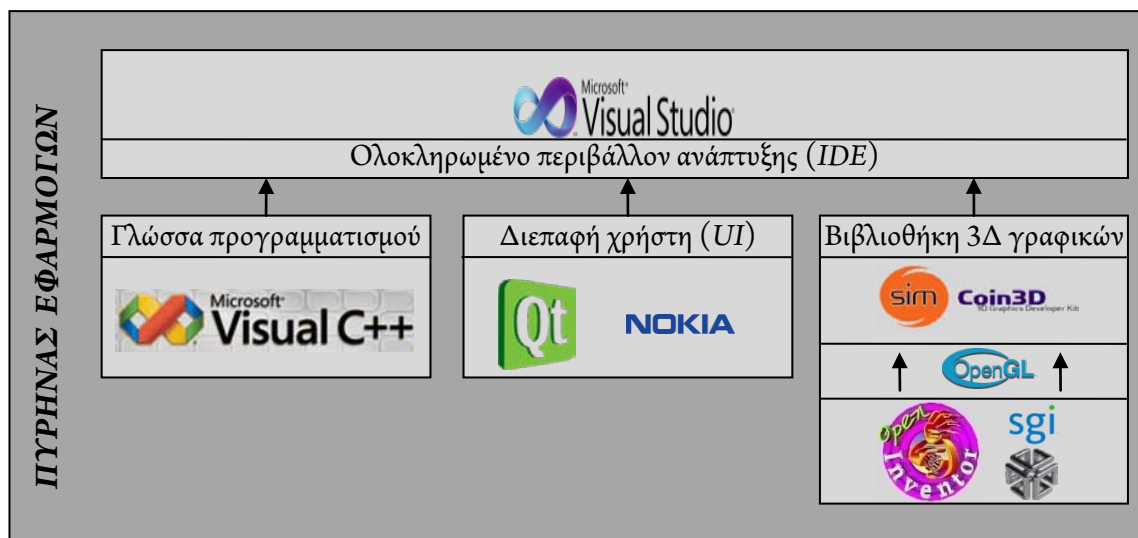
Οι λόγοι για τους οποίους ακολουθήθηκε αυτή η διαδικασία ήταν:

- Κάποια αντικείμενα – ή στοιχεία αντικειμένων – υπήρχαν είτε στην μία μορφή (*Autocad*) είτε στην άλλη (*Solidworks*).
- Τα τελικά αντικείμενα έπρεπε να είναι της μορφής *.wrl*, για να μπορούν να εισαχθούν επιτυχώς στο εικονικό περιβάλλον.
- Το λογισμικό *3ds Max* χρησιμοποιήθηκε τόσο για την συνεπή μετατροπή των αρχείων σε μορφή *.wrl*, αλλά και για την δημιουργία των ξεχωριστών τμημάτων (*parts*).

Η ανάγκη δημιουργίας ξεχωριστών τμημάτων ανά αντικείμενο προέκυψε από την ύπαρξη των σημασιολογικών μοντέλων, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2. Συνεπώς, για να είναι δυνατή η δημιουργία λειτουργικών χαρακτηριστικών, έπρεπε το κάθε αντικείμενο να χωριστεί στα επιμέρους τμήματά του όπως ορίζεται από το αντίστοιχο σημασιολογικό μοντέλο, να αποδοθούν τα συγκεκριμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά, και εν συνεχεία να γίνει η σύνθεσή τους εντός του εικονικού κόσμου.

6.2.2 Πυρήνας Εφαρμογών

Ο πυρήνας των εφαρμογών αφορά στο περιβάλλον ανάπτυξης, στη γλώσσα που χρησιμοποιήθηκε, στην δημιουργία της διεπαφής του χρήστη, καθώς και στην βιβλιοθήκη για την δημιουργία των γραφικών. Στην προκειμένη περίπτωση, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6-3, χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον *Visual Studio* και η γλώσσα προγραμματισμού *C++* της *Microsoft*, το περιβάλλον *Qt* της *Nokia* (πρώην *Trolltech*) και η βιβλιοθήκη *Open Inventor* της *Silicon Graphics Inc.* στην έκδοση *Coin3D* της *Kongsberg Oil & Gas Technologies* (πρώην *Systems In Motion*).



Σχήμα 6-3. Πυρήνας εφαρμογών

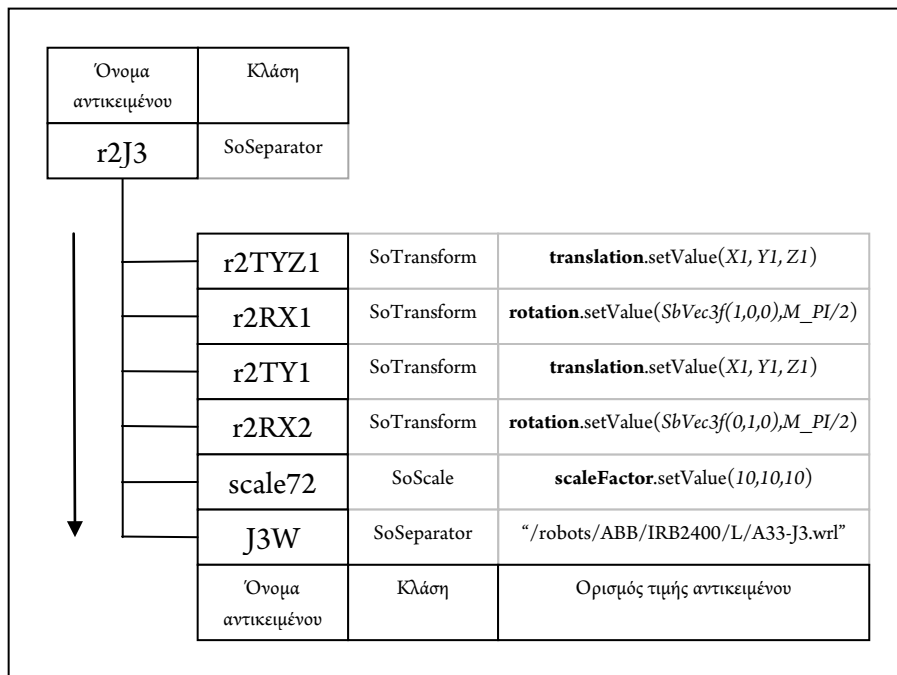
Η επιλογή της C++ ως γλώσσας προγραμματισμού έγινε για πολλούς λόγους, με κυριότερους εξ' αυτών την αντικειμενοστραφή φύση της γλώσσας, την σταθερότητα, την μεγάλη βάση χρηστών και την εύρυθμη λειτουργία με τα υπόλοιπα εργαλεία του πυρήνα.

Για την δημιουργία της διεπαφής του χρήστη (*user interface, UI*) χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον δημιουργίας γραφικής διεπαφής χρήστη (*GUI*) Qt της Trolltech. Το συγκεκριμένο περιβάλλον χρησιμοποιείται ευρέως σε δημοφιλείς εφαρμογές (*Google Earth, Skype, VLC*), ενώ είναι πολυπλατυβαθρικό (*cross-platform*), μπορεί να χρησιμοποιηθεί δηλαδή σε παραπάνω από μία πλατφόρμες (*MS Windows, Mac OS X, Linux, Symbian*). Επιπροσθέτως, διατίθεται με περιορισμένη γενική άδεια δημόσιας χρήσης (*GNU Lesser Public License*), συνεπώς δεν υπάρχει κόστος στην ενσωμάτωσή του σε μη εμπορικές εφαρμογές. Το 2008 η Nokia προχώρησε στην εξαγορά της Trolltech και στην μετονομασία της σε *Nokia Qt Development Frameworks*.

Η βιβλιοθήκη γραφικών *Coin3D* αποτελεί μια υλοποίηση της βιβλιοθήκης *Open Inventor* (αρχικά *IRIS Inventor*) που δημιούργησε και διένειμε η *Silicon Graphics Inc.* στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Η βιβλιοθήκη στηρίζεται στην γλώσσα C++ και σχεδιάστηκε για να διευκολύνει τον προγραμματισμό μέσω *OpenGL* (*Open Graphics Library*). Από το 2000, η βιβλιοθήκη *Open Inventor* χαρακτηρίστηκε ως ανοιχτός κώδικας (*open source*) και περίπου την ίδια περίοδο παρουσιάστηκε η υλοποίηση της *Systems in Motion (SIM)* με το όνομα *Coin3D*. Η συγκεκριμένη υλοποίηση περιείχε νέες κλάσεις αντικειμένων και αρκετές βελτιώσεις, καθώς και υποστήριξη για την γλώσσα *VRML*. Η βιβλιοθήκη βρήκε θερμή ανταπόκριση από την προγραμματιστική κοινότητα, με αποτέλεσμα η εταιρεία να εξαγοραστεί από την *Kongsberg*, η οποία συνεχίζει τόσο την υποστήριξη της βιβλιοθήκης όσο και την δημιουργία νέων επεκτάσεων (πχ. *Voleon, Dime, Quarter*). Η βιβλιοθήκη διατίθεται και με γενική άδεια δημόσιας χρήσης (*GNU General Public License*), επιτρέποντας την ενσωμάτωσή της σε εφαρμογές χωρίς περαιτέρω κόστος.

Η χρήση της βιβλιοθήκης γίνεται μέσω γραφήματος σκηνής (*scene graph*). η δομή των δεδομένων δηλαδή έχει την μορφή δέντρου, η οποία περιγράφει τα αντικείμενα του κόσμου και την θέση τους στον κόσμο αυτού. Το γράφημα περιέχει κόμβους (*nodes*), οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τα αντικείμενα του κόσμου, ενώ οι σχέσεις μεταξύ των κόμβων είναι γονέα-τέκνου (*parent-child*). Κάθε κόμβος μπορεί να είναι γονέας με πολλαπλά τέκνα, ενώ βασική αρχή της σχέσης γονέα-τέκνου είναι η κληρονομικότητα, πράγμα που σημαίνει ότι κάθε τέκνο κληρονομεί κάποια από τα χαρακτηριστικά του γονέα. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά που επιδιώκεται να κληρονομούνται αφορούν σε μετασχηματισμούς θέσης

(*translation*) και περιστροφής (*rotation*). Σε αυτές τις περιπτώσεις οποιοσδήποτε μετασχηματισμός σε γονέα αναγκάζει τα τέκνα να ακολουθήσουν τον ίδιο μετασχηματισμό, ενώ οποιοσδήποτε μετασχηματισμός σε κάποιο τέκνο γίνεται στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Επιπροσθέτως, κυρίως σε ότι αφορά μετασχηματισμούς θέσης/περιστροφής, ο τρόπος που σαρώνεται το δέντρο στην φάση παραγωγής της σκηνής (*rendering*) είναι ιεραρχικός. Αυτό σημαίνει ότι ο μετασχηματισμός ενός τέκνου σε ανώτερο επίπεδο επηρεάζει τους μετασχηματισμούς των κατώτερων τέκνων-αδερφών (*siblings*). Στο Σχήμα 6-4 φαίνεται ένα παράδειγμα δέντρου με έναν γονέα και έξι τέκνα.



Σχήμα 6-4. Παράδειγμα δέντρου γονέα – τέκνων

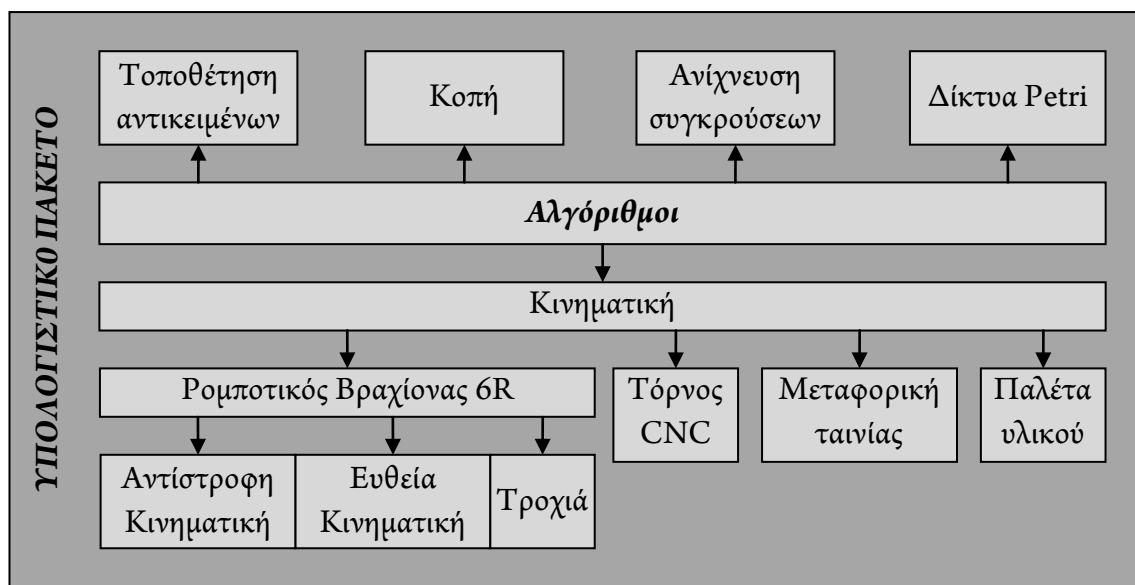
Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, παρατηρούμε ότι στο τέλος του δέντρου υπάρχει ένας κόμβος ο οποίος περιέχει ένα αρχείο *.wrl* (αντικείμενο *J3W*). Το αντικείμενο αυτό θα τοποθετηθεί στην σκηνή, ακολουθώντας τα εξής βήματα:

1. **Μετακίνηση** κατά X_1, Y_1, Z_1
2. **Περιστροφή** κατά 90° γύρω από τον άξονα X
3. **Μετακίνηση** κατά X_2, Y_2, Z_2 (στο τοπικό $\Sigma\Sigma$)
4. **Περιστροφή** κατά 90° γύρω από τον άξονα Y (στο τοπικό $\Sigma\Sigma$)
5. **Μεγέθυνση** επί 10 σε όλους τους άξονες

Πέραν των κλάσεων που αφορούν σε μετασχηματισμούς θέσης/περιστροφής, ως επί το πλείστον χρησιμοποιήθηκαν κλάσεις για την δημιουργία διαφορετικών καμερών, διαφοροποίησης του φωτισμού, κλάσεις τύπου *dragger* (για την μετακίνηση αντικειμένων μέσω του ποντικιού), κλάσεις τύπου *engine* (για την εξαγωγή δεδομένων), καθώς και κλάσεις σχετικές με το οριακό κουτί (*bounding box*) (βλ. §3.2, Αντίστροφη κινηματική).

6.2.3 Υπολογιστικό τμήμα

Το υπολογιστικό τμήμα αφορά στην δημιουργία κατάλληλων συναρτήσεων (*functions*) και την σύνδεσή τους με τα υπόλοιπα αντικείμενα του χώρου, για την υλοποίηση των προαναφερθέντων (Κεφάλαια 3,4,5) αλγορίθμων (Σχήμα 6-5).



Σχήμα 6-5. Υπολογιστικό τμήμα

- Για την ευθεία κινηματική των ρομποτικών βραχιόνων, δημιουργήθηκε η συνάρτηση *calculate()* με εισόδους τις γωνίες των αρθρώσεων των ρομποτικών βραχιόνων και εξόδους το μητρώο προσανατολισμού και τις συντεταγμένες X, Y, Z του εργαλείου.
- Για την αντίστροφη κινηματική των ρομποτικών βραχιόνων, δημιουργήθηκε η συνάρτηση *invkine()*, με εισόδους την θέση-στόχο και εξόδους τις τιμές για τις γωνίες των αρθρώσεων.
- Αντίστοιχοι αλγόριθμοι δημιουργήθηκαν για την κινηματική των τόρνων, των μεταφορικών ταινιών, και της παλέτας του υλικού.

- Για την ανίχνευση συγκρούσεων, δημιουργήθηκε κατάλληλος αλγόριθμος (συνάρτηση *collision()*).
- Τα δίκτυα Petri μοντελοποιήθηκαν εμμέσως για τον έλεγχο του κυττάρου μέσω της συνάρτησης *checkstate()* που ελέγχει εάν επιτρέπεται να εκτελεστεί μια ενέργεια ή όχι.
- Για την κοπή δημιουργήθηκε μια σειρά αλγορίθμων για την κίνηση του κοπτικού εργαλείου (*startCutting()*, *setScnc()*, *setOncnc()*), λόγω των βημάτων που ακολουθούνται, όπως περιγράφεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο, και ο αλγόριθμος *cutting()* για την εικονοποίηση της αποβολής του υλικού.
- Για την τοποθέτηση των αντικειμένων, δημιουργήθηκαν οι αλγόριθμοι *setPositioning()* και *setConvPositioning()*.

6.3 Υποσυστήματα διεπαφής

Η διεπαφή αποτελείται από δύο κύρια παράθυρα το κεντρικό παράθυρο επιλογών (*main panel*) και το παράθυρο-παρατηρητήριο (*viewer*), στο οποίο εικονίζεται ο κόσμος. Στο κεντρικό παράθυρο επιλογών, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει μεταξύ των δύο διαφορετικών υποσυστημάτων (σχεδιασμού και ελέγχου) αναφορικά με τα στοιχεία του κυττάρου κατεργασιών. Οι επιλογές του χρήστη επηρεάζουν άμεσα τα στοιχεία που εμφανίζονται στο παρατηρητήριο.

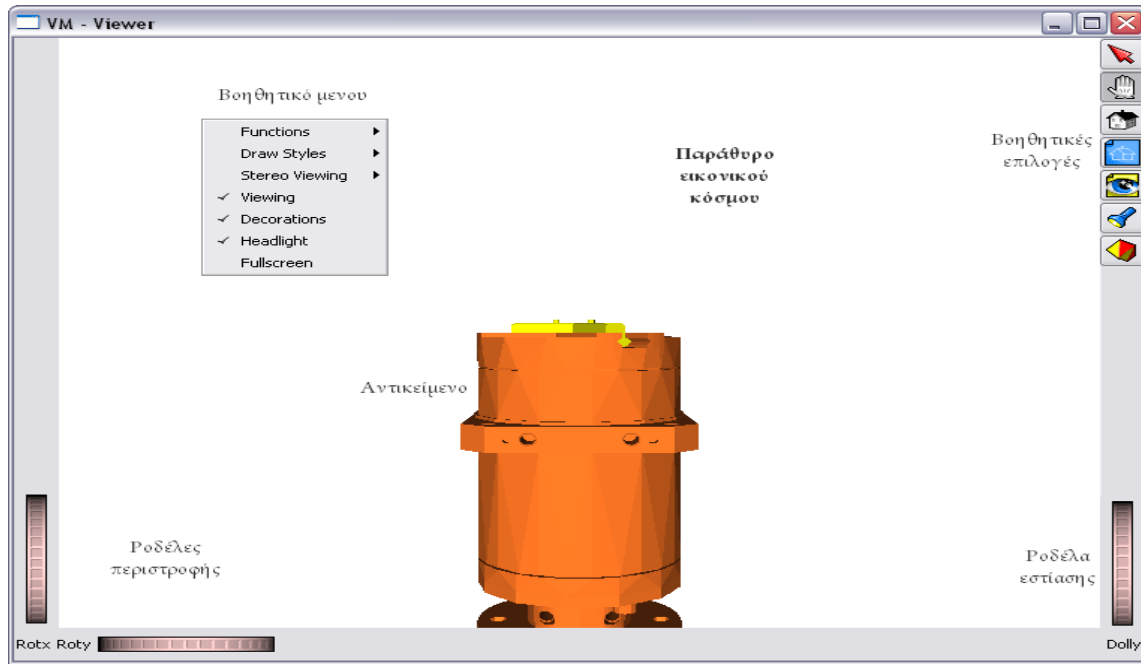
Ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάστηκε η εφαρμογή, επέβαλλε το διαχωρισμό του παρατηρητηρίου και του παραθύρου επιλογών, καθώς:

- στην περίπτωση που η εφαρμογή χρησιμοποιείται σε επιτραπέζιο υπολογιστή με δύο οθόνες, προτιμήθηκε να μην συνωστιζονται όλα τα δεδομένα σε μία οθόνη, ώστε η παρατήρηση του κυττάρου να είναι όσο το δυνατόν πιο ελεύθερη.
- στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται συσκευές εμβύθισης (HMD, γάντι κλπ), επιλέχθηκε ο χρήστης που εμβυθίζεται να μην έχει στην διάθεσή του το παράθυρο επιλογών, καθώς κάτι τέτοιο θα δημιουργούσε προβλήματα στην αντίληψη του για τον χώρο και δεν θα επιτυγχανόταν το επιθυμητό επίπεδο εμβύθισης.

Για τον ίδιο λόγο, επιλέχθηκε τα νέα παράθυρα που προκύπτουν από τις επιλογές του χρήστη να είναι ανεξάρτητα και όχι ενσωματωμένα σε ένα κοινό πλαίσιο, ώστε να επιτρέπουν στον χρήστη την τοποθέτησή τους κατά το δοκούν. Όλα τα υποσυστήματα αναφέρονται στην πιλοτική υλοποίηση που εντάσσεται στα εννοιολογικά πλαίσια του σχεδιασμού και της εκπαίδευσης, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του Κεφαλαίου 2.

6.3.1 Παρατηρητήριο (viewer)

Το παράθυρο-παρατηρητήριο αποτελεί τον τρόπο με τον οποίο ο χρήστης έχει επαφή με τον εικονικό κόσμο. Στηρίζεται σε είδη της κλάσης *SoQtFullViewer* (π.χ. *SoQtExaminerViewer*, *SoQtFlyViewer*) και αποτελείται από τρία βασικά χαρακτηριστικά (Εικόνα 6-1):



Εικόνα 6-1. Παρατηρητήριο (viewer)

- Το παράθυρο του εικονικού κόσμου (*render canvas*)
- Τις βοηθητικές επιλογές γύρω από το παράθυρο (*decorations*)
- Το βοηθητικό μενού εντός του παραθύρου (ενεργοποίηση με δεξί κλικ του ποντικιού)

Οι επιλογές που έχει ο χρήστης εντός του εικονικού κόσμου, αφορούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Κίνηση

Η κίνηση του χρήστη εντός του εικονικού κόσμου γίνεται ισοδύναμα με κίνηση της κάμερας την οποία χρησιμοποιεί. Η κάμερα μπορεί να μετακινηθεί, να περιστραφεί, και να εστιάσει ανάλογα με την επιθυμία του χρήστη. Η μετακίνηση (*pan*) γίνεται είτε μέσω χρήσης του ποντικιού (μεσαίο πλήκτρο και μετακίνηση του δείκτη) είτε μέσω του πληκτρολογίου (πλήκτρα βελών). Η περιστροφή κατά τους δύο άξονες (X , Y) γύρω από το σημείο εστίασης (*focal point*) γίνεται είτε μέσω των πλήκτρων στην κάτω αριστερή γωνία του

παραθύρου είτε μέσω του ποντικιού (αριστερό πλήκτρο και μετακίνηση του δείκτη). Η εστίαση (*zoom*) γίνεται είτε μέσω της ροδέλας στην κάτω δεξιά γωνία του παραθύρου είτε μέσω του ποντικιού (μεσαία ροδέλα). Επιπροσθέτως, παρέχεται η λειτουργία της αναζήτησης (*seek*), η οποία ενεργοποιείται είτε με το πλήκτρο *S* του πληκτρολογίου είτε μέσω του βοηθητικού μενού. Σε αυτή την περίπτωση, ο δείκτης του ποντικιού γίνεται σταυρός και με αριστερό κλικ, η κάμερα εστιάζει στο σημείο του αντικειμένου. Ο Πίνακας 6-1 παρουσιάζει όλες οι επιλογές που αφορούν στην κίνηση εντός του εικονικού κόσμου.

Λειτουργία	Μέσω πληκτρολογίου	Μέσω ποντικιού	Μέσω παραθύρου
Μετακίνηση (<i>pan</i>)	Πλήκτρα βελών	Μεσαίο πλήκτρο + μετακίνηση δείκτη	-
Περιστροφή κατά <i>X, Y</i>	-	Αριστερό πλήκτρο + μετακίνηση δείκτη	Πλήκτρα κάτω αριστερής γωνίας
Εστίαση (<i>zoom</i>)	-	Μεσαία ροδέλα	Πλήκτρα κάτω δεξιάς γωνίας
Ενεργοποίηση αναζήτησης (<i>seek</i>)	Πλήκτρο <i>S</i>	-	Πλήκτρο στόχου
Αναζήτηση	-	Αριστερό κλικ	-
<i>Home</i>	Πλήκτρο <i>Home</i>	Μέσω του βοηθητικού μενού (δεξί κλικ)	Πλήκτρα πλαϊνού τμήματος
<i>Set Home</i>	-		
<i>View all</i>	-		

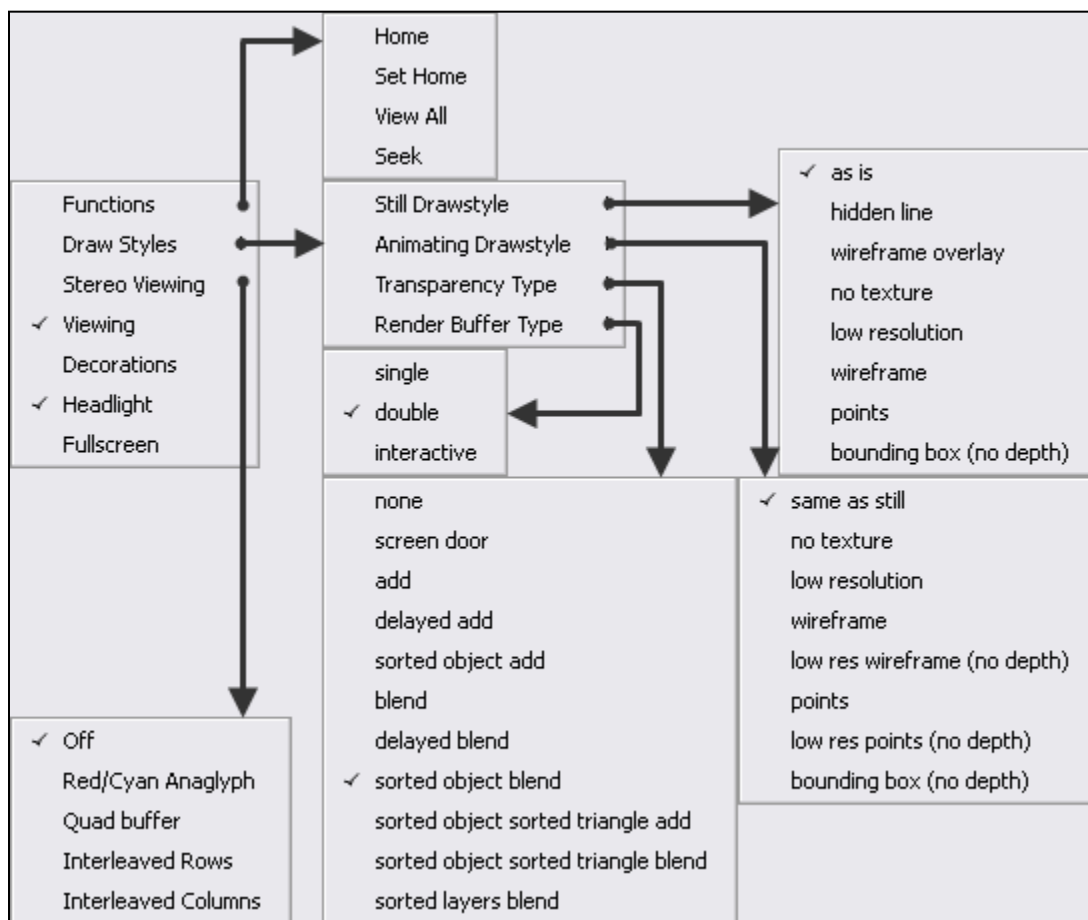
Πίνακας 6-1. Κίνηση στο εικονικό περιβάλλον

Επιπρόσθετες λειτουργίες (*functions*) της κάμερας είναι οι λειτουργίες *Home* (επιστροφή της κάμερας στην αρχική θέση), *Set Home* (ορισμός νέας θέσης ως αρχική), και *View All* (τοποθέτηση της κάμερας κατά τρόπο τέτοιο ώστε όλα τα αντικείμενα του κόσμου να είναι ορατά). Οι επιλογές αυτές βρίσκονται εντός του βοηθητικού μενού επιλογών, αλλά και στο πλαϊνό τμήμα του παραθύρου.

- Εικονοποίηση

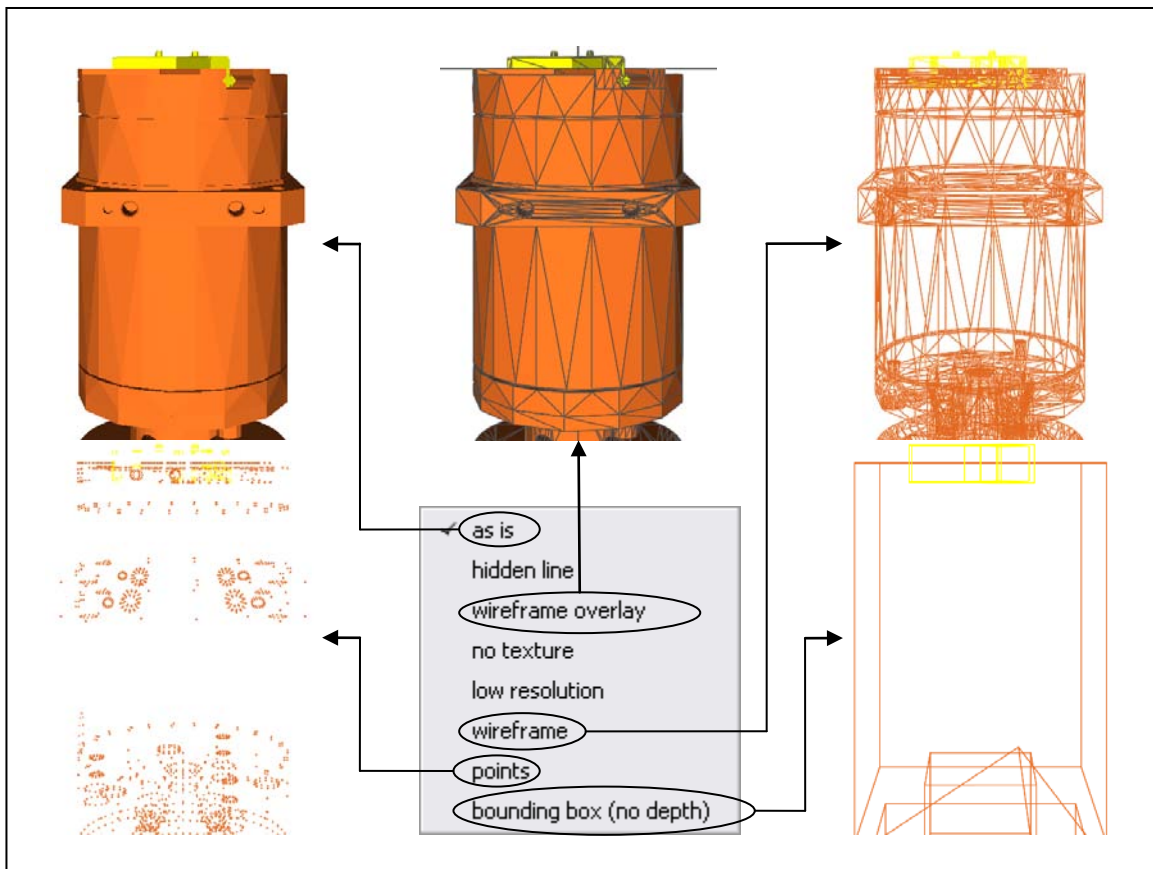
Η κατηγορία αυτή αφορά στον τρόπο με τον οποίο εμφανίζονται τα αντικείμενα εντός του εικονικού κόσμου. Το βοηθητικό μενού προσφέρει επιλογές σχετικά με την εμφάνιση των αντικειμένων (*draw styles*), τον τρόπο που θα αποδοθεί η σκηνή στεροσκοπικά (*stereo viewing*), την εμφάνιση ή όχι των βοηθητικών επιλογών γύρω από το παράθυρο (*decorations*), εάν θα υφίσταται κεντρική πηγή φωτός (*headlight*) και εάν το παράθυρο θα

έχει λειτουργία πλήρους οθόνης (*full screen*). Όλες οι επιλογές που προκύπτουν από το βοηθητικό μενού φαίνονται στην Εικόνα 6-2.



Εικόνα 6-2. Επιλογές εικονοποίησης

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν οι επιλογές σχετικά με την εμφάνιση των αντικειμένων. Οι υποεπιλογές αφορούν στην εμφάνισή τους όταν είναι στατικά (*still drawstyle*) και όταν είναι κινούμενα (*animating drawstyle*). Οι επιλογές αυτές περιλαμβάνουν την εμφάνιση των αντικειμένων όπως αυτά έχουν εισαχθεί (*as is*), με μοντέλα ακμών (*hidden line*), με ή χωρίς επικάλυψη πλέγματος (*wireframe / wireframe overlay*), χωρίς υφή (*no texture*), χαμηλής ανάλυσης (*low res*), σημείων (*points*), και μέσω οριακών όγκων χωρίς βάθος (*bounding box*). Στην Εικόνα 6-3 φαίνεται ένα αντικείμενο (αρπάγη ρομποτικού βραχίονα) με τους πέντε διαφορετικούς τρόπους. Άλλες επιλογές αφορούν στον τρόπο απεικόνισης διαφανών αντικειμένων (*transparency type*) και στο είδος του *buffer* που θα χρησιμοποιηθεί για την απόδοση των αντικειμένων (*render buffer type*).



Εικόνα 6-3. Διαφορετικοί τρόποι εμφάνισης ενός αντικείμενου

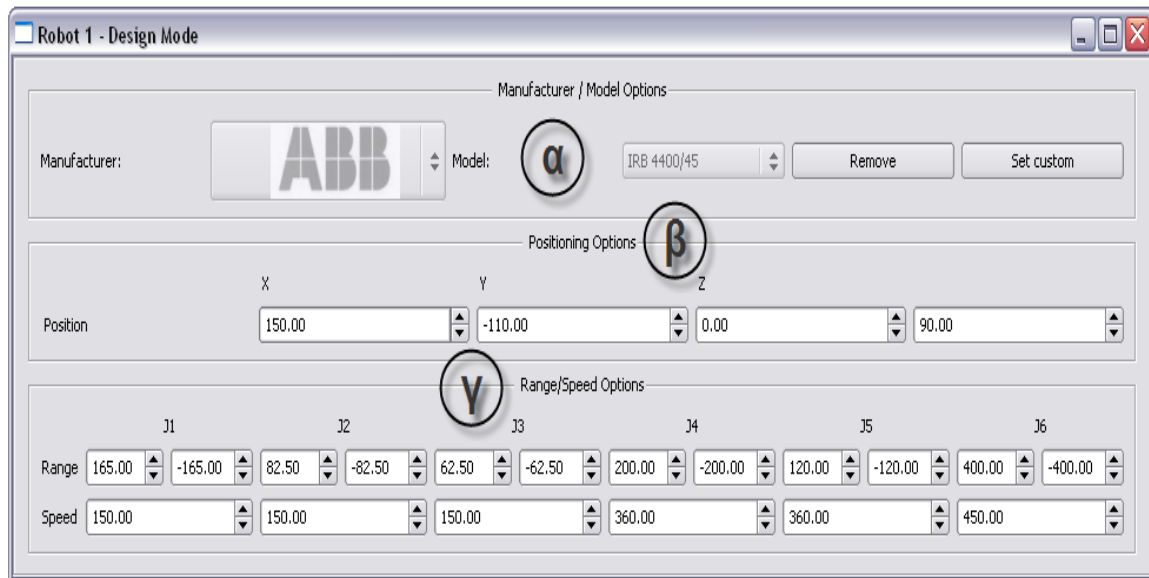
6.3.2 Υποσύστημα σχεδιασμού (*design module*)

Το υποσύστημα σχεδιασμού αφορά στις δυνατότητες που δίνονται στο χειριστή για την δημιουργία του εικονικού κελιού. Ο σχεδιαστής δύναται να προσθέσει/αφαιρέσει αντικείμενα αλλά και να τροποποιήσει χαρακτηριστικά που αφορούν στα αντικείμενα του εικονικού κελιού. Αναλυτικά:

- Ρομποτικοί βραχίονες (*robot*)

Στην πιλοτική υλοποίηση, ο χρήστης μπορεί να προσθέσει μέχρι δύο ρομποτικούς βραχίονες, επιλέγοντας από 16 διαθέσιμα μοντέλα της εταιρείας ABB (Εικόνα 6-4 – α). Η αρχική τους τοποθέτηση γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξυπηρετούν τις ανάγκες του κελιού και σύμφωνα με τον αλγόριθμο τοποθέτησης (§3.6), ενώ ο χρήστης δύναται να τους τοποθετήσει οπουδήποτε στον χώρο και με οποιονδήποτε προσανατολισμό ως προς τον κατακόρυφο άξονα (Εικόνα 6-4 – β). Επιπροσθέτως, μπορεί να προβεί σε αλλαγές, εφόσον το κρίνει απαραίτητο, τόσο στο εύρος τιμών που μπορεί να πάρει η κάθε άρθρωση, όσο και στην μέγιστη ταχύτητα κίνησης της κάθε άρθρωσης (Εικόνα 6-4 – γ). Οι αρχικές τιμές για

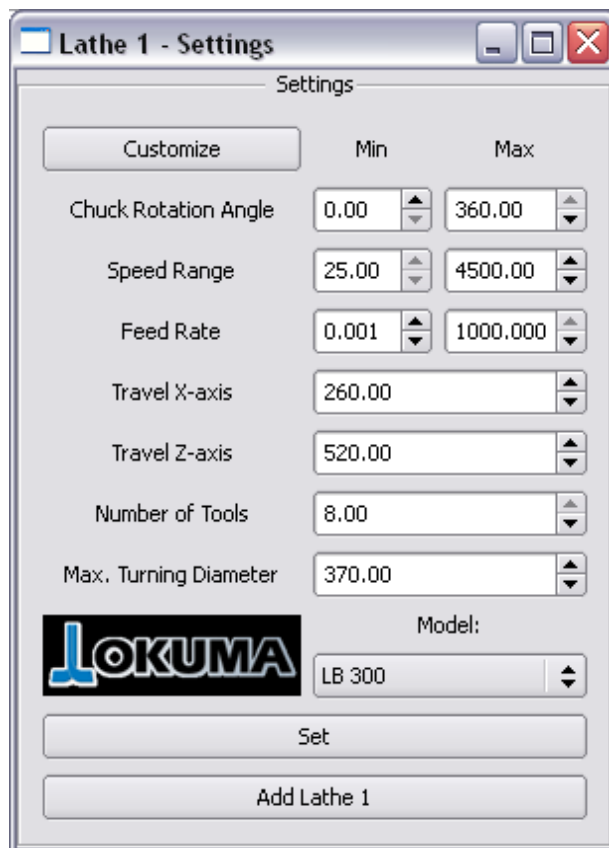
τα παραπάνω προέκυψαν σύμφωνα με τα δεδομένα των κατασκευαστών, είναι δηλαδή απόλυτα ρεαλιστικές. Στην παρούσα φάση, δεν επιτρέπεται η τροποποίηση χαρακτηριστικών μεγέθους (ήτοι η δημιουργία ενός νέου, μη τυποποιημένου μοντέλου), καθώς κρίθηκε μη ρεαλιστική. Μια τέτοια προσθήκη είναι – προγραμματιστικώς – δυνατή, δεδομένου ότι τα τμήματα του ρομποτικού βραχίονα συνδέονται μεταξύ τους παραμετρικά.



Εικόνα 6-4. Υποσύστημα σχεδιασμού ρομποτικού βραχίονα

- Τόρνοι (*lathe*)

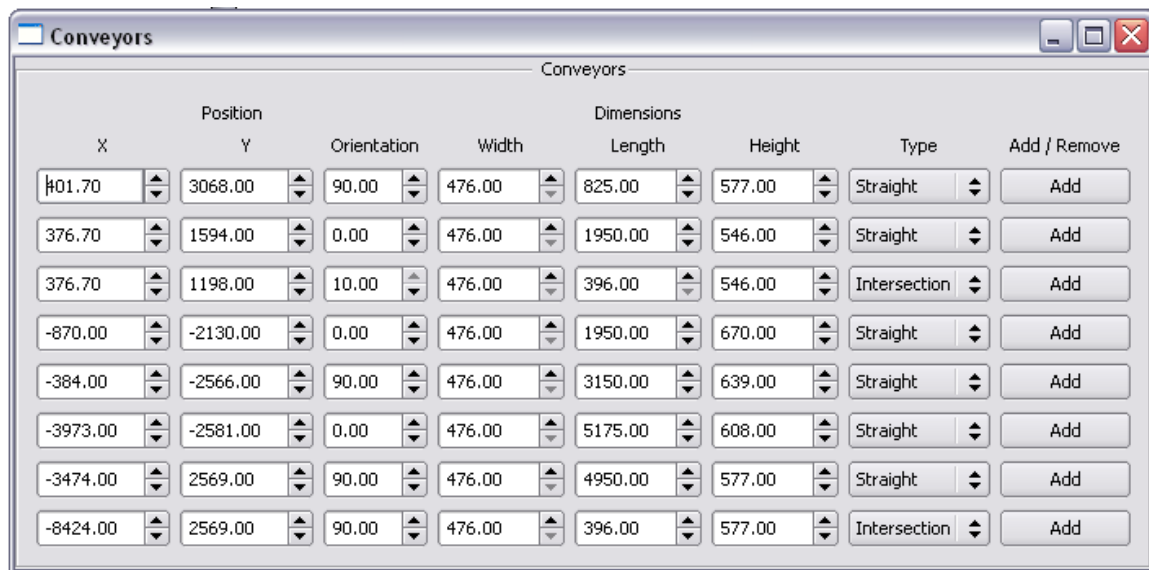
Στην πιλοτική εφαρμογή, ο χρήστης μπορεί να προσθέσει μέχρι δύο τόρνους στο εικονικό κύτταρο, επιλέγοντας οποιοδήποτε εκ των τριών διαθέσιμων μοντέλων (*OKUMA LB200, LB300, LB400*). Αναλόγως της επιλογής του, προκύπτουν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του τόρνου (εύρος ταχύτητας περιστροφής, εύρος πρόωσης, διαδρομή στους άξονες X και Z, αριθμός εργαλείων, μέγιστη διάμετρο αρχικού μπλοκ), τα οποία δύναται να τροποποιήσει (*customize*) εφόσον επιθυμεί να προσομοιώσει κάποιο άλλο μοντέλο τόρνου. Σε αυτή την περίπτωση, οφείλει να οριστικοποιήσει τις αλλαγές (*set*) (Εικόνα 6-5). Η θέση του μηχανήματος προσδιορίζεται από τις θέσεις των ρομποτικών βραχιόνων, κατά τρόπο τέτοιο ώστε κάθε ένα από τα ρομπότ να μπορεί να εξυπηρετήσει κάθε έναν τόρνο, πάντα σύμφωνα με τον αλγόριθμο τοποθέτησης. Επιπροσθέτως, τοποθετούνται στον χώρο θέσεις WIP (μία για κάθε τόρνο), οι οποίες υπάρχουν για να τοποθετούνται αντικείμενα μετά την επεξεργασία τους από τον τόρνο εφόσον δεν μπορούν να τοποθετηθούν στην έξοδο του κυττάρου.



Εικόνα 6-5. Υποσύστημα σχεδιασμού τόννου CNC

- Μεταφορικές ταινίες (*conveyors*)

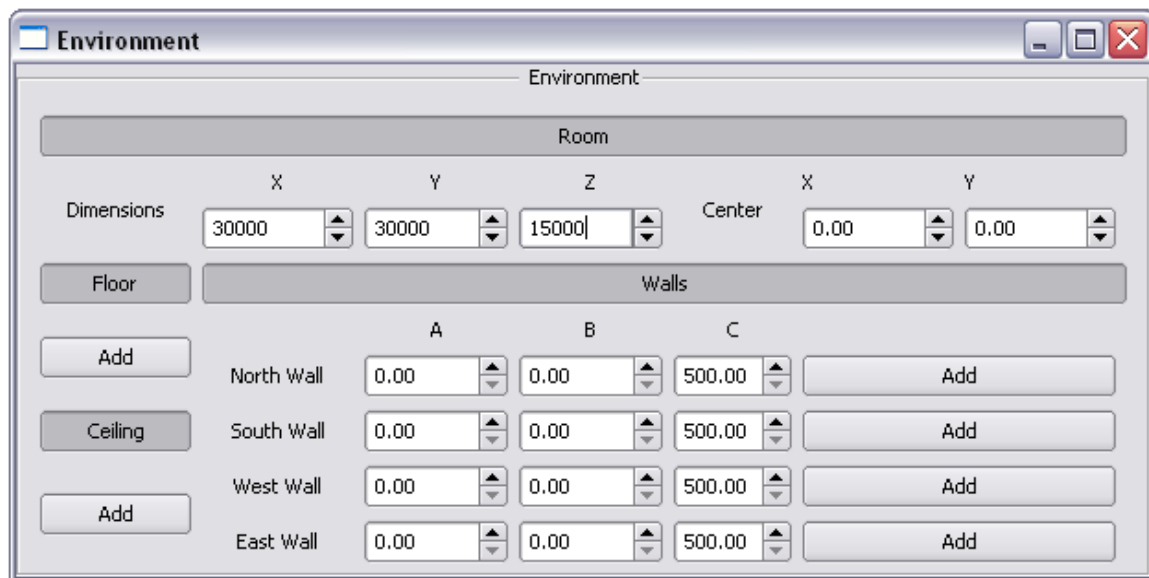
Στην πιλοτική εφαρμογή, ο χρήστης μπορεί να προσθέσει οκτώ αντικείμενα για την δημιουργία του δικτύου μεταφοράς των αντικειμένων στο κύτταρο (Εικόνα 6-6). Οι επιλογή στον τύπο του αντικειμένου αφορά σε ευθεία μεταφορική ταινία (*straight*) και σε τμήμα το οποίο λειτουργεί ως ενδιάμεση θέση υλικού (*intersection*). Στην αρχικό σχεδιασμό, έχουν επιλεχθεί 2+1 ταινίες για την είσοδο των τεμαχίων στο κελί και 4+1 για την έξοδο τους. Από τις οκτώ θέσεις, οι δύο είναι θέσεις εισόδου/εξόδου στις οποίες καταλήγει η παλέτα με την πρώτη ύλη. Οι αρχικές θέσεις/προσανατολισμοί των ταινιών είναι κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξυπηρετείται το κελί, με βάση τις θέσεις των τόννων. Οι μεταφορικές ταινίες μπορούν να διαφοροποιηθούν σε σχέση με το μέγεθός τους, αλλά για την εξυπηρέτηση του κυττάρου υπάρχουν συγκεκριμένοι περιορισμοί ώστε να μην δημιουργηθεί πρόβλημα κατά την κίνηση της παλέτας. Για παράδειγμα, η διαφορά ύψους μεταξύ διαδοχικών ταινιών πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει την απρόσκοπτη κίνηση του κουτιού από την υψηλότερη ταινία προς την χαμηλότερη.



Εικόνα 6-6. Υποσύστημα σχεδιασμού μεταφορικών ταινιών

- Περιβάλλον (*environment*)

Ο χρήστης μπορεί να προσθέσει και να αφαιρέσει κάποια στοιχεία του περιβάλλοντος για την δημιουργία περισσότερης αληθοφάνειας στον εικονικό κόσμο (Εικόνα 6-7).

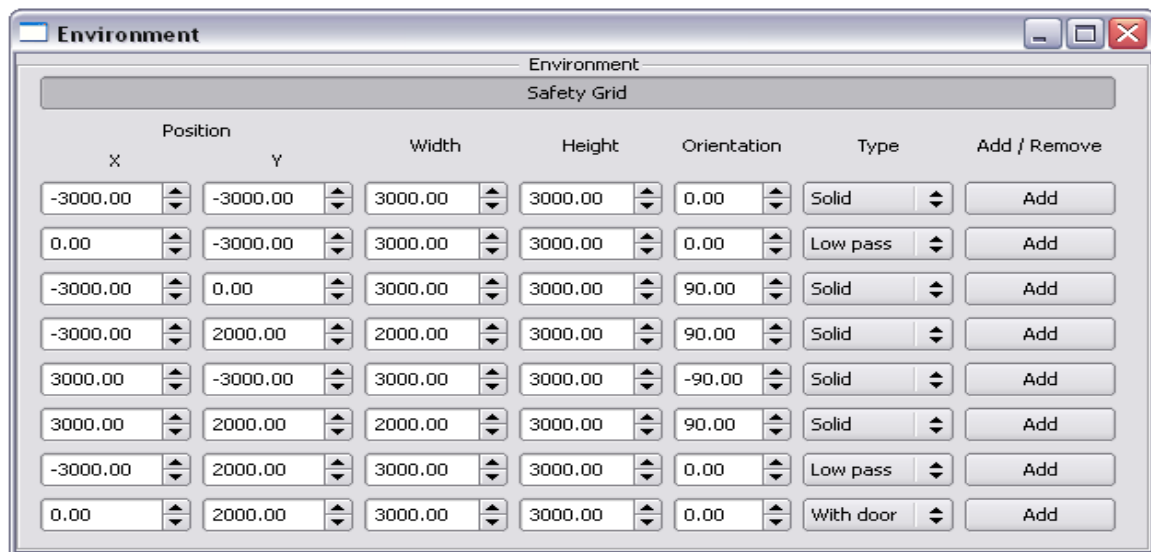


Εικόνα 6-7. Υποσύστημα σχεδιασμού περιβάλλοντος

Τα στοιχεία αυτά αφορούν την δημιουργία ενός χώρου (*room*) με δάπεδο (*floor*), οροφή (*ceiling*) και τέσσερις τοίχους (*walls*) στους τέσσερις προσανατολισμούς (βοράς, νότος, ανατολή, δύση). Το δωμάτιο είναι παραμετρικό ως προς το μέγεθός του (μήκος/πλάτος/ύψος), ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία ορίζονται με βάση τις διαστάσεις του

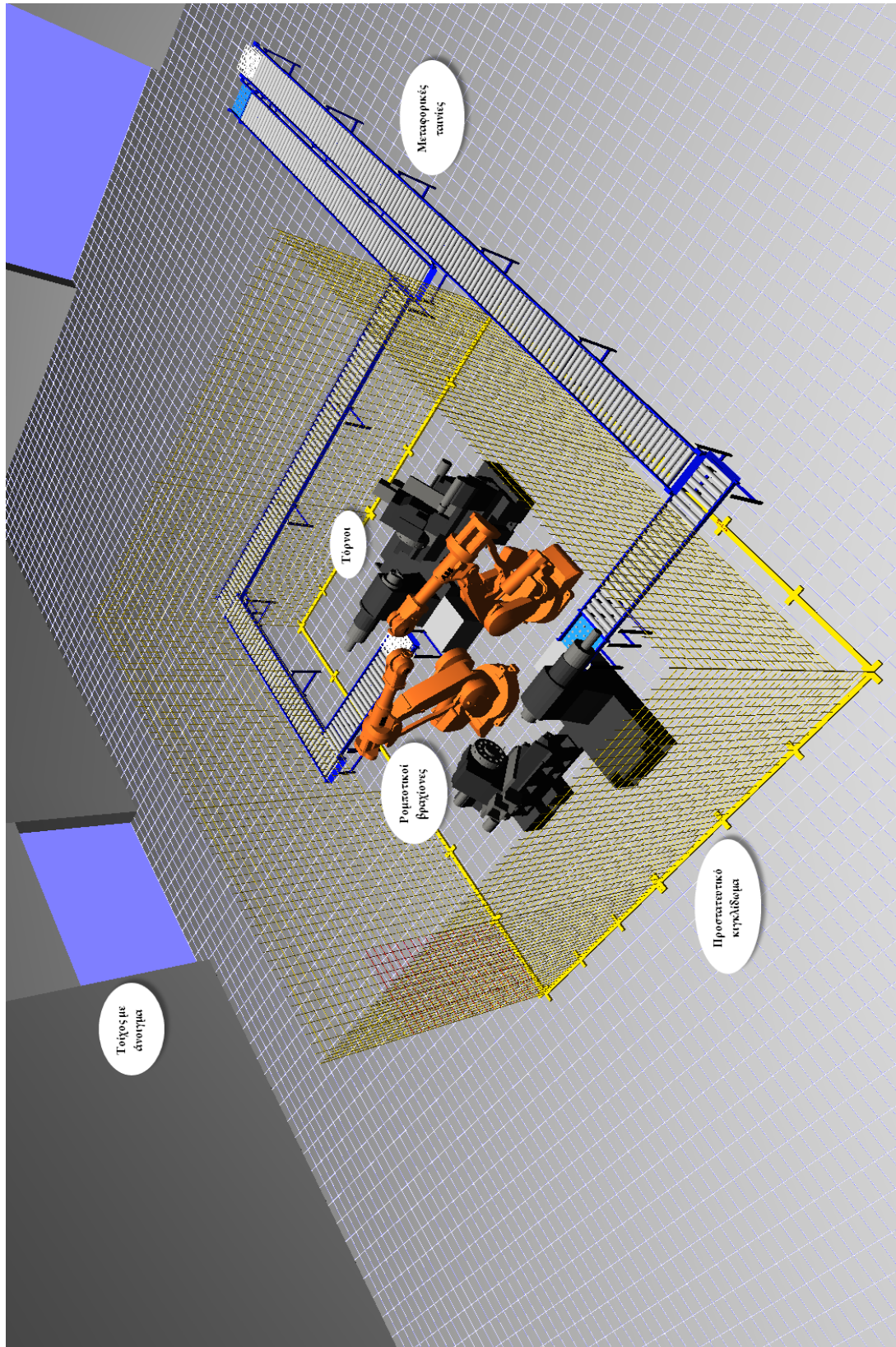
δωματίου: το δάπεδο και η οροφή έχουν το μήκος και το πλάτος του δωματίου, η οροφή τοποθετείται στο ύψος του δωματίου, ενώ κάθε τοίχος έχει το μήκος (ή το πλάτος, ανάλογα σε ποιον προσανατολισμό ανήκει) και το ύψος του δωματίου. Σε κάθε τοίχο μπορεί να τοποθετηθεί ένα άνοιγμα (ύψους A, πλάτους B, με κέντρο C), υποδηλώνοντας την ύπαρξη κάποιας πόρτας.

Επιπροσθέτως, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να τοποθετήσει προστατευτικό κιγκλίδωμα (*safety grid*) γύρω από το κελί, αποτελούμενο από οκτώ αντικείμενα (Εικόνα 6-8). Το κάθε αντικείμενο μπορεί να είναι είτε πλήρες (*Solid*), είτε με ένα χαμηλό άνοιγμα (*Low pass*) για να μπορούν να περνάνε μεταφορικές ταινίες, είτε να διαθέτει πόρτα (*With door*). Τα προστατευτικά κιγκλιδώματα είναι πλήρως παραμετρικά τόσο ως προς τις διαστάσεις των (πλάτος/ύψος) όσο και ως προς την θέση τους και τον προσανατολισμό τους.



Εικόνα 6-8. Υποσύστημα σχεδιασμού προστατευτικού κιγκλιδώματος

Στην Εικόνα 6-9 φαίνεται ένα ολοκληρωμένο εικονικό κύτταρο κατεργασιών που προέκυψε μέσω των υποσυστημάτων σχεδιασμού. Το κύτταρο περιέχει δύο ρομποτικούς βραχίονες, δύο τόνους CNC με τις αντίστοιχες θέσεις WIP, οκτώ μεταφορικές ταινίες, και οκτώ τμήματα προστατευτικού κιγκλιδώματος. Όλα τα αντικείμενα είναι τοποθετημένα εντός δωματίου με δάπεδο, οροφή, και τοίχους σε όλες τις πλευρές.



Εικόνα 6-9. Συνολική εικόνα κυττάρου κατεργασιών

6.3.3 Υποσύστημα ελέγχου (*control module*)

Το υποσύστημα ελέγχου αφορά στις δυνατότητες που δίνονται στο χειριστή για τον χειρισμό των αντικειμένων που έχουν εισαχθεί στο εικονικό κελί. Αναλυτικά:

6.3.3.1 Ρομποτικοί βραχίονες (*robot*)

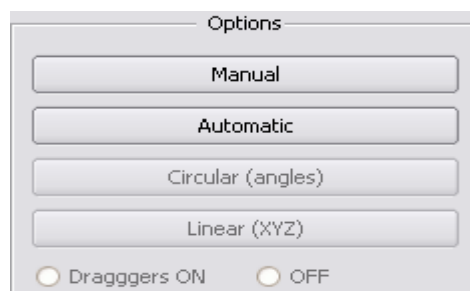
Το παράθυρο ελέγχου του κάθε ρομποτικού βραχίονα προσφέρει έναν αριθμό επιλογών ως προς την χρήση του βραχίονα. Το παράθυρο χωρίζεται σε τέσσερα τμήματα:

- το τμήμα *operation*, το οποίο περιέχει «οθόνες LCD» με τα δεδομένα που αφορούν στον βραχίονα σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή (Εικόνα 6-10),
- το τμήμα *options*, το οποίο περιέχει τις επιλογές του χρήστη ως προς την κίνηση του βραχίονα
- το τμήμα *controls*, το οποίο περιέχει τα στοιχεία που επιτρέπουν τις επιθυμητές μεταβολές στην θέση και τον προσανατολισμό του άκρου του βραχίονα. Το παράθυρο προσφέρει διαφορετικές δυνατότητες ανάλογα με τις επιλογές που κάνει ο χρήστης στο δεξί τμήμα.
- το τμήμα *task options*, το οποίο περιέχει στοιχεία σχετικά με την αποθήκευση θέσεων απαραίτητων για την εκτέλεση συγκεκριμένων εργασιών (*tasks*).



Εικόνα 6-10. Οθόνες LCD δεδομένων κίνησης / θέσης βραχίονα (*operation*)

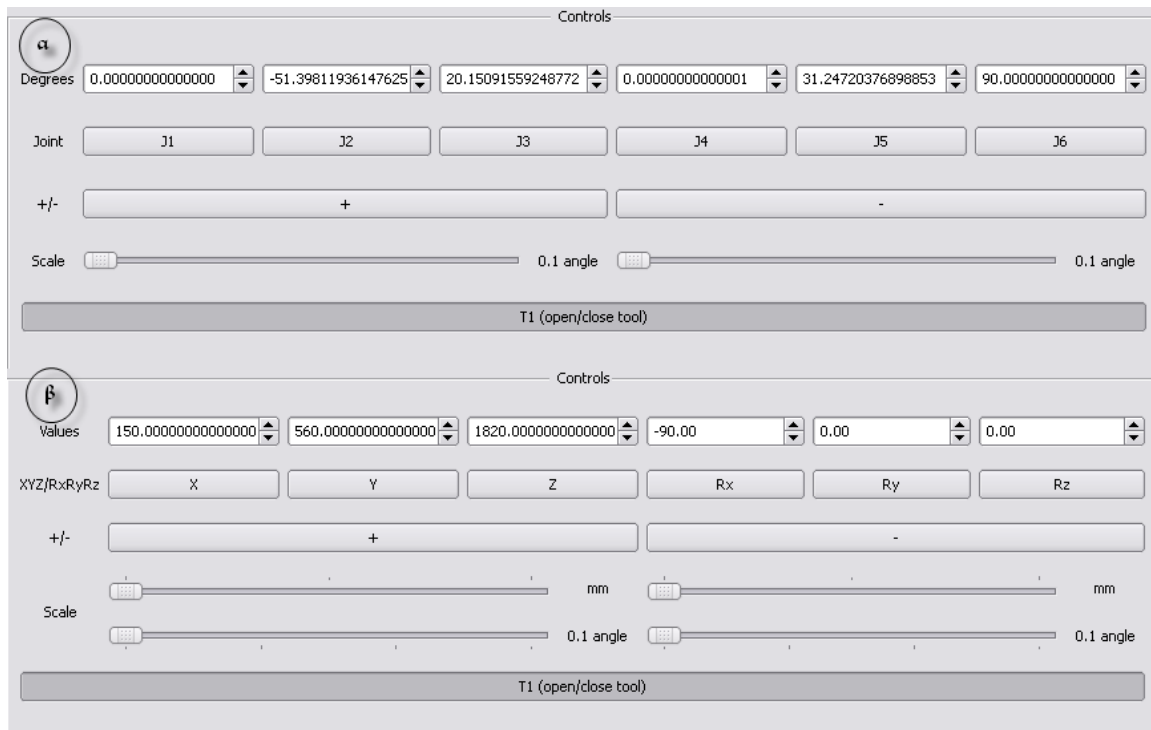
Οι βασικές επιλογές ως προς την κίνηση του βραχίονα (τμήμα *options*) αφορούν στο είδος του ελέγχου (χειροκίνητα/αυτόματα) και στο είδος της κίνησης (κυκλική/γραμμική) (Εικόνα 6-11).



Εικόνα 6-11. Βασικές επιλογές

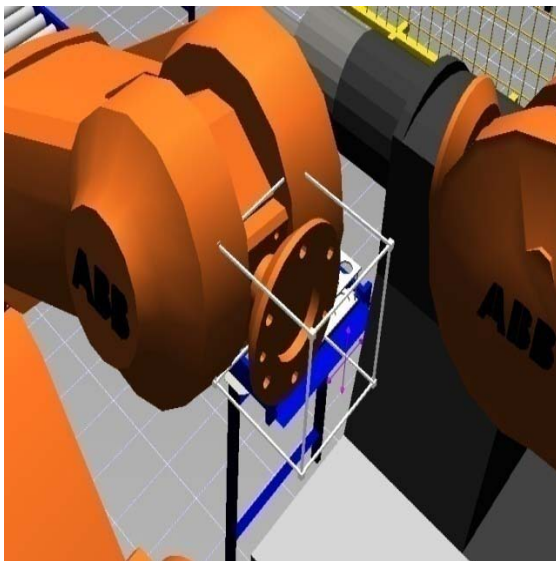
- Χειροκίνητη κίνηση (*manual*)

Στην περίπτωση χειροκίνητης κίνησης, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει ένα επιθυμεί να μεταβάλλει τις τιμές των γωνιών των αρθρώσεων (κυκλική κίνηση – Εικόνα 6-12 – α) ή τις τιμές XYZ και προσανατολισμού του άκρου (γραμμική κίνηση – Εικόνα 6-12 – β), μέσω του τμήματος *controls*. Αναλόγως των επιλογών του, προκύπτει και διαφορετικό παράθυρο στο αντίστοιχο τμήμα, στο οποίο ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει την θέση και τον προσανατολισμό του βραχίονα βηματικά, επιλέγοντας κάθε φορά και το επιθυμητό μέγεθος του βήματος. Η χειροκίνητη λειτουργία προσομοιώνει την χρήση ενός βραχίονα μέσω χειριστηρίου εκπαίδευσης (*teaching pendant*). Ανάλογα με τις επιλογές του χρήστη, ενεργοποιείται και ο αντίστοιχος αλγόριθμος κίνησης (ευθεία / αντίστροφη κινηματική).



Εικόνα 6-12. Χειροκίνητη λειτουργία βραχίονα

Εάν ο χρήστης προσπαθήσει να εισάγει τιμή για μία γωνία εκτός ορίων του βραχίονα ή ένα σημείο/προσανατολισμό που ο βραχίονας δεν μπορεί να εκτελέσει, το σύστημα επεμβαίνει και ακυρώνει την πρόθεση του χρήστη, σταματώντας τον βραχίονα.



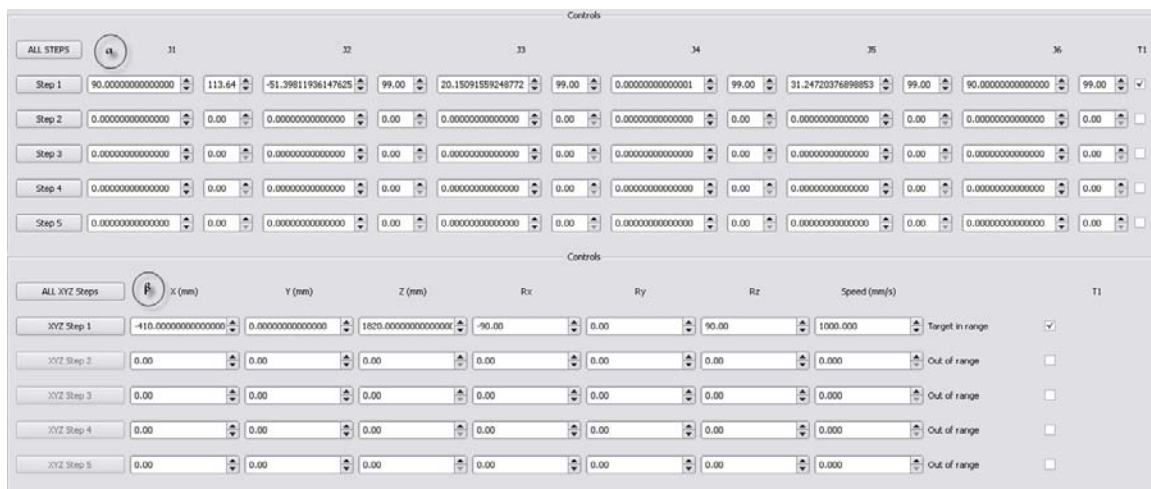
Εικόνα 6-13. Dragger ρομποτικού βραχίονα

Μια επιπρόσθετη δυνατότητα την οποία έχει ο χρήστης είναι η ενεργοποίηση (και χρήση) αντικειμένων εντός του εικονικού χώρου με την ονομασία «*draggers*» (Εικόνα 6-13). Τα συγκεκριμένα αντικείμενα επιτρέπουν στον χρήστη να σύρει ($\approx drag$) το άκρο του βραχίονα, καθώς και να το περιστρέψει. Η υλοποίηση αυτών των αντικειμένων είναι σημαντική εφόσον ο χρήστης είναι εμπυθισμένος στο εικονικό περιβάλλον και δεν έχει εύκολα πρόσβαση στα παράθυρα ελέγχου της εφαρμογής.

Μία επιπλέον λειτουργία που μπορεί να εκτελέσει ο χρήστης αφορά στο κλείσιμο και το άνοιγμα της αρπάγης-εργαλείου. Η λειτουργία αυτή εκτελείται μέσω του κομβίου T1. Σε κάθε κίνηση του βραχίονα, εκτελείται έλεγχος μέσω της συνάρτησης *chkrick()* σχετικά με την θέση του βραχίονα σε σχέση με την μπάρα του υλικού, κατά τρόπο τέτοιο ώστε να προσδιορίζεται εάν ο βραχίονας θα μεταφέρει ή όχι την μπάρα (εάν η αρπάγη κλείσει) μέσω της συνάρτησης *picking()*. Εάν μπορεί να μεταφέρει την μπάρα, τότε η αρπάγη κλείνει στην διάμετρο του άκρου της μπάρας, ενώ σε αντίθετη περίπτωση κλείνει τελείως.

- Αυτόματη κίνηση (*automatic*)

Στην περίπτωση αυτόματης κίνησης, ο χρήστης έχει την δυνατότητα, στην πιλοτική υλοποίηση, να εισάγει δεδομένα για πέντε θέσεις/προσανατολισμούς. Όπως και στην περίπτωση της χειροκίνητης επιλογής, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει εάν επιθυμεί να εισάγει δεδομένα για την θέση-στόχο μέσω γωνιών των αρθρώσεων (Εικόνα 6-14 – α) ή μέσω τιμών XYZ και προσανατολισμού για το άκρο (Εικόνα 6-14 – β). Στην συνέχεια, μπορεί είτε να ενεργοποιήσει κάποια από αυτές τις θέσεις (*Step1÷Step5*) είτε και τις πέντε σειριακά (*All Steps*). Και στις δύο περιπτώσεις, ο βραχίονας εκτελεί κίνηση από την αρχική του θέση προς την επιθυμητή, κάνοντας χρήση και της ταχύτητας που έχει εισαχθεί από τον χρήστη, με βάση τους αλγόριθμους του Κεφαλαίου 3.

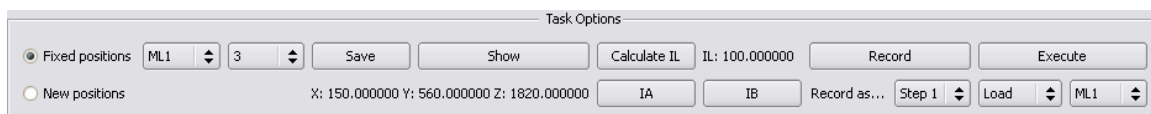


Εικόνα 6-14. Αυτόματη λειτουργία βραχίονα

Στην περίπτωση που η θέση-στόχος δεν είναι δυνατό να προσεγγιστεί από το ρομποτικό βραχίονα, η χρήστης ειδοποιείται σχετικώς και η κίνηση δεν εκτελείται. Επίσης, στο τέλος κάθε βήματος, ελέγχεται η ένδειξη της αρπάγης του βραχίονα και εφόσον υπάρχει ανακολουθία μεταξύ της κατάστασης της αρπάγης (π.χ. ανοιχτή) και της ένδειξης του βήματος (π.χ. αρπάγη κλειστή), τότε η εκτελείται κίνηση της αρπάγης. Κατά αυτό τον τρόπο, δίδεται περαιτέρω δυνατότητα προγραμματισμού των κινήσεων του βραχίονα, ώστε να μπορεί στο τέλος κάθε βήματος να ανοίγει ή να κλείνει η αρπάγη.

- Επιλογές εργασιών (*task options*)

Το τμήμα διαθέτει μια σειρά επιλογών σχετικά με τον ορισμό και την εκτέλεση ενεργειών.



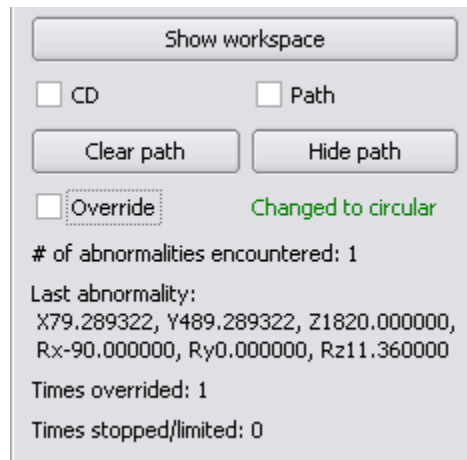
Εικόνα 6-15. Επιλογές εργασιών

Καταρχήν, δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να αποθηκεύσει θέσεις, είτε προκαθορισμένες (*fixed positions*) είτε νέες (*new positions*), που απαιτούνται για την εκτέλεση εργασιών. Εφόσον για μια εργασία έχουν αποθηκευθεί οι απαιτούμενες θέσεις, η εργασία μπορεί να εκτελεστεί είτε μέσω της επιλογής *execute* είτε μέσω της προσομοίωσης του κυττάρου (*simulation*). Επιπρόσθετα, μέσω της επιλογής *record*, είναι δυνατή η αποθήκευση μιας θέσης και η χρησιμοποίησής της μέσω κάπου βήματος (*step*) της αυτόματης λειτουργίας. Παράλληλα, υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού του μήκους της μπάρας υλικού, αποθηκεύοντας τα δύο άκρα της (*IA & IB*).

- Επιπλέον επιλογές

Ανεξαρτήτως των επιλογών του χρήστη σχετικά με τον τρόπο χειρισμού του βραχίονα, υπάρχουν στο τμήμα των επιλογών (*options*) επιπλέον στοιχεία (*CD*, *Path*, *Workspace*, *Override*) τα οποία ο χρήστης μπορεί να επιλέξει εάν επιθυμεί να χρησιμοποιηθούν ή όχι κατά τη διάρκεια της οποιασδήποτε κίνησης. Τα στοιχεία αυτά αφορούν:

- στον έλεγχο συγκρούσεων (*CD*), μέσω της αντίστοιχης συνάρτησης (*collision()*),
- στην γραφική απεικόνιση των σημείων της διαδρομής του βραχίονα (*Path*), μέσω της αντίστοιχης συνάρτησης (*pathing()*), και των σχετικών επιλογών (*hide/clear*),
- στην εμφάνιση του χώρου εργασίας (*Show workspace*) του βραχίονα, δηλαδή στον χώρο που μπορεί να κινηθεί ο καρπός του βραχίονα,
- στην παράκαμψη (*override*) προβληματικών σημείων και την εμφάνιση αυτών.¹



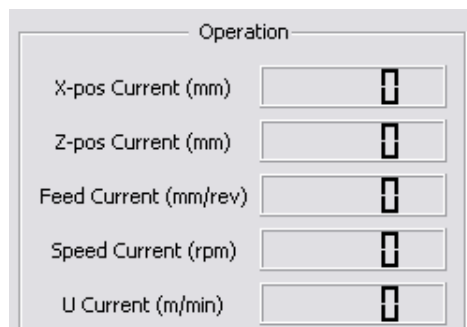
Εικόνα 6-16. Επιπλέον επιλογές ρομποτικού βραχίονα

6.3.3.2 Τόρνοι (*lathe*)

Το παράθυρο ελέγχου του κάθε τόρνου προσφέρει έναν αριθμό επιλογών ως προς την χρήση του τόρνου. Το παράθυρο χωρίζεται σε δύο τμήματα:

- το άνω τμήμα, το οποίο περιέχει «οθόνες *LCD*» με τα δεδομένα που αφορούν στον τόρνο σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή (Εικόνα 6-17),
- το κάτω τμήμα, το οποίο περιέχει τις επιλογές του χρήστη ως προς την χρήση του τόρνου.

¹ Εάν κατά την εκτέλεση γραμμικής κίνησης στην αυτόματη λειτουργία βρεθεί σημείο από το οποίο για οποιοδήποτε λόγο δεν μπορεί να περάσει ο βραχίονας, τότε με ενεργοποιημένη την λειτουργία *override*, συνεχίζεται η κίνηση κυκλικά προς το σημείο στόχο. Σε αντίθετη περίπτωση, η κίνηση σταματά.



Εικόνα 6-17. LCD λειτουργίας τóρνου CNC

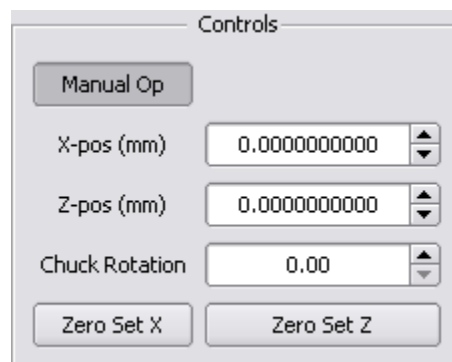
Οι επιλογές σχετικά με τον τρόπο χρήσης του τóρνου είναι δύο:

- Χειροκίνητη λειτουργία (*manual operation*)

Στην περίπτωση χειροκίνητης λειτουργία (Εικόνα 6-18), ο χρήστης δύναται, στην πιλοτική εφαρμογή να:

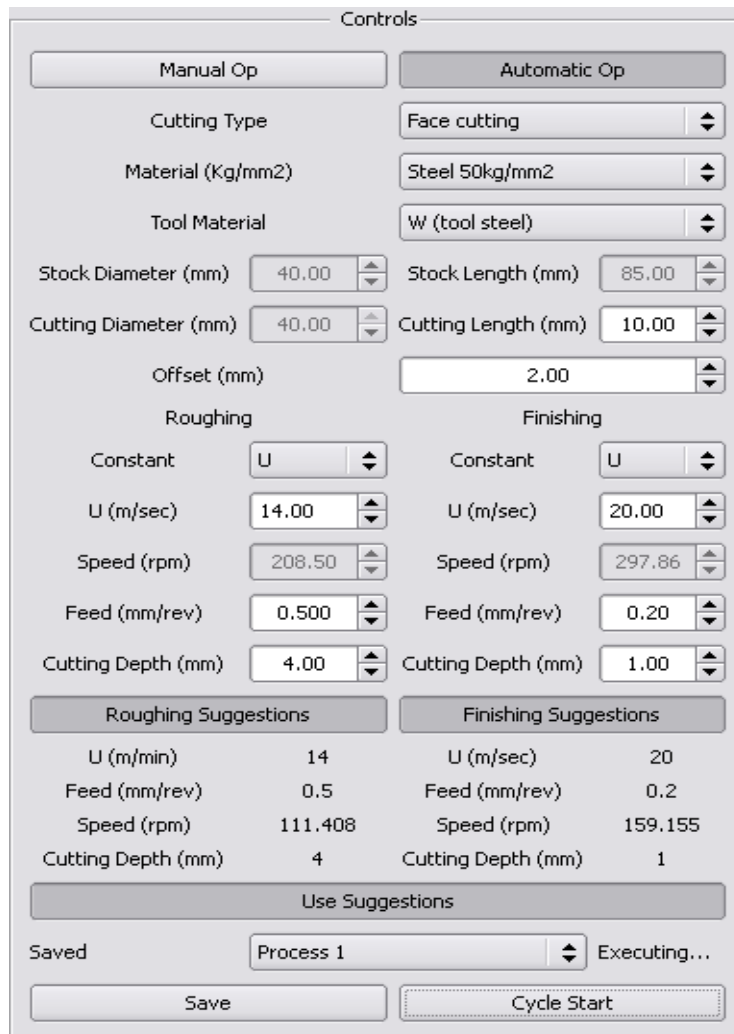
1. Μετακινήσει το εργαλείο του τóρνου στους δύο άξονες κίνησης (κατά X και κατά Z).
2. Περιστρέψει βηματικά το τσoκ του τóρνου.

Εάν ο χρήστης μετακινήσει το κοπτικό εργαλείο κατά τρόπο τέτοιο ώστε να έρθει σε επαφή με την μπάρα του υλικού, τότε εμφανίζεται κατάλληλη ένδειξη που τον πληροφορεί για το γεγονός, βοηθώντας με αυτό τον τρόπο την εύρεση του σημείου αναφοράς. Μέσω των λειτουργιών *zero set X/Z*, οι οποίες συνδέονται άμεσα και με τα στοιχεία του αρχικού τεμαχίου (διάμετρο και μήκος), ορίζεται το σημείο αναφοράς και εν συνεχεία δύναται πλέον να χρησιμοποιήσει τον τóρνο στην αυτόματη λειτουργία.



Εικόνα 6-18. Χειροκίνητη λειτουργία τóρνου CNC

- Αυτόματη λειτουργία (*automatic operation*)



Εικόνα 6-19. Αυτόματη λειτουργία τόννου CNC

Στην περίπτωση της αυτόματης λειτουργίας, ο χρήστης δύναται να κάνει μία σειρά επιλογών σχετικές με την επιθυμητή κοπή (Εικόνα). Οι αρχικές επιλογές αφορούν στο είδος κοπής που επιθυμεί, είτε δηλαδή κοπή προσώπου (*face cutting*) είτε διαμήκη κοπής (*outside diameter cutting*). Στην πρώτη περίπτωση, πρέπει να επιλέξει το μήκος της κοπής (*cutting length*), ενώ στην δεύτερη επιπροσθέτως την διάμετρο (*cutting diameter*). Στην συνέχεια, εφόσον επιθυμεί η κοπή να γίνει σε δύο φάσεις (εκχόνδριση / αποπεράτωση), πρέπει να επιλέξει το περιθώριο (*offset*) που θα αφήσει η πρώτη φάση.

Οι κύριες επιλογές της κοπής αφορούν στην ταχύτητα κοπής (u), στην ταχύτητα περιστροφής (n), στην πρόωση (f), και στο βάθος κοπής (*cutting depth*). Δεδομένου ότι η ταχύτητα κοπής και η ταχύτητα περιστροφής συνδέονται με την διάμετρο κοπής μέσω του τύπου:

$$u = \frac{\pi * D * n}{1000}$$

ο χρήστης πρέπει να επιλέξει ποιιά από τις δύο ταχύτητες επιθυμεί να παραμείνει σταθερή, όπως συμβαίνει και στον προγραμματισμό CNC των κέντρων τόννευσης.

Συμβουλευτικά, το σύστημα παρέχει συνιστώμενες τιμές για τα παραπάνω, τόσο για περιπτώσεις εκχόνδρισης (*roughing*) όσο και αποπεράτωσης (*finishing*) με βάση το υλικό του τεμαχίου, το υλικό του εργαλείου, και την διάμετρο του τεμαχίου. Η χρήση ή μη των προτεινόμενων επιλογών επαφίεται πλήρως στον χρήστη. Επιπροσθέτως, μέσω των αλγόριθμων *calcTime()* και *calcTimeF()* το σύστημα παρέχει εκτίμηση του συνολικού χρόνου κοπής, αναλόγως των επιλογών του χρήστη.

Εφόσον έχουν γίνει όλες οι επιλογές, ο χρήστης οφείλει να αποθηκεύσει την κατεργασία και είτε να την εκτελέσει άμεσα (*cycle start*), είτε μέσω της προσομοίωσης του κυττάρου. Η κοπή εκτελείται σε τρία βήματα:

- i) Το εργαλείο απομακρύνεται στην θέση ασφαλείας (*SP*),
- ii) το εργαλείο πηγαίνει στην θέση μηδέν,
- iii) το εργαλείο εκτελεί την κοπή,
- iv) το εργαλείο επιστρέφει στην θέση ασφαλείας.

Τα παραπάνω εκτελούνται μέσω υλοποίησης των αλγόριθμων του Κεφαλαίου 3 σχετικά με τη κινηματική του τόννου. Σχετικά με την εικονοποίηση της κοπής, τον τρόπο αποβολής του υλικού δηλαδή, ακολουθείται ο αλγόριθμος *cutting()*, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.

Κατά την διάρκεια της κοπής παρουσιάζεται ο υπολειπόμενος χρόνος για την εκτέλεσή της, καθώς και όλα τα στοιχεία που αφορούν τόσο στην θέση του κοπτικού εργαλείου, όσο και στις συνθήκες της κοπής. Ανά πάσα στιγμή, ο χρήστης μπορεί να (Εικόνα 6-20):

- i) Μεταβάλλει ποσοστιαία την ταχύτητα περιστροφής ή την πρόωση μέσω διαδικασιών *override*.
- ii) Σταματήσει την πρόωση.
- iii) Τερματίσει απότομα την κοπή (*emergency stop*).



Εικόνα 6-20. Στοιχεία κατά την εκτέλεση κοπής

6.3.3.3 Μεταφορικές ταινίες (conveyors)



Εικόνα 6-21. Λειτουργία μεταφορικών ταινιών

Ο χρήστης, μέσω του παραθύρου ελέγχου των μεταφορικών ταινιών δύναται να ορίσει την ταχύτητα κίνησης καθενός εκ των οκτώ ταινιών, την φορά κίνησης (*forward/reverse*), και την έναρξη και λήξη της κίνησης (Εικόνα 6-21). Εφόσον στην ταινία βρίσκεται η παλέτα υλικού, μετακινείται λόγω της κίνησης της μεταφορικής ταινίας, αναλόγως των δεδομένων που έχει δώσει ο χρήστης για την κίνηση.

Προφανώς, για τις ταινίες που έχουν επιλεγεί ως ενδιάμεσοι σταθμοί (*intersection*), καθώς και για ταινίες που δεν έχουν προστεθεί στον εικονικό κόσμο, δεν προσφέρονται επιλογές κίνησης.

6.3.4 Υποσύστημα προσομοίωσης (*simulation module*)

Επιπρόσθετα, στην αυτόματη λειτουργία, ο χρήστης έχει στην διάθεσή του την επιλογή προσομοίωσης (*simulation*), η οποία προσφέρει περαιτέρω δυνατότητες που αφορούν σε συγκεκριμένες εργασίες εντός του κυττάρου. Οι επιλογές αυτές αφορούν στην φόρτωση/εκφόρτωση ενός αντικειμένου στην/από τις διάφορες υφιστάμενες θέσεις του κυττάρου (είσοδος/έξοδος, τórνοι, θέσεις αναμονής), αλλά και στην εκτέλεση κοπών από τους τórνους.

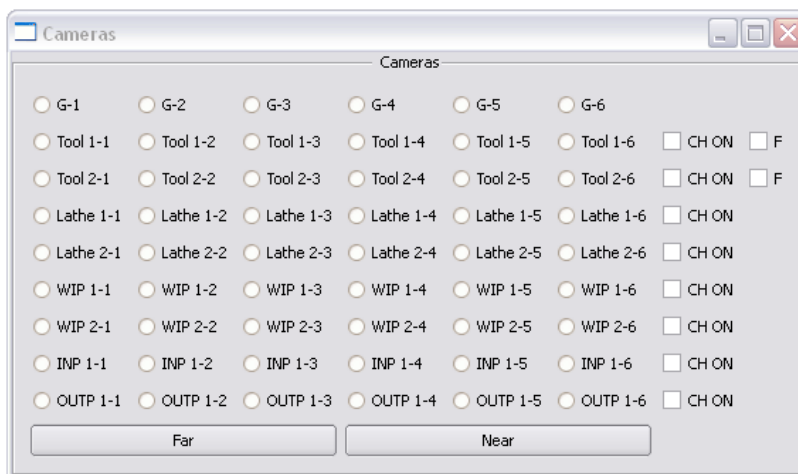
Η εκτέλεση των παραπάνω ελέγχεται από αλγόριθμο βασισμένο στα δίκτυα *Petri* του Κεφαλαίου 5. Για παράδειγμα, εάν επιλεγεί η φόρτωση του τórνου, η συνάρτηση *chkstate()* ελέγχει αν πληρούνται όλες οι προϋποθέσεις για την εκτέλεσή της, αν δηλαδή υπάρχουν όλα τα απαραίτητα κουπόνια στις θέσεις του δικτύου *Petri* για την ενεργοποίηση της μετάβασης.

6.3.5 Κάμερες

Για την διευκόλυνση του χρήστη, η εφαρμογή διαθέτει μια σειρά καμερών σε σημεία ενδιαφέροντος, οι οποίες ενεργοποιούνται μέσω του κεντρικού παραθύρου επιλογών του

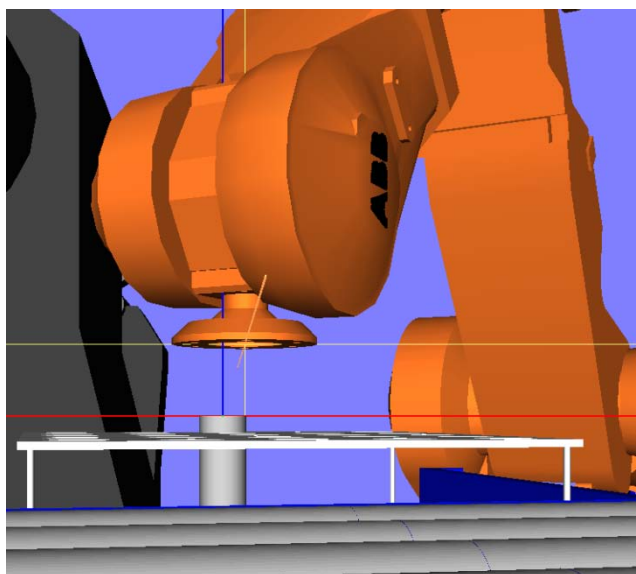
χρήστη (Εικόνα 6-22). Ο χρήστης έχει στην διάθεση του έξι κάμερες γενικού προφίλ, τοποθετημένες στον χώρο γύρω από το εικονικό κύτταρο κατεργασιών. Επιπροσθέτως, έχει στην διάθεσή του έξι κάμερες για κάθε μία από τις κύριες θέσεις του εικονικού κόσμου (τσωκ τόνρων, αποθήκες εισόδου-εξόδου-ενδιάμεσες), καθώς και για τα άκρα των ρομποτικών βραχιόνων, οι οποίες είναι τοποθετημένες στις έξι πλευρές ενός υποθετικού τετραγώνου γύρω από το υπό εξέταση αντικείμενο.

Λόγω της φύσης των αντικειμένων με τα οποία είναι συνδεδεμένες οι κάμερες, κάποιες από αυτές είναι σταθερές και κάποιες δυναμικά. Για παράδειγμα, οι κάμερες που είναι συνδεδεμένες στα άκρα των ρομποτικών βραχιόνων μετακινούνται μαζί με τους βραχίονες, ενώ οι κάμερες που είναι συνδεδεμένες με την θέση εισόδου αντικειμένων παραμένουν σταθερές.



Εικόνα 6-22. Μενού χρήσης καμερών

Η ύπαρξη των καμερών ενισχύει την αντίληψη του χρήστη για τα αντικείμενα και τον υποβοηθά στην εκτέλεση εργασιών. Για παράδειγμα, έστω ότι ο χρήστης προσπαθεί να πλησιάσει με το άκρο του ρομποτικού βραχίονα το αντικείμενο στην είσοδο του κελιού ώστε να το πάρει. Στην αρχή θα χρησιμοποιήσει κάποια γενική κάμερα για να πλησιάσει το αντικείμενο, στην συνέχεια θα χρησιμοποιήσει την κάμερα που είναι συνδεδεμένη με το άκρο του βραχίονα για να προσεγγίσει καλύτερα το αντικείμενο, ενώ όταν θα είναι αρκετά κοντά θα χρησιμοποιήσει την κάμερα που αφορά στην θέση εισόδου για να ευθυγραμμίσει το άκρο του βραχίονα με το τεμάχιο. Για να ενισχυθεί ακόμα περισσότερο η αντίληψη του χρήστη, διατίθεται σταυρόνημα (*crosshair*) για κάθε μία από τις κάμερες (Εικόνα 6-23). Σε συνδυασμό με την δυνατότητα να πλησιάσει ή να απομακρυνθεί (*near/far*), οι εργασίες που απαιτούν ευθυγράμμιση γίνονται σαφώς ευκολότερες.



Εικόνα 6-23. Σταυρόνημα

6.4 Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στην πιλοτική υλοποίηση της εφαρμογής αφορά στον τρόπο αλληλεπίδρασης με τον χρήστη. Υπό αυτή την έννοια, δεν ξεφεύγει από τα στενά πλαίσια χαρακτηρισμού του εξοπλισμού ενός υπολογιστικού συστήματος με βάση εάν εισάγονται ή εξάγονται δεδομένα (*input / output*). Ως *output* θεωρείται οποιοσδήποτε τρόπος με τον οποίο ο χρήστης αντιλαμβάνεται τον εικονικό κόσμο, και προκειμένη περίπτωση, αυτό συμβαίνει μέσω της όρασης. Ως *input* θεωρείται οποιοσδήποτε τρόπος με τον οποίο ο χρήστης εισάγει δεδομένα στον εικονικό κόσμο σε ένα υπολογιστικό σύστημα, κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται ο συνδυασμός πληκτρολογίου και ποντικιού.

Κατά την διαδικασία δημιουργίας και εξέλιξης της εφαρμογής, χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί τρόποι ένταξης του χρήστη εντός του εικονικού κόσμου. Στην πρώτη περίπτωση (*desktop*), χρησιμοποιήθηκε ένας υπολογιστής συνδεδεμένος με δύο οθόνες στην μία οθόνη προβάλλεται ο εικονικός κόσμος, ενώ στην άλλη οι επιλογές που κάνει ο χρήστης μέσω των υποσυστημάτων. Στην δεύτερη περίπτωση (*inside*), χρησιμοποιήθηκε ένας υπολογιστής συνδεδεμένος με μία οθόνη και με ένα προβολικό σύστημα επί προσώπου (ΠΣΠ) (*Head Mounted Display, HMD*). η οθόνη χρησιμοποιήθηκε για να προβάλλει τις επιλογές του χρήστη, ενώ το HMD για την προβολή του εικονικού κόσμου. Το ΠΣΠ που χρησιμοποιήθηκε (Πίνακας 6-2) διαθέτει δύο οθόνες τύπου *OLED* με ανάλυση *SVGA* (800x600), ανίχνευση κίνησης κεφαλής τριών βαθμών ελευθερίας, καθώς και υποστήριξη ήχου (μικρόφωνο για είσοδο, στερεοφωνικά ακουστικά για έξοδο).

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΣΠ (eMagin Z800 3DVISOR)	
Αντίστοιχο μέγεθος θέασης	Οθόνη διαγωνίου 105 ιντσών σε απόσταση 12 ποδιών
Εύρος θέασης	≈40°
Ανίχνευση κεφαλής	360° οριζόντια, >60° κάθετα
Λόγος πλευρών	4:3
Ανάλυση	800x600 ανά οθόνη (1.44MP)
Αριθμός χρωμάτων	24-bit (>16.7m)
Φωτεινότητα	>50cd/m ²
Αντίθεση	>200:1
Στερεοσκοπική προβολή	Ναι
Μέγεθος ελεγκτή	6.1''x3.45''x1.15'' (ΜxΓxΒ)
Βάρος	<227g
Κατανάλωση	<1.25W
Παροχή ρεύματος	USB ή 5VDC
Είσοδος σήματος	RGB D-sub
Έξοδος ήχου	Στερεοφωνικά ακουστικά
Είσοδος ήχου	Ενσωματωμένο μικρόφωνο



Πίνακας 6-2. Χαρακτηριστικά ΠΣΠ

Στην τρίτη περίπτωση (*large*), χρησιμοποιήθηκε ένας υπολογιστής συνδεδεμένος με μία οθόνη και έναν προβολέα ο προβολέας χρησιμοποιήθηκε για την προβολή του εικονικού κόσμου, ενώ η οθόνη για τις επιλογές του χρήστη.

Για την εισαγωγή δεδομένων στον εικονικό κόσμο, υφίσταται ένας καταρχήν διαχωρισμός που αφορά στα δεδομένα που εισάγει ο χρήστης μέσω του GUI και στα δεδομένα που εισάγει ο χρήστης εντός του εικονικού κόσμου. Για την πρώτη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε ο συνδυασμός πληκτρολογίου και ποντικιού, ενώ για την δεύτερη υπήρξαν διαφορετικές προσεγγίσεις αναλόγως του συστήματος προβολής που χρησιμοποιήθηκε, με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης λύσης ανά περίπτωση.

Αναλυτικά, χρησιμοποιήθηκαν:

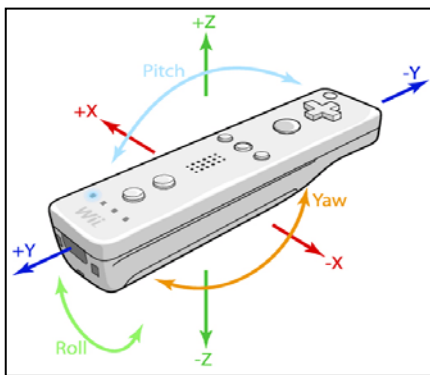
- *Το σύστημα ανίχνευσης (head tracking) του ΠΣΠ Z800 3DVISOR (eMagin)*
 Το ΠΣΠ διαθέτει σύστημα ανίχνευσης και χρησιμοποιήθηκε για να μεταβάλλεται η κάμερα θέασης του χρήστη ανάλογα με την κίνηση του κεφαλιού (εφαρμογή σε λειτουργία *inside*).
- *Το γάντι (data glove) P5 (Essential Reality)*
 Το P5 (Εικόνα 6-24) είναι ένα εξωσκελετικό γάντι χαμηλού κόστους (€\$80), το οποίο διαθέτει έξι αισθητήρες κίνησης (*X, Y, Z, yaw, pitch, roll*) και πέντε αισθητήρες κάμψης (ένας για κάθε δάχτυλο). Επιπροσθέτως, διαθέτει τέσσερα προγραμματιζόμενα κουμπιά (*A, B, C, D*).



Εικόνα 6-24. Γάντι P5

Συνδέεται στον δέκτη μέσω καλωδίου (για την λειτουργία των πλήκτρων και των αισθητήρων κάμψης), ενώ η πληροφορία που αφορά στους αισθητήρες κίνησης μεταφέρεται υπέρυθρα στον δέκτη. Ο δέκτης συνδέεται στον Η/Υ μέσω θύρας USB. Το γάντι χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της κάμερας θέασης στην λειτουργία *large*.

- Το ασύρματο χειριστήριο της συσκευής *Wii* (*Nintendo*)



Το χειριστήριο *Wii Remote* (*Wiimote*) (Εικόνα 6-25) διαθέτει επιταχυνσιόμετρο στους δύο άξονες (η επιτάχυνση στον τρίτο άξονα υπολογίζεται μέσω *IR led* ή μέσω προσθήκης του εξαρτήματος *Motion Plus*), καθώς και μία σειρά από πλήκτρα (δεξιά, αριστερά, πάνω, κάτω, *A*, *-*, *+*, *Home*, *1*, *2*). Επιπροσθέτως, διαθέτει ένα απλό σύστημα ανάδρασης, καθώς και ένα ηχείο για απλούς ήχους.

Εικόνα 6-25. Nintendo Wiimote Τα πλήκτρα του χειριστηρίου χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο του ρομποτικού βραχίονα, ενώ η ανάδραση για τις περιπτώσεις όπου εντοπίζεται σύγκρουση. Επιπρόσθετα, εκπέμπεται ηχητικό σήμα όταν η αρπάγη είναι σε θέση να πιάσει το αντικείμενο. Συνδέεται με τον Η/Υ μέσω *Bluetooth*, ενώ επιτρέπεται η ταυτόχρονη σύνδεση πολλών χειριστηρίων. Συνεπώς, είναι δυνατή η χρήση της εφαρμογής από περισσότερους χρήστες (*multi-user environment*).

Τα παραπάνω είτε εντάχθηκαν στην εφαρμογή (μέσω *C++*) είτε χρησιμοποιήθηκαν μέσω της εφαρμογής *GlovePIE* (με δημιουργία κατάλληλου κώδικα), η οποία λειτουργεί ως ενδιάμεσος κρίκος μεταξύ των συσκευών και της κύριας εφαρμογής.

6.5 Επεκτασιμότητα

Ένας από τους κυριότερους άξονες στην πιλοτική υλοποίηση της εφαρμογής αφορούσε στην δυνατότητα γενικότητάς. Υπό αυτό το πρίσμα, η πιλοτική υλοποίηση αποτελεί περισσότερο μια εκδοχή/έκφανση της μεθοδολογίας, λειτουργώντας ως επιβεβαίωσή της (*proof-of-*

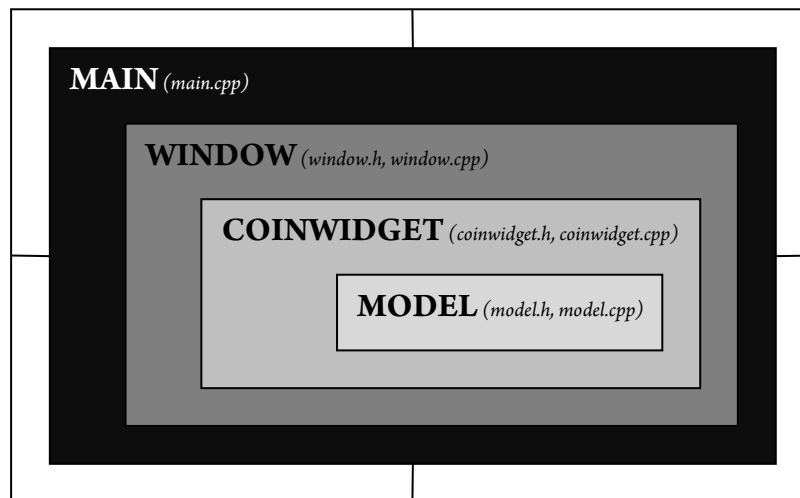
concept). Ακριβώς για αυτό το λόγο, τα περισσότερα στοιχεία της εφαρμογής οφείλουν να είναι επεκτάσιμα:

- Αντικείμενα: Εισαγωγή νέων αντικειμένων των υφιστάμενων κλάσεων (π.χ. ρομποτικός βραχίονας άλλης εταιρίας), όσο και νέων κλάσεων (π.χ. κέντρο κατεργασιών).
- Αλγόριθμοι: Επέκταση της χρήσης των αλγορίθμων σε περισσότερα αντικείμενα (π.χ. ανίχνευση συγκρούσεων μεταξύ της μπάρας υλικού και του κοπτικού εργαλείου), αλλά και εισαγωγή νέων αλγορίθμων (π.χ. ένταξη της δύναμης της βαρύτητας).
- Εννοιολογικό πλαίσια: Δημιουργία εφαρμογών με βάση τα υπόλοιπα εννοιολογικά πλαίσια (παρακολούθηση από απόσταση, έλεγχος) ή ενσωμάτωση των λειτουργιών των στην υφιστάμενη εφαρμογή.
- Εξοπλισμός: Χρήση νέου εξοπλισμού, αναλόγως του εννοιολογικού πλαισίου αλλά και του διαφορετικού συστήματος κατά περίπτωση.

7 Πιλοτική εφαρμογή

7.1 Στοιχεία προγράμματος πιλοτικής εφαρμογής

Στο Σχήμα 7-1 φαίνεται η προγραμματιστική δομή της πιλοτικής εφαρμογής



Σχήμα 7-1. Προγραμματιστική δομή

Το αρχείο *main.cpp* ορίζει την εφαρμογή (ως αντικείμενο της κλάσης *QApplication*) και χρησιμοποιείται για την έναρξη και την λήξη της εφαρμογής. Το μόνο αντικείμενο που καλεί άμεσα είναι μια πραγμάτωση (*instance*) του αντικείμενου *window*, το οποίο αποτελεί το κύριο παράθυρο της εφαρμογής.

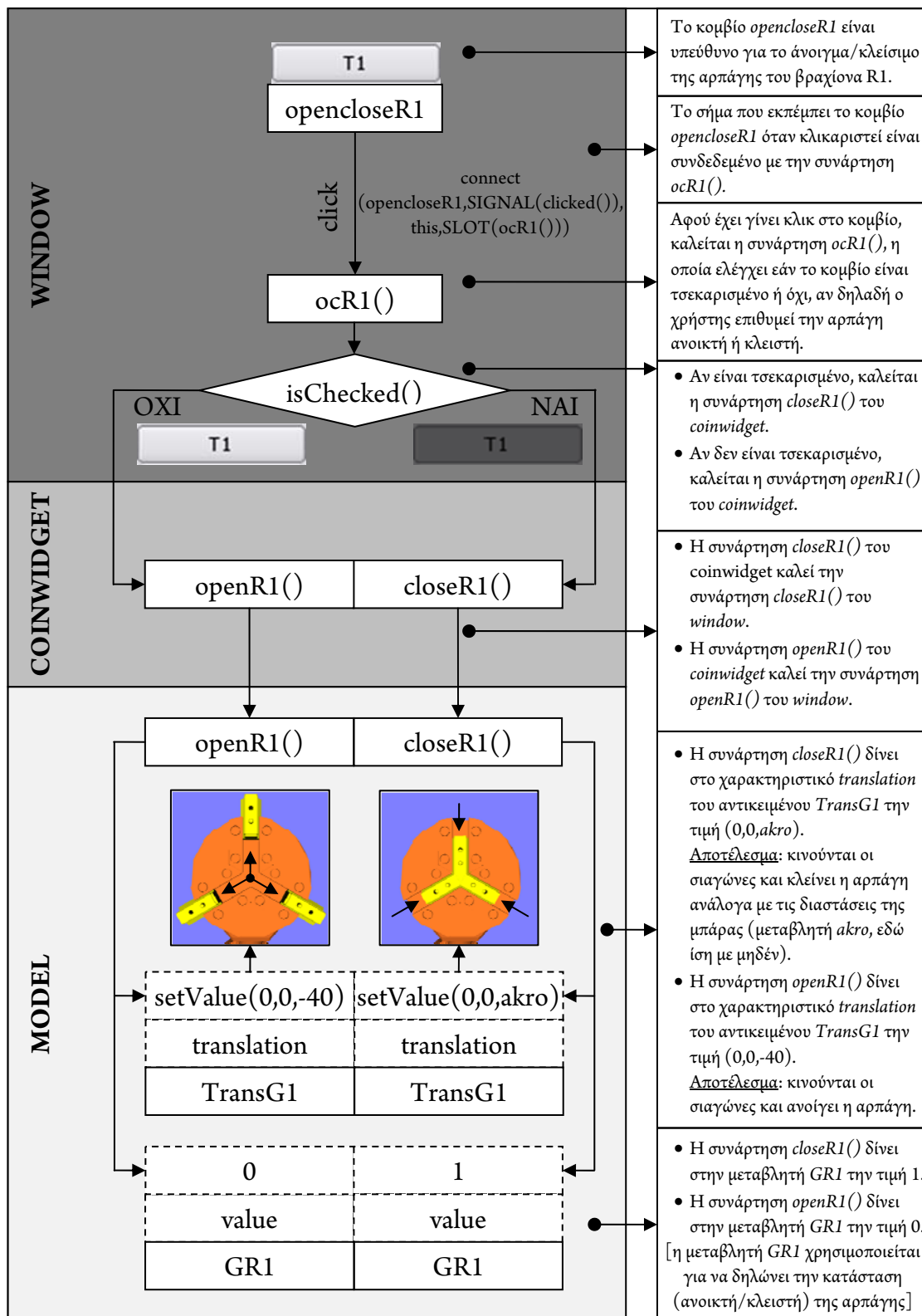
Το αντικείμενο *window* ορίζεται μέσω των αρχείων *window.h* και *window.cpp*. Το αρχείο περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που συνθέτουν την γραφική διεπιφάνεια του χρήστη (*GUI*), καθώς και τους περισσότερους αλγόριθμους του υπολογιστικού τμήματος. Η διεπιφάνεια αποτελείται από μια σειρά οπτικών δομικών μονάδων (*widgets*). Για την διάδραση με τον χρήστη, χρησιμοποιούνται κυρίως σχετικά αντικείμενα (*pushbuttons*, *checkboxes*, *spinboxes* κ.α.) που συναντώνται σε παραθυρικές εφαρμογές. Για την παρακολούθηση των αλλαγών σε αυτά τα αντικείμενα, χρησιμοποιούνται εσωτερικές συναρτήσεις, όπως η *valueChanged()*, η οποίες ενεργοποιούν με την σειρά τους κατάλληλες συναρτήσεις για την μετάδοση της αλλαγής κάποιας μεταβλητής.

Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι το αρχείο *window.cpp* έχει μέγεθος 1.83MB (περίπου 50.000 γραμμές κώδικα), περιλαμβάνει 450 πρωτότυπες συναρτήσεις και 1748 αντικείμενα.

Το αντικείμενο *model* ορίζεται μέσω των αρχείων *model.h* και *model.cpp*. Το αρχείο περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που συνθέτουν τον εικονικό κόσμο, καθώς και κάποιους σχετικούς – με τα εικονικά αντικείμενα – αλγόριθμους. Η εικονοποίηση των αντικειμένων γίνεται μέσω εισαγωγής των αντίστοιχων αρχείων *.wrl*, τα οποία τοποθετούνται στο τέλος του δέντρου του κάθε αντικειμένου. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι το αρχείο *model.cpp* έχει μέγεθος 840KB (περίπου 20.000 γραμμές κώδικα), περιλαμβάνει 134 πρωτότυπες συναρτήσεις και 1927 αντικείμενα, ενώ το σύνολο των υφιστάμενων αρχείων *.wrl* που χρησιμοποιούνται δεν ξεπερνάει το μέγεθος των 50MB.

Το αντικείμενο *coinwidget* ορίζεται μέσω των αρχείων *coinwidget.h* και *coinwidget.cpp* και αποτελεί τον ενδιάμεσο κρίκο μεταξύ της διεπιφάνειας του χρήστη και του εικονικού κόσμου. Μεταφέρει, δηλαδή, τις απαιτούμενες τιμές από τα αντικείμενα του αρχείου *window.cpp* στα αντικείμενα του αρχείου *model.cpp*.

Στο Σχήμα 7-2 περιγράφεται ένα απλό παράδειγμα (άνοιγμα/κλείσιμο αρπάγης ρομποτικού βραχίονα) του τρόπου μετάδοσης των πληροφοριών που εισάγει ο χρήστης στην διεπιφάνεια (μέσω του κομβίου *openCloseR1* του *window*) στο εικονικό μοντέλο (εντός του *model*).



Σχήμα 7-2. Παράδειγμα μετάδοσης πληροφοριών χρήστη στο εικονικό αντικείμενο

7.2 Σενάρια χρήσης της εφαρμογής

Η πιλοτική εφαρμογή εστιάζει στον σχεδιασμό και στην χρήση αντικειμένων εντός ενός κύτταρου κατεργασιών και εντάσσεται στα εννοιολογικά πλαίσια του σχεδιασμού και της εκπαίδευσης. Ο τρόπος χρήσης της είναι διττός: είτε χρησιμοποιείται για να σχεδιαστεί και να δοκιμαστεί ένα κύτταρο κατεργασιών εξ' ολοκλήρου από την αρχή, είτε για να γίνουν επεμβάσεις σε ένα υφιστάμενο κύτταρο και να ελεγχθούν αυτές. Η διαδικασία που ακολουθείται και στις δύο περιπτώσεις είναι η ίδια:

- Σχεδιάζεται ο χώρος (δωμάτιο) μέσα στον οποίο βρίσκεται το κύτταρο κατεργασιών.
- Τοποθετούνται τα αντικείμενα που αποτελούν το κύτταρο κατεργασιών..
- Πραγματοποιούνται ενέργειες (που θα λάβουν χώρα εντός του πραγματικού κύτταρου) στο εικονικό κύτταρο, για την εύρεση της βέλτιστης χωροταξικής τοποθέτησης.
- Πραγματοποιούνται συγκεκριμένες ενέργειες, για εξαγωγή συμπερασμάτων και χρήση αυτών των δεδομένων στο πραγματικό κύτταρο.

Στην πιλοτική εφαρμογή υπάρχουν συγκεκριμένοι περιορισμοί όσον αφορά στο είδος και στο πλήθος των αντικειμένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν (Πίνακας 7-1) και, κατ' επέκταση, και στους αντίστοιχους αλγόριθμους που ελέγχουν τα αντικείμενα, όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα κεφάλαια. Η άρση των περιορισμών επαφίεται αποκλειστικά σε ενέργειες επέκτασης της εφαρμογής.

Κατηγορία Αντικειμένου	Είδος αντικειμένου	Πλήθος	Διαθέσιμες επιλογές
Μηχανή Κατεργασίας Υλικού	Τόρνος CNC	2	3
Μηχανή Διαχείρισης Υλικού	Ρομποτικός βραχίονας	2	16
	Μεταφορική Ταινία	8	1*
Περιβάλλον	Δάπεδο	1	1*
	Οροφή	1	1*
	Τοίχος	4	1*
	Προστατευτικό κιγκλίδωμα	8	1*

Πίνακας 7-1. Περιορισμοί αντικειμένων

* η επιλογή στην εικονοποίηση είναι μία, αλλά τα αντικείμενα είναι παραμετρικά ως προς τις διαστάσεις τους

7.2 Σχεδιασμός κυττάρου

- Σχεδιασμός χώρου

Ο χρήστης ξεκινάει σχεδιάζοντας τον χώρο του κυττάρου (Εικόνα 7-1). Έστω ότι θέλει να σχεδιάσει ένα υφιστάμενο δωμάτιο, διαστάσεων 10x10x6 (ΜxΠxΥ, σε μέτρα). Από το κεντρικό παράθυρο της εφαρμογής (*VM Main Panel*), επιλέγει *Environment* (1) για να ανοίξει το σχετικό παράθυρο με τις επιλογές σχετικά με το περιβάλλον του κυττάρου. Εκεί επιλέγει *Room* (2), οπότε το παράθυρο αλλάζει και εμφανίζονται οι επιλογές σχετικά με το δωμάτιο. Εισάγει τα δεδομένα για τις διαστάσεις του δωματίου (*dimensions*) για τους τρεις άξονες (*X, Y, Z* = μήκος, πλάτος, ύψος) σε εκατοστά (3). Στην συνέχεια, επιλέγει το δάπεδο (*floor*) και το προσθέτει (*add*) (4). Προσθέτει αντίστοιχα τους τοίχους στους τέσσερις προσανατολισμούς (5-8). Επειδή το υφιστάμενο δωμάτιο έχει μια μεγάλη πόρτα στον δυτικό τοίχο (διαστάσεων 4.5 x 5.0 x 5.0), προσθέτει ένα άνοιγμα (οι τιμές *A,B,C* σύμφωνα με την περιγραφή του Κεφαλαίου 3) (9). Στο τέλος προστίθεται και η οροφή, η οποία διαθέτει και αντίστοιχο φωτιστικό (10). Η επίδραση του φωτιστικού φαίνεται καλύτερα εάν απενεργοποιηθεί η επιλογή *headlight* (η οποία τοποθετεί ένα γενικό φωτιστικό ώστε να φαίνονται όλα τα αντικείμενα του χώρου) (11).

- Εισαγωγή ρομποτικών βραχιόνων

Έχοντας δημιουργήσει τον χώρο του κυττάρου κατεργασιών, ο χρήστης προχωράει στην εισαγωγή των ρομποτικών βραχιόνων (Εικόνα 7-2), όπου οι διαφορετικές απόψεις του χώρου επιτυγχάνονται μέσω της χρήσης των γενικών καμερών *G1, G3, G4, G5*, και *G6*. Από το κεντρικό παράθυρο της εφαρμογής (1) επιλέγει *Design mode* → *Robot(s)* → *Robot 1*, οπότε και εμφανίζεται το σχετικό παράθυρο για την επιλογή ρομποτικού βραχίονα. Επιλέγει ως κατασκευαστή την *ABB* (2), και από τα 16 διαθέσιμα μοντέλα, το μοντέλο *IRB4400/45* (3) και το προσθέτει (4) στο εικονικό κύτταρο (5). Σε αυτή την φάση, εφόσον ακόμα η δημιουργία του κυττάρου είναι σε αρχικό στάδιο, δεν υπάρχει λόγος για αλλαγές σχετικά με την θέση/προσανατολισμό του βραχίονα, ούτε των ορίων κίνησης των αρθρώσεων του, οπότε δεν χρησιμοποιείται η επιλογή της τροποποίησης (*customize*). Στην συνέχεια, επαναλαμβάνεται η διαδικασία για τον δεύτερο βραχίονα (*Design* → *Robot(s)* → *Robot 2* → *ABB* → *IPB4400/45* → *add*) και προστίθεται ένα ίδιο μοντέλο (6).

VM - Main Panel

Environment

Environment

Room

Safety Grid

Extra Machines

Προσθήκη δαπέδου

Environment

Room

Dimensions X Y Z Center X Y

10000.00 10000.00 6000.00 0.00 0.00

Floor Walls

Add North Wall 0.00 0.00 500.00 Add

Add South Wall 0.00 0.00 3000.00 Add

Add West Wall 4500.00 5000.00 5000.00 Add

Add East Wall 0.00 0.00 500.00 Add

Safety Grid

Extra Machines

Προσθήκη βόρειου τοίχου

Προσθήκη νότιου τοίχου

Προσθήκη δυτικού τοίχου

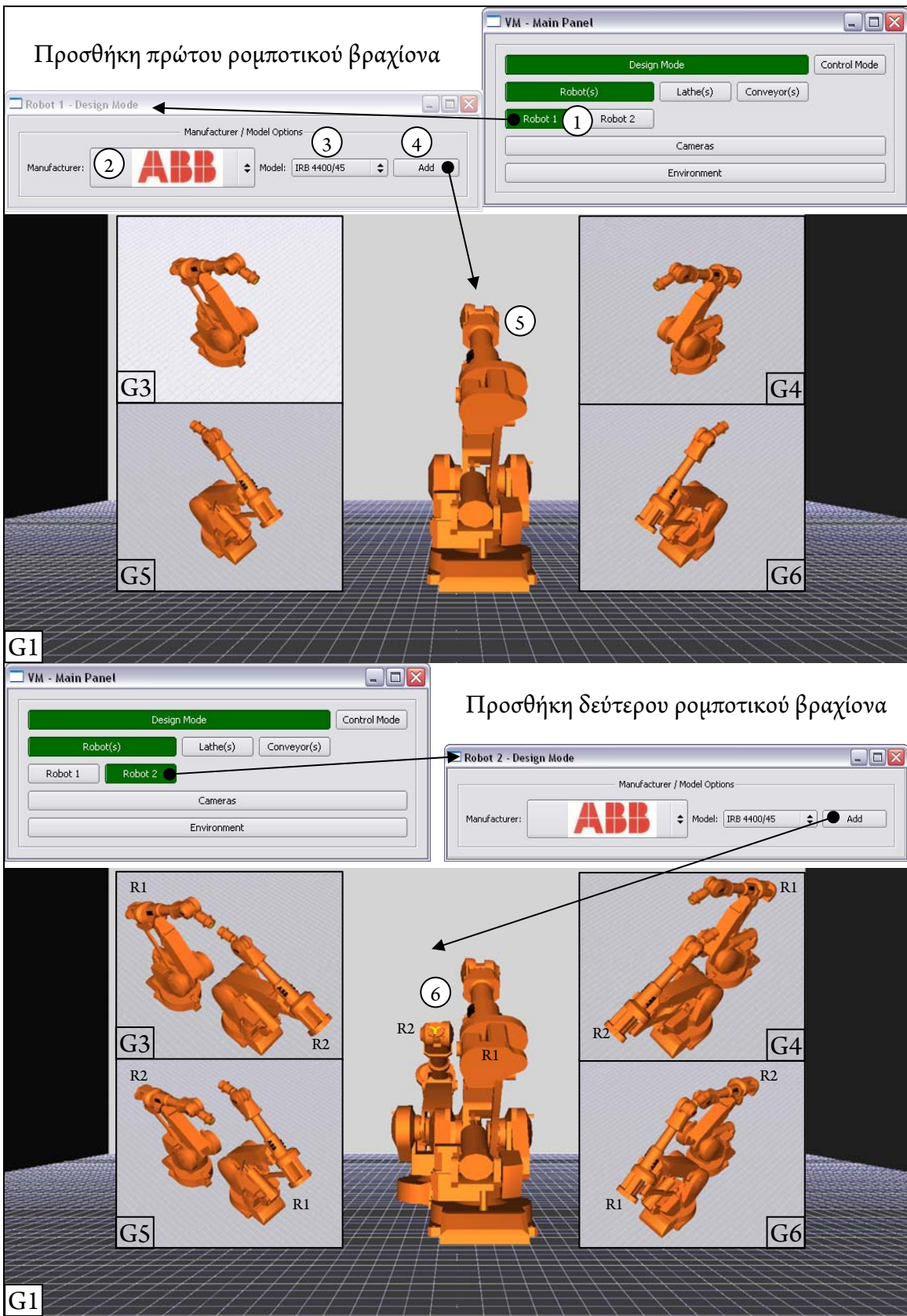
Προσθήκη ανατολικού τοίχου

Προσθήκη οροφής

Επιλογή headlight ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΜΕΝΗ

Επιλογή headlight ΑΠΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΜΕΝΗ

Εικόνα 7-1. Σχεδιασμός χώρου



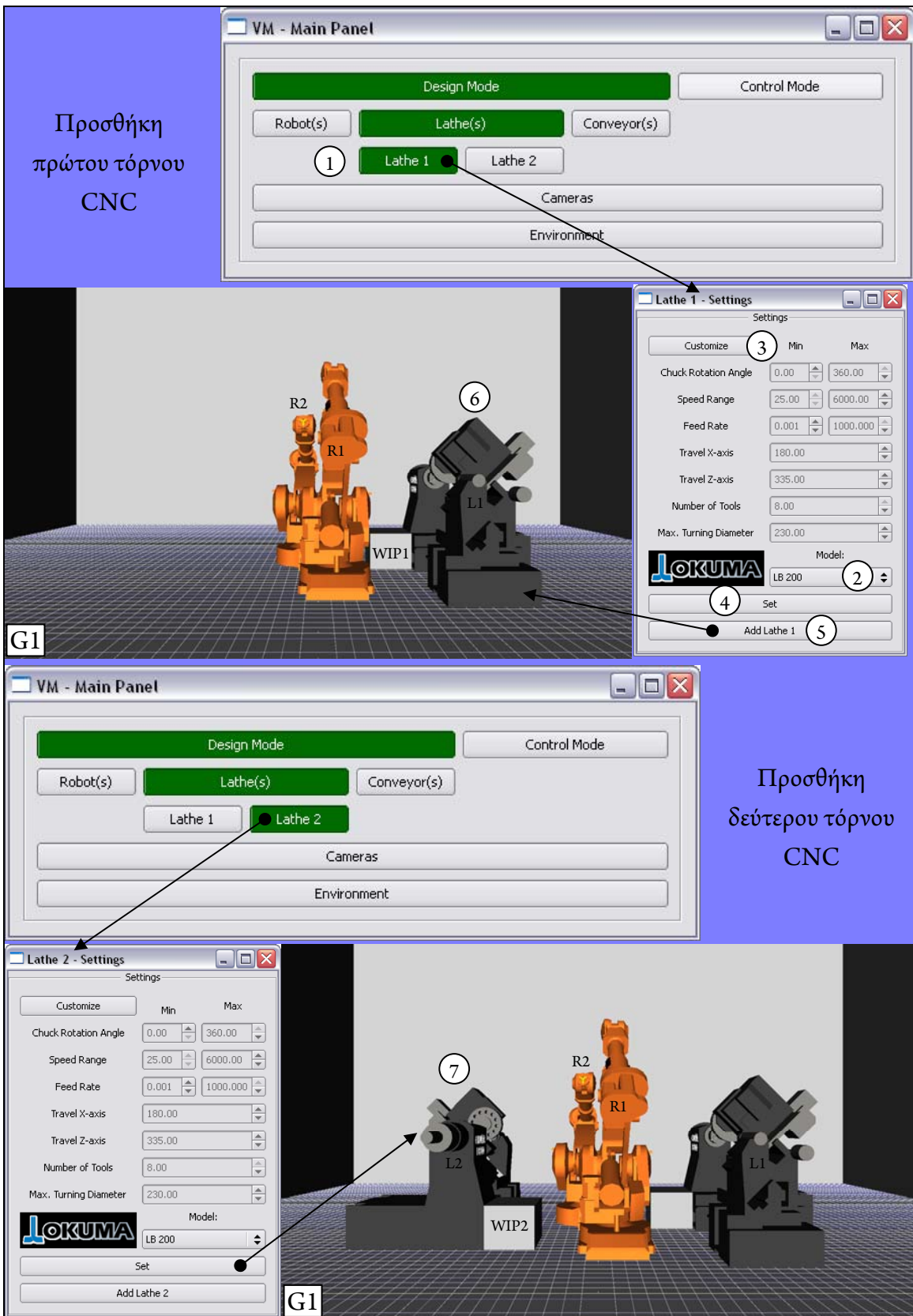
Εικόνα 7-2. Εισαγωγή ρομποτικών βραχιόνων

- Εισαγωγή τόνων CNC

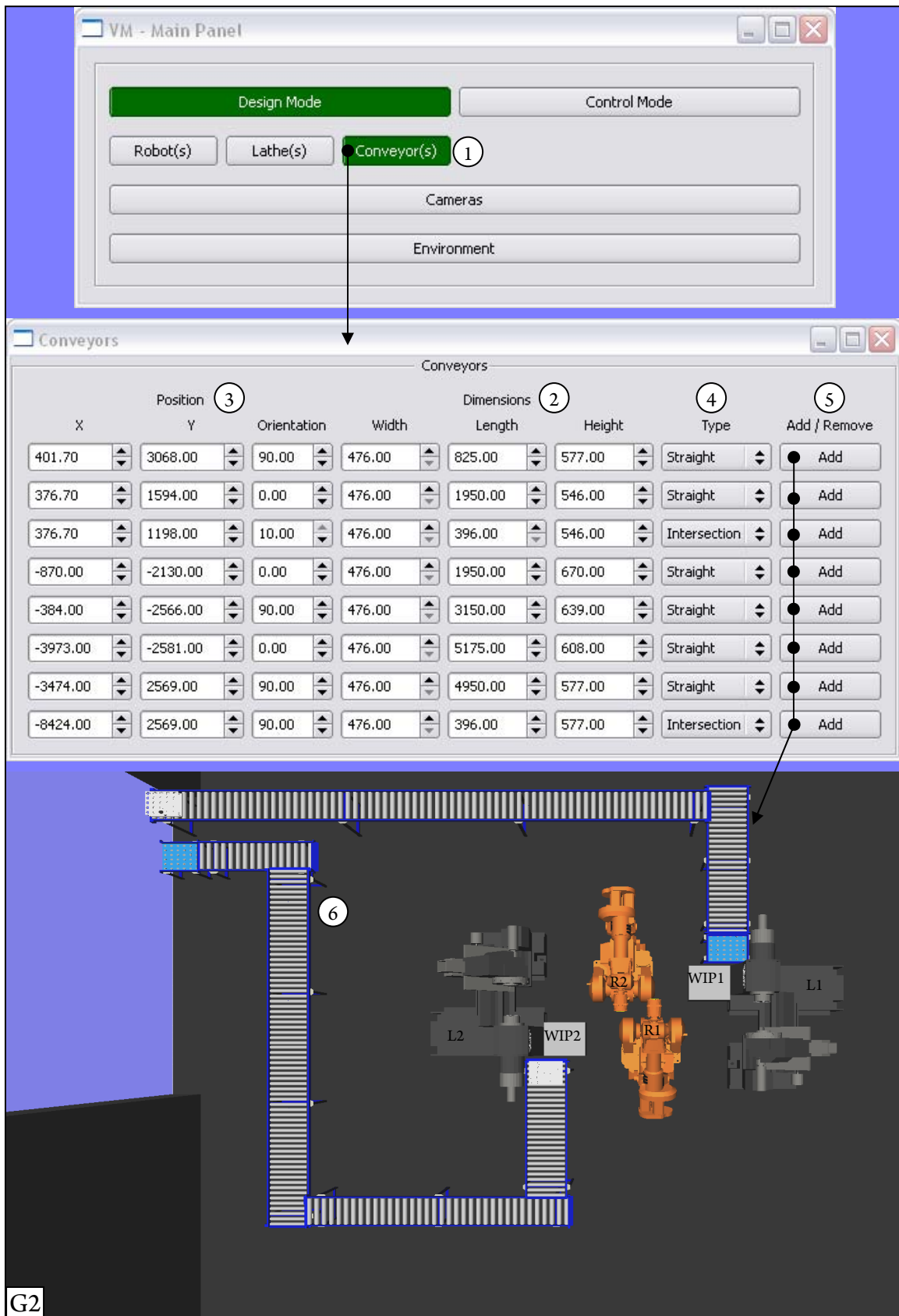
Στο επόμενο βήμα, ο χρήστης εισάγει τους τόνους CNC του εικονικού κυττάρου κατεργασιών (Εικόνα 7-3). Η διαδικασία μοιάζει με την διαδικασία εισαγωγής των ρομποτικών βραχιόνων· αρχικά, από το κεντρικό πάνελ (1) επιλέγει *Design mode* → *Lathe(s)* → *Lathe 1*. Στην συνέχεια, επιλέγει το επιθυμητό μοντέλο της εταιρείας OKUMA από τα τρία διαθέσιμα μοντέλα (2)· έστω ότι επιλέγεται το μοντέλο LB200. Παρατηρείται ότι αλλάζουν οι τιμές στα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται· εάν για οποιοδήποτε λόγο ο χρήστης επιθυμεί αλλαγές, επιλέγει τροποποίηση (*customize*) και προχωράει σε αλλαγές(3), τις οποίες ορίζει ως τελικές μέσω της επιλογής *set* (4). Η συγκεκριμένη επιλογή είναι απαραίτητη για την σωστή λειτουργία του μοντέλου ακόμα και εάν δεν προχωρήσει σε τροποποίηση χαρακτηριστικών. Τέλος, προσθέτει (5) τον τόρνο στο εικονικό σύστημα μέσω της αντίστοιχης επιλογής (*Add Lathe 1*) (6). Αντίστοιχη διαδικασία (*Design mode* → *Lathe(s)* → *Lathe 1* → *Set* → *Add Lathe 2*) ακολουθείται και για την προσθήκη του δεύτερου τόνου του συστήματος (7).

- Εισαγωγή μεταφορικών ταινιών

Η εισαγωγή μεταφορικών ταινιών στο εικονικό κύτταρο γίνεται με παρόμοιο τρόπο (Εικόνα 7-4). Από το κεντρικό πάνελ ο χρήστης επιλέγει *Design mode* → *Conveyors* (1), οπότε και προκύπτει το σχετικό με τις μεταφορικές ταινίες παράθυρο. Το σύστημα προσφέρει κάποιες αρχικές τιμές σχετικά με τις διαστάσεις (2) και το σημείο τοποθέτησης (3) των μεταφορικών ταινιών, καθώς και με το είδος τους (4), σύμφωνα με τον σχετικό αλγόριθμο τοποθέτησης. Έστω ότι ο χρήστης διατηρεί τις αρχικές τιμές, οπότε συνεχίζει προσθέτοντας τις ταινίες (5) και δημιουργώντας το δίκτυο μεταφοράς (6).



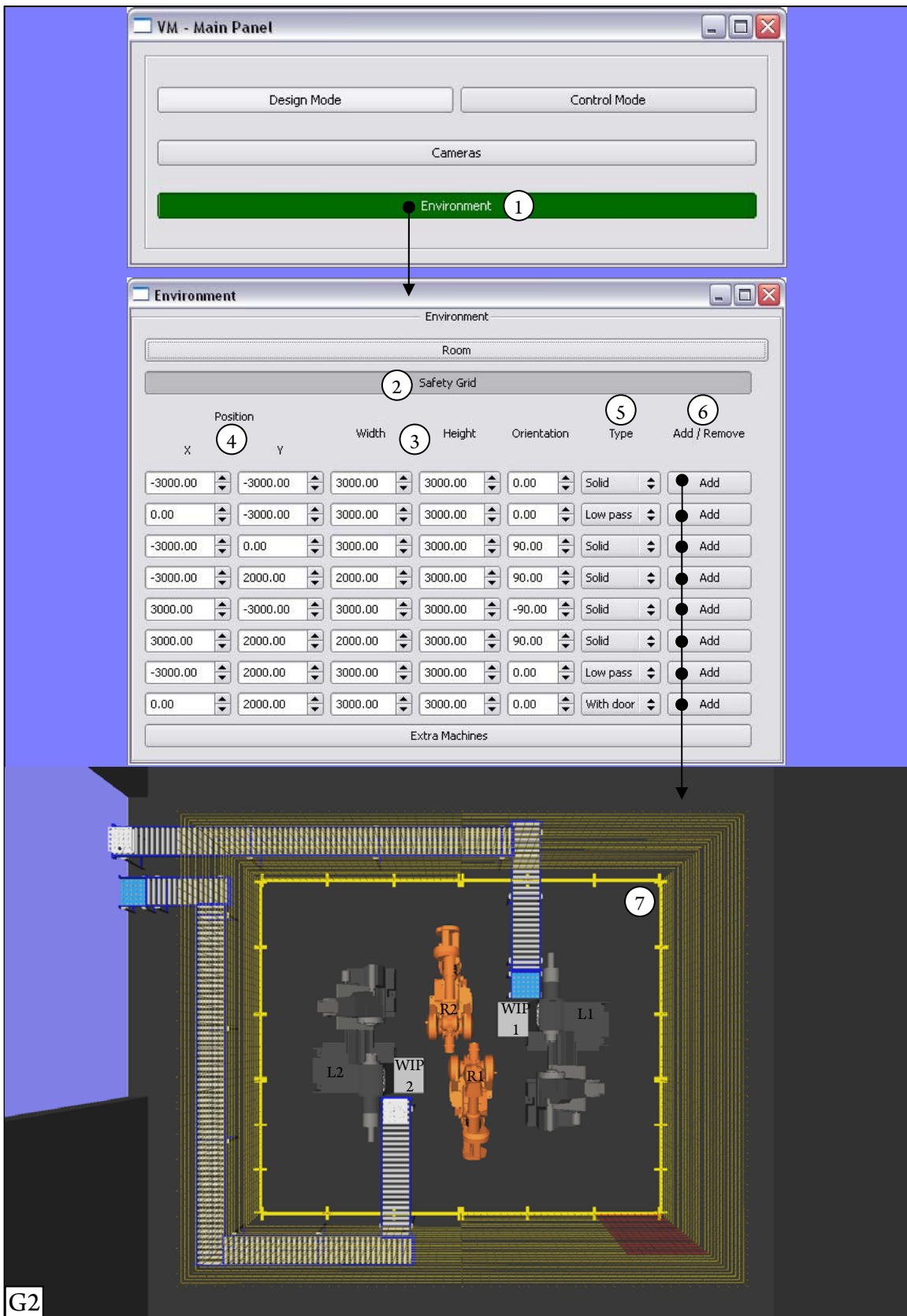
Εικόνα 7-3. Εισαγωγή τόρνων CNC



Εικόνα 7-4. Εισαγωγή μεταφορικών ταινιών

- Εισαγωγή προστατευτικού κιγκλιδώματος

Η εισαγωγή προστατευτικού κιγκλιδώματος στο εικονικό κύτταρο γίνεται με αντίστοιχο τρόπο με την εισαγωγή των προαναφερθέντων αντικειμένων (Εικόνα 7-5). Από το κεντρικό πάνελ ο χρήστης επιλέγει *Environment* (1), οπότε και προκύπτει το σχετικό με το περιβάλλον παράθυρο. Εν συνεχεία, επιλέγει *Safety Grid* (2), οπότε και εμφανίζονται οι σχετικές επιλογές. Το σύστημα προσφέρει κάποιες αρχικές τιμές σχετικά με τις διαστάσεις (3) και το σημείο τοποθέτησης (4) των προστατευτικών, καθώς και με το είδος τους (5), σύμφωνα με τον σχετικό αλγόριθμο τοποθέτησης. Έστω ότι ο χρήστης διατηρεί τις αρχικές τιμές, οπότε συνεχίζει προσθέτοντας τα προστατευτικά κιγκλιδώματα (6) και δημιουργώντας το συνολικό πλέγμα γύρω από το κελί (7).



Εικόνα 7-5. Εισαγωγή προστατευτικού κιγκλιδώματος

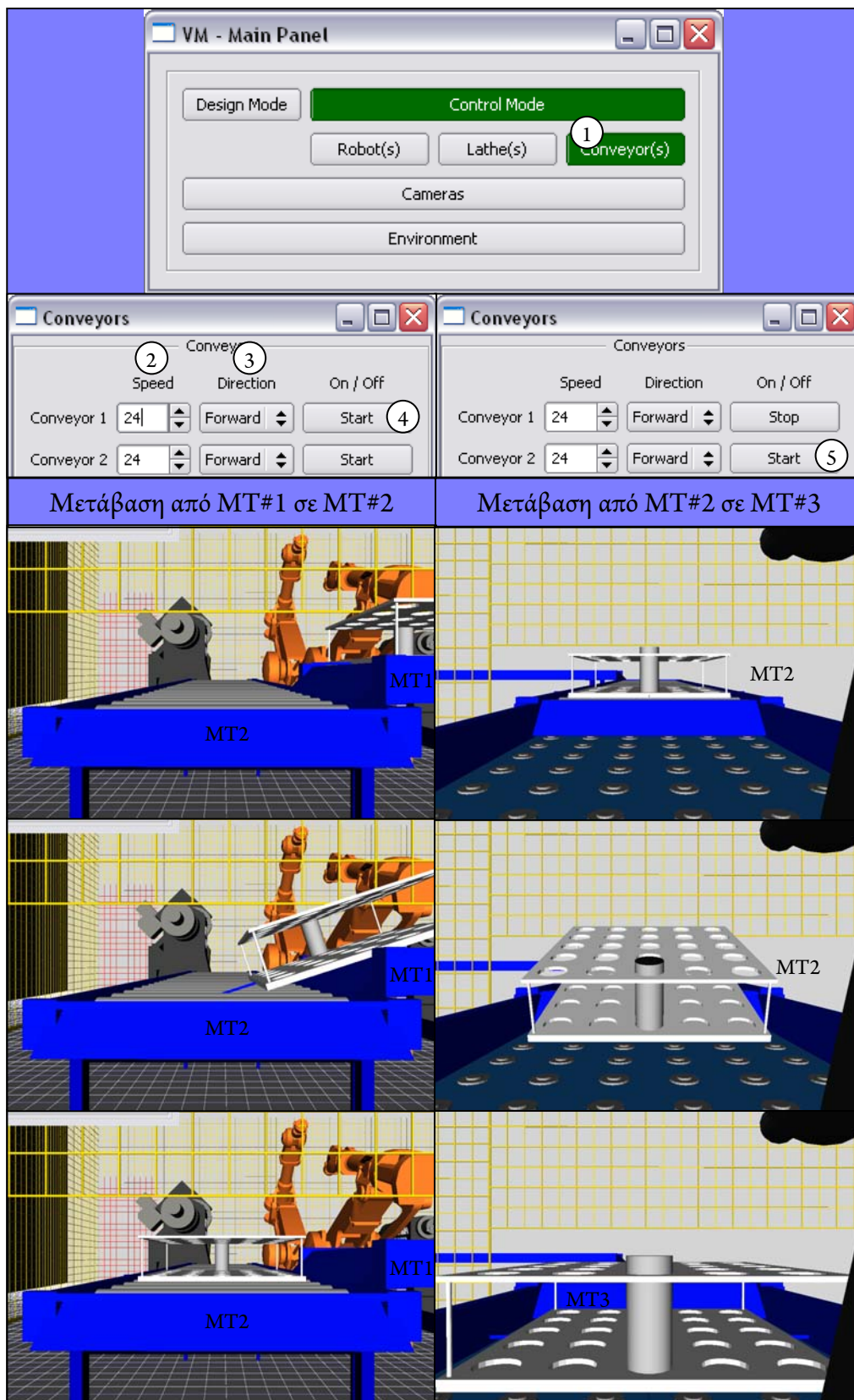
7.3 Χρήση αντικειμένων κυττάρου

Εφόσον ο χρήστης έχει σχεδιάσει το κύτταρο και έχει εισάγει τα αντικείμενα εντός του, μπορεί πλέον να τα χρησιμοποιήσει για να εκτελέσει διάφορες εργασίες. Η λειτουργία του ελέγχου των αντικειμένων ενεργοποιείται μέσω του κεντρικού πάνελ, επιλέγοντας *Control mode*. Οι επιλογές που έχει είναι κατ' αντιστοιχία με τις επιλογές της φάσης του σχεδιασμού· αφορά, δηλαδή, στους ρομποτικούς βραχίονες, στους τόνους CNC, και στις μεταφορικές ταινίες. Παρουσιάζεται ένα σενάριο εργασιών εντός του κυττάρου, μέσω του οποίου θα περιγραφούν οι δυνατότητές του. Το σενάριο περιλαμβάνει:

- Χρήση των μεταφορικών ταινιών (*C1* & *C2*) για την εισαγωγή του αρχικού υλικού στο σύστημα (θέση εισόδου *INP* επί της μεταφορικής ταινίας 3 (*C3*)).
- Φόρτωση του τεμαχίου στον τόρνο 1 (*L1*) με χρήση του ρομποτικού βραχίονα 1 (*R1*)
- Κατεργασία (κοπή προσώπου & περιφερειακή κοπή) του τεμαχίου στον *L1*
- Εκφόρτωση του τεμαχίου από τον *L1* με χρήση του *R2*
- Εναλλαγή του τεμαχίου από *R2* σε *R1* και φόρτωσή του στον *L2* με χρήση του *R1*
- Κατεργασία του τεμαχίου στον *L2*
- Εκφόρτωση του τεμαχίου από τον *L2* μέσω του *R1* και τοποθέτησή του στην παλέτα εξόδου.
- Έξοδος του τεμαχίου από το σύστημα.

7.3.1 Εισαγωγή αρχικού υλικού στο σύστημα μέσω μεταφορικών ταινιών 1 & 2

Έχοντας δημιουργήσει το δίκτυο των μεταφορικών ταινιών, η παλέτα με το αρχικό υλικό είναι τοποθετημένη στο ένα άκρο της μεταφορικής ταινίας 1. Για να εισαχθεί στο κύτταρο, πρέπει να μεταφερθεί στην μεταφορική ταινία 3, η οποία είναι τραπέζι, και η οποία είναι ουσιαστικά η θέση εισόδου. Για να πραγματοποιηθεί η κίνηση, έχοντας επιλέξει *Control Mode*, ο χρήστης επιλέγει *Conveyors (1)*, οπότε και εμφανίζεται το παράθυρο χειρισμού των μεταφορικών ταινιών. Στην συνέχεια, επιλέγει την ταχύτητα με τη οποία επιθυμεί να γίνει η κίνηση (2) και την φορά κίνησης (3)· στην προκειμένη περίπτωση, η φορά είναι *forward*. Τέλος, επιλέγει *start (4)* για να ενεργοποιηθεί η μεταφορική ταινία 1. Όταν η παλέτα φτάσει στο τέλος της μεταφορικής ταινίας 1, μεταφέρεται λόγω της βαρύτητας, στην μεταφορική ταινία 2. Το σύστημα τότε ενεργοποιεί την ταινία 2 (5) για να συνεχιστεί η μεταφορά της παλέτας προς την θέση εισόδου. Στο τέλος της ταινίας 2, πάλι λόγω της βαρύτητας, η παλέτα μεταφέρεται στην ταινία 3 (τραπέζι), η οποία και αποτελεί την θέση εισόδου.



Εικόνα 7-6. Κίνηση στις μεταφορικές ταινίες

7.3.2 Μεταφορά τεμαχίου από θέση εισόδου στον τόρνο 1

Με το τεμάχιο στην θέση εισόδου, χρησιμοποιούμε τον ρομποτικό βραχίονα 1 για την μεταφορά του και την φόρτωση στον τόρνο 1. Για την επίτευξη της παραπάνω ενέργειας, υπάρχουν δύο δυνατότητες:

- Χειροκίνητα
- Μέσω χρήσης της αυτοματοποιημένης λειτουργίας του κυττάρου (*simulation*)

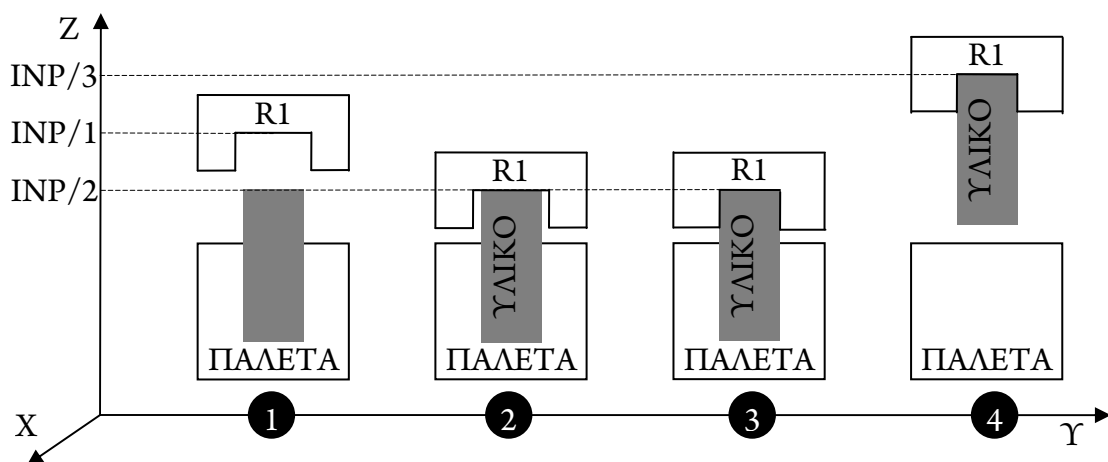
Για την πρώτη περίπτωση, πάντα μέσω του *control mode*, ο χρήστης επιλέγει τον βραχίονα 1 (*Robot 1*), οπότε και προκύπτει το σχετικό παράθυρο.

Στην περίπτωση της χειροκίνητης λειτουργίας, ο χρήστης επιλέγει *Manual*, οπότε έχει την δυνατότητα να μετακινήσει τον βραχίονα είτε μέσω ανεξάρτητης κίνησης των αρθρώσεών του (επιλογή *Circular*) είτε μέσω κίνησης του άκρου στον καρτεσιανό χώρο (επιλογή *Linear*). Επιπροσθέτως, γίνεται χρήση λειτουργιών για την διευκόλυνση εύρεσης του σημείου στο οποίο βρίσκεται το υλικό. Αυτές οι λειτουργίες αφορούν στην χρήση του παραθύρου των καμερών, στην χρήση σταυρονημάτων, καθώς και στην χρήση των αλγόριθμων ανίχνευσης σύγκρουσης και εμφάνισης διαδρομής. Για την χρήση της αυτοματοποιημένης λειτουργίας, είναι απαραίτητο κάθε εργασία να αναλυθεί στα επιμέρους βήματα, καθώς και να αποθηκευθούν οι επιμέρους θέσεις.

Η υπό εξέταση εργασία χωρίζεται σε δύο επιμέρους ενέργειες: την μεταφορά του τεμαχίου εκτός της θέσης εισόδου και την μεταφορά του στον τόρνο. Για την πρώτη ενέργεια, ο βραχίονας εκτελεί τις εξής ενέργειες (Σχήμα 7-3):

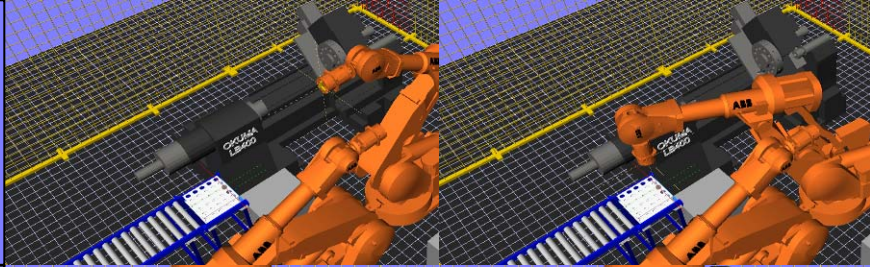
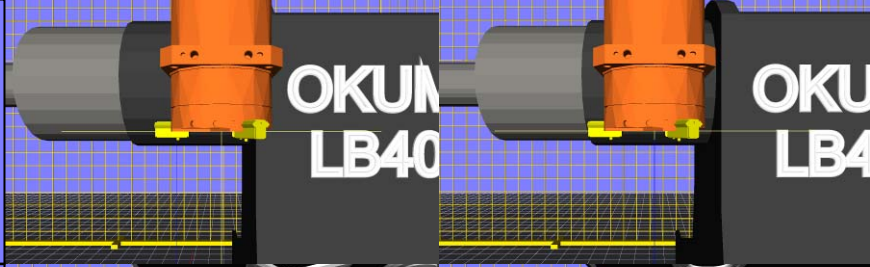
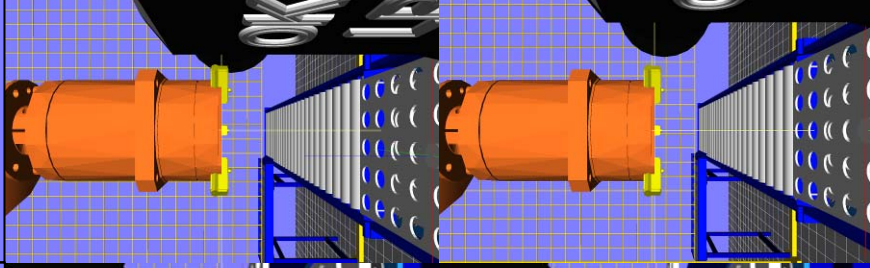
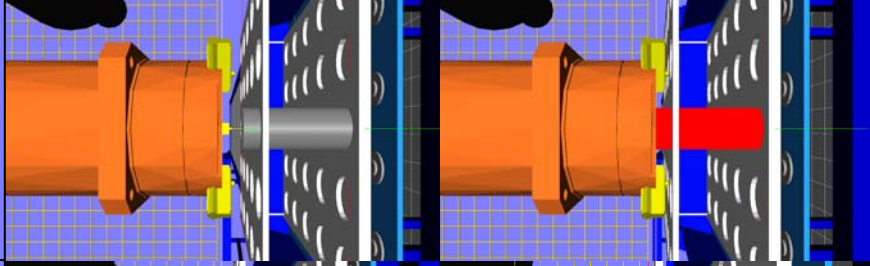
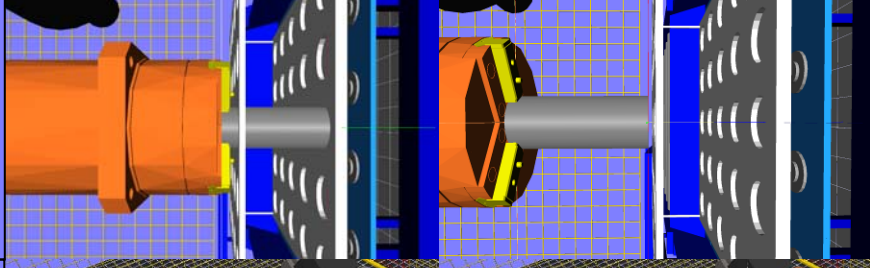
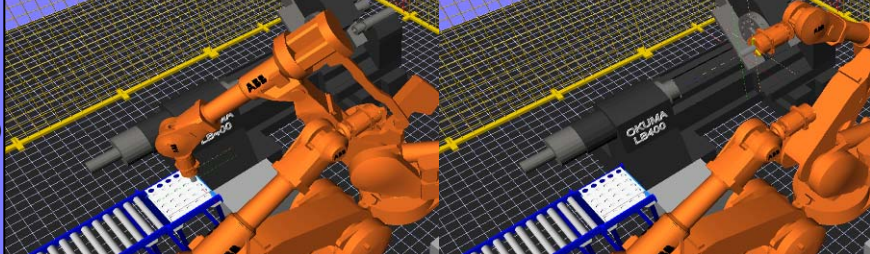
1. Γρήγορη κίνηση σε μία θέση 100mm πάνω από το τεμάχιο (με την αρπάγη ανοικτή).
2. Αργή κίνηση στον Z άξονα μέχρι την κορυφή του τεμαχίου.
3. Κλείσιμο της αρπάγης.
4. Αργή κίνηση στον Z άξονα για να βγει το τεμάχιο από την παλέτα.
5. Γρήγορη κίνηση στην θέση μηδέν του βραχίονα (θέση *home*).

Συνεπώς, για την εκτέλεση της πρώτης ενέργειας, πρέπει να είναι γνωστές τρεις θέσεις (*INP/1, INP/2, INP/3*). Ο χρήστης μετακινεί τον βραχίονα χειροκίνητα με σκοπό να βρει αυτές τις θέσεις και να τις καταγράψει για περαιτέρω χρήση. Αναλυτικά:



Σχήμα 7-3. Ενέργειες βραχίονα (μεταφορά τεμαχίου εκτός θέσης εισόδου)

1. Καταρχήν, γίνεται χρήση κάποιας γενικής κάμερας (κάμερες G1÷G6) για συνολική εποπτεία του βραχίονα σε σχέση με το τεμάχιο.
2. Ενεργοποίηση του σταυρόνηματος του βραχίονα (επιλογή CH ON).
3. Μεγάλες κινήσεις για να πλησιάσει ο βραχίονας το τεμάχιο.
4. Όταν πλησιάσει σχετικώς το τεμάχιο, αλλαγή και χρήση των καμερών του εργαλείου (*Tool 1-1÷1-6*), καθώς και τον επιλογών *Near-Far*.
5. Εφόσον συμπίπτουν οι άξονες X και Y των σταυρονημάτων βραχίονα/υλικού, απομένει να βρεθεί η τιμή για τον άξονα Z. Σε αυτή την περίπτωση, ο χρήστης ενεργοποιεί και την ανίχνευση συγκρούσεων.
6. Μόλις ανιχνευτεί σύγκρουση, ο χρήστης μετακινεί τον βραχίονα ένα βήμα πίσω. Έχει βρεθεί η θέση *INP/2* και αποθηκεύεται.
7. Η θέση *INP/1* θα είναι ψηλότερα από τη θέση *INP/2* για λόγους ασφαλείας κατά 100mm.
8. Επιστροφή στην θέση *INP/2* και κλείσιμο της αρπάγης.
9. Κίνηση του βραχίονα μαζί με το τεμάχιο στον άξονα Z μέχρι το τεμάχιο να είναι με ασφάλεια εκτός της παλέτας. Αποθήκευση της θέσης ως *INP/3*.

<p>Αρχική θέση (home)</p> <p>(κάμερα G-4, CH ON)</p>		<p>Γενική κίνηση</p>
<p>Κίνηση στον Y</p> <p>(κάμερα Tool 1-6)</p>		<p>X <i>aligned</i></p>
<p>Κίνηση στον X</p> <p>(κάμερα Tool 4-6)</p>		<p>Y <i>aligned</i></p>
<p>Κίνηση στον Z</p> <p>(INP/1)</p>		<p>Κίνηση στον Z (σύγκρουση)</p>
<p>Κίνηση στον Z</p> <p>(INP/2)</p>		<p>INP/3</p>
<p>Κίνηση σε XYZ προς αρχική θέση (κάμερα G-4)</p>		<p>Αρχική θέση (home)</p>

Εικόνα 7-7. Εκφόρτωση σημείου εισόδου από βραχίονα 1

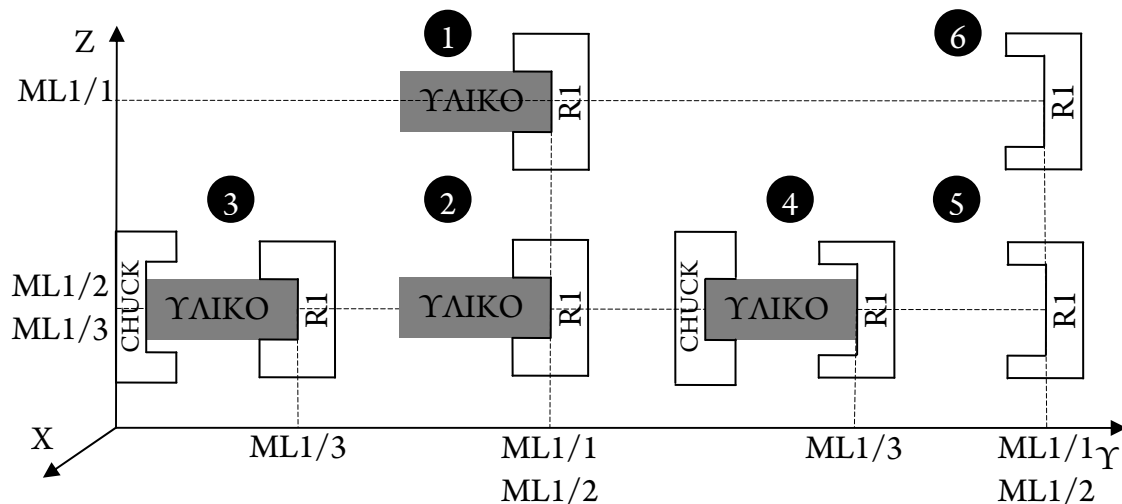
Οι συντεταγμένες των θέσεων αποθηκεύονται σε πίνακα και είναι διαθέσιμες και για τον δεύτερο βραχίονα, ενώ ο προσανατολισμός του βραχίονα αφορά μόνον στον υπό εκπαίδευση βραχίονα. Με αυτό τον τρόπο, εάν γίνει εκπαίδευση του βραχίονα 2 για φόρτωση/εκφόρτωση της θέσης εισόδου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι συντεταγμένες της θέσης (μέσω της λειτουργίας *show*) που έχουν αποθηκευθεί για επιτάχυνση της διαδικασίας, καθώς το μόνο που πρέπει να καθοριστεί είναι ο προσανατολισμός του βραχίονα στις συγκεκριμένες θέσεις.

Επιπροσθέτως, σε αυτό το σημείο πρέπει να υπολογιστεί το μήκος του τεμαχίου, καθώς η διάσταση αυτή χρησιμοποιείται στην συνέχεια για την εύρεση των υπολοίπων σημείων. Για τον υπολογισμό, μετακινούμε τον βραχίονα στο ένα άκρο του τεμαχίου, και αποθηκεύουμε την θέση ως *IA*. Στην συνέχεια, μετακινούμε τον βραχίονα στο άλλο άκρο του τεμαχίου, όπου και αποθηκεύεται η θέση ως *IB*. Τέλος, μέσω του πλήκτρου *Calculate IL*, υπολογίζεται και αποθηκεύεται το μήκος του τεμαχίου.

Για την δεύτερη ενέργεια (μεταφορά στον τόρνο), ο βραχίονας πρέπει να εκτελέσει τις εξής κινήσεις:

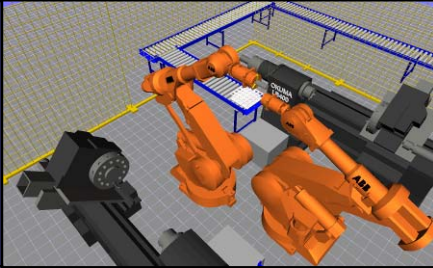
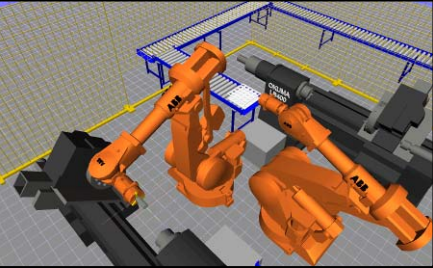
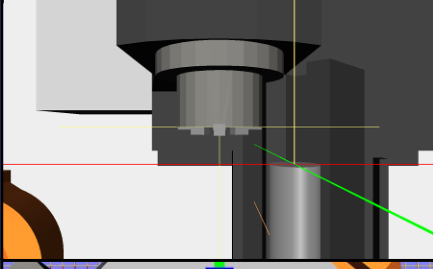
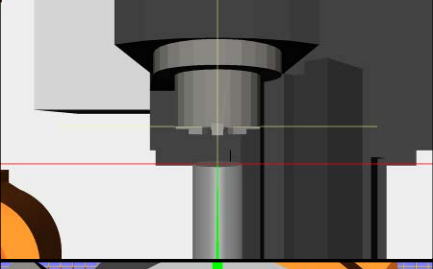
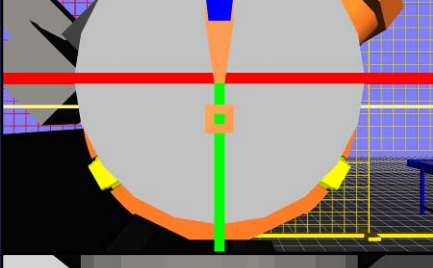

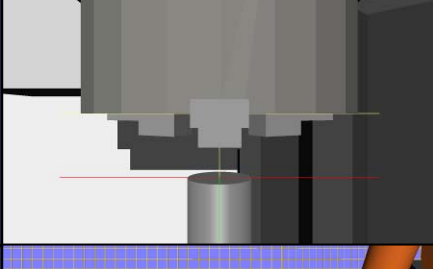
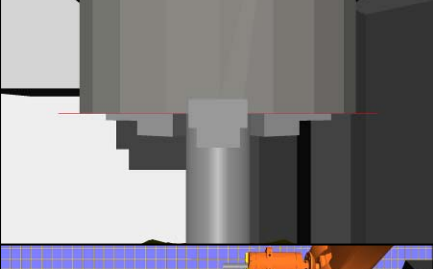
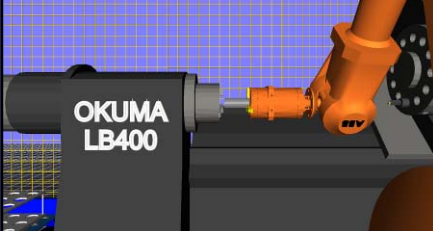

1. Γρήγορη κίνηση στον χώρο πάνω από τον τόρνο (ευθυγράμμιση του τεμαχίου με το τσώκ στον *X* και *Y*, θέση *ML1/1*)
2. Γρήγορη κίνηση στον *Z* άξονα (ευθυγράμμιση κατά *Z*, θέση *ML1/2*)
3. Αργή κίνηση στον *Y* άξονα (τεμάχιο εντός του τσώκ, θέση *ML1/3*).
4. Κλείσιμο του τσώκ. Άνοιγμα της αρπάγης.
5. Αργή κίνηση στον *Y* άξονα (απομάκρυνση από το τεμάχιο).
6. Γρήγορη κίνηση στον *Z* άξονα (απομάκρυνση από τον τόρνο).
7. Γρήγορη κίνηση στην θέση *home*.

Συνεπώς, για την εκτέλεση της ενέργειας, πρέπει να είναι γνωστές τρεις θέσεις (*ML1/1*, *ML1/2*, *ML1/3*). Ο χρήστης μετακινεί τον βραχίονα χειροκίνητα με σκοπό να βρει αυτές τις θέσεις και να τις καταγράψει για περαιτέρω χρήση. Αναλυτικά (Σχήμα 7-4):



Σχήμα 7-4. Ενέργειες βραχίονα (μεταφορά τεμαχίου στον τόρνο)

1. Ομοίως, γίνεται χρήση κάποιας γενικής κάμερας (κάμερες $G1÷G6$) για συνολική εποπτεία του βραχίονα σε σχέση με το τσώκ του τόρνου.
2. Ενεργοποίηση του σταυρονήματος του τόρνου (επιλογή $CH ON$).
3. Μεγάλες κινήσεις για να πλησιάσει ο βραχίονας τον τόρνο.
4. Όταν πλησιάσει, χρήση των καμερών του τόρνου (*Lathe 1-1÷1-6*), καθώς και τον επιλογών *Near-Far*.
5. Μετακίνηση του βραχίονα στον άξονα X μέχρι να συμπέσουν οι άξονες Y των σταυρονημάτων.
6. Μετακίνηση του βραχίονα στον άξονα Z μέχρι να συμπέσουν οι άξονες X των σταυρονημάτων.
7. Μετακίνηση του βραχίονα στον άξονα Y . Αν ο βραχίονας δεν διαθέτει το τεμάχιο, τότε όταν συμπίπτουν οι άξονες X και Z των σταυρονημάτων βραχίονα-τσώκ, έχει βρεθεί το κέντρο του τσώκ, και ακολουθεί το βήμα 8. Αν ο βραχίονας διαθέτει ήδη το τεμάχιο, τότε επιδιώκεται να συμπίπτουν οι άξονες X και Z των σταυρονημάτων μπάρας-τσώκ. Η θέση αποθηκεύεται ως $ML1/1$ και ακολουθεί το βήμα 9.
8. Μετακίνηση του βραχίονα στον άξονα $-Y$ όσο είναι το μήκος του τεμαχίου και αποθήκευση της θέσης ως $ML1/1$.
9. Μετακίνηση του βραχίονα στον άξονα $-Y$ κατά 200mm. Αποθήκευση $ML1/2$.
10. Μετακίνηση του βραχίονα στον άξονα Z ($=+1100mm$). Αποθήκευση $ML1/1$.

Αρχική θέση (home) (κάμερα G3, CH ON)			Γενική κίνηση
Κίνηση στον X (κάμερα Lathe1-5)			Υ <i>aligned</i>
Κίνηση στον Z (κάμερα Lathe1- 1)			X <i>aligned</i>
Κίνηση στον Υ (κάμερα Lathe1- 5)			ML1/3
Κίνηση στον Υ (κάμερα Lathe1-4) (ML1/2)			Κίνηση στον Z (κάμερα Lathe1-4) (ML1/1)

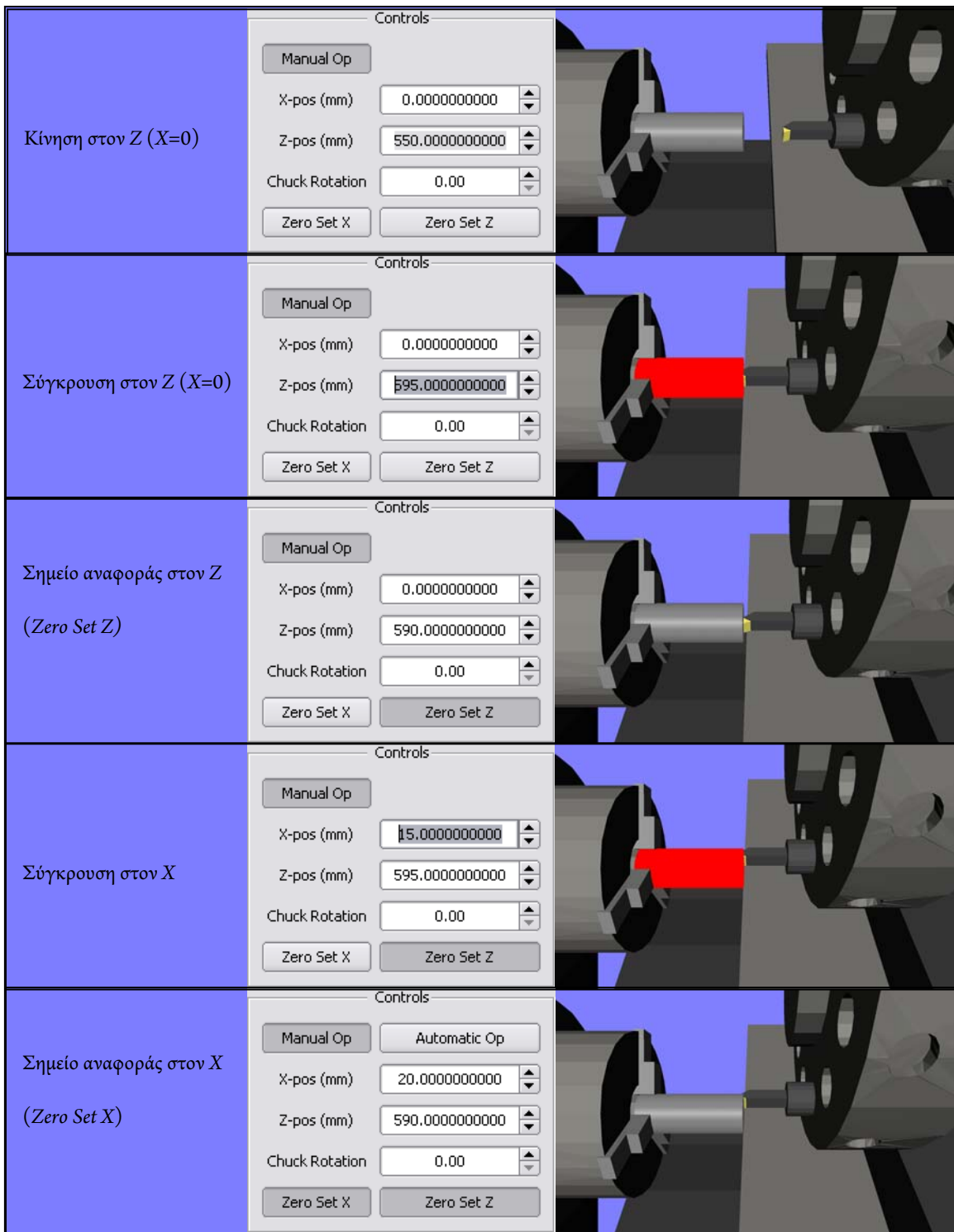
Εικόνα 7-8. Φόρτωση τόρνου 1 από βραχίονα 1

Για την εκφόρτωση του τόρνου, χρησιμοποιούνται παρόμοιες θέσεις, χωρίς να χρειάζεται εκπαίδευση του βραχίονα. Οι θέσεις ML1/1 και ML1/2 είναι ίδιες, ενώ η ML1/3 είναι διαφορετική εάν έχει προκύψει κοπή προσώπου. Γι αυτό το λόγο, ο βραχίονας μετά την θέση ML1/2 κινείται αργά στον άξονα Υ μέχρι να έρθει σε επαφή με το τεμάχιο, οπότε και καταγράφει την θέση ως ML1/3, ενώ ανανεώνεται και η τιμή του μήκους του τεμαχίου.

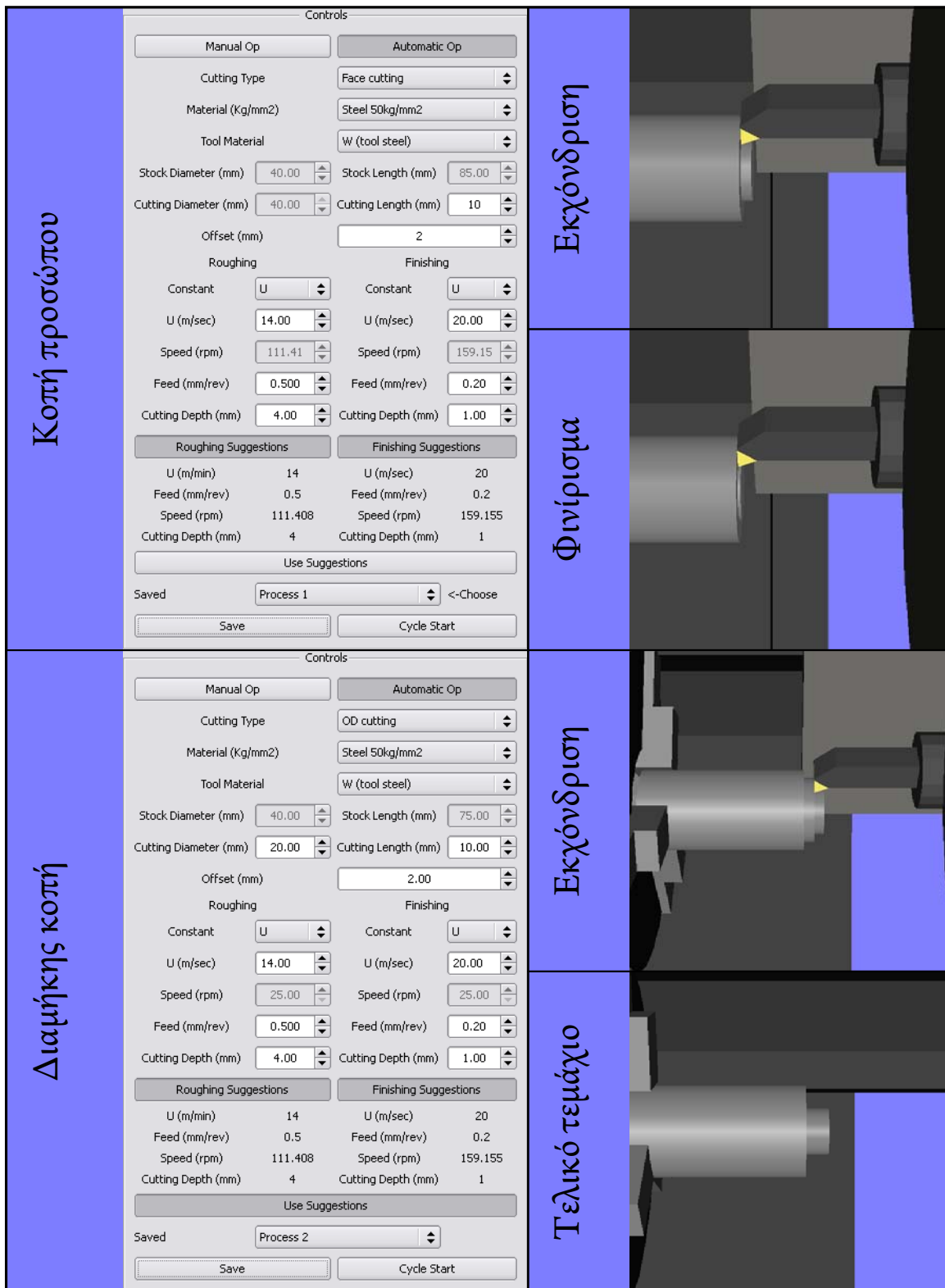
Για την χρήση της αυτόματης λειτουργίας, ο χρήστης επιλέγει *Simulation*, και στην συνέχεια την επιλογή *R1 Unload INP*. Με το πέρας της εργασίας, επιλέγει *R1 LOAD ML1* για να φορτωθεί το τεμάχιο στον τόρνο. Η συγκεκριμένη δυνατότητα «γνωρίζει» πλέον τις θέσεις των υπό εξέταση αντικειμένων, ενώ ελέγχει συνεχώς την κατάστασή τους μέσω δικτύου *Petri*. Για παράδειγμα, η επιλογή *R1 LOAD ML1* είναι διαθέσιμη μόνο εάν συντρέχουν όλες οι σχετικές προϋποθέσεις (τόρνος 1 διαθέσιμος, βραχίονας 1 χωρίς κίνηση, υλικό στον βραχίονα 1 κλπ.).

7.3.3 Κατεργασία (κοπή προσώπου & διαμήκης κοπή) του τεμαχίου στον *L1*

Εφόσον το τεμάχιο έχει φορτωθεί στον τόρνο 1, πρέπει να ορισθούν οι κατεργασίες που θα λάβουν χώρα. Καταρχήν, πρέπει να βρεθεί το σημείο αναφοράς της πρώτης κατεργασίας. Για να γίνει αυτό, ο χρήστης μετακινεί το εργαλείο κατά *X* και *Z* μέσω της λειτουργίας *manual* του τόρνου. Αρχικά, ο χρήστης μετακινεί το εργαλείο στον άξονα *Z*, έχοντας επιλέξει *X=0*. Όταν το εργαλείο έρθει σε σύγκρουση με το τεμάχιο, η σύγκρουση ανιχνεύεται και το τεμάχιο αλλάζει χρώμα (κόκκινο). Σε αυτό το σημείο, ο χρήστης μετακινεί το εργαλείο πίσω και αποθηκεύει την θέση (*Zero Set Z*). Στην συνέχεια, μετακινεί το εργαλείο στον άξονα *Z* προς το τεμάχιο ώστε να υπάρξει σύγκρουση, και τότε το μετακινεί στον άξονα *X*. Όταν σταματήσει να υπάρχει σύγκρουση, έχει βρεθεί και η θέση αναφοράς κατά *X*, οπότε αποθηκεύεται (*Zero Set X*). Εφόσον έχουν αποθηκευθεί και οι δύο θέσεις (Εικόνα 7-9), εμφανίζεται η αυτόματη λειτουργία (*Automatic*), για να ορισθούν οι ρυθμίσεις της κοπής. Έστε ότι η πρώτη κοπή θα είναι κοπή προσώπου (*Face Cutting*), επιλέγεται το υλικό του τεμαχίου και το υλικό του εργαλείου. Επιλέγεται ένα μήκος κοπής 10 mm, αφήνοντας 2mm για φινίρισμα. Στην συνέχεια, μέσω των επιλογών *Roughing* και *Finishing*, παρουσιάζονται κάποιες συνιστώμενες τιμές για την πρόωση, τις στροφές κλπ. Εφόσον ο χρήστης επιθυμεί να τις χρησιμοποιήσει, τις επιλέγει (*Use Suggestions*), ενώ αν επιθυμεί αλλαγές προχωράει ρυθμίζοντας τις επιλογές. Στο τέλος, επιλέγει την ονομασία της κατεργασίας (*Process 1*) και την αποθηκεύει (*Save*). Εάν υπάρχει οποιοδήποτε πρόβλημα με τις επιλογές (π.χ. δεν έχει επιλεγεί υλικό, η πρόωση είναι μηδενική κλπ.), τότε η κατεργασία δεν αποθηκεύεται και ο χρήστης ενημερώνεται για το πρόβλημα. Τέλος, εάν ο χρήστης θέλει να εκτελεστεί η κατεργασία άμεσα, τότε επιλέγει την κατεργασία που επιθυμεί και την εκτελεί (*Cycle start*). Αντίστοιχα ορίζεται μια διαμήκης κοπή (*OD cutting*), με νέο σημείο αναφοράς, αποθηκεύεται ως *Process 2* και εκτελείται (Εικόνα 7-0-10).



Εικόνα 7-9. Εύρεση σημείου αναφοράς (Zero Set)



Εικόνα 7-11. Κοπή προσώπου και διαμήκης κοπή

7.3.4 Εκφόρτωση του τεμαχίου από τον L1 με χρήση του R2

Η διαδικασία εκπαίδευσης του βραχίονα 2 για εκφόρτωση του τεμαχίου από τον τόρνο γίνεται με παρόμοιο τρόπο με την διαδικασία εκπαίδευσης του βραχίονα 1 για φόρτωση του τόρνου. Ο χρήστης κινεί χειροκίνητα τον βραχίονα για να εντοπίσει και να αποθηκεύσει τις, απαιτούμενες για την εκφόρτωση, θέσεις. Οι θέσεις που πρέπει να είναι γνωστές στον βραχίονα για να εκτελέσει την εκφόρτωση είναι οι *ML2/1*, *ML2/2*, *ML2/3*.

7.3.5 Εναλλαγή του τεμαχίου από R2 σε R1

Η εναλλαγή του τεμαχίου μεταξύ του βραχίονα 1 και του βραχίονα 2 μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: είτε ο βραχίονας 2 να φορτώσει τον βραχίονα 1 (*R2 load R1*), είτε ο βραχίονας 1 να εκφορτώσει τον βραχίονα 2 (*R1 unload R2*). Στην πρώτη περίπτωση ο βραχίονας 2 χρησιμοποιεί τις συντεταγμένες του βραχίονα 1 και το μήκος της μπάρας και περνάει από τρεις θέσεις, ενώ στην δεύτερη περίπτωση συμβαίνει το αντίθετο (Εικόνα 7-11).

7.3.6 Φόρτωση του τεμαχίου στον L2 με χρήση του R1, κατεργασία του τεμαχίου στον L2, και εκφόρτωση του τεμαχίου από τον L2 μέσω του R1

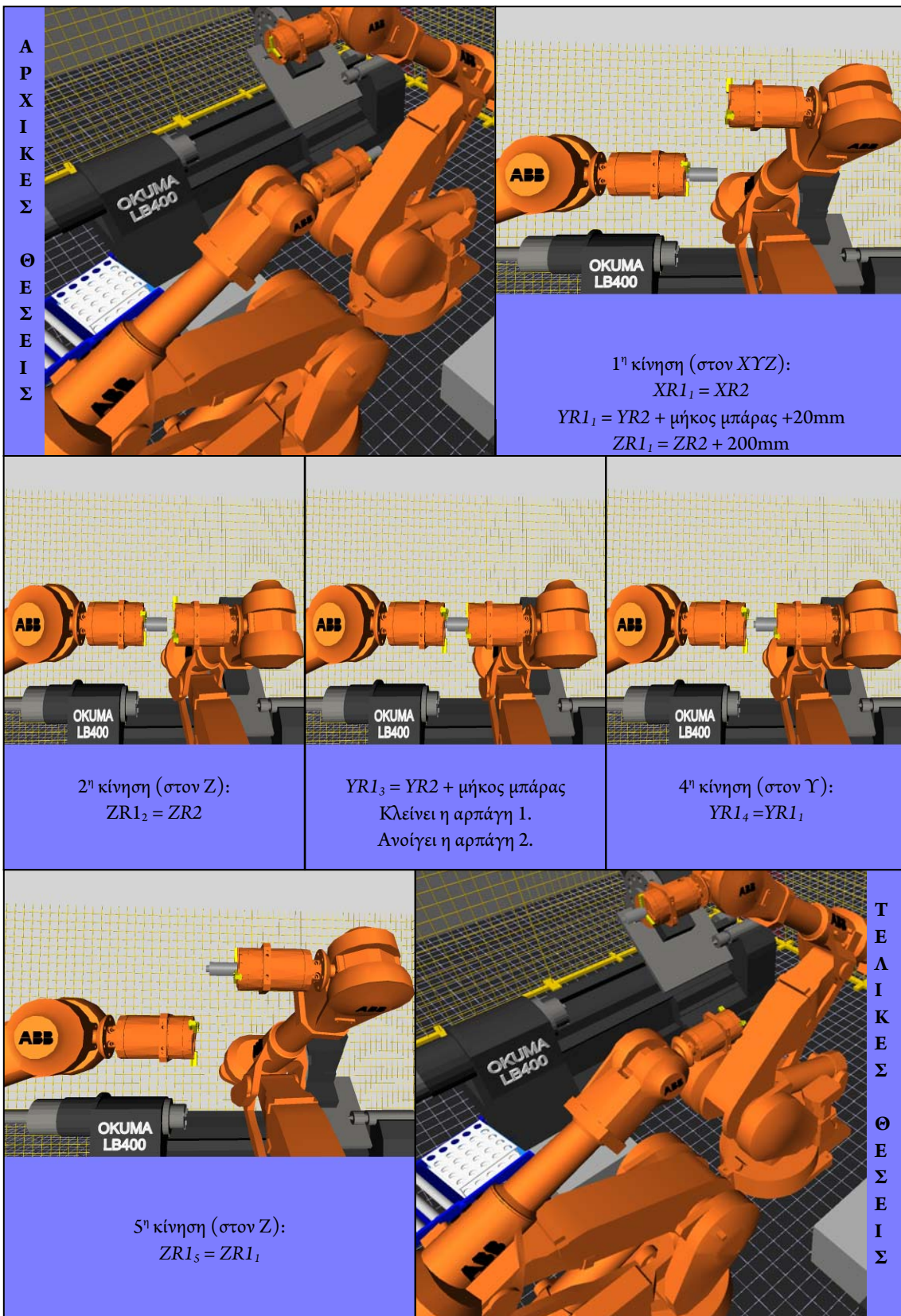
Με αντίστοιχο (με τους προηγούμενους) τρόπο εκπαιδεύεται ο βραχίονας 1 για την φόρτωση στον και εκφόρτωση του τεμαχίου από τον τόρνο 2. Με αντίστοιχο, επίσης, τρόπο πραγματοποιείται η κοπή στον τόρνο 2.

7.3.7 Τοποθέτηση του τεμαχίου στην παλέτα εξόδου

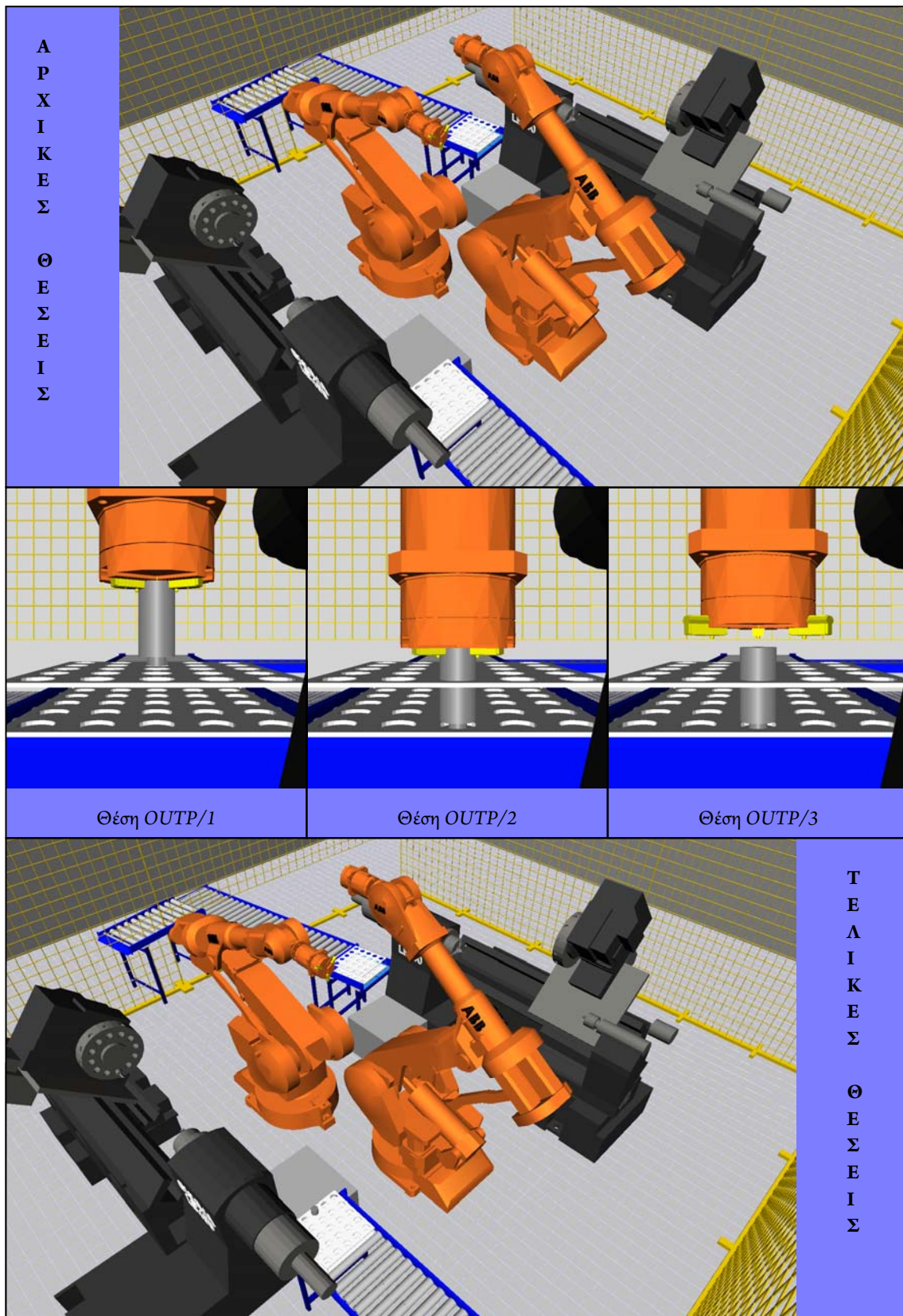
Έχοντας εκφορτώσει τον τόρνο 2, το τελικό τεμάχιο είναι έτοιμο να φορτωθεί στην παλέτα εξόδου. Με παρόμοιο τρόπο εκπαιδεύεται ο βραχίονας 1 για την εύρεση των κατάλληλων θέσεων για την πραγματοποίηση της ενέργειας. Οι θέσεις που απαιτούνται είναι οι *OUTP/1*, *OUTP/2*, *OUTP/3* (Εικόνα 7-12).

7.3.8 Έξοδος του τεμαχίου από το σύστημα

Η έξοδος του τεμαχίου από το σύστημα πραγματοποιείται παρόμοια με την είσοδό του στο σύστημα. Ο χρήστης εκκινεί την μεταφορική ταινία 4 για να ξεκινήσει η διαδικασία απαγωγής του τεμαχίου. Η παλέτα περνάει σειριακά από τις ταινίες 5 ως 7, για να καταλήξει στο τελικό σημείο (την μεταφορική ταινία/τραπέζι 8).



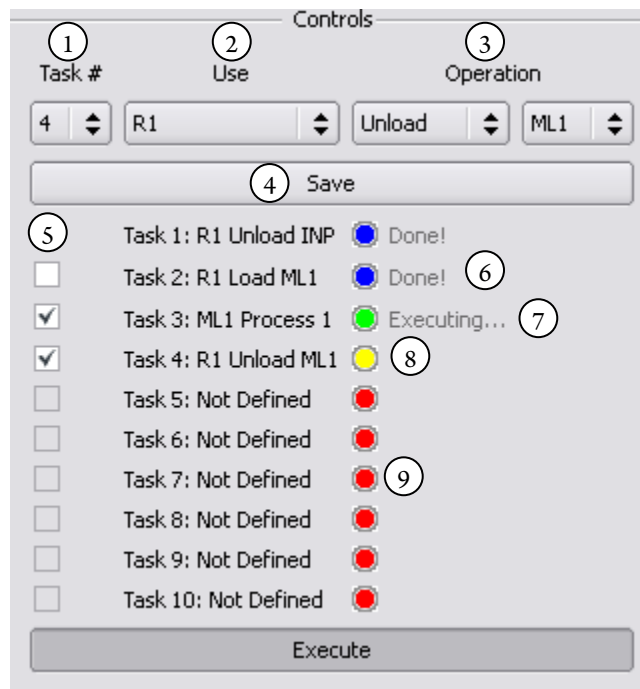
Εικόνα 7-12. Εκφόρτωση βραχίονα 2 από βραχίονα 1



Εικόνα 7-13. Φόρτωση σημείου εξόδου από βραχίονα 1

7.4 Η λειτουργία προσομοίωσης (*simulation*)

Η λειτουργία αφορά στην προσομοίωση ενεργειών εντός του κυττάρου στο σύνολό του (Εικόνα 7-13). Ο χρήστης δημιουργεί μια λίστα από εργασίες (*tasks*) που μπορούν να εκτελεστούν από τα υφιστάμενα αντικείμενα του κυττάρου (1). Επιλέγει αντικείμενο (2) και είδος εργασίας (3) και ακολούθως αποθηκεύει την εργασία (4). Μόνο αντικείμενα που υπάρχουν εντός του κυττάρου προσφέρονται ως επιλογές, ενώ κάθε αντικείμενο αντιστοιχεί και σε διαφορετικές εργασίες. Στην συνέχεια επιλέγει ποιές από αυτές επιθυμεί να εκτελεστούν (5). Οι εργασίες εκτελούνται σειριακά· εάν μία εργασία δεν μπορεί να εκτελεστεί γιατί δεν έχει οριστεί πλήρως, τότε ο χρήστης ενημερώνεται σχετικά και η προσομοίωση προχωράει στην επόμενη εργασία. Εάν μια εργασία δεν μπορεί να εκτελεστεί γιατί δεν πληρούνται οι προϋποθέσεις (από τον έλεγχο μέσω των δικτύων *Petri*), τότε η προσομοίωση σταματάει. Το παράθυρο της λειτουργίας πληροφορεί τον χρήστη σχετικά με ποιες εργασίες έχουν εκτελεστεί επιτυχώς (6), ποια εργασία εκτελείται εκείνη την στιγμή (7) και ποιες εργασίες απομένουν (8), καθώς και ποιες εργασίες δεν έχουν καν οριστεί (9).



Εικόνα 7-14. Λειτουργία *simulation*.

8 Συμπεράσματα

8.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται μια συνολική αποτίμηση της μεθοδολογίας, όσο και της υλοποίησης των επιμέρους στοιχείων της, ενώ προτείνονται οι μελλοντικές επεκτάσεις με αφετηρία σημεία της παρούσης διατριβής.

8.2 Η μεθοδολογία

Η φύση του αντικειμένου της παρούσας διδακτορικής διατριβής, δηλαδή η ανάλυση, η εικονοποίηση, και η διάδραση με ένα εικονικό κύτταρο κατεργασιών, απαιτούσε η μεθοδολογία να περιλαμβάνει στοιχεία διαφορετικών επιστημονικών πεδίων και ποικιλία εργαλείων. Αφενός, απαιτούσε την δημιουργία ενός μοντέλου περιγραφής των συστημάτων κατεργασιών με ικανή σαφήνεια και πληρότητα, τόσο σε ότι αφορούσε στα χαρακτηριστικά των αντικειμένων (με έμφαση στην λειτουργικότητα), όσο και στις μεταξύ τους σχέσεις. Η χρήση των σημασιολογικών μοντέλων και του σχετικού φορμαλισμού επέτρεψε την ολιστική μοντελοποίηση των αντικειμένων, καλύπτοντας όλες τις πιθανές παραμέτρους. Ταυτόχρονα, επιτρέπει την εισαγωγή νέων αντικειμένων με ευκολία. Παράλληλα, επιτρέπει περαιτέρω ανάλυση μέσω εξειδικευμένων εργαλείων της αντίστοιχης ερευνητικής περιοχής, εφόσον κάτι τέτοιο κριθεί απαραίτητο. Αφετέρου, δόθηκε ιδιαίτερο βάρος στην πιστή αναπαράσταση των αντικειμένων εντός του εικονικού κόσμου και στην διάδραση του χρήστη με αυτά. Κύρια χαρακτηριστικά της μεθοδολογίας απετέλεσαν τόσο η χρήση δοκιμασμένων και δημοφιλών προτύπων (π.χ. VRML) όσο και η υλοποίηση νέων εργαλείων, είτε για λόγους καλύτερης ενσωμάτωσης/συνεργασίας με τον ευρύτερο πλαίσιο δημιουργίας (π.χ. αλγόριθμος ανίχνευσης συγκρούσεων) είτε ως αποτέλεσμα εφαρμογής προσεγγίσεων που έχει αποδειχτεί ότι καλύπτουν τις ανάγκες του αντικειμένου (π.χ. δίκτυα *Petri*).

Εν συγκρίσει με αντίστοιχες προσεγγίσεις, η παρούσα μεθοδολογία υπερτερεί στο γεγονός ότι είναι σχετικά απλή, αλλά πλήρως παραμετροποιήσιμη, διαθέτοντας την απαιτούμενη επεκτασιμότητα. Κατ' αυτό τον τρόπο, και λόγω του αρθρωτού τρόπου δόμησης της μεθοδολογίας (συνεργασία ανεξάρτητων εργαλείων σε διαφορετικά επίπεδα) είναι δυνατή η επέμβαση στα επιμέρους στοιχεία, επιτρέποντας την εισαγωγή νέων αντικειμένων και δεδομένων. Επιπροσθέτως, το πλαίσιο στο οποίο στηρίζεται η υλοποίησή της είναι προϊόν

ανοιχτού κώδικα, γεγονός το οποίο σε συνδυασμό με την πολυβαθρική φύση του, ενισχύει τη δημιουργία εφαρμογών ανεξαρτήτως πλατφόρμας και πολύ χαμηλού κόστους. Αν συνυπολογιστεί το γεγονός ότι καλύπτεται τόσο η ανάλυση ενός κυττάρου στην φάση της δημιουργίας όσο και του λειτουργικού ελέγχου των αντικειμένων, καθίσταται σαφές ότι είναι δυνατό να προστεθούν εργαλεία εντός της μεθοδολογίας ανάλογα με το πρίσμα αντιμετώπισης του χειριστή κατά περίπτωση. Συνεπώς, ο χρήστης δεν έχει παθητικό ρόλο, καθώς τροποποιεί το πλαίσιο λειτουργίας (σχεδιασμός/έλεγχος) αναλόγως, πετυχαίνοντας πληρέστερη κάλυψη του αντικειμένου, χωρίς να υφίσταται κάποιος προφανής περιορισμός όσον αφορά στο φάσμα των αντικειμένων που επιθυμεί να συμπεριλάβει στον εικονικό κόσμο, εντός της οντολογίας που έχει ορισθεί.

8.3 Επιμέρους στοιχεία

Ως επιμέρους στοιχεία, χαρακτηρίζονται τα συστατικά της μεθοδολογίας που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση του τελικού αποτελέσματος, δηλαδή της εκάστοτε εφαρμογής. Στην προκειμένη περίπτωση, χαρακτηριστικά της μεθοδολογίας είναι τα σημασιολογικά μοντέλα στην φάση της ανάλυσης του κυττάρου κατεργασιών και η μετάβαση στον τρισδιάστατο σχεδιασμό, καθώς και οι αλγόριθμοι υποστήριξης των αντικειμένων στην φάση της υλοποίησης. Τα χαρακτηριστικά που αφορούν στην περαιτέρω ενίσχυση του ρόλου του χρήστη εντός του κόσμου ξεετάζονται ξεχωριστά.

Όσον αφορά στα σημασιολογικά μοντέλα, σημειώνεται ότι προσφέρουν τον απαιτούμενο φορμαλισμό για την ανάλυση και δημιουργία αντικειμένων. Η διαφορά με τις συνήθεις πρακτικές εστιάζεται στον τρόπο χρήσης των μοντέλων. Στην προκειμένη περίπτωση, δεν αντιμετωπίζονται τα αντικείμενα μέσω δημιουργίας πολλαπλών διαφορετικών ειδών σχεσιακών μοντέλων ούτε γίνεται χρήση βάσεων δεδομένων. Τα σημασιολογικά μοντέλα χρησιμοποιούνται μεν για να περιγράψουν τον κόσμο, αλλά αυτό δεν αποτελεί αυτοσκοπό λειτουργούν ως βασικός «καμβάς» για την διευκόλυνση της ένταξης των αντικειμένων στα πλαίσια της εφαρμογής και της χρήσης αντικειμενοστραφούς γλώσσας προγραμματισμού. Επιτρέπουν, δηλαδή, την ανάλυση των αντικειμένων σε ικανοποιητικό βαθμό, καταδεικνύοντας το σύνολο των δεδομένων που οφείλεται να ληφθεί υπόψη, ώστε να πραγματοποιηθούν όλα τα χαρακτηριστικά (δομικά, λειτουργικά) των αντικειμένων. Επιπροσθέτως, στα σημασιολογικά μοντέλα ορίστηκαν οι σχέσεις των διαφορετικών αντικειμένων και έτσι προέκυψαν οι απαιτούμενες συνδέσεις και ο τρόπος ενεργοποίησής τους στους τοπικούς και κεντρικούς ελεγκτές.

Σε σχέση με τη τρισδιάστατη μοντελοποίηση των αντικειμένων, ακολουθήθηκε η πεπατημένη οδός χρήσης κατάλληλου λογισμικού για την αναπαράσταση των στοιχείων ενός κυττάρου. Δεδομένου, όμως, ότι ήταν απαραίτητο τα αντικείμενα να έχουν και λειτουργικά χαρακτηριστικά, ώστε να είναι δυνατή η χρήση των εντός του κόσμου από τον χρήστη, το λογισμικό χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργηθούν ξεχωριστά τμήματα, βάσει των σημασιολογικών μοντέλων, τα οποία στην συνέχεια ενοποιήθηκαν εντός της εφαρμογής. Αναφορικά με το είδος των αρχείων (τύπου VRML) που είναι δυνατό να εισαχθούν στην εφαρμογή, κρίνεται ικανοποιητικό καθώς τέτοια αρχεία μπορούν να προκύψουν ως εξαγωγή (*exported*) από τα περισσότερα πακέτα τρισδιάστατου σχεδιασμού και έχουν σχετικά μικρό μέγεθος (50÷200 Kb), ενώ είναι δυνατό να περιέχουν περαιτέρω δεδομένα χρήσιμα για διάδραση με τον χρήστη (π.χ. αισθητήρες αφής). Η προέκταση του είδους (X3D), ένας συνδυασμός VRML και XML, αποτελεί πρωτόκολλο κατά ISO/IEC (19775/19776/19777) και διαθέτει σημαντική προγραμματιστική κοινότητα που το υποστηρίζει (*web3d.org*). Συνεπώς, υπάρχει πληθώρα δυνατοτήτων που μπορούν να ενσωματωθούν στα αρχεία πλέον της εικονοποίησης, ενισχύοντας σημαντικά την εφαρμογή.

Αναφορικά με την ενσωμάτωση ευφυΐας, δηλαδή τους αλγόριθμους που δημιουργήθηκαν για την λειτουργία των αντικειμένων, σημειώνεται ότι καλύπτουν τόσο συγκεκριμένες ανάγκες των αντικειμένων (π.χ. κινηματική βραχίονα), όσο και γενικότερες ανάγκες του κυττάρου (π.χ. ανίχνευση συγκρούσεων). Όσον αφορά στα κινηματικά μοντέλα, λειτουργούν ικανοποιητικά, ενώ είναι πλήρως παραμετροποιημένα, διατηρώντας την απαιτούμενη γενικότητα. Όσον αφορά στον αλγόριθμο ανίχνευσης συγκρούσεων, δίνονται ακριβή αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο, ενώ μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε αντικείμενο του εικονικού κόσμου. Μοναδικό πρόβλημα προκύπτει από την χρήση των οριακών κουτιών, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι για αντικείμενα που απέχουν πολύ από το αντίστοιχο ευθύγραμμο παραλληλόγραμμο, δίνονται εσφαλμένα στοιχεία. Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, το πρόβλημα είναι μικρής σημασίας, καθώς ο αλγόριθμος λειτουργεί στην ασφαλή πλευρά, δηλαδή μπορεί να ανιχνεύσει σύγκρουση όταν δεν υφίσταται, αλλά ποτέ δε θα αγνοήσει συγκρούσεις που υφίστανται. Επιπροσθέτως, είναι δυνατό να περιοριστεί το φαινόμενο, χρησιμοποιώντας μικρότερα οριακά κουτιά, καλύπτοντας με περισσότερη ακρίβεια τους υπό εξέταση όγκους.

Για τον έλεγχο των αυτόματων λειτουργιών των αντικειμένων χρησιμοποιήθηκαν δίκτυα *Petri*. Η επιλογή των δικτύων για την εξαγωγή όλων των κανόνων (τύπου *if-then*) αποδείχτηκε πρακτική, καθώς το κύτταρο περιλαμβάνει εργασίες/διακριτά γεγονότα, έναν τομέα στον οποίο τα δίκτυα *Petri* προσφέρουν τον απαραίτητο φορμαλισμό. Εφόσον έχει

δημιουργηθεί το αρχικό δίκτυο, και δεδομένου ότι η μετάβαση από τα δίκτυα στους κανόνες είναι σχετικά απλή, είναι δυνατή η παρακολούθηση όλων των γεγονότων, αλλά και η προσθήκη νέων, εφόσον κάτι τέτοιο κριθεί απαραίτητο (π.χ. λόγω δημιουργίας νέων εργασιών ή προσθήκης νέων αντικειμένων). Επιπλέον πλεονέκτημα αποτελεί η δυνατότητα για περαιτέρω ανάλυση εκτός της παρούσης εφαρμογής μέσω κατάλληλου λογισμικού (π.χ. *HPSim*, *WinPeSim*). Μειονέκτημα τους αποτελεί το γεγονός ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός θέσεων/μεταβάσεων τόσο δυσκολεύει η κατανόηση του δικτύου από κάποιον που δεν είναι εξοικειωμένος με το σύστημα. Μέσω, όμως, των συνοδευτικών πινάκων, ακόμα και αυτό το πρόβλημα είναι δυνατό να αντιμετωπιστεί, εάν πραγματοποιείται τακτή επικαιροποίηση και «συγχρονισμός» δικτύου-πινάκων-κανόνων.

8.4 Η έμφαση στον χρήστη

Βασικό άξονα στην δημιουργία του μοντέλου του συστήματος κατεργασιών αποτέλεσε ο χρήστης του συστήματος και ο ρόλος του μέσα σε αυτό. Η προσπάθεια αυτή περιλαμβάνει δύο αντικρουόμενες απαιτήσεις: από την μία πλευρά, είναι επιθυμητό να προσφέρονται στον χρήστη όλο και περισσότερες αυτοματοποιημένες διαδικασίες, απομακρύνοντας τον από την ανάγκη λήψης αποφάσεων, ενώ ταυτόχρονα είναι επιθυμητό να προσφέρονται όλο και περισσότερες επιλογές, επιτρέποντας του περισσότερη παραμετροποίηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών. Το πρόβλημα αυτής της προσπάθειας είναι προφανές και σχετίζεται άμεσα τόσο με το επίπεδο γνώσεων του χρήστη όσο και με την δυνατότητα εξοικείωσής του με ένα σύστημα. Μεγάλος βαθμός αυτοματοποίησης διαδικασιών προσφέρει σε έναν χρήστη χαμηλού επιπέδου γνώσεων – αρχικά – διευκολύνσεις και μεγάλο ρυθμό εξοικείωσης, αφήνει όμως ανικανοποίητο έναν έμπειρο χρήστη που επιθυμεί περισσότερες επιλογές.

Η χρυσή τομή μεταξύ των δύο παραπάνω απαιτήσεων αποτελεί ιδιαιτέρως δύσκολο εγχείρημα που απασχολεί τους δημιουργούς λογισμικού σε παγκόσμια κλίμακα. Η επιλογή που έγινε στην παρούσα διατριβή κινήθηκε προς τις δύο κατευθύνσεις. Προσφέρει ικανό αριθμό επιλογών στον χρήστη, αλλά και αυτοματοποιημένες διαδικασίες για ταχύτερη εκτέλεση εργασιών. Το σύστημα, δηλαδή, συμβουλεύει τον χρήστη, χωρίς όμως να τον περιορίζει στις επιλογές του. Παράλληλα, λόγω της φύσης του τρόπου υλοποίησης της εφαρμογής, μπορούν να προκύψουν τροποποιήσεις σε αρκετές από τις εσωτερικές λειτουργίες: ο χρήστης λειτουργεί ταυτόχρονα και ως δημιουργός. Κατ' αυτό τον τρόπο, η εφαρμογή καθίσταται προσαρμόσιμη στο επίπεδο εμπειρίας του χρήστη και στις εκάστοτε ανάγκες του, προσφέροντας ελευθερία επιλογής του επιπέδου εργασίας.

Χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες του τρισδιάστατου περιβάλλοντος για την τοποθέτηση του χρήστη εντός του εικονικού κόσμου η εφαρμογή προχωράει ένα βήμα παραπάνω. Επιδίωξη ήταν να υποστηρίζονται περισσότερο οι ικανότητες πρωτογενούς αντίληψής του, ώστε να διευκολύνονται οι αποφάσεις που πρέπει να λάβει, καθώς μειώνεται το επίπεδο. Αυτό επιτυγχάνεται ενισχύοντας τις ανθρώπινες αισθήσεις μέσω λειτουργιών που εκτός εικονικού περιβάλλοντος δεν υφίστανται. Ο συνδυασμός των νέων δυνατοτήτων που προκύπτουν λόγω της εικονικότητας και της ένταξης του ανθρώπου εντός του περιβάλλοντος συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση και επίλυση των προβλημάτων που προκύπτουν τόσο κατά τον σχεδιασμό όσο και κατά την λειτουργία των αντικειμένων ενός συστήματος κατεργασιών.

8.5 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η εφαρμογή που προέκυψε ως αποτέλεσμα της μεθοδολογίας της διατριβής αποτελεί ουσιαστικά μια επιβεβαίωσή της μέσα σε συγκεκριμένα πλαίσια. Η επεκτασιμότητά της επιτρέπει την προσθήκη πληθώρας νέων χαρακτηριστικών και λειτουργιών τόσο σε επίπεδο αντικειμένων όσο και σε επίπεδο πλαισίων. Ο βασικός παράγοντας που χαρακτηρίζει τις επεκτάσεις σχετίζεται άμεσα με την ροή των πληροφοριών, συνεπώς η επιλογή των εννοιολογικών πλαισίων διαδραματίζει τον σημαντικότερο ρόλο. Αναλυτικά, οι πιθανές επεκτάσεις μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Επεκτάσεις αντικειμένων

Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται οι επεκτάσεις που αφορούν είτε σε προσθήκη αντικειμένων εντός του εικονικού χώρου είτε σε αναβάθμιση των υπαρχόντων αντικειμένων. Νέοι τύποι αντικειμένων που μπορούν να προστεθούν, αφού προηγηθεί η κατάλληλη ανάλυσή των μέσω σημασιολογικών μοντέλων, είναι τόσο κύριες μηχανές (π.χ. CNC κέντρο κατεργασιών) όσο βοηθητικές μηχανές (π.χ. γερανογέφυρα, AGVs), ενώ είναι δυνατή η προσθήκη διαφορετικών αντικειμένων των υφιστάμενων τύπων (π.χ. βραχίονες άλλης εταιρίας, βραχίονες άλλου τύπου). Ως αναβάθμιση των υφιστάμενων αντικειμένων, είναι δυνατή η τροποποίησή των κατά τρόπο τέτοιο ώστε να εισάγονται δεδομένα με την μορφή της γλώσσας του ελεγκτή του αντικειμένου (π.χ. G-κώδικας για τις μηχανές CNC, γλώσσα προγραμματισμού *RAPID* για τους ρομποτικούς βραχίονες), αυξάνοντας αισθητά την ικανότητα προσομοίωσης της εφαρμογής.

- Επεκτάσεις εννοιολογικών πλαισίων

Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται οι επεκτάσεις που δύναται να προκύψουν από την ανάπτυξη νέων εφαρμογών (ή την ενσωμάτωση στην υφιστάμενη) σε σχέση με τα εναπομείναντα δύο εννοιολογικά πλαίσια (παρακολούθηση/χειρισμός εξ αποστάσεως). Και τα δύο πλαίσια απαιτούν τη σύνδεση του εικονικού κόσμου με τον πραγματικό, επομένως κρίνεται απαραίτητο να υλοποιηθεί κατάλληλος διάυλος επικοινωνιών μεταξύ της εφαρμογής και των πραγματικών αντικειμένων. Το πλέον σημαντικό σημείο στην υλοποίηση των παραπάνω είναι ο βαθμός πιστότητας του εικονικού κόσμου σε σχέση με τον πραγματικό, ενώ βαρύνουσα σημασία έχει ο παράγοντας του συγχρονισμού μεταξύ των δύο. Τα δύο στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους λόγω των περιορισμών που υφίστανται στους τομείς των δικτύων (σε σχέση με τον όγκο δεδομένων), συνεπώς θα πρέπει να υπάρχει δυνατότητα επιλογής του επιπέδου λεπτομέρειας. Στην υλοποίησή τους, πέραν των τοπικών διαύλων, θα πρέπει να εξεταστεί και η δυνατότητα για επέκταση της εφαρμογής σε δικτυακό περιβάλλον, με ταυτόχρονη συμμετοχή χρηστών, δυνατότητα που θα επιτρέψει περισσότερη συνέργεια και συμπληρωματικότητα.

- Επεκτάσεις διεπιφάνειας/διαδραστικότητας χρήστη

Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται τόσο οι επεκτάσεις που αφορούν σε προσθήκες στην διεπιφάνεια της εφαρμογής, όσο και σε αλλαγές στον εξοπλισμό που χρησιμοποιεί ο χρήστης. Στην πρώτη περίπτωση, οι όποιες αλλαγές εξαρτώνται άμεσα από τις προσθήκες αντικειμένων και από τις ανάγκες που θα προκύψουν από την υλοποίηση των διαφορετικών εννοιολογικών πλαισίων. Ανεξαρτήτως αυτών, είναι δυνατό να εξεταστεί η μετατροπή της εφαρμογής σε μία πιο κλασική δομή, ενοποιώντας τα διαφορετικά μενού επιλογών και λειτουργίας, καθώς και η προσθήκη δυνατότητας αποθήκευσης αντικειμένων και σχεδιασμένων κυττάρων για χρήση τους σε άλλο χρόνο, κάτι που στην πιλοτική υλοποίηση δεν είναι εφικτό. Στην περίπτωση του εξοπλισμού, θα πρέπει να μελετηθούν τρόποι τόσο για περαιτέρω εμπύθιση του χρήστη όσο και για δυνατότητα επαυξημένης πραγματικότητας, κυρίως σε σχέση με το πλαίσιο χειρισμού ενός πραγματικού κυττάρου σε τοπικό επίπεδο. Οι δυνατότητες είναι μεγάλες: η πρόοδος της τεχνολογίας στον χώρο της τρισδιάστατης απεικόνισης (π.χ. τηλεοράσεις 3D), αλλά και η αλλαγή στον τρόπο εισαγωγής δεδομένων (π.χ. ευρεία χρήση οθονών αφής), σε συνδυασμό με την τάση αύξησης της κινητικότητας (π.χ. *smart phones*), επιτρέπει την χρήση περισσότερων εμπορικών συσκευών αντί εξειδικευμένου εξοπλισμού, επιτρέποντας στις εφαρμογές να χρησιμοποιηθούν πιο μαζικά, με παράλληλη μείωση του κόστους.

Συμπερασματικά, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και η πιλοτική υλοποίησή της, καταδεικνύουν την ορθότητα της προσέγγισης, μέσω ισορροπίας μεταξύ ελευθερίας επιλογών και κανονιστικού πλαισίου. Η γενικότητά της θεωρείται δεδομένη, καθώς οποιοδήποτε αντικείμενο τόσο στο στενό πλαίσιο των συστημάτων κατεργασιών όσο και ευρύτερα σε συστήματα παραγωγής είναι δυνατό να αναλυθεί και να πραγματωθεί. Οι πιθανές επεκτάσεις της, δε, υπογραμμίζουν την ευελιξία της μεθοδολογίας και ενισχύονται από την φαντασία του ερευνητή μέσα στο πλαίσιο ανάπτυξης.

Βιβλιογραφία

Agrawala, M., Beers, A. C., McDowall, I., Frohlich, B., Bolas, M., & Hanrahan, P. (1997). The two-user Responsive Workbench: support for collaboration through individual views of a shared space. *24th Annual International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, (σσ. 327-332).

Artaud, A. (1938). *The Theater and Its Double*.

Babiceanu, R., & Chen, F. (2006). Development and applications of holonic manufacturing systems: a survey. *Journal of Intelligent Manufacturing*.

Belousov, I. R., Tan, J., & Clapworthy, G. J. (1999). Teleoperation and Java3D Visualization of a Robot Manipulator over the World Wide Web. *3rd International Conference on Information Visualisation*.

Bergen, G. v. (2004, January 19). *SOLID: Software Library for Interference Detection*. (Technische Universiteit Eindhoven) Ανάκτηση από <http://www.win.tue.nl/~gino/solid/>

Berthier, D. (2004). *Meditations sur le reel et le virtuel*. Paris: L'Harmattan.

Bingul, Z., Ertunc, H. M., & Oysu, C. (2005). *Applying Neural Network to Inverse Kinematic Problem for 6R Robot Manipulator with Offset Wrist*. Vienna, Austria: Springer.

Biocca, F. (1997). The Cyborg's Dilemma: Progressive Embodiment in Virtual Environments. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3 (2).

Bolas, M. T., Lorimer, E. R., McDowall, I. E., & Mead, R. X. (1994). Proliferation of counterbalanced, CRT-based stereoscopic displays for virtual environment viewing and control. *Proceedings of the International Society of Optical Engineering*, 2177.

Bondy, J. A., & Murty, U. S. (1976). *Graph theory with applications*. Department of Combinatorics and Optimization, University of Waterloo, Ontario, Canada: Elsevier.

Burdea, G. C. (1999). The Synergy Between Virtual Reality and Robotics. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 15 (3), 400-410.

- Burdea, G. C., & Coiffet, P. (2003). *Virtual Reality Technology*.
- Chapelle, F., & Bidaud, P. (2001). A Closed Form for Inverse Kinematics Approximation of General 6R Manipulators using Genetic Programming. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (σσ. 3364-3369). Seoul, Korea.
- Chapelle, F., & Bidaud, P. (2004). Closed form solutions for inverse kinematics approximation of general 6R manipulators. *Mechanism and Machine Theory* (39), 323-338.
- Cliburn, D. C., & Stormer, K. (2005). The HIVE: Hanover immersive virtual environment. *Journal of Computing Sciences in Colleges*, 20 (4), 6-12.
- Cohen, J. D., Lin, M. C., Manocha, D., & Ponamgi, M. (1995). I-COLLIDE: an interactive and exact collision detection system for large-scale environments. *Symposium on Interactive 3D Graphics* (σσ. 189 - ff). Monterey, California, USA: ACM.
- Courter, D., Springer, J. P., Neumann, C., Cruz-Neira, C., & Reiners, D. (2010). Beyond Desktop Point and Click: Immersive Walkthrough of Aerospace Structures. *IEEE Aerospace Conference*.
- Cutler, L. D., Frohlich, B., & Hanrahan, P. (1997). Two-handed direct manipulation on the responsive workbench. *Symposium on Interactive 3D Graphics* (σσ. 107-114). Providence, Rhode Island, USA: ACM.
- David, R. (1995). Grafcet: A Powerful Tool for Specification of Logic Controllers. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 3 (3), 253-268.
- Delaney, B. (1994). Immersive VR Tests Best. *CyberEdge Journal*, 4 (24), 6.
- Deleuze, G. (2002). *The Actual and the Virtual (Dialogues)*. Columbia UP.
- Fairen, M., Brunet, P., & Techmann, T. (2004). MiniVR: a portable virtual reality system. *Computers and Graphics*, 28 (2), 289-296.
- Funkhouser, T. A., & Sequin, C. H. (1993). Adaptive display algorithm for interactive frame rates during visualization of complex virtual environments. *20th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, (σσ. 247-254). Anaheim, California, USA.

Gilbert, E., Johnson, D., & Keerthi, S. (1988). A fast procedure for computing the distance between complex objects in three-dimensional space. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 193 - 203.

Ginzburg, A., & Yoeli, M. (1980). Vector addition systems and regular languages. *Journal of Computer and System Sciences*, 20 (3), 277-284.

Girard, J.-Y. (1987). Linear logic. *Theoretical Computer Science* (1), 1-101.

Goel, A. K., Rugaber, S., & Vattam, S. (2009). Structure, behavior, and function of complex systems: The structure, behavior, and function modeling language. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* (23), 23-35.

Gottschalk, J. (1997, September 6). *RAPID*. (University of North Carolina at Chapel Hill) Ανάκτηση από Geometric Algorithms for Modeling, Motion and Animation: <http://gamma.cs.unc.edu/OBB/>

Gottschalk, S., Lin, M., & Manocha, D. (1996). OBB-tree: A hierarchical structure for rapid interference detection. *SIGGRAPH*, (σσ. 171 - 180).

Heilig, M. (1955). The Cinema of the Future. *Expacios*.

Hennessy, J. L., & Patterson, D. A. (2007). *Computer Architecture: A Quantitative Approach*.

Hibino, H., Inukai, T., & Fukuda, Y. (2006). Efficient manufacturing system implementation based on combination between real and virtual factory. *International Journal of Production Research*, 44 (18-19), 3897-3915.

Hightower, J., Borriello, G., & Want, R. (2000). *SpotON: An Indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength*. Seattle, WA: UW CSE Technical Report #2000-02-02.

Hubbard, P. M. (1995). Collision Detection for Interactive Graphics Applications. 1 (3), 218-230.

Hudson, T. C., Lin, M. C., Cohen, J., Gottschalk, S., & Manocha, D. (1997). V-COLLIDE: an interactive and exact collision detection system for large-scale environments. *Second Symposium on Virtual Reality Modelin Language* (σσ. 117 - ff). Monterey, California, USA: ACM.

Jayram, S., Jayram, U., Wang, Y., Tirumali, H., Lyons, K., & Hart, P. (1999). VADE: A Virtual Assembly Design Environment. *IEEE Computer Graphics*, 19 (6), 44-50.

Kanai, S., Takahashi, H., & Kishinami, T. (1997). Networked Haptic Interfaces for Distant Redesign and Review of Free-Form Surfaces. *ASME Design Engineering Technical Conference*. Sacramento CA.

Klosowski, J. T., Held, M., Mitchell, J. S., Sowizral, H., & Zikan, K. (1998). Efficient collision detection using bounding volume hierarchies of k-dops. *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, 21 - 36.

Kolb, A., Latta, L., & Rezk-Salama, C. (2004). Hardware-based simulation and collision detection for large particle systems. *SIGGRAPH/EUROGRAPHICS conference on Graphics hardware*. Grenoble: ACM.

Kuffner, J., Nishiwaki, K., Kagami, S., Kuniyoshi, Y., Inaba, M., & Inou, H. (2002). Self-Collision Detection and Prevention for Humanoid Robots. *IEEE International conference on Robotics and Automation*. Washington, DC: IEEE.

Latoschik, M., Frohlich, M., Jung, B., & Wachsmuth, I. (1998). Utilize speech and gestures to realize natural interaction in a virtual environment. *24th Annual Conference of the IEEE*, 4, σσ. 2028-2033.

Lemaignan, S., Siadat, A., Dantan, J.-Y., & Semenenko, A. (2006). MASON: A Proposal For An Ontology Of Manufacturing Domain. *IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications (DIS'06)*.

Li, Y., Ho, J., & Li, N. (2000). Development of a physically behaved robot work cell in virtual reality for task teaching. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* (16), 91-101.

Li, Z., Yang, M. C., & Ramani, K. (2009). A methodology for engineering ontology acquisition and validation. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* (23), 37-51.

Lin, H. -K., Hardinga, J. A., & Shahbaza, M. (2004). Manufacturing system engineering ontology for semantic interoperability across extended project teams. *International Journal of Production Research*, 42 (24), 5099-5118.

Lin, H., & Hardingb, J. (2007). A manufacturing system engineering ontology model on the semantic web for inter-enterprise collaboration. *Computers in Industry* , 58 (5), 428-437.

Lin, M. C., & Gottschalk, S. (1998). Collision detection between geometric models: a survey. *IMA Conference on Mathematics of Surfaces*. Birmingham.

Manocha, D., & Canny, J. F. (1994). Efficient Inverse Kinematics for General 6R Manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* , 10 (5), 648-657.

Min, B.-K., Huang, Z., Pasek, Z. J., Yip-Hoi, D., Husted, F., & Marker, S. (2002). Integration of Real-Time Control Simulation to a Virtual Manufacturing Environment. *Journal of Advanced Manufacturing Systems* , 1 (1), 67-87.

Moore, P., Pu, J., Ng, H., Wong, C. B., Chong, S., Chen, X., και συν. (2003). Virtual engineering: an integrated approach to agile manufacturing machinery design and control. *Mechatronics* (13), 1105-1121.

Moreland, K., Wylie, B., & Pavlakos, C. (2001). Sort-last parallel rendering for viewing extremely large data sets on tile displays. *IEEE Symposium on Parallel and Large-data Visualization and Graphics*, (σ. 85-92). San Diego, California.

Mueller-Wittig, W., Jegathese, R., Song, M., Quick, J., Wang, H., & Zhong, Y. (2002). Virtual Factory - Highly Interactive Visualisation for Manufacturing. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*.

Nash, J. (1997). Wiring the Jet Set. *Wired Magazine* (5.10).

Pandzic, I. S., Lee, E., Thalmann, N. M., Capin, T. K., & Thalmann, D. (2008). A Flexible Architecture for Virtual Humans in Networked Collaborative Virtual Environments. *Computer Graphics Forum* , 16 (3), C177-C188.

Pedrazzoli, P., Sacco, M., Jonsson, A., & Boer, C. R. (2007). Virtual Factory Framework: Key Enabler For Future Manufacturing . *Digital Enterprise Technology: perspectives and future challenges (DET2007)*.

Petri, C. A. (1976). *Interpretation of Net Theory*. Bonn: Interner Bericht.

Petri, C. A. (1962). *Kommunikation mit Automaten*. Technical University Darmstadt.

Pieper, D. L. (1968). The kinematics of manipulators under computer control. PhD Thesis: Stanford University, Department of Mechanical Engineering.

Porta, J. M., Ros, L., & Thomas, F. (2005). INVERSE KINEMATICS BY DISTANCE MATRIX COMPLETION. *12th International Workshop on Computational Kinematics (CK2005)*. Cassino.

Regan, M., & Pose, R. (1994). Priority rendering with a virtual reality address recalculation pipeline. *21st International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, (σσ. 155-162).

Ribo, M., Pinz, A., & Fuhrmann, A. (2001). A new optical tracking system for virtual and augmented reality applications. *18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 3, σσ. 1932-1936.

Roehl, B. (1995). Distributed virtual reality: an overview. *1st Symposium on Virtual Reality Modeling Language*, (σσ. 39-43).

Schlenoff, C., Ivester, R., & Knutilla, A. (1998). A Robust Process Ontology for Manufacturing Systems Integration. *Proceedings of 2nd International Conference on Engineering Design and Automation*. Maui, Hawaii.

Schraft, R., Neugebauer, J., & Grefen, K. (1997). Factory and Logistics Planning with Virtual Reality. *7th International Conference of Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, (σσ. 958-968).

Shen, W., Hao, Q., Yoon, H., & Norrie, D. (2006). Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review. *Advanced Engineering Informatics*.

SIEMENS. (n.d.). Ανάκτηση από http://www.plm.automation.siemens.com/es_mx/products/tecnomatix/assembly_planning/jack/task_analysis_toolkit.shtml

Sowizral, H. A., & Deering, M. F. (1999). The Java 3D API and Virtual Reality. *IEEE Computer Graphics*, 19 (3), 12-15.

Strommer, W., Neugebauer, J., & Flaig, T. (1993). Transputer-Based Virtual Reality Workstation as Implemented for the Example of Industrial Robot Control. *Interfaces to Real and Virtual Worlds Conference*, (σσ. 137-146). Montpellier, France.

Turner, M. L., Gomez, D. H., Tremblay, M. R., & Cutkosky, M. R. (1998). Preliminary Tests of an Arm-Grounded Haptic Feedback Device in Telemanipulation. *ASME IMECE Haptics Symposium*. Anaheim, California, USA.

Weyrich, M., & Drews, P. (1999). An interactive environment for virtual manufacturing: the virtual workbench. *Computers in Industry* (38), 5-15.

Whyte, J. (2001). Business Drivers for the Use of Virtual Reality in the Construction Sector. *Conference on Applied Virtual Reality in Engineering and Construction/Applications of Virtual Reality Current Initiatives and Future Challenges*, (σσ. 99-105). Gothenburg, Sweden.

Xiang, W., & Lee, H. (2008). Ant colony intelligence in multi-agent dynamic manufacturing scheduling. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*.

Yanagihara, Y., Kakizaki, T., Arakawa, K., & Uemo, A. (1996). Task World Reality for Human and Robot System - A Multimodal Teaching Advisor and Its Implementation. *IEEE International Workshop on Robot-Human Communication*, (σσ. 38-43). Tsukuba, Japan.

Zachman, G. (1998). Rapid Collision Detection by Dynamically Aligned DOP-Trees. *Virtual Reality Annual International Symposium*, (σ. 90).

Zachmann, G., & Felger, W. (1995). The BoxTree: Enabling real time and exact collision detection of arbitrary polyhedra. *1st Workshop on Simulation and Interaction in Virtual Environments*, (σσ. 104-113).

Zhai, W., Fan, x., Yan, J., & Zhu, P. (2002). An Integrated Simulation Method to Support Virtual Factory Engineering. *International Journal of CAD/CAM*, 2 (1), 39-44.

Zhao, Q., Wu, W., Shen, X., Hao, A., Liang, X., & He, B. (2003). DVENET: a distributed integrated environment of virtual reality application. *3rd International Conference on Virtual Reality and Its Application in Industry*. 4756, σσ. 206-211. SPIE.