



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

**Διερεύνηση Μεθοδολογίας και Εργαλείων Κατασκευής  
Μοντέλων Εικονικής Πραγματικότητας για Ρομποτικά Κύτταρα  
Κατεργασιών**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

του

**ΛΕΒΕΔΙΑΝΟΥ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ**

**Επιβλέπων :** Γ.-Χ. Βοσνιάκος  
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2013



## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η μεθοδολογία και τα εργαλεία κατασκευής μοντέλων εικονικής πραγματικότητας για ρομποτικά κύτταρα κατεργασιών, χρησιμοποιώντας το λογισμικό ανάπτυξης διαδραστικών εικονικών εφαρμογών 3DVIA Virtools. Στο πλαίσιο αυτό επιχειρήθηκε η προσομοίωση ενός σύγχρονου κέντρου τόννευσης (Mori Seiki NT 4250) και ενός ρομποτικού βραχίονα έξι περιστροφικών αρθρώσεων 6R (Fanuc R2000iA-125L) σε τέσσερις βασικούς άξονες: γεωμετρική, κινηματική, λειτουργική μοντελοποίηση και διάδραση.

Σύμφωνα με τα παραπάνω υλοποιήθηκαν αλγόριθμοι κίνησης των διαφόρων μερών του κέντρου τόννευσης και αλγόριθμοι ευθείας και αντίστροφης κινηματικής του ρομποτικού βραχίονα 6R, οι οποίοι ενσωματώθηκαν στο πρότυπο σύστημα ΕΠ, μέσω του λογισμικού 3DVIA Virtools, με την μορφή «συμπεριφορών», παρέχοντας τη δυνατότητα ανάκτησης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε πραγματικό χρόνο. Παράλληλα χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός εικονικής πραγματικότητας για την αλληλεπίδραση με το χρήστη. Συγκεκριμένα, έγινε χρήση χειριστηρίων, ενός μαγνητικού ανιχνευτή έξι βαθμών ελευθερίας, καθώς και συστήματος προβολικής επιπροσωπίδας. Μέσω της εικονικής προσομοίωσης και της αλληλεπίδρασης του χρήστη με το εικονικό περιβάλλον, το σύστημα αξιολογήθηκε ως κατάλληλο. Τα κύρια πλεονεκτήματα του είναι η δυνατότητα διάδρασης και εμπύθισης του χρήστη, καθώς και η δυνατότητα άντλησης χρήσιμων δεδομένων από το εικονικό περιβάλλον που μπορούν, υπό συνθήκες, να χρησιμοποιηθούν σε πληθώρα εφαρμογών πραγματικών συστημάτων κατεργασιών. Επιπλέον, το σύστημα επικυρώθηκε όσον αφορά στην ανίχνευση συγκρούσεων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται και ποσοτικά με μια σειρά παραδειγμάτων, δείγμα των δυνατοτήτων, αλλά και των περιορισμών, του συστήματος.

Τέλος, οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν συνιστούν μια βιβλιοθήκη επαναχρησιμοποιήσιμου κώδικα με την μορφή «συμπεριφορών» στο 3DVIA Virtools, παρέχοντας τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε αρθρωτούς ρομποτικούς βραχίονες 6R ή μέρη εργαλειομηχανών που παρουσιάζουν αντίστοιχα κινηματικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά. Σκοπός ήταν η βιβλιοθήκη να αποτελέσει τη βάση για επόμενες εργασίες και έρευνα πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

**Λέξεις Κλειδιά:** συστήματα κατεργασιών, εικονική πραγματικότητα, εικονικό περιβάλλον, εικονικά συστήματα κατεργασιών, διάδραση, ρομποτικά κύτταρα κατεργασιών, κινηματική αρθρωτών ρομποτικών βραχιόνων, προγραμματισμός αρθρωτών ρομποτικών βραχιόνων, εικονικό κέντρο τόννευσης

## Abstract

The scope of this study is the investigation of the methodology and the tools for constructing virtual reality models of robotic manufacturing cells, using 3DVIA Virtools, a development platform for interactive virtual applications. Within this framework, the simulation of a modern turning center (Mori Seiki NT 4250) and a 6R articulated robotic manipulator (Fanuc R2000iA-125L) is presented, focusing in four main areas: geometric, kinematic, functional modelling and interaction.

According to this, motion algorithms for the architectural components of the turning center as well as forward and inverse kinematics of the robotic manipulator were implemented. The algorithms were embedded in the VR environment, using 3DVIA Virtools, in the form of 'behaviors', making use of real-time data during simulation. Virtual reality equipment was used for the interaction of the user with the system; namely, the system was coupled and synchronized with a gamepad, a six DOF magnetic tracker and a Head Mounted Display (HMD). The thesis presents successful simulation, in terms of accurate implementation of the real machines and mechanisms, as well as with regard to user interaction with the virtual environment. The main advantages of the system is the immersion of the user into the virtual environment and the fact that data retrieved from the virtual system can be applied, under specific circumstances, upon real systems. Moreover, the system was confirmed in terms of collision detection. The simulation results are presented through a series of paradigms which show the system's capabilities, as well as its limitations.

Lastly, the algorithms which were developed, form a library of reusable code of 'behaviors' in 3DVIA Virtools, applicable in similar 6R robotic manipulators and components of machine tools with relevant kinematic and functional features. This database and the proposed methodology, provide a solid basis for future research in this field.

**Keywords:** manufacturing systems, virtual manufacturing, virtual reality, virtual environment, virtual manufacturing systems, interaction, robotic manufacturing cells, kinematics of articulated robotic manipulator, programming of robotic manipulator, virtual turning center

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, στα πλαίσια των ερευνητικών δραστηριοτήτων του Εργαστηρίου Κατεργασιών των Υλικών.

Επιβλέπων ήταν ο Αναπλ. Καθηγητής κ. Γ.-Χ. Βοσνιάκος, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεση της εργασίας αυτής και τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Η ουσιαστική βοήθεια και η υποστήριξη που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια, ήταν καθοριστικής σημασίας για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Τον ευχαριστώ ειλικρινά για την υπομονή και εμπιστοσύνη που μου έδειξε.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον φίλο και συνάδελφο, Δρ. Ξενοφώντα Β. Γωγουβίτη για την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας και όχι μόνο. Οι εύστοχες παρατηρήσεις, υποδείξεις, αλλά και συμβουλές του πέραν των ορίων της εργασίας αυτής εξακολουθούν να με επηρεάζουν και να με διαμορφώνουν.

Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω το προσωπικό του ερευνητικού κέντρου FCIM του τμήματος ETSEIB του Πολυτεχνείου της Καταλωνίας(UPC) και τον καθηγητή Juan Ramon Goma για την φιλοξενία και την άψογη συνεργασία μας κατά την διαμονή μου στην Βαρκελώνη, όπου εκπονήθηκε μέρος της εργασίας στα πλαίσια του προγράμματος Erasmus. Καθώς και τους φίλους και συνεργάτες από το εργαστήριο Κατεργασιών των Υλικών του ΕΜΠ.

Τέλος δεν θα μπορούσα να παραλείψω την οικογένειά μου για την συμπαράστασή τους, αλλά και όλους όσους βοήθησαν, ο καθένας με τον δικό του τρόπο, στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Μάλλον η λίστα είναι πολύ μεγάλη, ξέρουν όμως καλά ποιοι είναι και για αυτό τους ευχαριστώ.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2013

*Στους Βάσω  
και Γιώργο Βούλαρη,*



## Πίνακας περιεχομένων

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
1.1	Εικονικά Συστήματα Κατεργασιών.....	1
1.2	Αντικείμενο διπλωματικής.....	3
<b>2</b>	<b>Εικονική Πραγματικότητα .....</b>	<b>5</b>
2.1	Ορισμός.....	5
2.1.1	<i>Reality-Virtuality continuum</i> .....	6
2.2	Ιστορική Αναδρομή .....	7
2.3	Συστήματα Εικονικής πραγματικότητας .....	8
2.3.1	<i>Λογισμικό</i> .....	10
2.3.2	<i>Συσκευές εισόδου</i> .....	11
2.3.3	<i>Συσκευές εξόδου</i> .....	13
2.4	Κατηγοριοποίηση συστημάτων ΕΠ.....	14
2.5	Ανάπτυξη Εικονικού Περιβάλλοντος.....	15
2.5.1	<i>Δομικά στοιχεία ΕΠΕ</i> .....	15
2.5.2	<i>Κατευθυντήριες γραμμές σχεδιασμού ΕΠΕ</i> .....	16
2.6	Σημερινή κατάσταση.....	19
<b>3</b>	<b>Virtual Manufacturing .....</b>	<b>21</b>
3.1	Η γενική ιδέα της ολοκληρωμένης παραγωγής – CIM.....	21
3.1.1	<i>Συστατικά Ολοκληρωμένης Παραγωγής</i> .....	22
3.1.2	<i>Από την Ολοκληρωμένη Παραγωγή στο VM</i> .....	23
3.2	Virtual Manufacturing.....	24
3.2.1	<i>Ορισμός του Virtual Manufacturing</i> .....	24
3.3	Κατηγορίες του Virtual Manufacturing.....	25
3.3.1	<i>Σχεδιασμός - Design</i> .....	25
3.3.2	<i>Λειτουργίες Διαχείρισης – Operations Management</i> .....	26
3.3.3	<i>Διαδικασίες παραγωγής – Manufacturing processes</i> .....	27
3.4	Εικονικά Εργοστάσια – Virtual Factory.....	28
<b>4</b>	<b>Μεθοδολογία.....</b>	<b>30</b>



4.1 Προσδιορισμός του Αντικειμένου.....	33
4.2 Προδιαγραφές Εικονικού Συστήματος Κατεργασιών.....	35
4.3 Κατασκευή ΕΠΕ.....	36
4.4 Διεπαφή.....	36
4.5 Εφαρμογή.....	37
<b>5 Επιλογή προς μοντελοποίηση μηχανών και περιγραφή τους.....</b>	<b>38</b>
5.1 Κέντρα Κατεργασιών – Κέντρα Τόρνευσης.....	39
5.1.1 Εργαλειομηχανές πέντε αξόνων.....	40
5.1.2 Χρήσης εργαλειομηχανών πέντε αξόνων.....	42
5.1.3 Σημσιολογικό Μοντέλο κέντρου τόρνευσης 5 αξόνων.....	45
5.1.4 MORI SEIKI NT.....	48
5.2 Βιομηχανικοί ρομποτικοί βραχίονες.....	53
5.2.1 Αρθρωτοί Βιομηχανικοί βραχίονες έξι περιστροφικών αρθρώσεων (6R).....	54
5.2.2 Περισσότερα Τεχνικά Χαρακτηριστικά.....	57
5.2.3 Μέθοδοι προγραμματισμού ρομπότ.....	59
5.2.4 Τύποι Κίνησης .....	62
5.2.5 Σημσιολογικό μοντέλο ρομποτικών βραχιόνων 6R.....	66
5.2.6 FANUC R2000iA /125L.....	68
<b>6 Κινηματική Ανάλυση αρθρωτών ρομποτικών βραχιόνων 6R.....</b>	<b>71</b>
6.1 Ευθεία κινηματική ανάλυση ρομποτικού βραχίονα 6R.....	72
6.2 Γεωμετρική αναπαράσταση.....	72
6.3 Αντίστροφη κινηματική, οικογένειας ρομποτικών βραχιόνων 6R.....	75
6.3.1 Υλοποίηση.....	76
6.3.2 Υπολογισμός $q_1, q_2, q_3$ .....	77
6.3.3 Υπολογισμός $q_4, q_5, q_6$ .....	82
6.4 Ευρέως χρησιμοποιούμενα «πλαίσια» στη ρομποτική.....	84
<b>7 Ανάπτυξη ΕΠΕ με το λογισμικό 3DVIA Virtools.....</b>	<b>86</b>
7.1 3DVIA Virtools.....	87
7.2 Ταξική Ιεραρχία και Σχεδιαστικά Στοιχεία .....	89
7.3 Γραφικό περιβάλλον διεπαφής - Graphical User Interface (GUI).....	92
7.3.1 Το παράθυρο τρισδιάστατης διάταξης-3D Layout Window.....	93

7.3.2	<i>Level Manager, Schematic και γραμμή κατάστασης</i> .....	94
7.3.3	<i>Data Resources and Building Blocks</i> .....	95
7.4	Εισαγωγή στον Προγραμματισμό Συμπεριφορών.....	97
7.4.1	<i>Στοιχεία Δόμησης Συμπεριφοράς BBs (Behaviour Building Blocks)</i> .....	97
7.4.2	<i>Πρωτογενή στοιχεία σύνθεσης των BBs</i> .....	98
7.4.3	<i>Παράμετροι – Parameters</i> .....	99
7.4.4	<i>Παράμετρος Στόχος – Target Parameter</i> .....	100
7.4.5	<i>Παραμετρικές Λειτουργίες - paramOp (Parameter Operations)</i> .....	101
7.4.6	<i>Σύμβολα "C", "S" και "V"</i> .....	102
7.4.7	<i>Μηνύματα - Messages</i> .....	103
7.4.8	<i>Γραφήματα Συμπεριφοράς BG – Behaviour Graphs</i> .....	104
7.5	Συμβατοί τύποι αρχείων.....	105
<b>8</b>	<b>Πιλοτική Εφαρμογή</b> .....	<b>107</b>
8.1	Πρακτικά βήματα υλοποίησης.....	107
8.2	Αρχικό στάδιο μοντελοποίησης.....	108
8.2.1	<i>Εισαγωγή εικονικών αντικειμένων</i> .....	109
8.2.2	<i>Συναρμολόγηση οντοτήτων και δημιουργία σημείων ελέγχου με 3D Πλαίσια</i> .....	109
8.2.3	<i>Διαχείριση ιεραρχιών εικονικών αντικειμένων</i> .....	112
8.2.4	<i>Καθορισμός αρχικών συνθηκών οντοτήτων</i> .....	114
8.3	Μοντελοποίηση Δομικών Γραφημάτων Συμπεριφορών – ΔΓΣ.....	115
8.3.1	<i>Περιστροφική Κίνηση Ατράκτου (RPM) - Spindle Rotation (RPM)</i> .....	116
8.3.2	<i>Προσδιορισμός Διαμέτρου του Τσωκ - Modify Chuck Diameter</i> .....	118
8.3.3	<i>Περιστροφή 3D Οντοτήτων</i> .....	120
8.3.4	<i>Κίνηση 3D οντότητας κατά μήκος άξονα X,Y ή Z</i> .....	122
8.3.5	<i>Περιορισμός της κίνησης</i> .....	124
8.3.6	<i>Αντίστροφη Κινηματική εργαλειοφορείου Φρέζας και Τόρνευσης</i> .....	125
8.3.7	<i>Αντίστροφη Κινηματική ρομποτικών βραχιόνων 6R</i> .....	127
8.3.8	<i>Ευθύγραμμη μετατόπιση σε σημείο στο χώρο (X,Y,Z) με ταχύτητα V</i> .....	129
8.3.9	<i>Αυτόματη Αλλαγή Εργαλείων</i> .....	130
8.4	Προγραμματισμός και Διαχείριση Συμπεριφορών .....	132
8.4.1	<i>Μετατόπιση ακολουθώντας ορισμένη τροχιά</i> .....	132
8.4.2	<i>Μηχανισμός αντίχτυσης συγκρούσεων</i> .....	137

8.4.3	Σύνθεση αλληλουχίας κινήσεων.....	138
<b>9</b>	<b>Σύστημα και Διάδραση.....</b>	<b>143</b>
9.1	Δομή του συστήματος.....	143
9.2	Υποσύστημα Διάδρασης.....	144
9.2.1	Εξοπλισμός .....	145
9.2.2	Συσκευή χειρισμού ηλεκτρονικών παιχνιδιών - <i>GamePad</i> .....	145
9.2.3	Προβολικό Σύστημα Επιπροσωπίδας ( <i>Head Mounted Display – HMD</i> ).....	146
9.2.4	Μαγνητικός ανιχνευτής θέσης 6 βαθμών Ελευθερίας.....	147
9.3	Χρήση του εξοπλισμού.....	148
9.3.1	Ποντίκι.....	148
9.3.2	Πληκτρολόγιο.....	148
9.3.3	Χειριστήριο.....	149
9.3.4	Προβολικό Σύστημα Επιπροσωπίδας.....	150
9.3.5	Μαγνητικός ανιχνευτής θέσης – <i>FOB</i> .....	151
<b>10</b>	<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>154</b>
10.1	Συνεισφορά.....	154
10.2	Δυνατότητες και πλεονεκτήματα του συστήματος.....	155
10.3	Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	156

# 1

## *Εισαγωγή*

### *1.1 Εικονικά Συστήματα Κατεργασιών*

Ο τομέας των κατεργασιών έχει αλλάξει ριζικά τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Τα τεχνολογικά άλματα, τα οποία έγιναν στο διάστημα αυτό και συνεχίζουν να γίνονται με ραγδαίους ρυθμούς, δημιουργούν συνεχόμενα τη δυνατότητα παραγωγής νέων και πιο εξελιγμένων προϊόντων. Παράλληλα, από την πλευρά της αγοράς, παρατηρείται ζήτηση ολοένα και πιο εξατομικευμένων και διαφοροποιημένων προϊόντων καθώς και ανάγκη βελτιστοποίησης της ποιότητας και μείωσης του χρόνου παράδοσης. Έτσι, τόσο η εξέλιξη της επιστήμης όσο και οι αυξανόμενες απαιτήσεις της αγοράς που αυτή συνεπάγεται, οδήγησαν στην τεράστια ανάπτυξη των κλάδων των κατεργασιών και της παραγωγής.

Ο επαναπροσδιορισμός του κλάδου των κατεργασιών έγκειται στον εμπλουτισμό και την συνεργασία του με διάφορους άλλους κλάδους της επιστήμης, προκειμένου να αντεπεξέλθει στις σύγχρονες απαιτήσεις που θέτουν σαν πρωταρχικό στόχο την ευελιξία. Νέες ορολογίες και τεχνικές, όπως Digital Manufacturing, Virtual Manufacturing, New Manufacturing, εμφανίζονται διαρκώς στο προσκήνιο και υπόσχονται ότι θα διαδραματίσουν πρωταγωνιστικό ρόλο στον δρόμο για την κατάκτηση της αγοράς. Σήμερα ο τομέας των κατεργασιών έχει μετατραπεί

περισσότερο σε μία επιστήμη πληροφοριών, οικονομικών, διαχείρισης και λήψης αποφάσεων, έχει να κάνει πολύ περισσότερο με προγραμματιστικές δεξιότητες και απασχολεί εξειδικευμένους σε πολλούς τομείς εργαζομένους.

Στο πλαίσιο αυτό, προκειμένου να υποστηριχθούν πολυδιάστατες διεργασίες, προτείνεται τη δημιουργία ενός συνθετικού και ολοκληρωμένου περιβάλλοντος, που αποτελείται από εργαλεία λογισμικού, συστημάτων προσομοίωσης και εικονικής πραγματικότητας(ΕΠ) – Virtual Reality(VR). Αντικειμενικός σκοπός της προσπάθειας αυτής είναι η παροχή νέων πόρων στους μηχανικούς, που θα τους βοηθήσουν να σχεδιάζουν, να αξιολογούν και να ελέγχουν, μέσω της προσομοίωσης, πολύπλοκα συστήματα σε ένα εικονικό περιβάλλον. Αυτός ο τομέας, που προσδιορίζεται με τον όρο Virtual Manufacturing(VM), ευελπιστεί να παρέχει ένα γρήγορο και ολιστικό τρόπο διεξαγωγής πειραμάτων, ώστε να προβλεφθούν και να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα εναλλακτικών αποφάσεων παραγωγής, πριν ξοδευτεί χρόνος και χρήμα για την κατασκευή του σε φυσικές μακέτες. Παράλληλα νέες τεχνικές υπόσχονται την ενσωμάτωσή του VM στην παραγωγή με έναν πιο ενεργό χαρακτήρα.

Η Προσομοίωση είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάλυση των συστημάτων κατεργασιών, τόσο στην φάση του σχεδιασμού αλλά και για λειτουργίες κατά την παραγωγική διαδικασία. Τα τελευταία χρόνια, οι διαδικασίες της μοντελοποίησης και ανάλυσης έχουν ενισχυθεί σημαντικά από την εξέλιξη της τεχνολογίας τόσο στον τομέα του λογισμικού όσο και του υλικού εξοπλισμού, με ολοένα και πιο ισχυρές υπολογιστικές πλατφόρμες. Αυτό επέτρεψε την ανάπτυξη υψηλής πιστότητας μοντέλων συστημάτων κατεργασιών, τουλάχιστον από μια υπολογιστική σκοπιά, με σημαντικά οφέλη στην απόδοση συστημάτων σχεδίασης και προτυποποίησης. Ωστόσο, τέτοιου είδους συστήματα πρέπει να υποστηρίζονται από μία πειθαρχημένη μοντελοποίηση και δομημένη προσέγγιση για την προσομοίωση διεργασιών παραγωγής μέσα στο εργοστάσιο. Στην παρούσα διπλωματική περιγράφονται τα αποτελέσματα της ενσωμάτωσης συστημάτων Εικονικής Πραγματικότητας(ΕΠ) στα συστήματα κατεργασιών και γίνεται μία προσπάθεια προσομοίωσης αυτών σε ένα Εικονικό Περιβάλλον(ΕΠΕ). Όπως πολλές αναδυόμενες τεχνολογίες προσομοίωσης,

η ΕΠ έχει ξεπεράσει τον ενθουσιασμό και τις υπερβολές της σαν πρωτοεμφανιζόμενη τεχνολογία και έχει πλέον ωριμάσει, αποτελώντας ένα χρήσιμο εργαλείο σε μια ποικιλία βιομηχανιών παραγωγής.

## ***1.2 Αντικείμενο διπλωματικής***

Η βασική ερευνητική περιοχή της διπλωματικής εργασίας αφορά στο σχεδιασμό και τη λειτουργία συστημάτων κατεργασιών σε ένα εικονικό περιβάλλον. Συγκεκριμένα, επιχειρείται η μοντελοποίηση ενός σύγχρονου κέντρου τόννευσης και ενός ρομποτικού βραχίονα έξι περιστροφικών αρθρώσεων(6R) με το λογισμικό ανάπτυξης διαδραστικών εικονικών εφαρμογών 3DVIA VIRTTOOLS. Η μοντελοποίηση που επιχειρείται, έγκειται σε τέσσερα βασικά πλαίσια:

1. Γεωμετρική μοντελοποίηση: μορφή εργαλειομηχανών, χειριστών υλικού και βοηθητικών στοιχείων δηλ. ρομπότ, μεταφορικών ταινιών, παλετών κλπ.
2. Κινηματική μοντελοποίηση: κινήσεις των επιμέρους μερών του κέντρου τόννευσης και του ρομποτικού βραχίονα (ευθεία και ανάστροφη κινηματική).
3. Λειτουργική μοντελοποίηση: δηλαδή αποτύπωση των αλλαγών κατάστασης που μπορεί να είναι κινηματικής ή άλλης φύσεως και ακολουθούν συγκεκριμένη λογική διαδοχής – παραλληλίας.
4. Διάδραση, ο ενεργός ρόλος του χρήστη σε ένα τέτοιο εικονικό περιβάλλον συστημάτων κατεργασιών και η επικοινωνία-συνεργασία του με τα εικονικά μοντέλα.

Στόχος της εργασίας είναι να απαντήσει στα ακόλουθα ερωτήματα:

- Ποια είναι τα βήματα για να πραγματοποιηθεί μια πλήρης και χρήσιμη εικονική προσομοίωση συστημάτων κατεργασιών;
- Πώς είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί μια "συγχώνευση" μεταξύ εικονικού και φυσικού κόσμου συστημάτων κατεργασιών;

- Ποιοι είναι οι κρίσιμοι παράγοντες για την υλοποίηση τέτοιων εικονικών προσομοιώσεων με το λογισμικό 3DVIA Virtools, πόσο κατάλληλο είναι αυτό για την προσομοίωση συστημάτων κατεργασιών και πώς θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί;

# 2

## *Εικονική Πραγματικότητα*

### **2.1 Ορισμός**

Σε μια συζήτηση διάρκειας αρκετών αιώνων περί της φύσης του πραγματικού, ο όρος εικονική πραγματικότητα, αποτελώντας ένα κράμα αντιφατικών κατά μία έννοια συστατικών εγείρει επιπλέον προβληματισμούς. Ο όρος εισήχθη από τον Jaron Lanier το 1989 για να ορίσει «...ένα αλληλεπιδραστικό, τρισδιάστατο περιβάλλον, φτιαγμένο από υπολογιστή, στο οποίο μπορεί κάποιος να εμβυθιστεί». Έκτοτε δόθηκαν πολλοί εναλλακτικοί ορισμοί μερικοί από τους οποίους παρατίθενται παρακάτω:

- «Διαδραστικά γραφικά με τρισδιάστατα μοντέλα σε πραγματικό χρόνο, που σε συνδυασμό με μια τεχνολογία απεικόνισης δίνουν στο χρήστη την αίσθηση της “βύθισης” σε έναν εικονικό κόσμο – μοντέλο».
- «Η ψευδαίσθηση της συμμετοχής σε ένα συνθετικό περιβάλλον αντί της εξωτερικής παρατήρησης αυτού».
- «Οι προσομοιώσεις των υπολογιστών που χρησιμοποιούν 3Δ γραφικά και συσκευές, όπως ένα γάντι «DataGlove» που επιτρέπει στον χρήστη να «αλληλεπιδρά» με την προσομοίωση».



- «Η Εικονική πραγματικότητα αναφέρεται σε τρισδιάστατα διαδραστικά περιβάλλοντα ηλεκτρονικών υπολογιστών, εμπύθισης, πολύ-αισθητηριακά, με επίκεντρο τον θεατή, καθώς και στο συνδυασμό των τεχνολογιών που απαιτούνται για την κατασκευή αυτών των περιβαλλόντων».
- «Εικονική πραγματικότητα μας επιτρέπει να περιηγηθούμε και να βιώσουμε έναν κόσμο τριών διαστάσεων σε πραγματικό χρόνο, με έξι βαθμούς ελευθερίας. Στην ουσία, η εικονική πραγματικότητα είναι ένας κλώνος της φυσικής πραγματικότητας».

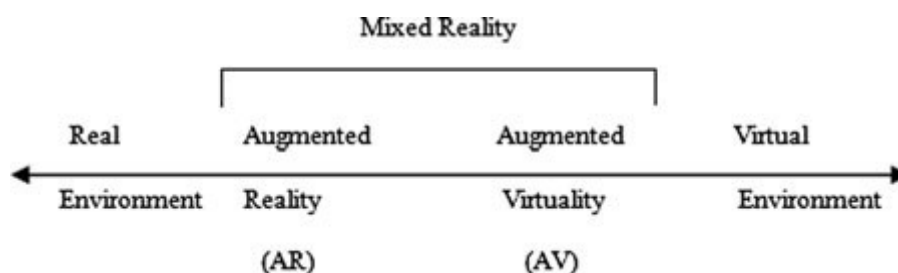
Με βάση τα παραπάνω, η Εικονική Πραγματικότητα επιτρέπει στον χρήστη να φτάσει σε ένα τρισδιάστατο (3Δ) κόσμο, στον οποίο ο χρήστης μπορεί να περιηγηθεί αλλά και με τον οποίο μπορεί να αλληλεπιδράσει σε πραγματικό χρόνο. Έτσι η ΕΠ είναι μια διαδραστική και καθηλωτική (με την αίσθηση της παρουσίας) – βιωματική εμπειρία σε έναν προσομοιωμένο αυτόνομο κόσμο.

Ορίζοντας ως εικονικό αυτό που δεν είναι υπαρκτό, υπό την έννοια της υλικής υπόστασης, ενώ ως πραγματικό αυτό που είναι αντιληπτό από τις ανθρώπινες αισθήσεις και κατά συνέπεια προκαλεί ανθρώπινες αντιδράσεις, η εικονική πραγματικότητα θα μπορούσε να ορισθεί σαν το σύνολο των ερεθισμάτων, που μπορούν να γίνουν αντιληπτά, να επεξεργαστούν και να προκαλέσουν αντιδράσεις, αντλώντας την υλική τους υπόσταση μόνο μέσα από την ψευδαίσθηση της αλληλεπίδρασης με το υποκείμενο. Στα εικονικά αντικείμενα δηλαδή, έχει προσδοθεί εξωγενώς η δυνατότητα αλληλεπίδρασης με τον άνθρωπο χωρίς αυτό να συνεπάγεται την υλική τους ύπαρξη.

### ***2.1.1 Reality-Virtuality continuum***

Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ιδέα της συνεχούς κλίμακας που υπάρχει μεταξύ του εντελώς εικονικού (εικονική πραγματικότητα) και του εντελώς πραγματικού (πραγματικότητα).

Το συνεχές πραγματικότητας-εικονικότητας περιλαμβάνει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς και συνθέσεις πραγματικών και εικονικών αντικειμένων (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 1: Κλίμακα συνεχούς πραγματικότητας-εικονικότητας

## 2.2 Ιστορική Αναδρομή

Η εικονική πραγματικότητα έχει τις ρίζες της στους χώρους της τέχνης. Στη ζωγραφική, περί τον 14ο αιώνα, η μελέτη της δημιουργίας της εντύπωσης του τρισδιάστατου χώρου σε μια δισδιάστατη επιφάνεια όπως ο καμβάς μπορεί να θεωρηθεί σαν μια πρώτη μορφή εικονικής πραγματικότητας.

Αργότερα η επινόηση της στερεοσκοπικής οθόνης από τον Wheatstone το 1833, έδωσε τη δυνατότητα θέασης στερεοσκοπικών εικόνων δημιουργώντας έτσι την αίσθηση του βάθους στο θεατή. Εξελίσσοντας την εφεύρεση αυτή ο Brewster δημιούργησε το 1844 το Viewmaster, ένα προϊόν ευρείας κατανάλωσης με το οποίο ο θεατής μπορούσε να δει μια αλληλουχία τρισδιάστατων εικόνων που αποτελούσαν μια ιστορία. Στο χώρο του σινεμά, το 1956 ο Heilig παρουσίασε το Sensorama, με το οποίο χρησιμοποιώντας 3D γραφικά, στερεοσκοπικό ήχο και δονητές, επιχείρησε να περικυκλώσει το θεατή με αισθήσεις φτιαγμένες από μηχανήματα και να τον μεταφέρει σε μια άλλη διάσταση.

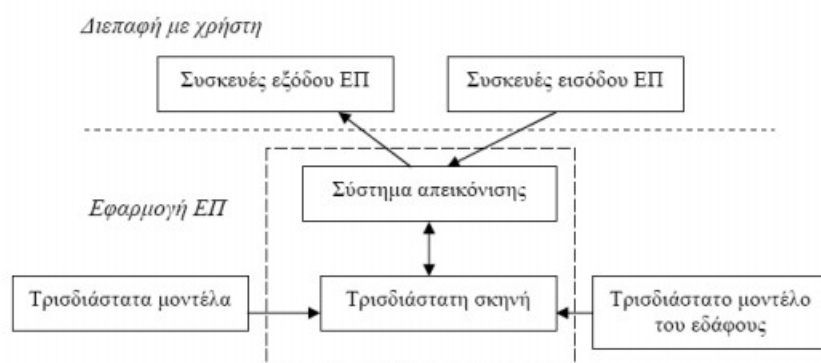
Στο χώρο της επιστήμης, απαρχή θεωρείται ο μηχανικός εξομοιωτής πτήσης που κατασκευάστηκε από τον Edward Link το 1929 για την εκπαίδευση πιλότων. Το 1961 οι μηχανικοί Comeau και Bryan δημιούργησαν το πρώτο κράνος (HMD) απομακρυσμένης παρακολούθησης, με ανίχνευση της κίνησης του κεφαλιού. Το 1965 ο Ivan Sutherland επιχείρησε να συνδυάσει τους υπολογιστές και τη δημιουργία

Εικονικών Κόσμων με την εργασία του "*The ultimate display*". Στην εργασία αυτή ουσιαστικά περιέγραφε ένα δωμάτιο, όπου τα πάντα ελέγχονται από τον υπολογιστή και όλες οι ενέργειες του χρήστη μέσα σε αυτό έχουν τον ίδιο αντίκτυπο που θα είχαν και στον πραγματικό κόσμο. Ουσιαστικά ο Sutherland θεωρείται ο πατέρας της εικονικής πραγματικότητας με την μορφή που την αναγνωρίζουμε σήμερα. Το *GROPE*, (Brooks, 1967) είχε σαν στόχο να εξερευνήσει τη χρήση απτικής αλληλεπίδρασης για να βοηθήσει τους βιοχημικούς να «αισθανθούν» τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ μορίων πρωτεΐνης. Το 1968, ο Sutherland κατασκεύασε το *Sword of Damocles* (Σπαθί του Δαμοκλή), ένα HDM το οποίο πήρε το όνομα του από το γεγονός ότι κρεμόταν από το ταβάνι. Χρησιμοποιούσε καθοδικές λυχνίες, είχε μηχανική ανίχνευση της κίνησης του κεφαλιού και πρόβαλλε εικόνες πάνω στον πραγματικό κόσμο. Το εύρος πεδίου του ήταν 40° και ο χρήστης μπορούσε να δει σε πραγματικό χρόνο, αντικείμενα σε wireframe μορφή να προβάλλονται πάνω στον πραγματικό κόσμο. Την ίδια χρονιά ο ίδιος και ο David Evans ίδρυσαν την εταιρία Evans and Sutherland Computer Corp. (E&S), η οποία ασχολήθηκε με συστήματα οπτικοποίησης τα οποία χρησιμοποιούνται στο στρατό, σε εμπορικούς εξομοιωτές καθώς και σε πλανητάρια και αλληλεπιδραστικά θέατρα. Το 1972, η εταιρία Atari πρόσφερε στο ευρύ κοινό αλληλεπιδραστικά γραφικά πραγματικού χρόνου, με το παιχνίδι Pong. Το 1974 ο Myron Kueger δημιούργησε τα πρωτοποριακά του έργα, *Metaplay* και *Videoplace*, για να εξερευνήσει τις δυνατότητες της αλληλεπίδρασης με τη βοήθεια υπολογιστή. Δημιουργήθηκαν έτσι αλληλεπιδραστικά καλλιτεχνικά περιβάλλοντα, σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να δίνουν στους χρήστες τους τη δυνατότητα ελευθερίας επιλογής και προσωπικής έκφρασης. Το *GROPE II*, που κατασκευάστηκε το 1976 από τους P. J. Kilpatrick και Fred Brooks, παρείχε ανάδραση δύναμης (force feedback) και χρησιμοποιούσε μηχανικούς βραχίονες.

Σήμερα η επιστημονική κοινότητα χρησιμοποιεί κυρίως τον όρο εικονικό περιβάλλον έναντι της εικονικής πραγματικότητας προκειμένου να παρακάμψει την πολλαπλότητα και αντιφατικότητα του προηγούμενου όρου.

## 2.3 Συστήματα Εικονικής πραγματικότητας

Η ΕΠ απαιτεί περισσότερους πόρους από ότι διαθέτουν τα τυποποιημένα συστήματα desktop. Προκειμένου να επιτευχθεί μια ενισχυμένη αλληλεπίδραση των χρηστών με τον εικονικό κόσμο, απαιτείται υλικό (hardware) με πρόσθετες εισόδους και εξόδους σε συνδυασμό με εξειδικευμένο λογισμικό. Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζονται τα μέρη του βρόχου αλληλεπίδρασης ανθρώπου – Η/Υ – ανθρώπου που κρίνονται θεμελιώδους σημασίας για κάθε διαδραστικό σύστημα. Ο χρήστης είναι εξοπλισμένος με μία ή περισσότερες συσκευές εξόδου (πχ. HMD, tracker κλπ.) και προαιρετικά μια συσκευή εισόδου/χειρισμού (πχ. τρισδιάστατο ποντίκι, γάντι δεδομένων κλπ.). Καθώς ο άνθρωπος εκτελεί δράσεις όπως το περπάτημα και την περιστροφή του κεφαλιού (δηλαδή την αλλαγή του πεδίου όρασής του), τα διάφορα στοιχεία του εξοπλισμού καταγράφουν τη συμπεριφορά του και τροφοδοτούν το σύστημα μέσω των συσκευών εισόδου. Ο υπολογιστής επεξεργάζεται τις πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο και δημιουργεί την κατάλληλη ανατροφοδότηση που την περνάει πίσω στο χρήστη μέσω των συσκευών εξόδου. Σε γενικές γραμμές: συσκευές εισόδου είναι υπεύθυνες για την αλληλεπίδραση, οι συσκευές εξόδου για τη δημιουργία του αισθήματος της βύθισης και το λογισμικό για το σωστό έλεγχο και συγχρονισμό ολόκληρου του περιβάλλοντος.



Σχήμα 2: Βασικά συστατικά συστήματος ΕΠ

Σύμφωνα με το Σχήμα 2.2, ένα σύστημα εικονικής πραγματικότητας αποτελείται από τα εξής επιμέρους στοιχεία:

- Σύστημα απεικόνισης (viewer): απεικονίζει την τρισδιάστατη σκηνή. Ανάλογα με το είδος του διακρίνονται και τα είδη εικονικής πραγματικότητας
- Τρισδιάστατη σκηνή: Είναι μια δυναμική δομή δεδομένων η οποία περιέχει όλη την πληροφορία που η εφαρμογή ΕΠ πρόκειται να δείξει στο χρήστη. Η τρισδιάστατη σκηνή λαμβάνει πληροφορίες από ένα τρισδιάστατο μοντέλο του εδάφους και τρισδιάστατες απεικονίσεις των αντικειμένων του πραγματικού κόσμου.
- Μοντέλο εδάφους: μια γεωγραφική βάση δεδομένων του εδάφους σε τρισδιάστατη μορφή.
- Τρισδιάστατα μοντέλα του πραγματικού κόσμου: περιγράφουν τις κλάσεις των ορατών αντικειμένων της τρισδιάστατης σκηνής.
- Συσκευές εισόδου ΕΠ: μέσω αυτών οι χρήστες μπορούν να αλληλεπιδράσουν με τον εικονικό κόσμο.
- Συσκευές εξόδου ή απεικόνισης ΕΠ: μέσω αυτών οι χρήστες εμβυθίζονται στον εικονικό κόσμο.

### **2.3.1 Λογισμικό**

Το λογισμικό ελέγχει και συγχρονίζει όλο το σύστημα. Συνήθως χωρίζεται σε λογισμικό ανάπτυξης, το οποίο αφορά στο σχεδιασμό του εικονικού περιβάλλοντος και λογισμικό εκτέλεσης, που αναλαμβάνει την αλληλεπίδραση του χρήστη με τον υπολογιστή.

Για τη σχεδίαση του εικονικού περιβάλλοντος χρησιμοποιούνται προγράμματα τρισδιάστατης μοντελοποίησης, συμπίεσης δεδομένων, εργαλεία επεξεργασίας εικόνων και κάποια γλώσσα προγραμματισμού για την εισαγωγή των κανόνων του κόσμου και τον προγραμματισμό της κίνησης των αντικειμένων. Κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης απαιτούνται τα ακόλουθα:

- Λογισμικό οπτικοποίησης: μηχανή τρισδιάστατης οπτικοποίησης και παραγωγής ήχου σε πραγματικό χρόνο.
- Κατάλληλο λογισμικό χειρισμού των συσκευών εισόδου-εξόδου: λαμβάνει δεδομένα από τις συσκευές αυτές και να τα μεταφράζει σε δεδομένα του εικονικού περιβάλλοντος.

- Διαδικασία προσομοίωσης: εφαρμόζει τους νόμους στα αντικείμενα του περιβάλλοντος και υπολογίζει τις νέες τους ιδιότητες (πχ νέα θέση).
- Βάση δεδομένων γεωμετρίας του εικονικού περιβάλλοντος: η εφαρμογή αναλαμβάνει να εμφανίσει κάθε φορά μόνο τα αντικείμενα που βρίσκονται στο οπτικό πεδίο του χρήστη, σε ανάλυση αντίστοιχη της απόστασης τους από το χρήστη.

### **2.3.2 Συσκευές εισόδου**

Οι συσκευές εισόδου χωρίζονται σε επιμέρους κατηγορίες ως προς τις δυνατότητες που παρέχουν και την πολυπλοκότητά τους. Οι πιο απλές απαιτούν συγκεκριμένες κινήσεις από το χρήστη (πχ χρήση συμβατικού πληκτρολογίου) ενώ άλλες χρησιμοποιούν την κιναισθητική αλληλεπίδραση η οποία αναφέρεται στην αλληλεπίδραση ανθρώπου-Υπολογιστή βάσει κινήσεων του σώματος και χειρονομιών.

- Συμβατικά δισδιάστατα μέσα: Ο πιο απλός τρόπος αλληλεπίδρασης με τον εικονικό κόσμο μπορεί να γίνει μέσω του ποντικιού ή του πληκτρολογίου.
- Τρισδιάστατο ποντίκι (spacemouse) και χειριστήριο (joystick). Οι συσκευές αυτές υποστηρίζουν την κίνηση προς όλες τις κατευθύνσεις και την περιστροφή με τους τρεις δυνατούς τρόπους (6 βαθμοί ελευθερίας)
- Συσκευές κιναισθητικής αλληλεπίδρασης όπως γάντι δεδομένων (DataGlove). Το γάντι δεδομένων είναι μια συσκευή εισόδου, η οποία χρησιμοποιεί αισθητήρες για ανίχνευση των πραγματικών κινήσεων του χεριού και των δακτύλων του χρήστη. Τα δεδομένα που προκύπτουν από την ανίχνευση χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της εικονικής αναπαράστασης του χεριού και των κινήσεων του μέσα στο ΕΠΕ. Στην καλύτερη περίπτωση, κατά την οποία δεν υπάρχει σημαντική καθυστέρηση μεταξύ της πραγματικής και της εικονικής κίνησης του χεριού, ενισχύεται κατά πολύ η αίσθηση της παρουσίας (presence) του χρήστη μέσα στο ΕΠΕ. Η συσκευή μπορεί να λειτουργεί ταυτόχρονα και ως συσκευή εξόδου, παρέχοντας απτική ανάδραση στο χρήστη.

- Ανιχνευτές κίνησης (trackers): αισθητηριακές συσκευές ανίχνευσης κίνησης και προσανατολισμού που χρησιμοποιούνται για την δυναμική αλλαγή αντίστοιχα θέσης και προσανατολισμού των στοιχείων στα οποία επιβάλλονται. Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη συστημάτων ανίχνευσης κίνησης - παρακολούθησης που χρησιμοποιούνται σε συστήματα εικονικής πραγματικότητας, αλλά όλα έχουν κάποια κοινά στοιχεία. Μπορούν να ανιχνεύσουν έξι βαθμούς ελευθερίας (6-DOF), θέση του αντικειμένου στο χώρο (x, y, z συντεταγμένες) και προσανατολισμός (roll, pitch, yaw). Από την πλευρά του χρήστη, αυτό σημαίνει ότι όταν φοράει ένα HMD, η προβολή αλλάζει κατά αντιστοιχία με την κίνηση του κεφαλιού προς τα πάνω, κάτω, αριστερά και δεξιά. Αλλάζει, επίσης, εάν γείρει το κεφάλι σε μια γωνία ή αν μετακινηθεί προς τα εμπρός ή προς τα πίσω, χωρίς να αλλάξει τη γωνία του βλέμματός του. Κάθε σύστημα ανίχνευσης περιλαμβάνει πομπό-ους, δέκτη-ες (αισθητήρες) και μία μονάδα ελέγχου η οποία επεξεργάζεται το σήμα και στέλνει πληροφορίες στη CPU. Ανάλογα με το σύστημα ο χρήστης μπορεί να φέρει είτε πομπούς, είτε αισθητήρες. Τα σήματα που αποστέλλονται από τους πομπούς προς τους αισθητήρες μπορούν να λάβουν πολλές μορφές, συμπεριλαμβανομένων ηλεκτρομαγνητικών, ακουστικών, οπτικών και μηχανικών σημάτων. Κάθε τεχνολογία έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η σύγχρονη τάση στους ανιχνευτές κίνησης είναι μέσω ανίχνευσης εικόνας

Η απεικόνιση της αίσθησης της αφής ή της απτικής αντίδρασης (tactile και force feedback) ενισχύει ακόμα περισσότερο την αληθοφάνεια της εμπειρίας. Όμως οι μέχρι τώρα απόπειρες κατασκευής γαντιών που να παρέχουν την αίσθηση της αφής βρίσκονται σε σχετικά πειραματικό στάδιο. Αντίθετα, συσκευές που παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε αυτό τον τομέα είναι οι απτικές συσκευές (haptic devices). Από την άλλη έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στον τομέα ανίχνευσης εικόνας, και παρατηρείται μία στροφή στην έρευνα για την χρήση τέτοιων συστημάτων στην ανίχνευση κίνησης. Η ταινία Avatar χρησιμοποίησε κάμερες για την ανίχνευση χειρονομιών αλλά και εκφράσεων (gestures). Παραδείγματα

εξελιγμένων συστημάτων ανίχνευσης εικόνας αποτελεί η εμπορικής μάλιστα χρήσης συσκευή Kinect (Microsoft, Xbox).

### **2.3.3 Συσκευές εξόδου**

Οι συσκευές εξόδου παρουσιάζουν τον εικονικό κόσμο στον χρήστη και είναι αυτές που δημιουργούν το αίσθημα της εμπύθισης. Χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες

- Κράνη εικονικής πραγματικότητας (HMD – Head Mounted Display) Τα κράνη αυτά διαθέτουν δυο μικροσκοπικές στερεοσκοπικές οθόνες (μια για κάθε μάτι), που προβάλλουν τις κινούμενες εικόνες του εικονικού περιβάλλοντος. Ο χρήστης αισθάνεται να «εμβυθίζεται» στο εικονικό περιβάλλον. Η παραίσθηση αυτή λέγεται «τηλεπαρουσία» και επηρεάζεται από πολλούς αισθητήρες κίνησης (motion trackers) που συλλέγουν τις κινήσεις του χρήστη και ανάλογα προσαρμόζουν την απεικόνιση των οθονών σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να εξερευνήσει τον κόσμο εικονικής πραγματικότητας, αλλάζοντας οπτικές γωνίες, βασισμένος στην περιστροφή του κεφαλιού. Το κράνος μπορεί επίσης να διαθέτει και στερεοσκοπικό ήχο.
- Πανκατευθυντική διοπτρική οθόνη (Binocular Omni-directional monitor – BOOM): Οι οθόνες και το οπτικό σύστημα τοποθετούνται σε ένα κουτί το οποίο βρίσκεται σε ένα βραχίονα πολλαπλών συνδέσμων. Ο χρήστης βλέπει τον εικονικό κόσμο κοιτώντας μέσα στο κουτί και μπορεί να καθοδηγήσει το κουτί σε οποιαδήποτε θέση μέσα στον όγκο λειτουργίας της συσκευής. Οι αισθητήρες κίνησης βρίσκονται στους συνδέσμους του βραχίονα που κρατάει το κουτί.
- Στερεοσκοπικά γυαλιά (LCD shutter glasses) Τα γυαλιά αυτά παρέχουν την αίσθηση του βάθους σε δισδιάστατες οθόνες. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην προβολή εικόνων του εικονικού περιβάλλοντος εναλλάξ στο δεξί και αριστερό μάτι με άνοιγμα και κλείσιμο του αντίστοιχου φακού σε υψηλές συχνότητες έτσι ώστε να μην γίνονται αντιληπτές. Διακρίνονται σε ενεργητικά, τα οποία αλλάζουν την εικόνα που προβάλλεται ανάλογα με την περιστροφή του κεφαλιού και σε παθητικά, τα οποία δίνουν στερεοσκοπική αίσθηση.



- Αυτόματο Εικονικό Περιβάλλον Σπηλαίου (Cave Automatic Virtual Environment – CAVE): Στο σύστημα αυτό η ψευδαίσθηση της εμπύθισης δημιουργείται μέσω της προβολής στερεοσκοπικών εικόνων στους τείχους και το δάπεδο ενός κυβικού δωματίου. Μια ομάδα ατόμων η οποία φοράει τρισδιάστατα γυαλιά μπορεί να μετακινηθεί ελεύθερα στο CAVE ενώ αισθητήρες κίνησης συνεχώς αναπροσαρμόζουν τη στερεοσκοπική προβολή του διευθύνοντος ατόμου.

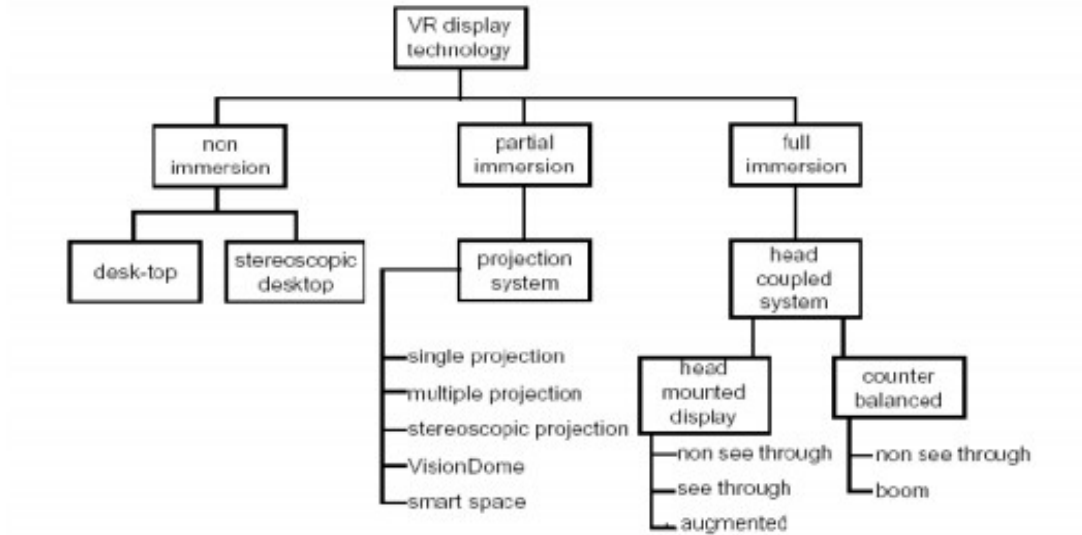
Συνοψίζοντας το αίσθημα της εμπύθισης απαιτεί να αιχμαλωτιστούν όσο το δυνατόν περισσότερες αισθήσεις του χρήστη. Ως προς τις οπτικές συσκευές, διακρίνονται τρεις διαφορετικοί άξονες ανάπτυξης, τα κράνη, οι μεγάλων διαστάσεων οθόνες και οι κλειστοί χώροι, συστήματα τύπου κιβωτός που δημιουργούν έναν κλειστό χώρο στον οποίο περιηγείται ο χρήστης. Ως προς τον ήχο, αναπτύχθηκαν τεχνολογίες στερεοσκοπικού ήχου αλλά και αναπαραγωγής των δονήσεων του ήχου για μεγαλύτερου βαθμού εμπύθιση. Οι απτικές συσκευές προσφέρουν απτική ανάδραση στο χρήστη. Τέτοιες είναι τα γάντια και οι συσκευές ανάδρασης δύναμης.

## **2.4 Κατηγοριοποίηση συστημάτων ΕΠ**

Ανάλογα με το βαθμό εμπύθισης του χρήστη, τα συστήματα ΕΠ ταξινομούνται σε:

- Επιτραπέζια Συστήματα ΕΠ (Desktop VEs) : Είναι τα πιο διαδεδομένα καθώς απαιτούν μόνο τη ύπαρξη προσωπικού υπολογιστή. Η οπτικοποίηση του εικονικού περιβάλλοντος γίνεται μέσω της οθόνης του υπολογιστή ενώ η αλληλεπίδραση του χρήστη με το περιβάλλον μέσω του πληκτρολογίου ή ποντικιού. Ενδεχομένως να υπάρχει και δυνατότητα υποστήριξης εξειδικευμένων περιφερειακών συσκευών πλοήγησης στον τρισδιάστατο εικονικό χώρο και χρήσης στερεοσκοπικών γυαλιών ή κράνους. Τα συστήματα αυτά δεν παρέχουν αίσθηση εμπύθισης.
- Προβολικά συστήματα ΕΠ (Projection-based VEs): Βασίζονται σε ένα σύστημα προβολών (μονοσκοπικής ή στερεοσκοπικής) από πολλαπλές οθόνες που κυκλώνουν το χρήστη και δημιουργούν το αίσθημα της μερικής εμπύθισης στο εικονικό περιβάλλον.

- Συστήματα πλήρους εμπύθισης ΕΠ (Immersive VEs): Ο χρήστης αποκόπτεται από τον πραγματικό κόσμο με τη χρήση κράνους (HMD) στο οποίο προβάλλονται οι εικόνες του συνθετικού περιβάλλοντος.



Σχήμα 3: Κατηγοριοποίηση συστημάτων ΕΠ ανάλογα με τον βαθμό εμπύθισης

## 2.5 Ανάπτυξη Εικονικού Περιβάλλοντος

Ένα εικονικό περιβάλλον περιλαμβάνει έναν εικονικό χώρο και τη δυνατότητα αλληλεπιδράσεων με το χρήστη. Έτσι η δημιουργία του συνίσταται αφενός στην κατασκευή του μοντέλου του εικονικού κόσμου και αφετέρου στο σχεδιασμό των αλληλεπιδράσεων με το χρήστη.

### 2.5.1 Δομικά στοιχεία ΕΠΕ

Σύμφωνα με τον Ellis (Ellis, 1993) το μοντέλο του εικονικού περιβάλλοντος έχει τρία δομικά στοιχεία:

- Περιεχόμενο: Είναι τα αντικείμενα (objects) και τα ενεργά ή δρώντα στοιχεία (actors) τα οποία μπορούν να θεωρηθούν και αυτά σαν αντικείμενα, αλλά έχουν επιπλέον την δυνατότητα να ξεκινούν από μόνα τους αλληλεπιδράσεις με άλλα αντικείμενα του ΕΠΕ. Ένα τέτοιο στοιχείο είναι ο ίδιος ο χρήστης που αντιπροσωπεύεται στο ΕΠΕ από τη δική του οπτική άποψη (viewpoint) του περιβάλλοντος.

- Γεωμετρία: αποτελεί την περιγραφή του πεδίου όπου εξελίσσεται η αλληλεπίδραση (σκηνικό).
- Δυναμικές: αφορούν στους κανόνες της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στα συστατικά του περιβάλλοντος, οι οποίοι περιγράφουν την συμπεριφορά των συστατικών αυτών καθώς ανταλλάσσουν ενέργεια ή πληροφορία.

Όσον αφορά στους τύπους αλληλεπίδρασης με τον χρήστη, χωρίζονται σύμφωνα με τον Bordegoni (Bordegoni,1993) σε:

- πλοήγηση και έλεγχο του οπτικού πεδίου
- αλληλεπίδραση με αντικείμενα (χρήση και μετακίνηση ως προς διαφορετικούς άξονες)

### **2.5.2 Κατευθυντήριες γραμμές σχεδιασμού ΕΠΕ**

Η εμπύθιση του υποκειμένου και η διάδραση με το εικονικό σύστημα, βασικά χαρακτηριστικά των ΕΠΕ, τοποθετούν εξ ορισμού τον άνθρωπο στο κέντρο της έρευνας, τόσο από πλευράς εργονομίας της φυσιολογίας και της ένταξης του στον εικονικό χώρο, αλλά και της επικοινωνίας του με αυτόν. Για τον λόγο αυτό, πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με το συγκεκριμένο θέμα και προτάσσουν κατευθυντήριες οδηγίες για την ανάπτυξη εικονικών εφαρμογών.

Μία ανθρωποκεντρική μέθοδος σχεδιασμού περιλαμβάνει αντιπροσωπευτικούς χρήστες κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης ή κατά τη φάση αξιολόγησης της αναπτυξιακής διαδικασίας του ΕΠΕ, έτσι ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να ανταποκρίνονται στα καθήκοντα και τις απαιτήσεις του χρήστη. Το ότι ο χρήστης βρίσκεται στο επίκεντρο του σχεδιασμού αποτελεί ένα αξιόλογο μέσο για να εξασφαλιστεί η χρησιμότητα και επαναχρησιμοποίηση του ΕΠΕ.

Οι Stanney et al. (2003) διακρίνουν δύο επίπεδα χρηστικότητας ενός συστήματος ΕΠΕ:

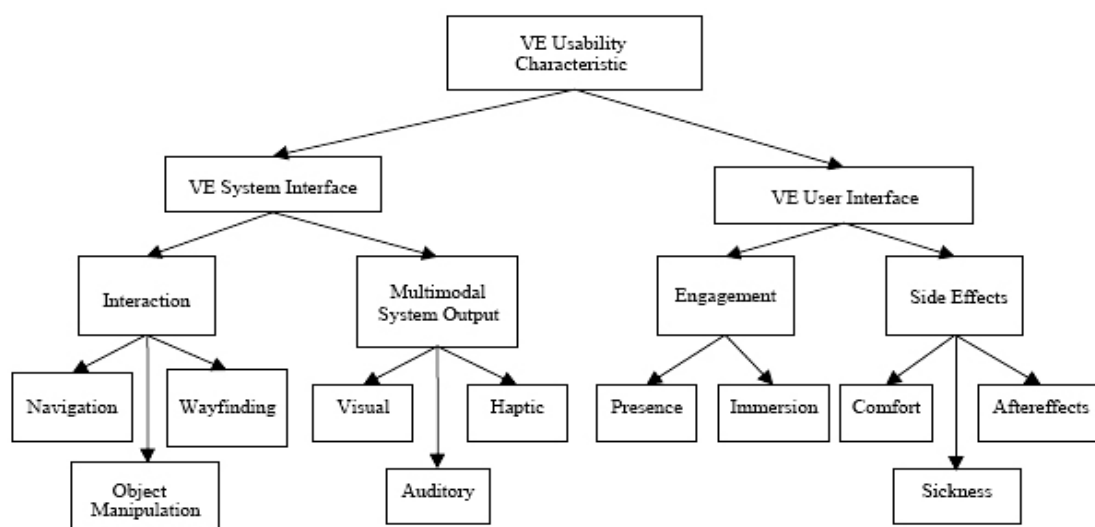
- το σύστημα διεπαφής του ΕΠΕ (VE interface)
- Διεπαφή χρήστη και ΕΠΕ (VE user interface).

Το σύστημα διεπαφής του ΕΠ περιλαμβάνει το λογισμικό (software), το υλικό (hardware) και το συνολικό σχεδιασμό της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-μηχανής. Από την άλλη το user interface ενός ΕΠ περιλαμβάνει φυσιολογικούς, ψυχολογικούς και ψυχοκοινωνικούς παράγοντες και εκτιμήσεις.

Οι Stanney et al. (2003) πρότειναν το σύστημα MAUVE (The Multi-criteria Assessment of Usability for Virtual Environments), ένα σύστημα καθοδήγησης για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη ΕΠΕ με βάση την χρηστικότητα. Το σύστημα αυτό παρέχει μια δομημένη προσέγγιση για την επίτευξη ευχρηστίας και αξιολόγησης στο σχεδιασμό συστημάτων ΕΠ. Για παράδειγμα: η αλληλεπίδραση θα πρέπει να είναι φυσική, αποτελεσματική και κατάλληλη για τους χρήστες, να ανταποκρίνεται στους στόχους και στο πεδίο που καλύπτει.

Ως εκ τούτου, σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές κατά MAUVE, τα κριτήρια χρηστικότητας που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση υποταξινομούνται ως:

- Προσανατολισμού - wayfinding, δηλαδή τον τρόπο που βιώνει ο χρήστης τον εντοπισμό και τον προσανατολισμό του εαυτού του σε ένα περιβάλλον).
- Πλοήγησης - navigation, δηλαδή η μετακίνηση από το ένα σημείο στο άλλο σε ένα περιβάλλον.
- Επιλογής και χειρισμού αντικειμένων (πχ. επανατοποθέτηση και αναπροσανατολισμό αντικειμένων σε ένα περιβάλλον).



Σχήμα 4: Κατευθυντήριες γραμμές σχεδιασμού ΕΠΕ με βάση την χρηστικότητα, κατά MAUVE

Ένα άλλο πλαίσιο κατευθυντήριων γραμμών για το σχεδιασμό ΕΠΕ με βάση την χρηστικότητα, για να βοηθήσει τους σχεδιαστές ΕΠ σε ειδικές περιπτώσεις, προτάθηκε από τον Gabbard το 1997. Η μελέτη αυτή είχε ως στόχο την εύρεση μίας μεθοδολογίας που θα ενσωμάτωνε τις διάφορες υπάρχουσες έρευνες χρηστικότητας στην αλληλεπίδραση ανθρώπου-υπολογιστή και θα έβρισκε εφαρμογή στην ανάπτυξη ΕΠΕ. Έτσι ο Gabbard παρέχει 195 κατευθυντήριες γραμμές για θέματα που σχετίζονται με το σχεδιασμό. Αυτές αναφέρονται κυρίως στην επιλογή και το χειρισμό αντικειμένων, τους στόχους των χρηστών, την πιστότητα των εικόνων, το περιεχόμενο ενός ΕΠΕ, τη μετακίνηση, την χρήση avatars (ελεγχόμενους από υπολογιστή χαρακτήρες), καθώς και να συμβάλει ως καθοδήγηση σχετικά με τις φυσικές πτυχές του συστήματος εικονικής πραγματικότητας. Αντίστοιχα, οι οκτώ χρυσοί κανόνες που εισήγαγε ο Schneiderman το 1998 και οι δέκα αρχές σχεδιασμού ΕΠΕ του Nielsen (1994) σχετικά με το σχεδιασμό διεπαφής, θεωρούνται ιδιαίτερα χρήσιμοι στη διαδικασία σχεδιασμού ΕΠΕ επειδή υπάρχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ ΕΠΕ και των παραδοσιακών δισδιάστατων διεπαφών σε σχέση με την απαίτηση εισαγωγής πληροφοριών από τον χρήστη. Επιπλέον, σημαντική είναι η έρευνα των Kaur et al. (1998), όπου παρουσιάζονται μια σειρά από 46 κατευθυντήριες γραμμές υπό τη μορφή των «ιδιοτήτων σχεδιασμού» και χρησιμοποιούνται σαν μία λίστα ελέγχου για την αντιμετώπιση θεμάτων ευχρηστίας κατά τη σχεδιαστική φάση, παρέχοντας γενικές λύσεις. Αυτές οι κατευθυντήριες γραμμές υποστηρίζουν κυρίως την αλληλεπίδραση που καλύπτει τους τομείς της χωρικής διάταξης, εκπροσώπηση των χρηστών, χειρισμό αντικειμένων, την αρχική συμπεριφορά του συστήματος, δράση και αντίδραση σε έργα των χρηστών κλπ. Κάθε κατευθυντήρια γραμμή εξετάζεται προσεκτικά και παρέχει υποδείξεις για το τι ερεθίσματα είναι αναγκαία προκειμένου οι χρήστες να κατανοήσουν και να αλληλεπιδράσουν με ένα ΕΠΕ.

Παράλληλα με όσα περιγράφονται παραπάνω, ένα τυπικό μοντέλο που απεικονίζει τα διάφορα στάδια λήψης αποφάσεων που αντιμετωπίζουν οι προγραμματιστές ΕΠΕ αναπτύχθηκε από τον Eastgate το 2001. Το μοντέλο αυτό φέρει το όνομα Virtual Environment Development Structure – VEDS (Δομή ανάπτυξης εικονικού περιβάλλοντος) και έχει ως στόχο να προσφέρει σε σχεδιαστές και προγραμματιστές

σχετικές κατευθυντήριες γραμμές σε κάθε στάδιο του σχεδιασμού. Πιο αναλυτικά, το VEDS προτείνει επτά σημαντικά στάδια της ανάπτυξης VE:

- Προδιαγραφές – Specifications
- Γενικός Σχεδιασμός ΕΠΕ – VE overall design
- Απόκτηση Πόρων – Resource Acquisition
- Λεπτομερής Σχεδιασμός ΕΠ – VE Design Detail
- Κατασκευή ΕΠΕ – VE building
- Έλεγχος ΕΠΕ - VE Testing
- Εφαρμογή – Implementation

Αντιθέτως, το επιχείρημα ότι πολλές υφιστάμενες κατευθυντήριες γραμμές και μοντέλα δεν είναι πάντα χρήσιμα και αποτελεσματικά για τους σχεδιαστές ΕΠΕ, προτάθηκε από τον Wilson το 2001. Η προσπάθεια που απαιτείται για τη μοντελοποίηση αντικείμενων και δράσεων του πραγματικού κόσμου καθώς και η διαφορετική φύση της διεπαφής χρήστη, σημαίνει ότι η ανάπτυξη ΕΠΕ απαιτεί καθοδήγηση μοναδική στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις του. Τα διαφορετικά γνωρίσματα και ιδιότητες των ΕΠΕ απαιτούν τα δικά τους δομημένα πλαίσια ανάπτυξης, παρόλο που παρόμοιες αναπτυξιακές τεχνικές καθοδήγησης χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό προσομοιώσεων ΕΠΕ. Συγκεκριμένα δε για την ανάπτυξη εικονικών περιβαλλόντων στα συστήματα κατεργασιών δεν υπάρχουν συγκεκριμένες κατευθυντήριες γραμμές σχεδιασμού οι οποίες θα παρείχαν κίνητρα και θα ενίσχυαν άτυπα τις πρακτικές σχεδίασης.

## **2.6 Σημερινή κατάσταση**

Η έρευνα συνεχίζει στα εργαστήρια μεγάλων εταιριών και πανεπιστημίων, ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται μία αύξηση της εμπορικής εκμετάλλευσης των εφαρμογών της ΕΠ, στο ευρύ κοινό. Εξοπλισμός που μέχρι πριν λίγα χρόνια είχε απαγορευτική τιμή για τον μέσο καταναλωτή ή ανεξάρτητο προγραμματιστή έχει εισβάλει στις ζωές πολλών, εφαρμογές augmented reality με χρήση κινητών τηλεφώνων και υψηλού επιπέδου συσκευές κινισθητικού ελέγχου όπως Nintendo Wii και Xbox Kinect είναι

από τα πιο γνωστά παραδείγματα. Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί διάφορα λογισμικά για την ανάπτυξη ΕΠ που μπορεί να εξειδικεύονται σε διάφορους τομείς. Μερικά από τα πιο γνωστά στην αγορά πακέτα λογισμικού είναι τα: Quest3D, Unity3D, 3DVIA Virtools (που χρησιμοποιήθηκε και στην συγκεκριμένη εργασία), 3DVIA Studio, Vizard. Μάλιστα υπάρχουν και πολλές πλατφόρμες ανοιχτού κώδικα (open source) με εξαιρετικές δυνατότητες όπως το Blender3D και Delta3D καθώς και open source μηχανές γραφικών (graphic engines) Orge3D, Panda3D. Μερικές από τις εταιρείες που προσφέρουν εξειδικευμένα λογισμικά πακέτα για την βιομηχανία είναι η Dassault Systems, PTC, PRESAGIS, EON Reality κ.α, με το Delmia της Dassault Systems να είναι ίσως η πιο ολοκληρωμένη λύση.

Καθώς η τεχνολογία της ΕΠ χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο τα πλεονεκτήματα της έχουν αναλυθεί και αναγνωρισθεί ήδη από πολλούς και αυτό φαίνεται από το εύρος των εφαρμογών στο οποίο χρησιμοποιείται. Το ερώτημα πλέον δεν είναι αν όντως χρειαζόμαστε την ΕΠ αλλά το πώς και που θα χρησιμοποιηθεί για να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματα που παρέχει. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται μία περιγραφή του πώς χρησιμοποιείται η ΕΠ στον βιομηχανικό τομέα και συγκεκριμένα στα συστήματα κατεργασιών και εισάγεται ο όρος του Virtual Manufacturing.

# 3

## *Virtual Manufacturing*

### ***3.1 Η γενική ιδέα της ολοκληρωμένης παραγωγής – CIM***

Η ολοκληρωμένη παραγωγή (ΟΠ), όπως μεταφέρεται στα ελληνικά ο όρος Computer Integrated Manufacturing – CIM, είναι ένας πολύ γενικός όρος με τον οποίο επιχειρείται ο συνδυασμός των φάσεων του σχεδιασμού των προϊόντων, των διαδικασιών παραγωγής και της κατασκευής, με την βοήθεια πολύπλοκων συστημάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ένα ολοκληρωμένο μηχανογραφικό σύστημα για τον προγραμματισμό και έλεγχο της παραγωγής αλλά και όλων των επιμέρους διαδικασιών που λαμβάνουν μέρος σε αυτήν, από την αρχική παραγγελία μέχρι και την τελική παράδοση στον πελάτη, συχνά θεωρείται μέρος της ΟΠ. Με την χρήση αυτών των ισχυρών συστημάτων πληροφορικής, που προσπαθούν να ενσωματώσουν όλες τις φάσεις της παραγωγής, οι επιχειρήσεις ευελπιστούν να αυξήσουν την παραγωγικότητά τους, να βελτιώσουν την ποιότητα των προϊόντων τους και να ανταποκρίνονται γρήγορα και με μεγαλύτερη ευελιξία στις ανάγκες των πελατών και της αγοράς.



### 3.1.1 Συστατικά Ολοκληρωμένης Παραγωγής

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής συμπεριλαμβάνει μια πληθώρα διεργασιών μερικές από τις οποίες αναφέρονται παρακάτω:

- Προσδιορισμός των προδιαγραφών των προϊόντων και των απαιτήσεων του συστήματος παραγωγής
- Ανάλυση της ικανότητας κατασκευής για μεμονωμένα προϊόντα
- Μοντελοποίηση και προσδιορισμός των διαδικασιών παραγωγής
- Μέτρηση και ανάλυση των δυνατοτήτων της διαδικασίας
- Τροποποίηση των σχεδίων του προϊόντος για την αντιμετώπιση κατασκευαστικών προβλημάτων
- Διάταξη της μονάδας παραγωγής σχεδιασμός εγκαταστάσεων
- Προσομοίωση και ανάλυση της απόδοσης του συστήματος
- Εξέταση πολλαπλών σεναρίων διαδικασιών παραγωγής, συστημάτων εξοπλισμού, εργαλείων και υλικών από οικονομικής πλευράς
- Ανάλυση υποστηρίζοντας την επιλογή των συστημάτων / προμηθευτών
- Προμήθεια εξοπλισμού παραγωγής και των υποστηρικτικών συστημάτων
- Προσδιορισμός του περιβάλλοντος διασύνδεσης και ενοποίηση των πληροφοριακών συστημάτων
- Ανάλυση καθηκόντων των εργαζομένων
- Σχεδιασμός του χώρου εργασίας
- Διαχείριση, προγραμματισμός, παρακολούθηση και έλεγχος έργων

Έτσι στην ΟΠ, οι λειτουργικοί τομείς όπως ο σχεδιασμός, η ανάλυση, ο προγραμματισμός, οι προμήθειες, η κοστολόγηση, ο έλεγχος απογραφής και διανομής προϊόντων, συνδέονται μέσω του υπολογιστή με τις βάσεις δεδομένων και γνώσεων του εργοστασίου, όπως η διαχείριση των υλικών, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο άμεσο έλεγχο και παρακολούθηση όλων των εργασιών. Για την επίτευξη των παραπάνω διεργασιών απαιτείται μια πληθώρα εργαλείων CAx, όπως CAD, CAM, CAPP, CAQ, ειδικές συσκευές και εξοπλισμός όπως CNC, εργαλειομηχανές,

ρομποτικοί βραχίονες, υπολογιστές, PLC, δίκτυα επικοινωνίας, εξοπλισμός παρακολούθησης, καθώς και ένα σύνολο διαφορετικών τεχνολογιών προσέγγισης, όπως Ευέλικτα Συστήματα Κατεργασιών (FMS), Οχήματα Αυτόματης Πλοήγησης (AGV) κλπ. Σε γενικές γραμμές λοιπόν η ΟΠ εντάσσει τεχνολογίες επικοινωνίας και πληροφοριών στην κατασκευή. Μία ανασκόπηση της εξέλιξης της ΟΠ και παρουσίαση των σύγχρονων τάσεων, εργαλείων και τεχνικών περιγράφεται από τους Χρυσολούρης et al (2008).

### **3.1.2 Από την Ολοκληρωμένη Παραγωγή στο VM**

Η ΟΠ έκανε την εμφάνισή της στα τέλη της δεκαετία του '80, αποτέλεσμα της εκτεταμένης χρήσης της επιστήμης της πληροφορικής στην βιομηχανία της παραγωγής και σήμανε την αρχή της «ψηφιακής εποχής» στον τομέα των συστημάτων κατεργασιών (Digital Manufacturing). Ο Dalton-Taggart (2005) ορίζει την ψηφιακή παραγωγή (digital manufacturing) ως «την δυνατότητα περιγραφής κάθε πτυχής των διαδικασιών σχεδιασμού και παραγωγής ψηφιακά - χρησιμοποιώντας εργαλεία που περιλαμβάνουν σχεδίαση με χρήση υπολογιστών CAD, συστήματα PLM (Product Lifecycle Management), λογισμικό ανάλυσης, προσομοίωσης, λογισμικό CAM, κλπ». Η ιδέα είναι ότι το πέρασμα των δεδομένων από ένα τμήμα ή υποσύστημα διαχείρισης σε κάποιο άλλο θα πρέπει να είναι ομαλή, έτσι ώστε τα δεδομένα που δημιουργούνται να είναι άμεσα επαναχρησιμοποιήσιμα. Από τότε πολλά διαφορετικά εννοιολογικά πλαίσια, εργαλεία και τεχνικές, έχουν εισαχθεί για την επιδίωξη της ιδέας της ΟΠ. Πολλά από αυτά άλλαξαν ολοσχερώς την εικόνα των συστημάτων κατεργασιών και συνεχίζουν να εξελίσσονται ταυτόχρονα με την τεχνολογική ανάπτυξη των επιμέρους κλάδων. Η δημιουργία ολοένα και περισσότερων εργαλείων που προσφέρουν επιπλέον δυνατότητες και η προσπάθεια ενσωμάτωσης των νέων αυτών τεχνολογιών στην παραγωγή, έχει σαν αποτέλεσμα τον διαρκή επαναπροσδιορισμό του περιεχομένου του όρου. Οι σημαντικές εξελίξεις και στον τομέα της εικονικής πραγματικότητας κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο δεκαετιών οδήγησαν στην μελέτη των τρόπων ενσωμάτωσης των ΕΠΕ στα συστήματα κατεργασιών, κάτι που περιγράφεται με τον όρο Virtual Manufacturing και πλέον συμπεριλαμβάνεται στην ΟΠ.

### **3.2 *Virtual Manufacturing***

Η βιβλιογραφία περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα ορισμών του VM που εστιάζουν σε διαφορετικές περιοχές. Για παράδειγμα, κάποιιοι εστιάζουν στην συνολική διαχείριση πολλών τμημάτων ενός εργοστασίου (Huang, 2003), σύμφωνα με τον Lederer (1995), το VM γεμίζει το κενό της αυτοματοποίησης των βιομηχανικών διαδικασιών, αυξάνοντας το επίπεδο της μηχανογράφησης – πληροφορικής. Οι Shridhar και Ravi(2002) ορίζουν ως VM «...ένα ολοκληρωμένο, συνθετικό περιβάλλον παραγωγής που χρησιμοποιείται για την ενίσχυση όλων των επιπέδων λήψης αποφάσεων και ελέγχου». Άλλοι ερευνητές έχουν επικεντρωθεί μόνο σε μεταποιητικές δραστηριότητες – κατεργασίες. Σύμφωνα με τους Banerjee και Zetu (2001), το VM μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολλούς τρόπους στα πλαίσια των συστημάτων κατεργασιών, και μπορεί να οριστεί ως η μοντελοποίηση συστημάτων κατεργασιών και εξαρτημάτων με την αποτελεσματική χρήση υπολογιστών και οπτικοακουστικών μέσων, ώστε να προσομοιωθούν ή να σχεδιαστούν εναλλακτικές λύσεις σε ένα περιβάλλον κατεργασιών. Στους Kim et al. (2004), η γενική έννοια του VM επικεντρώνεται μόνο σε πραγματικά συστήματα μέσα στον κύκλο ζωής του εργοστασίου, την οποία αποκαλούν «στενό VM». Οι Venkateswaran, Manmohan και Young-Jun (2001) έχουν έναν ευρύτερο ορισμό για το VM, κατά τους οποίους ορίζεται ως: «...η χρήση υπολογιστικών μοντέλων και προσομοιώσεων διαδικασιών παραγωγής για την ενίσχυση του σχεδιασμού και της παραγωγής βιομηχανικών(μεταποιημένων) προϊόντων».

#### **3.2.1 *Ορισμός του Virtual Manufacturing***

Μέσα από την συζήτηση αυτή για τον καθορισμό και την διαλεύκανση του περιεχομένου του όρου, μια πιο πρόσφατη και ευρύτερης αποδοχής άποψη έρχεται από τους Wasim Ahmed Khan, Abdul Raouf και Kai Cheng, με το ομώνυμο βιβλίο. Σύμφωνα με τους παραπάνω τα Εικονικά συστήματα κατεργασιών (Virtual Manufacturing Systems) είναι συνθετικά περιβάλλοντα που προορίζονται για την προσομοίωση της λειτουργίας των συστημάτων κατεργασιών σε ένα συνεχές πραγματικότητας-εικονικότητας. Αναδεικνύοντας έτσι την άμεση σχέση του VM με τα διακριτικά χαρακτηριστικά της εικονικής πραγματικότητας.

Η κατάσταση πραγματικότητας – εικονικότητας που εκτίθεται το σύστημα κατεργασιών εμπίπτει στις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες:

- **Πραγματικότητα:** Πραγματικές λειτουργίες κατεργασιών
- **Επαυξημένη πραγματικότητα:** Ο έλεγχος συστημάτων κατεργασιών επαυξάνεται χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά – υπολογιστικά συστήματα υλικού και λογισμικού.
- **Επαυξημένη εικονικότητα:** Υψηλότερο επίπεδο της εικονικότητας από αυτό της επαυξημένης πραγματικότητας. Χρησιμοποιείται ένα υψηλότερο ποσοστό συνθετικών/εικονικών στοιχείων.
- **Εικονικότητα:** Εμπεριέχει την “βύθιση” σε ένα πλήρως συνθετικό/εικονικό περιβάλλον.

### **3.3 Κατηγορίες του *Virtual Manufacturing***

Σύμφωνα με τους Mujber et al.(2004) οι εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας στα συστήματα κατεργασιών ταξινομούνται σε τρεις ομάδες:

- Σχεδιασμός
- Λειτουργίες διαχείρισης
- Διαδικασίες παραγωγής

#### **3.3.1 Σχεδιασμός - *Design***

Η εικονική πραγματικότητα έρχεται να παίξει καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό ενός νέου προϊόντος. Τεχνολογία εικονικής πραγματικότητας έχει χρησιμοποιηθεί σε δύο διαφορετικές εφαρμογές, στο σχεδιασμό και την προτυποποίηση. Αφενός, η ΕΠ παρέχει ένα εικονικό περιβάλλον για τους σχεδιαστές στο δημιουργικό στάδιο του σχεδιασμού ενός νέου προϊόντος. Ο σχεδιαστής μπορεί να παράγει ένα 3D "σκίτσο" ενός προϊόντος στο εικονικό περιβάλλον. Σε αυτό το στάδιο, μπορεί να πειραματιστεί με τα λειτουργικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του προϊόντος, όπως μεντεσέδες, συναρμολόγηση κλπ, ώστε να αξιολογηθεί η αρχική σύλληψη της ιδέας και να γίνουν τυχόν τροποποιήσεις όπου αυτό απαιτείται. Μόλις οι σχεδιαστές είναι ικανοποιημένοι με το αποτέλεσμα, τότε το σχέδιο καθώς και οι απαραίτητες

τροποποιήσεις θα μπορούσαν να είναι πιο λεπτομερείς. Κατά τη διαδικασία ανάπτυξης ενός προϊόντος, η προτυποποίηση αποτελεί ένα ουσιαστικό βήμα. Ένα πρότυπο αντιπροσωπεύει σημαντικά χαρακτηριστικά ενός προϊόντος, τα οποία πρόκειται να διερευνηθούν, να αξιολογηθούν, και να βελτιωθούν. Θα μπορούσαν λοιπόν να χρησιμοποιηθούν εικονικά (virtual) πρότυπα πριν από την κατασκευή του φυσικού προτύπου ώστε να βρεθούν εναλλακτικές σχεδιαστικές λύσεις, να γίνει μια τεχνική ανάλυση, να οργανωθεί ένα κατασκευαστικό πλάνο που θα υποστηρίζει αποφάσεις διαχείρισης, αλλά και να συλλεχθούν πληροφορίες σχετικά το νέο προϊόν από τους υποψήφιους πελάτες. Το εικονικό περιβάλλον για την προτυποποίηση πρέπει να περιλαμβάνει τα επιμέρους στάδια:

- **Λειτουργικότητα:** το εικονικό πρότυπο πρέπει να ορίζεται με σαφήνεια και να προσομοιώνεται ρεαλιστικά, ώστε να προσδιοριστούν η λειτουργικότητά του και η δυναμική του συμπεριφορά.
- **Ανθρώπινη αλληλεπίδραση:** οι εμπλεκόμενες ανθρώπινες λειτουργίες με το προϊόν πρέπει να προσομοιώνονται εξίσου ρεαλιστικά ή να περιλαμβάνεται ο άνθρωπος στην προσομοίωση.
- **Περιβάλλον:** πρέπει να πραγματοποιηθεί μια offline προσομοίωση των λειτουργιών σε υπολογιστή ή ο συνδυασμός αυτής με προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο (real time simulation).

### **3.3.2 Λειτουργίες Διαχείρισης – *Operations Management***

Οι λειτουργίες διαχείρισης έχουν ταξινομηθεί σε τρεις κατηγορίες: προγραμματισμός, προσομοίωση και εκπαίδευση. Τα οφέλη από την εφαρμογή της τεχνολογίας εικονικής πραγματικότητας σε αυτές τις κατηγορίες προέρχονται από την ανάγκη για έναν πιο έξυπνο προγραμματισμό και σχεδιασμό του εργοστασίου. Η εικονική πραγματικότητα είναι μια χρήσιμη μέθοδος για την βελτίωση της κατανόησης των σχεδίων και για την υποστήριξη διεπιστημονικών συζητήσεων.

Επίσης η εκπαίδευση και κατάρτιση χρησιμοποιώντας εφαρμογές ΕΠ, είναι ίσως ανά τον κόσμο η πιο προηγμένη μέθοδος διδασκαλίας κατασκευαστικών δεξιοτήτων και διαδικασιών για τους εργαζομένους. Χρησιμοποιώντας τεχνολογίες αιχμής ΕΠ, η

εκπαίδευση λαμβάνει μέρος σε μια ρεαλιστική προσομοίωση, εκδοχή της πραγματικής εγκατάστασης, ολοκληρωμένη με τις δράσεις, τα αντικείμενα και τους ήχους του εργοστασίου.

### **3.3.3 Διαδικασίες παραγωγής – *Manufacturing processes***

Οι διαδικασίες παραγωγής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις επιμέρους περιοχές: Κατεργασιών, Συναρμολόγησης και Ελέγχου.

#### **3.3.3.1 Εικονικών Κατεργασιών – *Virtual Machining***

Το Virtual Machining ασχολείται κυρίως με κατεργασίες κοπής, όπως η τόννευση, η διάτρηση, το φρεζάρισμα, η λείανση κλπ. Χρησιμοποιείται για τη μελέτη των παραγόντων που επηρεάζουν την ποιότητα, τον χρόνο κατεργασίας της διαδικασίας αφαίρεσης υλικού καθώς και τη σχετική κίνηση μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου. Για παράδειγμα, το πανεπιστήμιο του Bath, στην Αγγλία, έχει αναπτύξει ένα διαδραστικό εικονικό μηχανουργείο (Shop Floor) που περιέχει μια τριαξονική φρέζα και ένα βιομηχανικό ρομπότ πέντε αξόνων για βαφή. Ο χρήστης μπορεί να φορτώσει το προσδιορισμένο για κατεργασία τεμάχιο στην φρέζα, να επιλέξει ένα εργαλείο και να εκτελέσει διεργασίες άμεσης κατεργασίας, όπως αξονικές κινήσεις ή προκαθορισμένες ακολουθίες.

#### **3.3.3.2 Εικονική Συναρμολόγηση – *Virtual Assembly***

Η Εικονική Συναρμολόγηση – VA αποτελεί βασικό συστατικό του VM. Το VA επιτυγχάνεται με την βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών και λογισμικού όπου διενεργούνται μηχανικές αναλύσεις, μοντέλα πρόβλεψης, απεικόνιση και παρουσίαση των δεδομένων. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν χρησιμοποιούνται για τη λήψη σημαντικών αποφάσεων σχετικά με τη δημιουργία ενός πλάνου ολόκληρης της συναρμολόγησης ή μέρους αυτής. Σε εργασίες συναρμολόγησης, το VM χρησιμοποιείται κυρίως για να διερευνήσει τα μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού και εργαλείων και την αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων μηχανών και τεμαχίων. Άλλα ζητήματα που μπορούν να αντιμετωπιστούν είναι ο παράγοντας δυσκολίας συναρμολόγησης/αποσυναρμολόγησης ενός τεμαχίου-

εξαρτήματος, ο χρόνος που λαμβάνει μέρος η παραπάνω διαδικασία, ενώ από πλευράς εργονομίας το πόσο επίπονη είναι η κάθε διεργασία για τους εργαζομένους και πόσο καλά είναι χωρικά – χωροταξικά διατεταγμένος ο χώρος που πραγματοποιείται η συναρμολόγηση.

### **3.3.3.3 Έλεγχος - *Inspection***

Ο εικονικός έλεγχος (παρακολούθηση) κάνει χρήση της τεχνολογίας VM με σκοπό να δημιουργήσει το μοντέλο και την προσομοίωση της διαδικασίας της παρακολούθησης καθώς και των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του εξοπλισμού ελέγχου. Αυτό αποσκοπεί στην καλύτερη παρουσίαση και μελέτη των μεθόδων ελέγχου, της ανίχνευσης συγκρούσεων, το πλάνο επιθεωρήσεων, παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια της διαδικασίας ελέγχου, κτλ.

## **3.4 Εικονικά Εργοστάσια – *Virtual Factory***

Είναι προφανές ότι για τη διεύθυνση των παραπάνω δραστηριοτήτων είναι αναγκαία η κατασκευή εργαλείων που υποστηρίζουν την καλή λήψη αποφάσεων σχετικά με το σχεδιασμό, την ανάπτυξη, και τη λειτουργία ολόκληρου του συστήματος αλλά και των μερών του. Ωστόσο, στην περίπτωση των συστημάτων κατεργασιών, συνήθως δεν υπάρχει ένα πεδίο δοκιμής που να προσομοιάζει τέλεια τέτοιου είδους διαδικασίες. Η χρήση του ίδιου του εργοστασίου ως πεδίο δοκιμής εναλλακτικών μοντέλων συστημάτων παραγωγής είναι πολύ πιθανό να διαταράξουν τη λειτουργία του.

Έτσι, οι εξειδικευμένες προσομοιώσεις σε υπολογιστή, που αναφέρονται και με τον όρο εικονικά εργοστάσια στην βιβλιογραφία, χρησιμοποιούνται προκειμένου να δημιουργηθεί ένα κατανεμημένο, ολοκληρωμένο, σύνθετο μοντέλο της συνολικής παραγωγής. Το μοντέλο αυτό, ενσωματώνοντας όλες τις εργασίες και τους πόρους που απαιτούνται για να επιτευχθεί ο σχεδιασμός, η παραγωγή και η παράδοση ενός προϊόντος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να μελετηθούν και να συγκριθούν εναλλακτικά σχέδια παραγωγής. Τα εικονικά εργοστάσια, διαθέτοντας τη δυνατότητα ακριβούς προσομοίωσης των διεργασιών του εργοστασίου, σε χρονικά περιθώρια έως και μηνών, προσφέρουν στους διαχειριστές ένα ισχυρό και ευέλικτο εργαλείο

διερεύνησης πολλών πιθανών διαμορφώσεων και χρονοδιαγραμμάτων παραγωγής, ένα πεδίο ανάπτυξης και αξιολόγησης διαφορετικών οργανωτικών σχημάτων με σημαντική εξοικονόμηση κόστους και χρόνου. Με βάση τα παραπάνω, η απεικόνιση εργοστασίων σε εικονικούς χώρους αποτελεί ένα σημαντικό βοήθημα για τη βελτίωση της παραγωγής σε πολλαπλά επίπεδα.

Αυτή τη στιγμή υπάρχει στην αγορά μία ποικιλία από λογισμικά πακέτα εικονικής πραγματικότητας, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη εικονικών περιβαλλόντων για διάφορες εφαρμογές. Επιπλέον, πακέτα λογισμικού έχουν αναπτυχθεί για εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας εξειδικευμένα στον κατασκευαστικό τομέα (πχ. DELMIA). Το Delmia παρέχει την δυνατότητα σύνταξης προγραμματιστικών εφαρμογών, για την ανάπτυξη και τη δημιουργία εικονικών περιβάλλοντων στην παραγωγή που μπορούν να διευθύνουν την διαδικασία σχεδιασμού, την εκτίμηση κόστους, τη διάταξη εργοστασίου, την εργονομία, τη ρομποτική, κατεργασίες, επιθεώρηση, προσομοίωση εργοστασίου, και διαχείριση της παραγωγής.



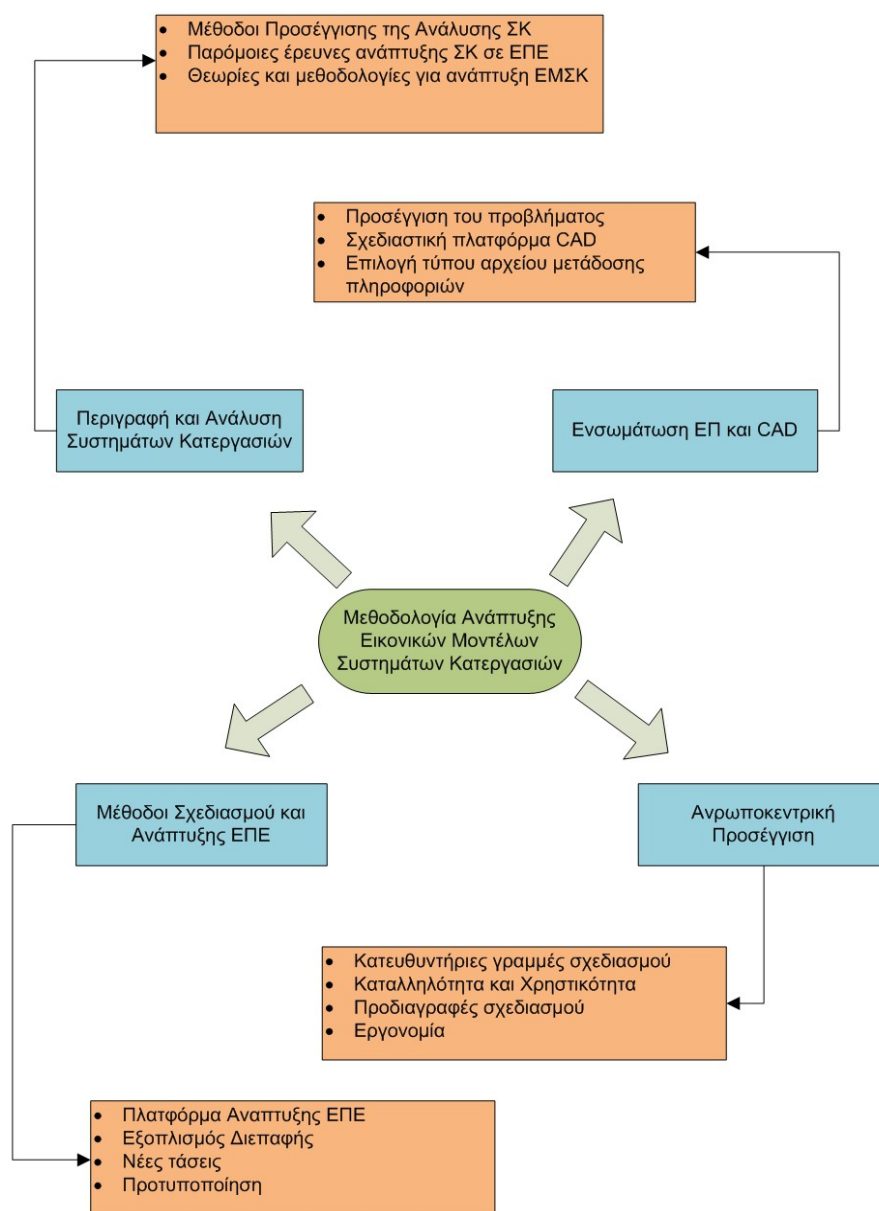
# 4

## *Μεθοδολογία*

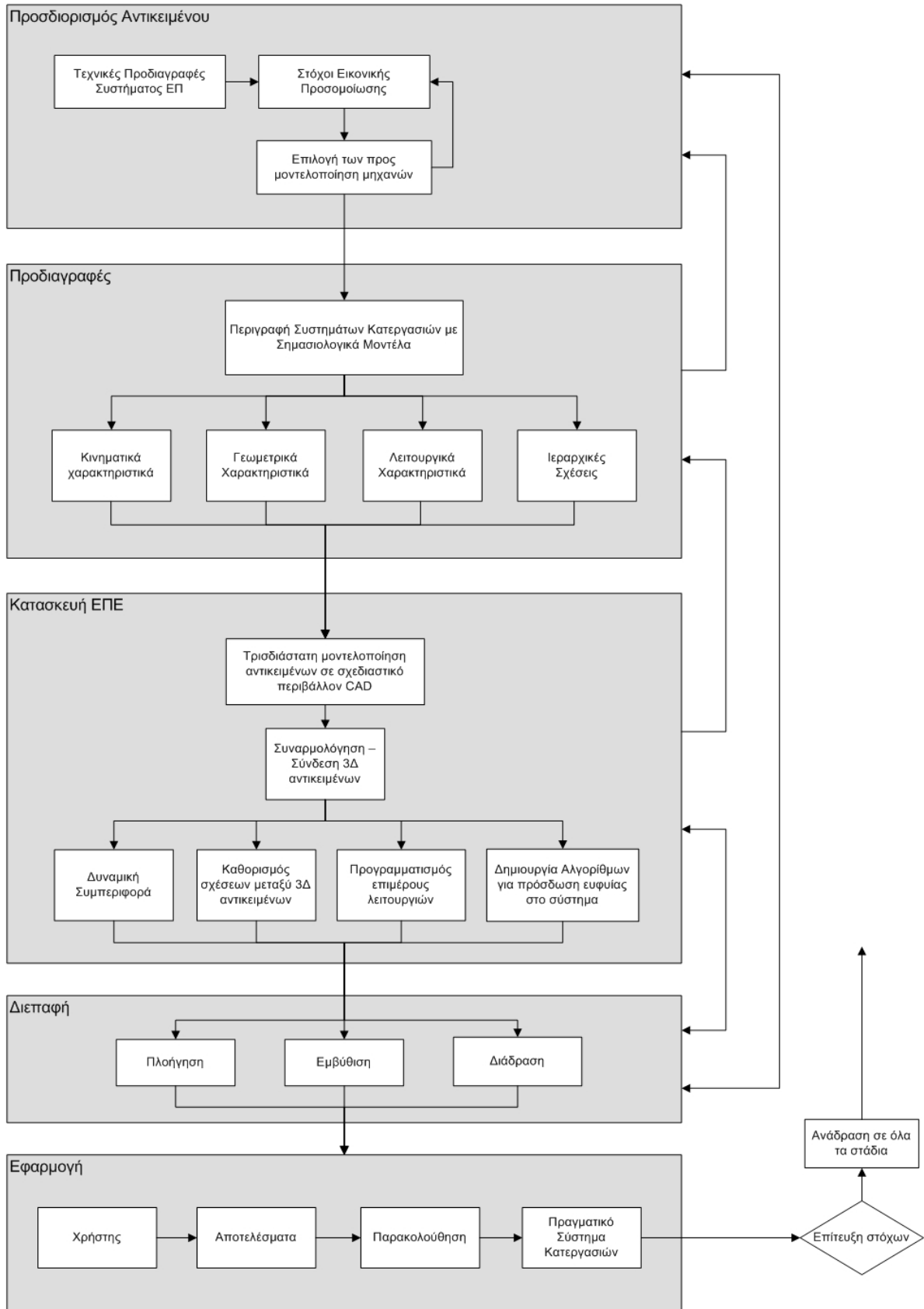
Η χρήση εικονικών μοντέλων για την ανάπτυξη δυναμικών συστημάτων είναι μια εξαιρετικά πολύπλοκη εργασία, δεδομένου ότι δεν υπάρχει ένα συγκεκριμένο εργαλείο που να επιτρέπει ταυτόχρονα την περιγραφή, προσομοίωση, και ανάλυση του υπό μελέτη συστήματος. Ένα από τα εμπόδια που έπρεπε να ξεπεραστούν, ήταν να κατανοηθεί σε βάθος η συνολική διαδικασία σχεδιασμού, η οποία είναι αρκετά ευρύτερη από αυτή της ανάπτυξης ενός Εικονικού Περιβάλλοντος. Καθώς και να κατανοηθούν σαφώς τα συγκριτικά πλεονεκτήματα των εφαρμογών εικονικής πραγματικότητας, έναντι κάθε άλλου τύπου εφαρμογών.

Η βασική μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική πριν την ενσωμάτωσή της σε ένα ειδικό πλάνο, περιλάμβανε έρευνα σε πολλούς διαφορετικούς τομείς (Σχήμα 4.1) : γενικές γνώσεις πάνω στο κύριο αντικείμενο των Συστημάτων Κατεργασιών, Εργαλεία ανάλυσης Συστημάτων Κατεργασιών, σχεδιασμό με την βοήθεια υπολογιστή – CAD, ρομποτική και κινηματική ανάλυση, προγραμματισμό συμπεριφορών, ανάπτυξη ΕΠΕ, καθώς και σχεδιασμό με βάση την χρηστικότητα. Παράλληλα, κάθε ενέργεια έπρεπε να γίνει σε συνάρτηση με τον χρήστη και τις λειτουργίες που εκτελεί αυτός και τα μηχανήματα σε ένα πραγματικό σύστημα, ενώ ταυτόχρονα έπρεπε να εξασφαλιστεί η καταλληλότητα και

αποδοτικότητα της εφαρμογής καθώς και η σύνδεσή της με τον πραγματικό κόσμο. Για να εξασφαλιστούν τα παραπάνω, υιοθετήθηκε μία ανθρωποκεντρική μέθοδος αντιμετώπισης, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι ήταν μία άκαμπτη μέθοδος παρά περισσότερο μία ευέλικτη διαδικασία η οποία ενσωματώνει όλες τις παραπάνω απαιτήσεις. Το διάγραμμα το οποίο παρουσιάζεται παρακάτω αποτελεί σύμπτυξη των μεθόδων με τις οποίες προσεγγίζεται το αντικείμενο και περιλαμβάνει πέντε επιμέρους στάδια τα οποία αναλύονται στην συνέχεια.



Σχήμα 4.1: Σύνθεση Μεθοδολογίας



Σχήμα 4.2: Μεθοδολογία

#### **4.1 Προσδιορισμός του Αντικειμένου**

Η επιλογή ενός εργαλείου που επιτρέπει στην αποτελεσματική απεικόνιση μιας προσομοίωσης είναι ένας από τους πρωταρχικούς στόχους για τη δημιουργία ενός εικονικού περιβάλλοντος. Το εργαστήριο κατεργασιών διαθέτει το λογισμικό 3DVIA Virtools, μια πλατφόρμα ανάπτυξης διαδραστικών ΕΠΕ, καθώς και τον απαραίτητο υλικό εξοπλισμό, μια σειρά μηχανημάτων αναγκαία για την απόδοση των βασικών χαρακτηριστικών της ΕΠ.

Μέσω του εργαλείου προσομοίωσης Virtools, επιχειρείται η οικοδόμηση και εξερεύνηση μοντέλων Συστημάτων Κατεργασιών σε ένα ΕΠΕ. Το προτεινόμενο ΕΠΕ πρέπει να περιλαμβάνει την κατάλληλη εκπροσώπηση των πραγματικών αντικείμενων στο χώρο κατά τέτοιο τρόπο, που να τα καθιστά αυτόνομα μέσα, που δέχονται αισθητηριακές εντολές και παράγουν αποτελέσματα με την μορφή δράσεων. Για κάθε συγκεκριμένο φαινόμενο μας ενδιαφέρουν αντίστοιχα μόνο συγκεκριμένες πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη αυτό, έπρεπε από την μία μεριά να αντιμετωπιστεί ολιστικά το προς μοντελοποίηση αντικείμενο αλλά και να οριστούν συγκεκριμένοι προς ανάπτυξη στόχοι που θα φιλτράρουν μόνο τις πτυχές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τη μελέτη. Ένα περιβάλλον γεμάτο περιττά αντικείμενα θα περιέπλεκε χωρίς λόγο τη μοντελοποίηση και θα οδηγούσε στη μείωση της αποτελεσματικότητας. Έτσι, ανάλογα με το πρόβλημα, είναι απαραίτητο να οριστούν από την αρχή οι αντικειμενικοί στόχοι και να απλοποιηθεί σημαντικά η προσομοίωση.

Ο κύριος σκοπός ενός συστήματος παραγωγής είναι η κατασκευή διαφορετικών τύπων προϊόντων, κάτι που προϋποθέτει μια ακολουθία διεργασιών που μπορούν να εκτελούνται από ένα ή περισσότερα μηχανήματα. Οι διακριτές αυτές διεργασίες που εκτελούνται στα συστήματα κατεργασιών αναφέρονται σε συγκεκριμένες δραστηριότητες, όπως μηχανήματα και λειτουργία, τεχνολογία επιλογής και τοποθέτησης αντικειμένων, χρήση εξοπλισμού αποθήκευσης και μεταφοράς κλπ. Ενώ ο τρόπος λειτουργίας ενός συστήματος κατεργασιών εξαρτάται άμεσα από το φυσικό σύστημα που το αποτελεί, τη διάταξη παραγωγής, καθώς και τη διαχείριση του συστήματος.

Ανεξάρτητα όμως από την διάταξη και το μοντέλο διαχείρισης το οποίο επιλέγεται τα συστήματα κατεργασιών χρησιμοποιούν μηχανές που αν χωριστούν κατά «οικογένειες» κατεργασιών έχουν κατά βάση κοινά χαρακτηριστικά στον τρόπο λειτουργίας τους. Μπορεί εργαλειομηχανές τόννευσης για παράδειγμα να διαφέρουν πολύ μεταξύ τους από μοντέλο σε μοντέλο σε σχέση με τις δυνατότητες κατεργασιών που προσφέρουν, όμως η αρχή λειτουργίας και προγραμματισμού τους παραμένει η ίδια, κάτι το οποίο φαίνεται και από την περιγραφή τους από Σημασιολογικά Μοντέλα. Αντίστοιχα, το ίδιο ισχύει και για κάθε εργαλειομηχανή της ίδιας «οικογένειας», όπως και για τους ρομποτικούς βραχίονες, μεταφορικές ταινίες κτλ.

Προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα του Virtools να προσομοιώσει με πιστότητα τα διακριτά γεγονότα αλλά και την κινηματική λειτουργία μηχανών Συστημάτων Κατεργασιών, επιλέχθηκαν δύο αντιπροσωπευτικές προς μοντελοποίηση μηχανές. Ένα κέντρο κατεργασιών για την εκπροσώπηση των εργαλειομηχανών μεταποίησης υλικού και ένας ρομποτικός βραχίονας 6R από την μεριά των μηχανών διαχείρισης υλικού. Η επιλογή των μηχανών για μοντελοποίηση και προσομοίωση στο εικονικό περιβάλλον έγινε βάσει των χαρακτηριστικών της πολυπλοκότητας τους και της χρηστικότητας τους σε αυτοματοποιημένες γραμμές παραγωγής χωρίς βλάβη της γενικότητας. Η μοντελοποίηση των μηχανών αυτών χωρίζεται σε τρεις τομείς:

- Γεωμετρική, η οποία περιλαμβάνει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μηχανών για μία πιστή αναπαράστασή τους στο ΕΠΕ.
- Κινηματική, η οποία περιλαμβάνει τα κινηματικά χαρακτηριστικά των διαφόρων μερών των μηχανών
- Λειτουργική, η οποία περιλαμβάνει τις λειτουργίες των μηχανών και την σύνδεσή τους με τις εντολές του χειριστή. Με έμφαση στην χειροκίνητη, ημιαυτόματη λειτουργία και προγραμματισμού τους από τον χρήστη, αλλά και ανάπτυξη της βάσης για την αυτόματη λειτουργία τους.

## ***4.2 Προδιαγραφές Εικονικού Συστήματος Κατεργασιών***

Προκειμένου να προσομοιωθούν τα στοιχεία του πραγματικού συστήματος κατεργασιών χρειαζόταν μια περιγραφή σε ένα πιο αφηρημένο επίπεδο. Στο σημείο αυτό η χρήση σημασιολογικών μοντέλων κρίθηκε κατάλληλη, αποτελώντας μια ολιστική απεικόνιση που ορίζει οντότητες και σχέσεις μεταξύ οντοτήτων.

Η σημασιολογία εκφράζεται μέσα από μια οντολογία. Ο όρος οντολογία προέρχεται από τη φιλοσοφία, και αφορά στη μελέτη της ύπαρξης και της υπόστασης. Προσπαθεί να περιγράψει τις κατηγορίες και σχέσεις μεταξύ όλων των υπαρκτών πραγμάτων. Η οντολογία είναι, σε αυτό το πλαίσιο, μια τυποποιημένη περιγραφή και εν γένει αποτελείται από οντότητες που αντιπροσωπεύουν τις κατηγορίες και τις ιδιότητες των αντικειμένων στον πραγματικό κόσμο καθώς και τις μεταξύ τους σχέσεις και τους περιορισμούς των σχέσεων αυτών.

Αυτό που είναι σημαντικό σε αυτή την προσέγγιση είναι η ανάλυση και η κατανόηση των δεδομένων σε ένα ευρύ φάσμα πλαισίων. Έτσι μπορούμε να έχουμε μια γενική οντολογία/γενικό σημασιολογικό μοντέλο που αφορά στο σύνολο των εργασιών ενός εργοστασίου. Ο Γωγουβίτης στην εργασία του «Εικονικά Συστήματα Κατεργασιών Βασισμένα σε Ευφυή Αντικείμενα» (2011), διακρίνει τα σημασιολογικά μοντέλα των κύριων και δευτερευουσών μηχανών, περιβάλλοντος, εργασιών και ελέγχου. Συμπερασματικά μπορούμε να έχουμε οντολογίες διαφορετικών επιπέδων ανάλυσης καθώς και να χτίσουμε νέες οντολογίες με βάση τις υπάρχουσες. Οι οντολογίες αυτές του Γωγουβίτη αποτέλεσαν την βάση για την ανάπτυξη των σημασιολογικών μοντέλων στην παρούσα εργασία.

Βάσει των τριών διακριτών αξόνων της προσομοίωσης που ορίστηκαν στο προηγούμενο επίπεδο, εξετάζονται τα αντικείμενα και τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους, οι σχέσεις που δημιουργούνται μεταξύ τους και με τον χρήστη και ορίζονται οι προδιαγραφές που περιγράφουν το πραγματικό σύστημα ώστε βάσει αυτών να αναπτυχθεί το ΕΠΕ. Εδώ καθορίζονται και οι οντότητες που πρέπει να ενισχυθούν με την ανάπτυξη «συμπεριφορών» οπότε εμπλέκεται η κινηματική ανάλυση των μηχανών και δημιουργία αλγορίθμων για πρόσδοση ευφυΐας στο σύστημα.

### **4.3 Κατασκευή ΕΠΕ**

Η κατασκευή του εικονικού συστήματος, χωρίζεται σε τρία επιμέρους στάδια: σχεδιασμό, συναρμολόγηση και προγραμματισμό. Βάσει της προηγούμενης ανάλυσης εδώ πραγματοποιείται η οπτικοποίηση και ο προγραμματισμός της προσομοίωσης. Αρχικά γίνεται η τρισδιάστατη μοντελοποίηση των αντικειμένων του κόσμου σε σχεδιαστικά προγράμματα CAD. Η λογική που ακολουθείται κατά το σχεδιασμό, είναι κάθε αντικείμενο που αποτελεί μία ξεχωριστή οντότητα σύμφωνα με τα Σηματολογικά Μοντέλα να αποτελεί και ένα αυτοτελές τρισδιάστατο αντικείμενο. Τα τρισδιάστατα αντικείμενα εισάγονται στην πλατφόρμα ανάπτυξης ΕΠΕ – 3DVIA Virtools όπου συναρμολογούνται βάσει των ιεραρχικών σχέσεων, γεωμετρικών και λειτουργικών τους χαρακτηριστικών. Τέλος στο στάδιο αυτό χτίζεται η συμπεριφορά των οντοτήτων, τόσο από λειτουργικής-δυναμικής συμπεριφοράς αλλά και κινηματικής, ενσωματώνοντας αλγόριθμους κίνησης και ελέγχου σε κάθε αντικείμενο. Σημαντικό βήμα στο συγκεκριμένο στάδιο είναι η συνεχής αξιολόγηση του εικονικού συστήματος κατά την διαδικασία προγραμματισμού της προσομοίωσης, εξετάζοντας αν υπάρχει συνέπεια μεταξύ της συμπεριφοράς των εικονικών, έναντι των πραγματικών αντικειμένων.

### **4.4 Διεπαφή**

Επιχειρείται ο προγραμματισμός και η σύνδεση του εικονικού με τον πραγματικό κόσμο, αναπτύσσοντας τα βασικά συστατικά χαρακτηριστικά της εικονικής πραγματικότητας: πλοήγηση, εμπύθιση και διάδραση. Χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι σύνδεσης και συγχρονισμού του υλικού εξοπλισμού του εργαστηρίου με το εικονικό σύστημα κατεργασιών.

Η προσομοίωση συνδέεται με το πραγματικό ΣΚ μέσω του χρήστη γεγονός που τονίζει τον ανθρωποκεντρικό χαρακτήρα της προσέγγισης στο στάδιο αυτό, παρόλο που δεν απουσιάζει και από τις υπόλοιπες φάσεις του σχεδιασμού. Κατά τον τρόπο αυτό πρέπει να υπάρξει μία αντιστοιχία πραγματικών και εικονικών ενεργειών από την μεριά του χρήστη. Απαιτείται η αξιοποίηση του εξοπλισμού με τέτοιο τρόπο ώστε να προσομοιωθούν οι κινήσεις και οι ενέργειες που εκτελεί ο χρήστης για τον προγραμματισμό και έλεγχο των πραγματικών ΣΚ.

#### **4.5 Εφαρμογή**

Μέσω του εργαλείου προσομοίωσης, είναι δυνατό να οικοδομήσουμε και να εξερευνήσουμε διαφορετικά μοντέλα ΣΚ που βοηθούν στην απόκτηση μίας βαθύτερης κατανόησης της συγκεκριμένων διαδικασιών, λειτουργιών και συμπεριφοράς των οντοτήτων ενός συστήματος. Στο τελικό στάδιο ο χρήστης έχει πλέον ενεργό ρόλο. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αξιολογούνται με βάση την χρησιμότητα και καταλληλότητα τους ανάλογα με το εννοιολογικό πλαίσιο στο οποίο αποσκοπεί η χρήση. Η ανάπτυξη ΕΠΕ περιλαμβάνει αντιπροσωπευτικούς χρήστες κατά την φάση του σχεδιασμού. Επομένως θα μπορούσαμε να πούμε ότι το συγκεκριμένο στάδιο είναι ενσωματωμένο καθ' όλη την διάρκεια κατασκευής του εικονικού περιβάλλοντος και της ανάπτυξης διεπαφής, ώστε να αξιολογείται διαρκώς η ανάπτυξη του ΕΠΕ και να αναπροσαρμόζεται στις απαιτήσεις. Ένας βρόχος ανάδρασης ενεργοποιεί όλα τα προηγούμενα στάδια της διαδικασίας έως ότου επιτευχθούν οι αρχικοί στόχοι.



# 5

## *Επιλογή προς μοντελοποίηση*

### *μηχανών και περιγραφή τους*

Η επιλογή των μηχανών για μοντελοποίηση και προσομοίωση στο εικονικό περιβάλλον έγινε με βάση των χαρακτηριστικών της πολυπλοκότητας τους και της χρηστικότητας τους σε αυτοματοποιημένες γραμμές παραγωγής. Ένα βιομηχανικό ρομπότ έξι περιστροφικών αρθρώσεων - 6R και ένα κέντρο κατεργασιών πέντε αξόνων ήταν οι μηχανές οι οποίες επιλέχθηκαν.

Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές αποτελούν ένα ουσιαστικό μέρος του βιομηχανικού αυτοματισμού. Κατευθύνουν γραμμές παραγωγής και ελέγχουν συστήματα κατασκευής (π.χ. εργαλειομηχανές, συγκολλητές, κοπτικές διατάξεις Laser, κ.α.). Τα βιομηχανικά ρομπότ χρησιμοποιούν υπολογιστές σαν μια βασική συνιστώσα του ελέγχου τους, αλλά οι αυξημένες δυνατότητές τους, τα αναβαθμίζουν σε εξελιγμένα συστήματα αυτοματισμού, που μπορούν να εκτελούν ποικίλες εργασίες στα βιομηχανικά συστήματα και γενικά συμμετέχουν στον πλήρη αυτοματισμό των εργασιών.

## **5.1 Κέντρα Κατεργασιών – Κέντρα Τόρνευσης**

Οι βασική λειτουργία των εργαλειομηχανών είναι η μετατροπή των πρώτων υλών, δεδομένων των μηχανικών τους χαρακτηριστικών, σε τελικά τεμάχια με συγκεκριμένες απαιτήσεις γεωμετρίας, διαστάσεων και ποιότητας επιφάνειας. Η συνεχόμενη αύξηση των απαιτήσεων αυτών, οδήγησε στην δημιουργία πιο πολύπλοκων εργαλειομηχανών με πολλαπλές λειτουργίες και εναλλασσόμενα/ μεταβλητά μέρη της διάταξης της αρχιτεκτονικής τους (modular and reconfigurable design architectures), προσφέροντας τη δυνατότητα επιλογής των μερών που θα συμπεριληφθούν, αλλά και προσαρμοσμένων (customized) λύσεων κατά παραγγελία από την κατασκευαστική εταιρεία της μηχανής. Πολλά από τα κατασκευαζόμενα τεμάχια παράγονται μέσω μίας αλληλουχίας διαδικασιών και διεργασιών, οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν διάφορες διεργασίες κοπής, λείανσης, πλαστικής παραμόρφωσης, θερμικής επεξεργασίας και άλλες διεργασίες φινιρίσματος. Προκειμένου να κατασκευαστούν τέτοια τεμάχια και μάλιστα σε μικρές ποσότητες, είναι απαραίτητη μία εργαλειομηχανή που μπορεί να εκτελέσει ποικίλες διεργασίες της μεταποιητικής διαδικασίας, σε αντίθεση με την διανομή των ενεργειών αυτών σε μία σειρά από διαφορετικές εργαλειομηχανές. Διάφορων τύπων διατάξεις πολυλειτουργικών εργαλειομηχανών, ενσωματωμένες με διάφορες διαδικασίες έχουν αναπτυχθεί για γενικούς αλλά και πιο εξειδικευμένους σκοπούς. Σε αυτές είναι ενσωματωμένες διάφορες διεργασίες κοπής για την κατεργασία τεμαχίων σε μικρές ποσότητες, με πολύπλοκες γεωμετρίες, υψηλά στάνταρ ποιότητας και παραγωγή σε σύντομο χρονικό διάστημα. Τέτοιες πολυλειτουργικές εργαλειομηχανές είναι τα κέντρα κατεργασιών και κέντρα τόρνευσης.

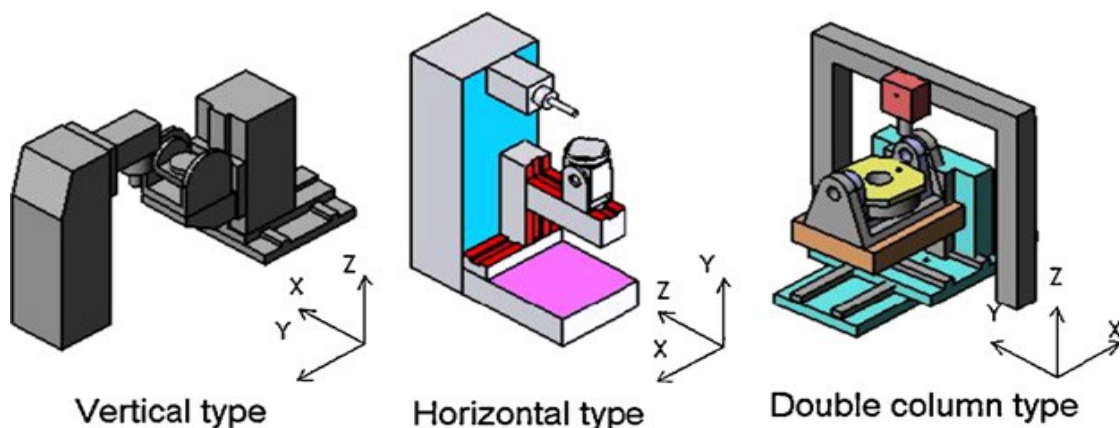
Τα κέντρα κατεργασιών και κέντρα τόρνευσης είναι η εξέλιξη των συμβατικών διατάξεων των εργαλειομηχανών φρέζας και τόρνευσης. Στην ανάπτυξή τους οδήγησε η ανάγκη για την κατεργασία πολύπλοκων γεωμετριών σε υψηλή ποιότητα, με γρηγορότερους και αυτοματοποιημένους κύκλους εργασιών (επαναληψιμότητα). Οι μηχανές αυτές συνήθως απαιτούν μόνο μία ρύθμιση (setup) μηχανής για την κατεργασία ενός τεμαχίου, εξοικονομούν έτσι χρόνο και βελτιώνουν την ακρίβεια μεταξύ των διαδικασιών κατεργασίας. Έχουν επίσης την ικανότητα να αλλάζουν την κατεύθυνση του άξονα του εργαλείου, προκειμένου να προσεγγίσει τις επεξεργάσιμες

περιοχές με μικρότερα, πιο άκαμπτα εργαλεία ή να φθάσει τις ζώνες ‘υποκοπής’ που δεν θα μπορούσαν να επεξεργαστούν με συνηθισμένες μεθόδους. Για την επίτευξη των παραπάνω προστέθηκαν στις μηχανές αυτές επιπλέον λειτουργίες. Μεταβλητά μέρη της διάταξης και αρχιτεκτονικής τους καθώς και περισσότερη βαθμοί ελευθερίας με περισσότερους άξονες ελέγχου των κινητών μερών των μηχανών, κάτι στο οποίο συνέβαλε και η εξέλιξη των τεχνολογιών NC και CNC με την δυνατότητα για ταυτόχρονο έλεγχο πολλαπλών αξόνων. Οι τύποι και οι διατάξεις τέτοιων μηχανών που έχουν κατασκευαστεί τα τελευταία χρόνια είναι πάρα πολλοί. Ενώ τα όρια μεταξύ κέντρων κατεργασιών και κέντρων τόνρευσης σε ορισμένες περιπτώσεις είναι ιδιαίτερα στενά, καθώς τα τελευταία εξοπλίζονται μερικές φορές με εργαλειοφορέα φρέζας για ακόμα μεγαλύτερη ευελιξία κατεργασιμότητας περίπλοκων τεμαχίων και μικρότερους χρόνους παραγωγής.

Στην παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται το ενδιαφέρον στη μοντελοποίηση πενταξονικών εργαλειομηχανών κατεργασιών. Το μέγεθός των εργαλειομηχανών αυτών μπορεί να μην ξεπερνά πλέον αυτό των συμβατικών και τα οφέλη τους είναι εύκολο να δικαιολογήσουν το κόστος αναβάθμισης στην τελευταία λέξη της τεχνολογίας. Γιαυτό και πλέον αποτελούν την πιο διαδεδομένη και ευέλικτη λύση αυτοματισμού και βρίσκουν εφαρμογή από τις μεγαλύτερες εταιρείες κατασκευής, μέχρι και μεσαίου ή μικρού μεγέθους μηχανουργία. Ταυτόχρονα η μοντελοποίηση που ακολουθείται στο τρισδιάστατο περιβάλλον έχει σκοπό να καλύψει τις βασικές λειτουργίες σχεδόν κάθε τύπου τέτοιων εξελιγμένων και πολυλειτουργικών μηχανών.

### ***5.1.1 Εργαλειομηχανές πέντε αξόνων***

Ακόμα και στις πενταξονικές εργαλειομηχανές οι δυνατότητες κατασκευής και χρήσης διαφορετικών διατάξεων είναι πάρα πολλές. Ενδεικτικά αν ληφθούν υπόψιν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί των κινήσεων κάθε άξονα σε μία εργαλειομηχανή πέντε αξόνων, τότε προκύπτουν 2160 διαφορετικοί συνδυασμοί εργαλειομηχανών. Ενώ κάθε μία από αυτές τις διατάξεις μπορεί να λάβει τουλάχιστον τρεις τύπους δομών κατασκευής: κάθετου τύπου, οριζόντιου τύπου και διπλής στήλης (Σχήμα 5.1).

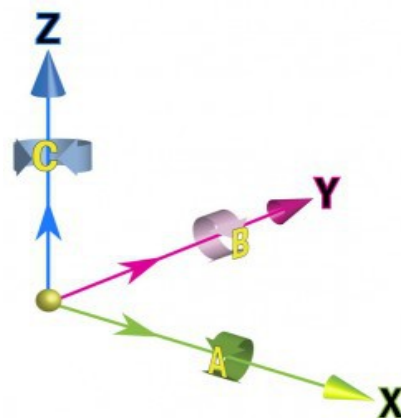


Σχήμα 5: Οι τρεις τύποι αρχιτεκτονικής δομής κατασκευής πενταξονικών εργαλειομηχανών

Η πραγματική δομή κατασκευής κάθε εργαλειομηχανής προσδιορίζεται ανάλογα με την διάταξη της από μία αντίστοιχη ακρίβεια, ακαμψία, ιδιότητες θερμικής παραμόρφωσης, ευκολία κατασκευής και χρήσης-προγραμματισμού της.

Για να καταλάβει κανείς τις διαφορετικές διατάξεις που προκύπτουν πρέπει πρώτα να καταλάβει την βασική ορολογία των πενταξονικών εργαλειομηχανών. Ενώ οι συμβατικές εργαλειομηχανές μπορούν να εκτελέσουν τρεις γραμμικές κινήσεις κατά μήκος των αξόνων X, Y και Z. Οι πενταξονικές μηχανές διαθέτουν δύο επιπλέον άξονες περιστροφής, κάθε ένας εκ των οποίων θα περιστρέφεται γύρω από έναν εκ των τριών βασικών αξόνων. Οι περισσότεροι κατασκευαστές εργαλειομηχανών προσδιορίζουν τους άξονες περιστροφής σύμφωνα με το πρότυπο ISO (ωστόσο αρκετοί μπορεί να ακολουθούν διαφορετική σύμβαση ονομασίας), το οποίο είναι ότι:

- Ο άξονας που περιστρέφεται γύρω από τον X-άξονα, ονομάζεται άξονας A
- Ο άξονας που περιστρέφεται γύρω από τον Y-άξονα, ονομάζεται άξονας B
- Ο άξονας που περιστρέφεται γύρω από τον Z-άξονα, ονομάζεται άξονας C

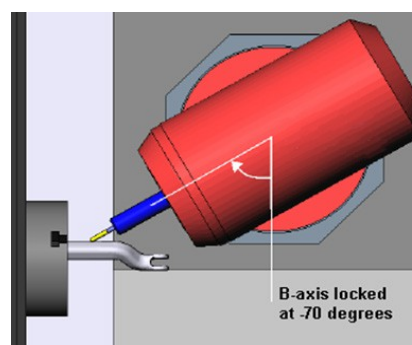


Σχήμα 6: Ονοματολογία αξόνων εργαλειομηχανών κατά ISO

### 5.1.2 Χρήσης εργαλειομηχανών πέντε αξόνων

Η πραγματική αναφορά σε κατεργασία πέντε αξόνων προσπίπτει στην ικανότητα τροφοδότησης με κίνηση όλων των αξόνων της εργαλειομηχανής, ώστε να επιτευχθεί η ομαλή προσέγγιση του εργαλείου στην τροχιά μίας μη επίπεδης επιφάνειας. Εξάλλου, οι πενταξονικές μηχανές αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά για την αεροδιαστημική βιομηχανία με σκοπό να κάνουν ακριβώς αυτό. Σε αυτό το παράδειγμα οι άξονες περιστροφής κινούνται συνεχώς κατά τη διάρκεια της κοπής. Αυτό όμως που μπορεί να μην συνειδητοποιήσει κανείς, είναι ότι δεν χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα πάντα και οι πέντε άξονες. Μια από τις πλέον πρακτικές εφαρμογές ονομάζεται «3+2». Σε αυτή το τεμάχιο περιστρέφεται σε θέση πριν την έναρξη κάθε κοπής και κατόπιν το εργαλείο ακολουθεί μία πρότυπη τριαξονική τροχιά. Αυτό καθιστά πιο εύκολο τον προγραμματισμό, ενώ περιστροφική κίνηση γίνεται μόνο μεταξύ των διαφορετικών διεργασιών κοπής. Επιπλέον η στρατηγική αυτή επιτρέπει την περιστροφή του τεμαχίου σε μία θέση όπου με μικρότερα εργαλεία μπορούμε να προσεγγίσουμε δύσκολες και βαθιές περιοχές. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται πολύ συχνά στην κατεργασία καλουπιών, ώστε να αποφευχθεί το πρόβλημα παραμόρφωσης των εργαλείων, κυρίως λόγω καμψής, εξαιτίας των μεγάλων δυνάμεων που αναπτύσσονται στα μεγαλύτερου μήκους εργαλεία. Μια άλλη πρακτική εφαρμογή είναι να «κλειδώσει» ένας μόνο εκ των αξόνων. Η στρατηγική αυτή που ονομάζεται «4+1» φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.

Σε αυτό το σχήμα, ο άξονας B γέρνει προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση διαγράφοντας γωνία 70° με τον κάθετο άξονα. Εκεί αφού «κλειδώσει», προσεγγίζει το τεμάχιο το οποίο περιστρέφεται καθ' όλη τη διάρκεια της κοπής. Κατά τον τρόπο αυτό η άτρακτος του άξονα B είναι πιο σταθερή.



Σχήμα 7: Στρατηγική κοπής 4+1, «κλείδωμα» άξονα B

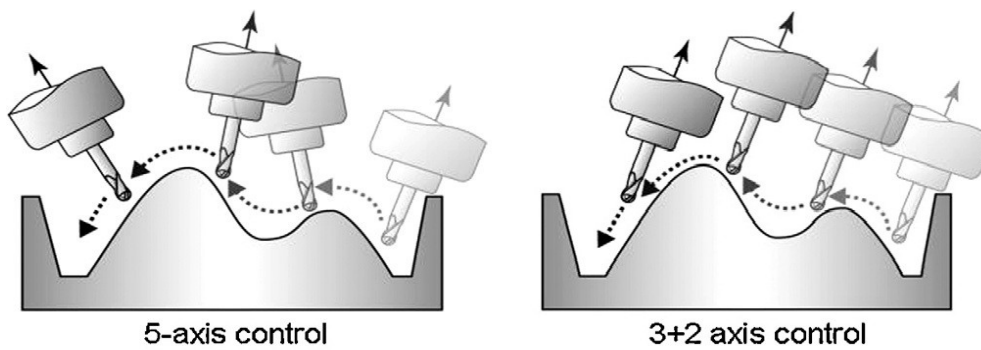
Παρ' όλα αυτά είναι πολύ πιο κοινό οι μηχανές αυτές να χρησιμοποιούνται για τη μείωση του χρόνου εγκατάστασης των τεμαχίων, αλλά και για να εξαλείψουν την τυπική αλλαγή των τεμαχίων που απαιτείται στα συμβατικά τριαξονικά κέντρα κατεργασιών. Αυτό οδηγεί στην αύξηση του περιθωρίου κέρδους ανά κατεργαζόμενο τεμάχιο, ενώ επιπλέον αυξάνεται η ακρίβεια κατεργασίας με την μείωση του αριθμού εγκαταστάσεων τεμαχίων σε μόλις μία τοποθέτηση, αντί πολλών. Οι δύο επιπλέον άξονες περιστροφής μπορούν να :

- Περιστρέφονται ταυτόχρονα με την κίνηση των γραμμικών αξόνων. Χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή ανάγλυφων επιφανειών και αεροδυναμικών σχημάτων.
- Περιστρέφουν το τεμάχιο/εργαλείο στην επιθυμητή θέση πριν την έναρξη κοπής. Χρησιμοποιούν δηλαδή τρεις άξονες για την εκτέλεση κατεργασιών, εκτελώντας ενδιάμεσα περιστροφικές κινήσεις τοποθέτησης. Αποτελεί ίσως την πιο πρακτική εφαρμογή, η οποία είναι γνωστή σαν «3+2», αφού ο προγραμματισμός κοπής είναι ανάλογος των συμβατικών εργαλειομηχανών.
- «Κλειδώνουν» μεμονωμένα, έτσι ώστε μόνο ένας άξονας να μπορεί να περιστρέφεται κατά τη διάρκεια της κοπής. Ιδανική λύση για κέντρα κατεργασιών τόννου/φρέζας, γνωστή και σαν «4+1». Αποτελεί έναν συνδυασμό πλεονεκτημάτων-μειονεκτημάτων των παραπάνω περιπτώσεων, τα οποία και μπορεί να εκμεταλλευτεί κανείς αναλόγως.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τα πλεονεκτήματα των περιπτώσεων ταυτόχρονης χρήσης των πέντε αξόνων και της περίπτωσης «3+2».

<b>Ταυτόχρονη κίνηση 5 αξόνων</b>	<b>3+2</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Καλύτερη ποιότητα επιφάνειας</li> <li>• Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής κοπτικού εργαλείου</li> <li>• Καλύτερη ποιότητα επιφάνεια</li> <li>• Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής κοπτικού εργαλείου</li> <li>• Το εργαλείο μπορεί να προσεγγίσει δύσκολες περιοχές πιο ομαλά</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Καλύτερη ποιότητα επιφάνειας</li> <li>• Εύκολη στον προγραμματισμό</li> <li>• Μεγαλύτερες ταχύτητες κοπής</li> <li>• Λιγότερες ανησυχίες για παρεμβολή-σύγκρουση με εργαλείο</li> <li>• Εξαιρετική στρατηγική εκχόνδρισης</li> </ul>

Πίνακας 5.1: Σύγκριση περίπτωσης ταυτόχρονης χρήσης των 5 αξόνων με την περίπτωση «3+2»



Σχήμα 8 : Περιπτώσεις χρήσεις «5» και «3+2» αξόνων

Τα βασικά πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την χρήση κέντρων κατεργασιών πέντε αξόνων είναι:

- Εξοικονόμηση χρόνου και χρήματος
  - ✓ Μέσω της μείωσης των setup των τεμαχίων στη μηχανή
  - ✓ Μέσω της μείωσης του χρόνου αναμονής μεταξύ διεργασιών
  - ✓ Μέσω της μείωσης του χρόνου κατεργασίας
  - ✓ Μείωση του κόστους ιδιοσυσκευών/διατάξεων συγκράτησης τεμαχίων
  - ✓ Μείωση του ενδιάμεσου κόστους μεταφοράς των τεμαχίων
  - ✓ Μείωση της εργασίας για την διαχείριση αποθεμάτων
- Βελτίωση της ακρίβειας κατεργασίας
  - ✓ Εξαλείφοντας λάθη από την επανατοποθέτηση των τεμαχίων
- Βελτίωση της εξυπηρέτησης πελατών
  - ✓ Μέσω της ταχύτερης και καλύτερης ποιότητας παραγωγής
  - ✓ Προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία
  - ✓ Μειώνει τον χρόνο παράδοσης
  - ✓ Προσφέροντας περισσότερες δυνατότητες κατεργασιών

Οι προκλήσεις στη χρήση πενταξονικών κέντρων κατεργασιών είναι:

- η εκμετάλλευση των επιπλέον αξόνων κίνησης
- ο συντονισμός των κινήσεων πολλαπλών αξόνων ταυτόχρονα
- η αποφυγή συγκρούσεων
- η κατεργασία εντός των ορίων της μηχανής

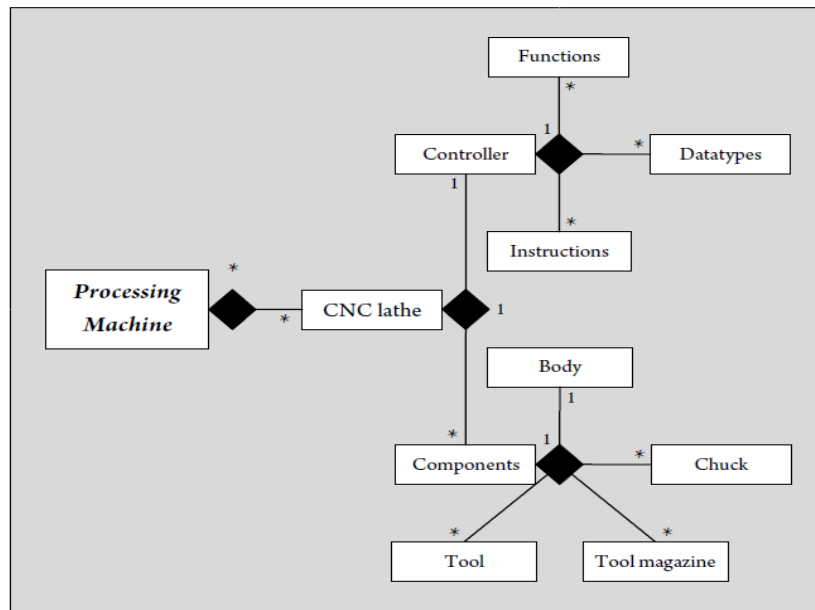
Τα συστήματα CAM βοηθούν τους μηχανικούς στον προγραμματισμό εργαλειομηχανών. Σύγχρονα λογισμικά CAM καλύπτουν όλες τις παραπάνω παραμέτρους, προσφέροντας μία σύνθετη και ταυτόχρονα πιο απλοποιημένη προγραμματιστική λογική, η οποία είναι παρόμοια με αυτή που ακολουθεί ένας μηχανικός, αλλά κάνει παράλληλα δυνατή τη χρήση ρεαλιστικών προσομοιώσεων προσφέροντας αξιόπιστα αποτελέσματα.

### **5.1.3 Σημασιολογικό Μοντέλο κέντρου τόννευσης 5 αξόνων**

Ο Γωγουβίτης παρουσίασε στην εργασία του τα σημασιολογικά μοντέλα κύριων και δευτερευουσών μηχανών ενός κυττάρου κατεργασιών. Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται το δομικό διάγραμμα κατά UML ενός CNC τόννου. Ο Γωγουβίτης χωρίζει την κλάση του CNC τόννου σε δύο υποκλάσεις, αυτές των διαφορετικών μερών (*components*) του τόννου και του ελεγκτή (*controller*) της μηχανής. Τα μέρη αποτελούνται από το κυρίως σώμα της μηχανής (*body*), το εργαλειοφορείο (*tool magazine*), το τσωκ (*chuck*) και τα εργαλεία (*tools*). Ο ελεγκτής αποτελείται από τις εντολές (*instructions*) του G-κώδικα που μπορεί να λάβει, τις λειτουργίες (*functions*) που αναφέρονται ουσιαστικά στις εσωτερικές εντολές, δηλαδή τους αλγορίθμους που εκτελούνται για την μετατροπή των εντολών (*instructions*) σε κινήσεις και τα είδη δεδομένων (*datatypes*).

Επίσης προκύπτουν οι ιεραρχικές σχέσεις μεταξύ των κλάσεων. Ο γεμάτος ρόμβος υποδηλώνει την εξάρτηση μεταξύ των κλάσεων σαν σύνθεση (*composition*). Ουσιαστικά, η κλάση που έχει τον ρόμβο είναι η περικλείουσα κλάση (*container*) και κατέχει (*owns*) την κλάση που ακολουθεί. Η σήμανση στις δύο άκρες των συνδέσμων με έναν αριθμό (πχ.1) , αστερίσκο (\*) ή ένα εύρος αριθμών (πχ.1...\*) υποδηλώνει την πολλαπλότητα (*multiplicity*), δηλαδή πόσα αντικείμενα του ενός άκρου αντιστοιχούν σε αντικείμενα του άλλου άκρου. Στο παράδειγμα, ένας τόννος μπορεί να περικλείει πολλά εργαλεία, αλλά μόνο ένα σώμα.



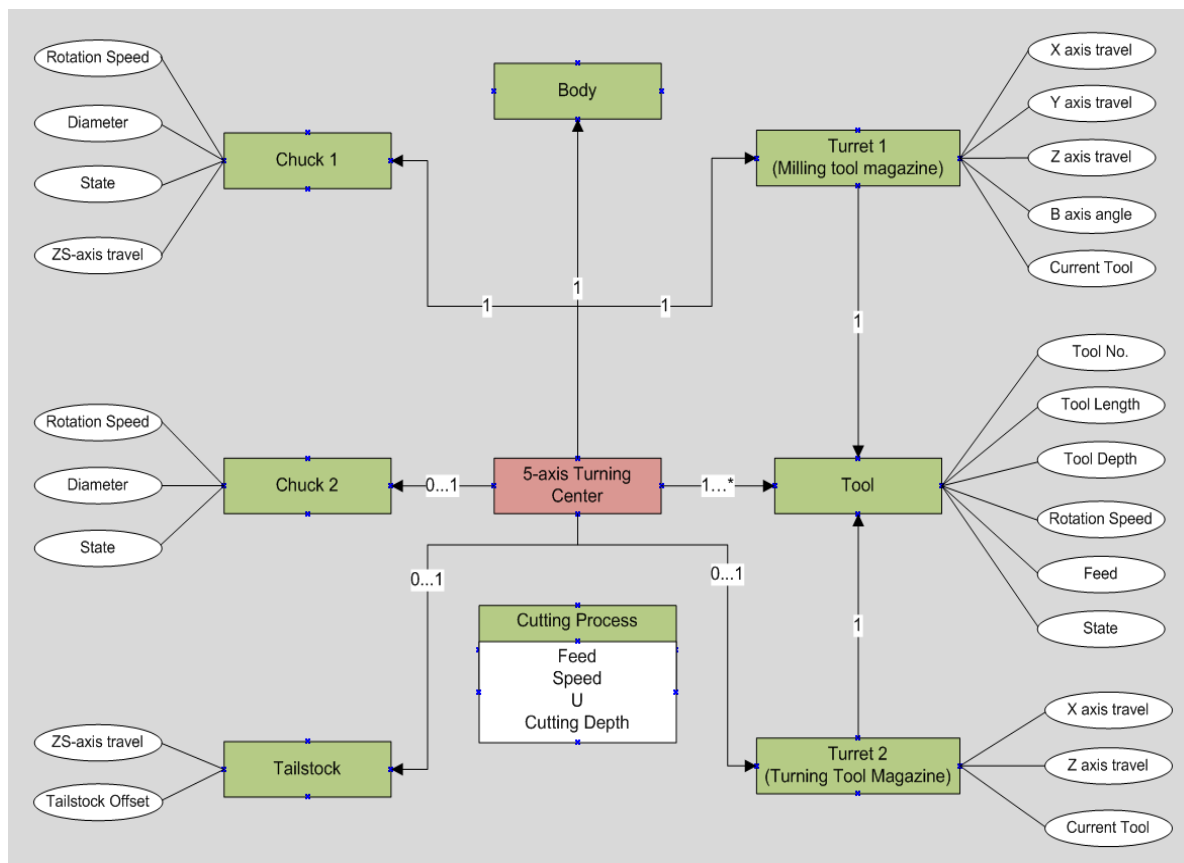


Σχήμα 9: Δομικό διάγραμμα διάγραμμα τήρνον CNC, Γωγουβίτης 2011

Βάση αυτής της λογικής χρησιμοποιήθηκε το παραπάνω σημασιολογικό μοντέλο για την μοντελοποίηση ενός γενικού σημασιολογικού μοντέλου ενός πενταξονικού κέντρου τήρνευσης. Για την μοντελοποίηση στο Virtools δεν δημιουργήθηκαν ξεχωριστές κλάσεις, παρά χρησιμοποιήθηκε η ήδη υπάρχουσα αρχιτεκτονική και κλάσεις του προγράμματος και «χτίστηκαν» όλα τα εικονικά αντικείμενα πάνω σε αυτές. Αυτό είναι και το βασικό πλεονέκτημα του Virtools αφού χωρίς εξειδικευμένες γνώσεις προγραμματισμού δημιουργήθηκαν συμπεριφορές για την κινηματική λειτουργία και χειρισμό των διαφορετικών μερών των εικονικών αντικειμένων μιας και οι κλάσεις, οι μεταβλητές και συμπεριφορές που μπορούσαν να υποστηρίξουν την διαδικασία αυτή, ήταν ήδη έτοιμες. Παρόλα αυτά η ανάλυση με την χρήση των σημασιολογικών μοντέλων θεωρήθηκε σημαντικό κομμάτι του σχεδιασμού καθώς ορίζει σε πρώτη φάση τα αντικείμενα της μοντελοποίησης, τις σχέσεις αλληλεξάρτησης μεταξύ τους και με τον χρήστη και επομένως όλα τα βασικά χαρακτηριστικά για την δημιουργία μίας διαδραστικής προσομοίωσης.

Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα ενός πενταξονικού κέντρου τήρνευσης, σε αυτό διακρίνονται τα βασικά μέρη της «αρχιτεκτονικής» του, καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά (attributes) που αντιστοιχούν σε κάθε ένα από αυτά. Η σήμανση στους συνδέσμους αντιπροσωπεύει τις διαφορετικές διατάξεις που

προκύπτουν για την συγκεκριμένη μηχανή. Με (1) δηλώνεται ότι η σχέση είναι μοναδική, ενώ με (0...1) δηλώνεται η ύπαρξη μίας ή καμίας σύνδεσης. Από την κατεύθυνση των συνδέσεων προκύπτουν οι ιεραρχικές σχέσεις μεταξύ των αντικειμένων ενώ σημαντική είναι η παρατήρηση πως το εργαλείο μπορεί να είναι παιδί (child) του κέντρου τórνευσης σαν ξεχωριστό μέρος (component) ή σαν παιδί(child) των εργαλειοφορέων (περίπτωση που το εργαλείο είναι φορτωμένο σε ένα εργαλειοφορείο, οπότε και αλλάζει η ιεραρχία).



Σχήμα 10: Δομικό διάγραμμα πενταζονικού κέντρου τórνευσης

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως κάθε κλάση κάθε μία από τις κλάσεις που αντιπροσωπεύουν γεωμετρικά αντικείμενα (*robot, components, axis, etc*), έχει σαν βασικά χαρακτηριστικά της: τη θέση, το μέγεθος και τον προσανατολισμό, χαρακτηριστικά τα οποία διατηρούν και οι υποκλάσεις της.

Τέλος στο Σχήμα 5.6 φαίνεται και η κλάση (Cutting Processes) που δημιουργήθηκε καθώς ορίζει κινηματικά μεγέθη μεταξύ των διαφόρων μερών ανάλογα με τις συνθήκες κοπής που επιλέγονται. Αυτή αποτελεί υποκλάση της κλάσης «Functions»

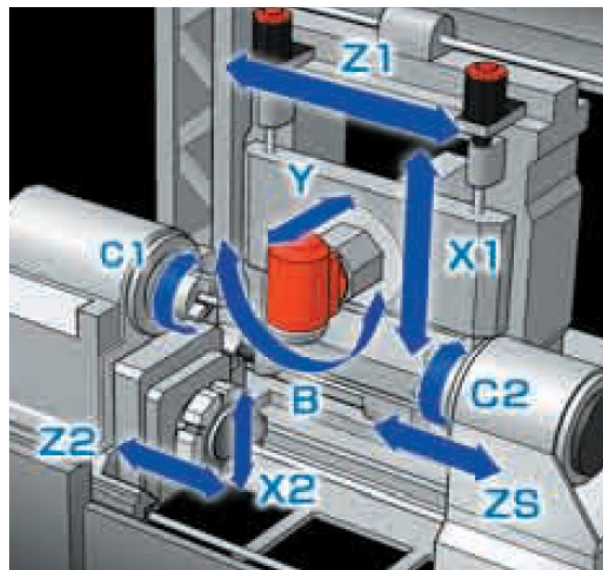
που ανήκει στον ελεγκτή, ο οποίος μοντελοποιήθηκε κατά τον ίδιο τρόπο με αυτόν που παρουσιάζει ο Γωγουβίτης, ώστε να μπορούν να αναπαρασταθούν οι εντολές που λαμβάνει ένας ελεγκτής (G-κώδικας), και εν συνεχεία να προκύψουν οι σχέσεις μεταξύ ελεγκτή – κινούμενων μερών. Σε αυτή τη φάση ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στην χειροκίνητη (ημιαυτόματη) λειτουργία της μηχανής, ενώ επιχειρήθηκε με επιτυχία και η μετάφραση απλών εντολών G-κώδικα.

#### **5.1.4 MORI SEIKI NT**

Η εταιρεία Mori Seiki με την σειρά των εργαλειομηχανών NT, στην οποία ενσωμάτωσε όλες τις σύγχρονες τεχνολογίες που έχει αναπτύξει, κατασκεύασε ένα υπερσύγχρονο πενταξονικό κέντρο τόννευσης τύπου τόννου-φρέζας. Για μοντελοποίηση στο εικονικό περιβάλλον επιλέχθηκε από αυτή τη σειρά μηχανών το μοντέλο NT 4250 σαν αντιπρόσωπος των κέντρων τόννευσης/κατεργασιών, εξαιτίας της μεταβλητής αρχιτεκτονικής και των πολλών χαρακτηριστικών που συνδυάζει.

##### **5.1.4.1 Διάταξη αξόνων των μηχανημάτων Mori Seiki NT**

Στις μηχανές αυτές της σειράς NT ο άξονας περιστροφής «C» βρίσκεται στο τσωκ και ο άξονας «B» βρίσκεται στην φρεζοκεφαλή και χειρίζεται τον προσανατολισμό του εργαλείου. Στο διπλανό σχήμα φαίνονται όλοι οι άξονες κίνησης καθώς και ο τρόπος διάταξης των γραμμικών αξόνων.

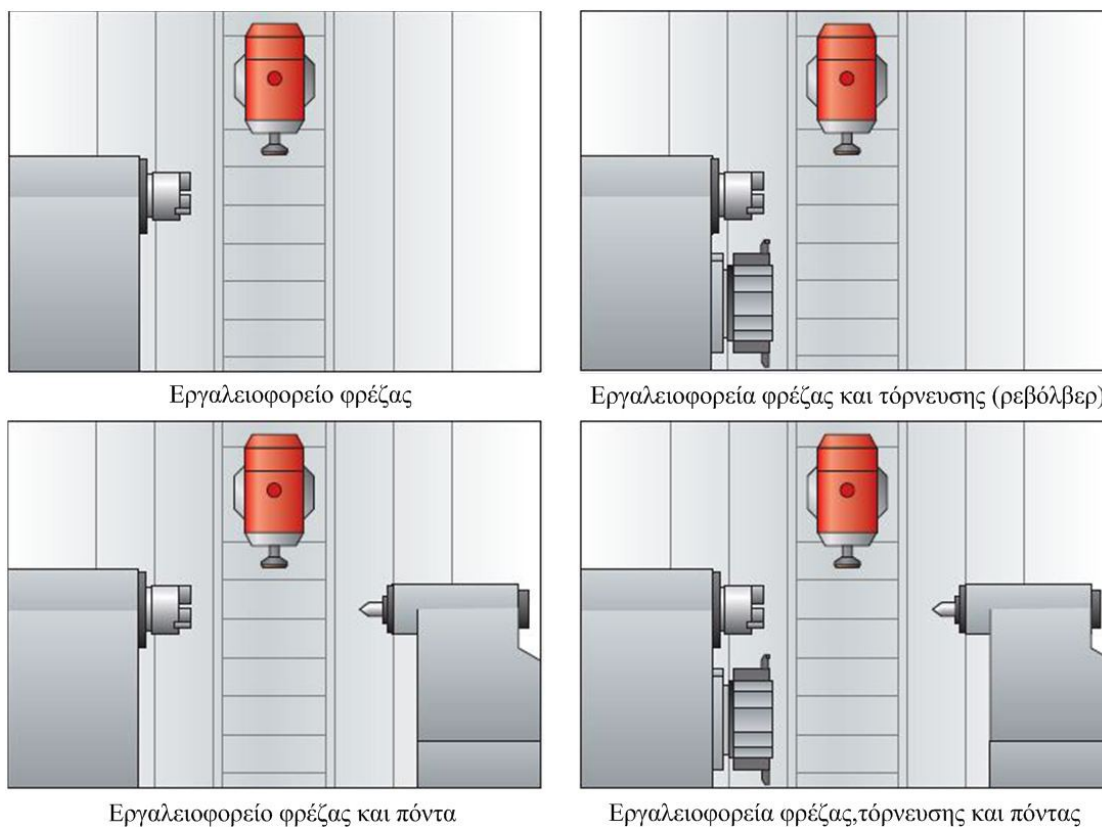


Σχήμα 11: Διάταξη αξόνων Mori Seiki NT

##### **5.1.4.2 Παραλλαγές του Mori Seiki NT**

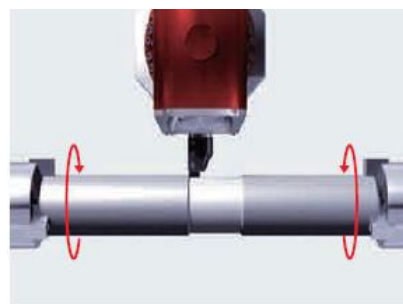
Οι μηχανές της σειράς Mori Seiki NT προσφέρονται σε διάφορα μεγέθη, αλλά και σε διαφορετικές παραλλαγές της κύριας μηχανής με δυνατότητα προσαρμογής επιπλέον

εναλλασσόμενων μερών και μονάδων κατεργασιών, που αναλόγως προσδίδουν μεγαλύτερη ευελιξία στην γκάμα των τεμαχίων που μπορεί να επεξεργαστεί η μηχανή. Μερικές από αυτές τις παραλλαγές παρουσιάζονται στο σχήμα. Έτσι συγκεκριμένο μηχάνημα μπορεί να εκτελεστεί ένα ευρύ φάσμα παραλλαγών κατεργασίας με ένα μόνο setup, φτάνοντας από την πρώτη ύλη στην ολοκλήρωση



Σχήμα 12: Παραλλαγές Mori Seiki NT

Το εργαλειοφορείο φρέζας μπορεί να εκτελέσει εργασίες τόννευσης, φρέζας και διάτρησης, ενώ στην περίπτωση που η μηχανή είναι εξοπλισμένη με δύο εργαλειοφορεία τότε επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη κοπή και επεξεργασία του τεμαχίου, οδηγώντας σε ταχύτερους χρόνους αποπεράτωσης.



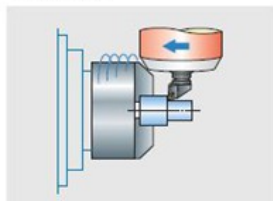
Σχήμα 13: Τσوك 1&2  
Συγχρονισμένη περιστροφή τεμαχίου

Με την πρόσθεση της πόντας, τα πιο μεγάλα και μακριά τεμάχια κατεργάζονται χωρίς ταλαντώσεις. Εναλλακτικά αντί της πόντας μπορεί να προστεθεί ένα δεύτερο τσوك, που χρησιμεύει στη συγκράτηση μεγάλων τεμαχίων αλλά και στη περίπτωση που

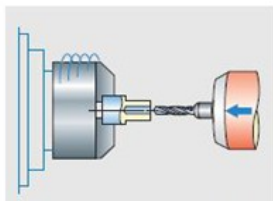
χρειάζεται να επιτευχθεί διαμόρφωση στην αντίθετη πλευρά του τεμαχίου, μετά την αποπεράτωση κατεργασίας με το πρώτο τσωκ.

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές από τις δυνατότητες των εναλλακτικών κατεργασιών που μπορεί να εκτελέσει η συγκεκριμένη εργαλειομηχανή ανά κατηγορία:

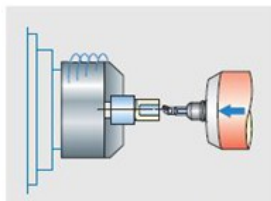
#### Τόρνευση



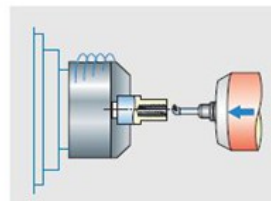
O. D. cutting



Drilling

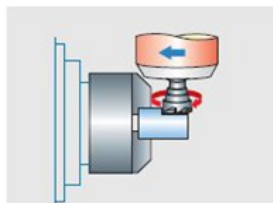


I. D. cutting

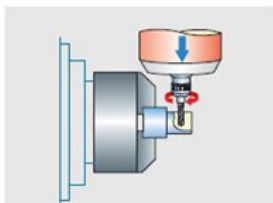


I. D. threading

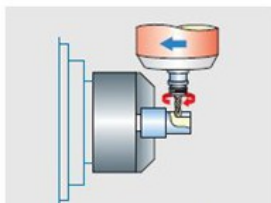
#### Φρεζάρισμα



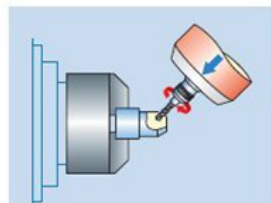
O. D. milling



O. D. hole machining

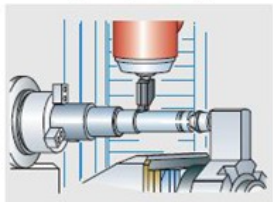


Ball-end milling

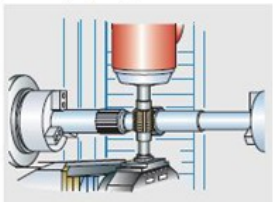


Angular machining (deburr)

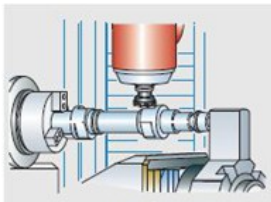
#### Ταυτόχρονη κοπή με δύο εργαλειοφορείς



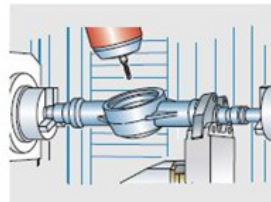
O.D. machining using the center



Hobbing using the tool spindle and Turret 2

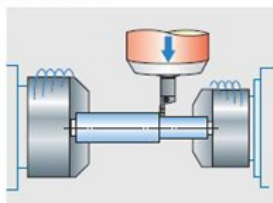


Face milling using the center

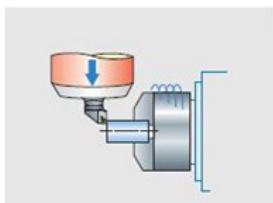


Drilling using a hydraulic steady rest

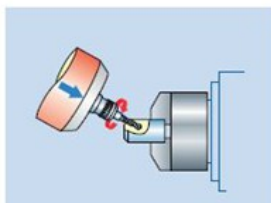
#### Δύο τσωκ



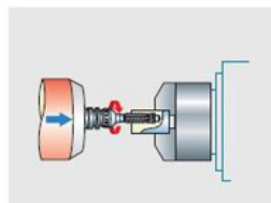
Cut-off



Face cutting



Angular machining (deburr)

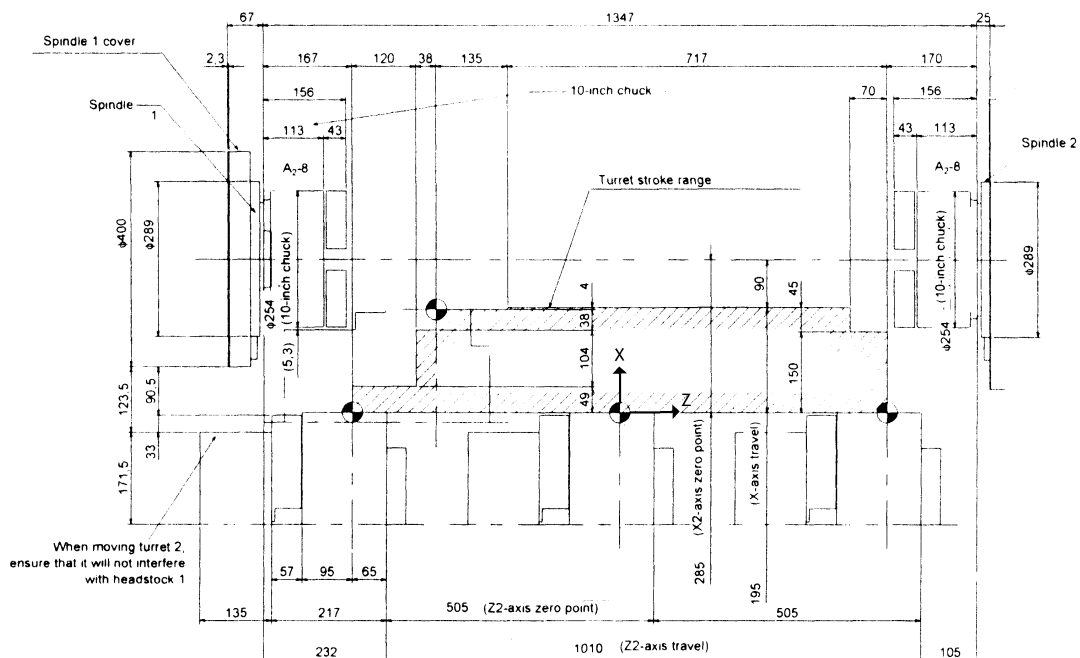


End face hole machining and tapping

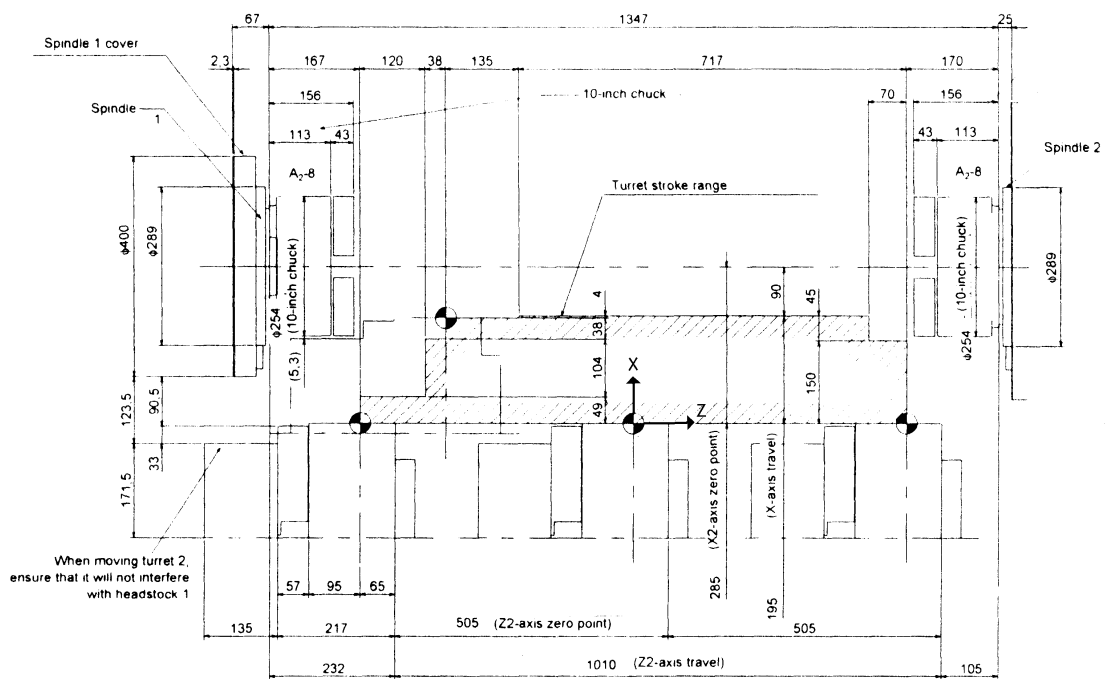
Σχήμα 14: Παραλλαγές κατεργασιών Mori Seiki NT

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα όρια κίνησης των διαφόρων εξαρτημάτων του κέντρου κατεργασιών καθώς και τα συστήματα συντεταγμένων που

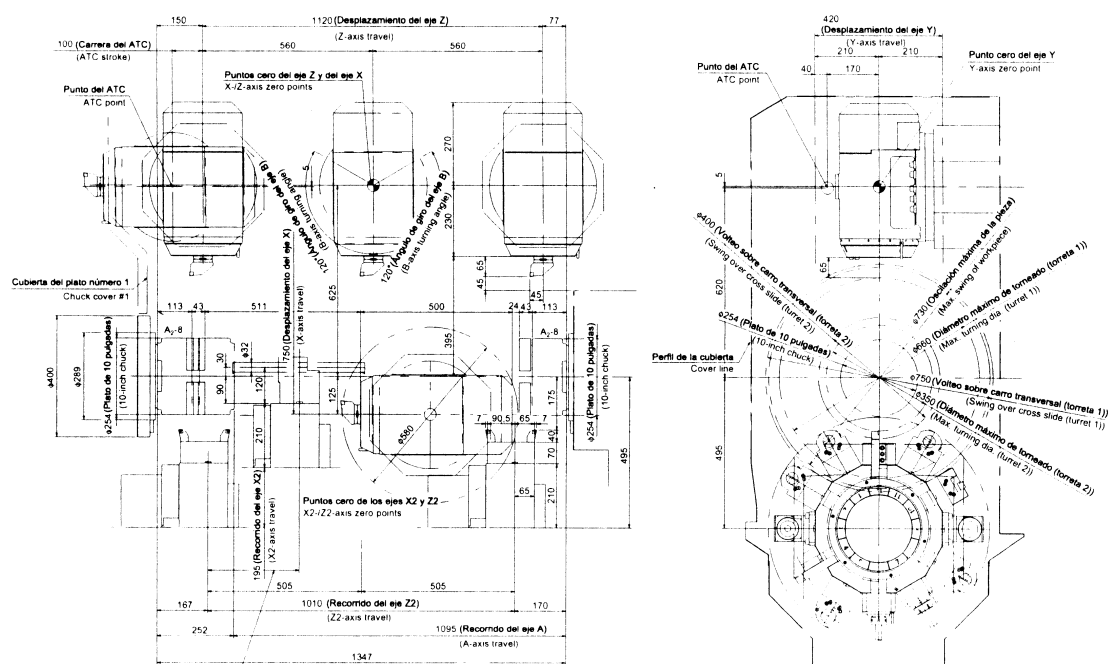
χρησιμοποιούνται για τις σχετικές τους κινήσεις και έλεγχο. Τέλος παρατίθεται ο πίνακας με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής.



Σχήμα 15: Διαδρομή και εύρος κινήσεων Φρεζοκεφαλής



Σχήμα 16: Διαδρομή και εύρος κινήσεων εργαλειοφορείου τórνευσης Ρεβόλβερ



Σχήμα 17: Διαδρομή, εύρος κινήσεων και σημείο αυτόματης αλλαγής εργαλείου Φρεζοκεφαλής

<b>Γενικά Τεχνικά Χαρακτηριστικά Κέντρου Τόρνευσης Mori Seiki NT 4250</b>	
<b>Διαδρομή και Εύρος Κινήσεων</b>	
Διαδρομή εργαλειοφορείου φρέζας κατά τον άξονα X	750 mm
Διαδρομή εργαλειοφορείου φρέζας κατά τον άξονα Y	±210 mm
Διαδρομή εργαλειοφορείου φρέζας κατά τον άξονα Z	760+100mm(ATC)
Εύρος περιστροφής άξονα B της Φρεζοκεφαλής	±120°
Διαδρομή εργαλειοφορείου τόρνευσης κατά τον άξονα X	195 mm
Διαδρομή εργαλειοφορείου τόρνευσης κατά τον άξονα Z	1,010 mm
<b>Τσωκ 1/ Τσωκ 2</b>	
Μέγιστη ταχύτητα ατράκτου του Τσωκ	4000 min <sup>-1</sup>
Ελάχιστη περιστροφική ικανότητα/«βήμα»	0.0001°
<b>Εργαλειοφορείο φρέζας</b>	
Αριθμός σταθμών εργαλείων	1
Ελάχιστη περιστροφική ικανότητα/«βήμα» του άξονα B	0.0001°
Μέγιστη ταχύτητα ατράκτου του εργαλείου	12000min <sup>-1</sup>
Χωρητικότητα αποθήκευσης εργαλείων	20
Μέγιστο μήκος εργαλείου	400mm
Μέγιστη μάζα εργαλείου	8 kg
Χρόνος αλλαγής εργαλείου	1.25sec
<b>Εργαλειοφορείο τόρνευσης</b>	
Αριθμός σταθμών εργαλείων	12
Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του άξονα του εργαλείου	6000 min <sup>-1</sup>

<b>Πόντα</b>			
Μεταφορά πόντας			1,095mm
<b>Ρυθμός πρόωσης</b>			
Μέγιστος δυνατός ρυθμός πρόωσης ανά εξάρτημα και άξονα της μηχανής	Εργαλειοφορείο φρέζας	(m/min)	X:50 Y:30 Z:50
	Εργαλειοφορείο τórνευσης	(m/min)	X:30 Z:30
	Τσoκ 2	(m/min)	30
	B	(min <sup>-1</sup> )	40
	C	(min <sup>-1</sup> )	250

Πίνακας 5.2: Γενικά Τεχνικά Χαρακτηριστικά κέντρου τórνευσης Mori Seiki NT 4250

## 5.2 Βιομηχανικοί ρομποτικοί βραχίονες

Οι βιομηχανικοί ρομποτικοί βραχίονες είναι εξειδικευμένοι, πολύ-λειτουργικοί και επαναπρογραμματιζόμενοι μηχανισμοί οι οποίοι μπορούν να εκτελούν μεταβλητές προγραμματιζόμενες κινήσεις για την εκτέλεση μίας ποικιλίας καθηκόντων. Το μηχανικό τμήμα των ρομπότ αποτελείται από μια αλληλουχία μηχανικών συνδέσμων (links) και αρθρώσεων (joints) που ενώνουν τους συνδέσμους ανά δύο και μπορούν να προκαλέσουν κινήσεις σε διάφορες διευθύνσεις (γραμμικές ή στροφικές).

Στόχος της εφαρμογής των ρομποτικών συστημάτων στη βιομηχανία αποτελούν η υποκατάσταση της χειρωνακτικής εργασίας, η βελτίωση και σταθεροποίηση της ποιότητας και η αύξηση της παραγωγικότητας. Τα ρομπότ είναι ιδανικά για να εκτελούν βαριές, επικίνδυνες, ανιαρές και επαναλαμβανόμενες εργασίες. Εργασίες που συνήθως απασχολούν ανειδίκευτους εργάτες και διακρίνονται από αντίξοες συνθήκες εργασίας, όπως λ.χ. το βάψιμο με ψεκασμό, η συναρμολόγηση μικρών κομματιών ή η διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων. Με την πρόοδο της τεχνολογίας και την αύξηση του επιπέδου αυτοματοποίησης εξελιγμένοι ρομποτικοί βραχίονες διαθέτουν πλέον τεχνητή νοημοσύνη – artificial intelligence και προσφέρουν μεγάλη ευελιξία στη βιομηχανία σε σχέση με άλλες μορφές αυτοματισμού. Παρόλα αυτά εργασίες που απαιτούν την ανθρώπινη εξυπνάδα και δημιουργικότητα δεν μπορούν να αντικατασταθούν από τα σημερινά ρομπότ, αλλά μπορούμε να πούμε ότι δίνουν την ευκαιρία απασχόλησης του ανθρώπινου δυναμικού σε εργασίες που μπορεί να εκτελεί καλύτερα.



Οι κυριότερες βιομηχανικές εφαρμογές των ρομπότ είναι οι ακόλουθες:

- Φόρτωμα και Ξεφόρτωμα μηχανών
- Σημειακή συγκόλληση
- Συγκόλληση τόξου
- Βάψιμο ψεκασμού
- Συναρμολόγηση εξαρτημάτων
- Σιδηρουργικές εργασίες (τρύπημα, κόψιμο, σφυρηλάτηση, κ.α.)
- Ρίψη μετάλλων σε καλούπια (χυτήρια)

### **5.2.1 Αρθρωτοί Βιομηχανικοί βραχίονες έξι περιστροφικών αρθρώσεων (6R)**

Ανάλογα με την περίπτωση και τα αποτελέσματα που επιθυμούμε να πετύχουμε, σχεδιάζουμε ρομποτικούς βραχίονες που να επιτρέπουν τις σχετικές κινήσεις που μας είναι χρήσιμες και παράλληλα να εμποδίζουν άλλες, ούτως ώστε οι διάφοροι σύνδεσμοι να παραμένουν συνδεδεμένοι μεταξύ τους, επιτρέποντας έτσι τη μεταφορά δυνάμεων ή ροπών απ' το ένα σώμα στο άλλο. Τα βιομηχανικά ρομπότ βρίσκονται σε διάφορες διατάξεις/διαμορφώσεις αξόνων. Ωστόσο, η συντριπτική πλειοψηφία βιομηχανικών βραχιόνων που συναντούνται στα συστήματα κατεργασιών, είναι τα αρθρωτά ρομπότ (articulate robots) που διαθέτουν έξι άξονες, και επομένως έξι βαθμούς ελευθερίας. Οι έξι άξονες προσδίδουν μεγαλύτερη ευελιξία και τα ρομπότ αυτά μπορούν να εκτελέσουν μια ευρύτερη ποικιλία εφαρμογών από αυτά με λιγότερους άξονες.

Τα αρθρωτά βιομηχανικά ρομπότ χρησιμοποιούν στην πλειοψηφία τους περιστροφικές αρθρώσεις για την σύνδεση των βραχιόνων/συνδέσμων τους και μπορούν να ελέγχουν και να αυτοκινούν ανεξάρτητα κάθε μία από αυτές τις αρθρώσεις. Η περιστροφική άρθρωση δίνει ένα βαθμό ελευθερίας αφήνοντας το σώμα να περιστραφεί σε ένα επίπεδο και αποκόπτει κάθε άλλη δυνατότητα κίνησης. Επειδή είναι η συνηθέστερη μορφή σύνδεσης δύο σωμάτων, έχει καθιερωθεί να καλείται και απλά «άρθρωση», ενώ δεν είναι υπερβολή να πει κανείς ότι τη συναντάμε σχεδόν σε κάθε τύπο βιομηχανικών βραχιόνων. Πράγματι, αν και υπάρχει μία πληθώρα λύσεων για την σύνδεση δύο σωμάτων, θα ήταν πολύπλοκο να

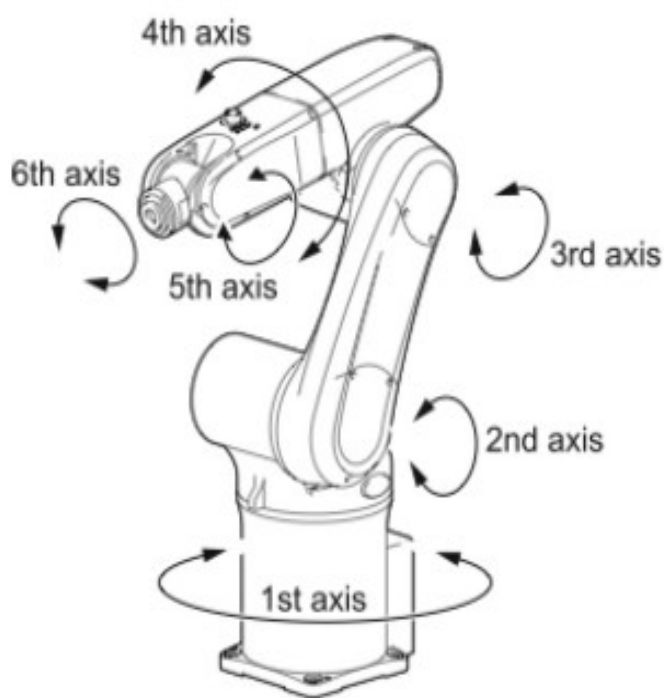
χρησιμοποιούσαμε λύσεις με αρθρώσεις μεγαλύτερου βαθμού ελευθερίας, γιατί θα ήταν πολύπλοκη η διαδικασία κίνησης και ελέγχου των επιπλέον κινήσεων.

#### 5.2.1.1 Περιγραφή των αξόνων ενός αρθρωτού βιομηχανικού βραχίονα

**Άξονας 1:** βρίσκεται στη βάση του ρομπότ και επιτρέπει την περιστροφή του από τα αριστερά στα δεξιά και αντιστρόφως. Αυτή η «σαρωτική» κίνηση επεκτείνει το χώρο εργασίας συμπεριλαμβανομένων των περιοχών στις δύο πλευρές και πίσω από το βραχίονα. Ο άξονας αυτός επιτρέπει στο ρομπότ την περιστροφή σε ένα εύρος μέχρι και  $180^\circ$  από το κεντρικό σημείο.

**Άξονας 2:** επιτρέπει την επέκταση του κάτω βραχίονα του ρομπότ προς τα εμπρός και προς τα πίσω. Είναι ο άξονας που τροφοδοτεί με κίνηση ολόκληρο το κάτω μέρος του βραχίονα.

**Άξονας 3:** διευρύνει την κάθετη έκταση του ρομπότ, επιτρέποντας την προς τα πάνω ή προς τα κάτω κίνηση στο άνω τμήμα του βραχίονα με αυτό τον τρόπο το ρομπότ έχει την δυνατότητα να προσεγγίζει πιο εύκολα περιοχές. Σε ορισμένα μοντέλα, επιτρέπεται ο άνω βραχίονας να φθάσει μέχρι και πίσω από το κυρίως σώμα του ρομπότ, για την περαιτέρω επέκταση του χώρου εργασίας.



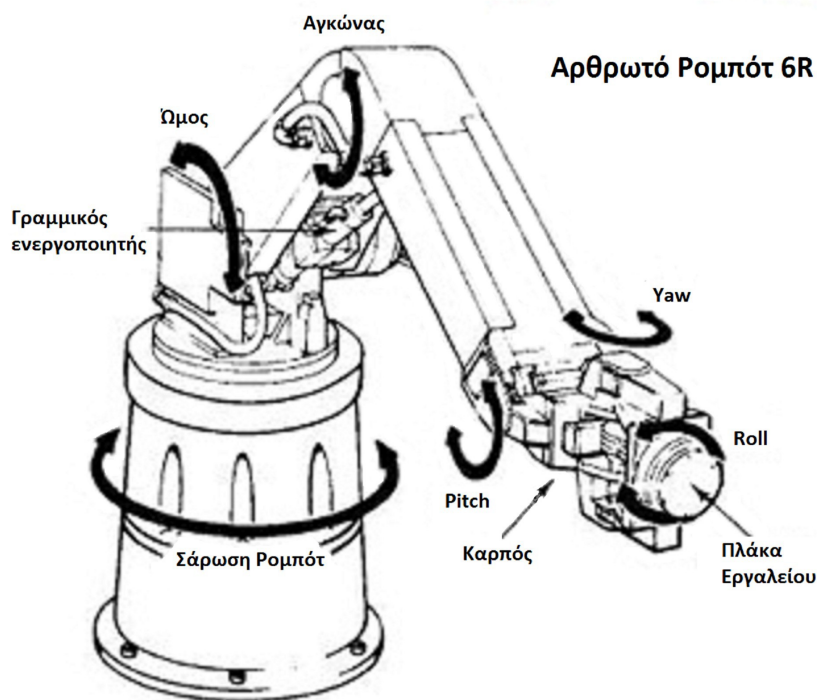
Σχήμα 18 Αρθρωτός ρομποτικός βραχίονας 6R

**Άξονας 4:** ο άξονας αυτός βοηθά στην τοποθέτηση του καρπού του βραχίονα και το χειρισμό των τεμαχίων. Γνωστός και σαν την κύλιση του καρπού (wrist roll), περιστρέφει το άνω μέρος του βραχίονα σε μια κυκλική κίνηση, κινώντας τον καρπό σε οριζόντιο και κατακόρυφο προσανατολισμό.

**Άξονας 5:** αυτός ο άξονας επιτρέπει στον καρπό του ρομποτικού βραχίονα να γέρνει προς τα πάνω και προς τα κάτω. Είναι υπεύθυνος για την κίνηση ανύψωσης (pitch) και στροφής (yaw). Η κίνηση ανύψωσης (pitch) είναι πάνω και κάτω, σαν το άνοιγμα και κλείσιμο του καπακιού ενός κουτιού. Η κίνηση στροφής είναι η αριστερά και δεξιά κίνηση, σαν αυτή μιας πόρτας σε μεντεσέδες.

**Άξονας 6:** είναι υπεύθυνος για μια περιστροφική κίνηση, επιτρέποντας έτσι την ελεύθερη περιστροφή του άκρου του ρομπότ. Ο άξονας αυτός είναι συνήθως ικανός για μία περιστροφή ακόμα και μεγαλύτερη από 360°, σε δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα κατεύθυνση.

Αυτού του τύπου οι βιομηχανικοί βραχίονες παρομοιάζονται εύκολα με το ανθρώπινο χέρι, καθώς οι αρθρώσεις τους μπορεί να πει κανείς ότι είναι ανάλογες και μιμούνται αυτές του ανθρώπινου χεριού ήτοι «**ώμο**», «**αγκώνα**», και «**καρπό**». Ο καρπός μπορεί να περιστρέφεται γύρω από τρεις άξονες. Τον **διαμήκη** που έχει την διεύθυνση των δακτύλων (η κίνηση ονομάζεται **κύλιση**: roll), τον **εγκάρσιο** που βρίσκεται στο επίπεδο της παλάμης και είναι κάθετος προς τα δάκτυλα (**κίνηση ανύψωσης**: pitch) και τον **κάθετο άξονα** που είναι κάθετος προς τους άλλους δύο, δηλαδή κάθετος προς το επίπεδο της παλάμης (**κίνηση στροφής**: yaw).



Σχήμα 19: Αρθρωτός βιομηχανικός ρομποτικός βραχίονας (2)

### **5.2.2 Περισσότερα Τεχνικά Χαρακτηριστικά**

Εκτός από την φυσική διαμόρφωση του ρομπότ και των βασικών δεξιοτήτων κίνησης, υπάρχουν κάποιες επιπλέον τεχνικές προδιαγραφές που περιγράφουν συγκεκριμένες ικανότητες και λειτουργίες, από τις οποίες εξαρτάται η αποδοτικότητα του ρομποτικού βραχίονα στο πλήθος των εργασιών που μπορεί να εκτελέσει.

Ορισμένες από αυτές τις προδιαγραφές είναι οι παρακάτω:

- Όγκος εργασίας ή χώρος εργασίας - Work volume, Work area ή Work envelope
- Ακρίβεια κίνησης - Movement accuracy
- Ταχύτητα κίνησης – Velocity
- Ανυψωτική ικανότητα - Power lifting
- Τύπος συστήματος κίνησης - Drive system

#### **5.2.2.1 Όγκος εργασίας**

Ο όγκος εργασίας ενός βιομηχανικού ρομπότ είναι ο χώρος όπου το ρομπότ είναι σε θέση να λειτουργεί. Στην βιβλιογραφία αναφέρεται και σαν «χώρος εργασίας – work area» ή και «φάκελος εργασίας – work envelope». Τεχνικώς μπορεί να ειπωθεί ότι είναι το χωρικό πεδίο μέσα στο οποίο μπορεί να κινηθεί και να λειτουργήσει το άκρο του καρπού ενός βιομηχανικού ρομπότ. Για τον υπολογισμό του, είναι αναγκαίο να θεωρηθούν μερικά από τα φυσικά χαρακτηριστικά ενός ρομποτικού βραχίονα, όπως:

- Η Φυσική διαμόρφωση – ανατομία του
- Το μέγεθος των διαφόρων μερών του
- Τα όρια μετακίνησης – περιστροφής των αρθρώσεων

Η γνώση του χώρου εργασίας ενός ρομπότ είναι ιδιαίτερης σημασίας. Ανάλογα με την εργασία που θα εκτελεί ο βραχίονας από τον χώρο εργασίας εξαρτιούνται άμεσα:

- Η διάταξη των κύριων και βοηθητικών μηχανών (Lay Out, συμπεριλαμβανομένου του ρομπότ
- Ο χρόνος παραγωγής
- Η περιοχή ασφαλούς εργασίας
- Το πρόγραμμα παραγωγής

### 5.2.2.2 *Ακρίβεια της κίνησης*

Υπάρχουν τρεις τυπικές κατηγορίες σχετικά με την ακρίβεια της κίνησης του άκρου του ρομπότ σε μια εφαρμογή, δηλαδή:

- **Χωρική Ανάλυση:** μπορεί να οριστεί ως η μικρότερη κίνηση που μπορεί ακόμα να ελέγχεται από τους προγραμματιστές, οπότε η χωρική ανάλυση είναι ο αριθμός του ελέγχου ανάλυσης με μηχανικές ανακρίβειες.
- **Ακρίβεια:** είναι η ικανότητα του ρομπότ να φθάσει στο τελικό σημείο του προορισμού. Με άλλα λόγια, η χωρική ανάλυση εμπεριέχει κατά το ήμισυ αυτού του είδους την ακρίβεια.
- **Επαναληψιμότητα:** είναι η ικανότητα του ρομπότ να προσεγγίσει το τελικό σημείο μίας προηγούμενα ελεγχόμενης θέσης. Η επαναληψιμότητα είναι εν γένει μικρότερη από την ακρίβεια.

### 5.2.2.3 *Ανυψωτική Ικανότητα*

Είναι η ικανότητα του ρομπότ να κινεί φορτία. Σημαντικός παράγοντας ανάλογα με το είδος της προς εκτέλεσης δραστηριότητας και τον σκοπό που αυτή επιτελεί, ήτοι:

- Το είδος της εργασίας
- Το είδος εμπορευμάτων
- Ο επιδιωκόμενος ρυθμός παραγωγικότητας

### 5.2.2.4 *Τύπος συστήματος κίνησης*

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι της οδήγησης ρομπότ, και συγκεκριμένα:

- **Υδραυλικά συστήματα κίνησης:** Κάνουν χρήση υδραυλικών ενεργοποιητών που μετατρέπουν υδραυλική πίεση και ροή σε μηχανική κίνηση. Χρησιμοποιούνται σε περιστροφικούς αλλά και γραμμικούς μηχανισμούς κίνησης. Οι υδραυλικοί ενεργοποιητές αποτελούν μία ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή για την μετακίνηση μέτριων και υψηλών φορτίων με λογικές ταχύτητες και μέτρια επίπεδα θορύβου. Χαρακτηρίζονται από την ανυψωτική τους ικανότητα και την επίτευξη υψηλών ενεργειακών αποδόσεων, αλλά είναι ακριβοί και γενικά λιγότερο ακριβής από τους σερβοκινητήρες.

• **Πνευματικά συστήματα κίνησης:** Χρησιμοποιούν πνευματικούς κινητήρες για την κίνηση, οι οποίοι γενικά μετατρέπουν πεπιεσμένο αέρα σε μηχανική κίνηση. Αυτά τα συστήματα αποτελούν την πιο φθηνή λύση. Συναντούνται κυρίως σε χαμηλού κόστους ρομποτικούς βραχίονες με μικρή ανυψωτική ικανότητα, ενώ χρησιμοποιούνται πολλά χρόνια για την τροφοδοσία απλών stop-to-stop κινήσεων.

• **Ηλεκτρικά συστήματα κίνησης:** Η ενεργοποιητές είναι οδηγούμενοι από ηλεκτρικούς κινητήρες. Συνήθως χρησιμοποιούνται βηματικοί κινητήρες ή εναλλακτικά, για πιο υψηλή απόδοση, σερβοκινητήρες. Επειδή τα ηλεκτρικά οδηγούμενα ρομπότ δεν απαιτούν μια υδραυλική μονάδα ισχύος, εξοικονομούν χώρο στο δάπεδο και μειώνουν τα επίπεδα του θορύβου.

### ***5.2.3 Μέθοδοι προγραμματισμού ρομπότ***

Ο προγραμματισμός ρομπότ πραγματοποιείται με διάφορους τρόπους. Σύμφωνα με την τρέχουσα βιομηχανική πρακτική διαιρούμε τις μεθόδους προγραμματισμού σε δύο βασικούς τύπους:

1. Μεθόδων διδασκαλίας (Leadthrough)
2. Μεθόδων με γλώσσες προγραμματισμού ρομπότ

Εκτός από αυτές, μια ακόμα μέθοδος χρησιμοποιείται για τα απλά ρομπότ χαμηλής τεχνολογίας. Αυτή χρησιμοποιείται σε τύπους μηχανών που αναφέρονται ως ρομπότ περιορισμένης ακολουθίας, που ελέγχονται με τη βοήθεια μηχανικών στάσεων και αλλαγών ορίου για να καθορίσουν τα σημεία τέλους των κοινών κινήσεών τους. Ο καθορισμός αυτών των στάσεων και διακοπών μοιάζει με μέθοδο προγραμματισμού. Ωστόσο θεωρείται περισσότερο ως χειροκίνητη διαδικασία οργάνωσης.

#### ***5.2.3.1 Μέθοδοι προγραμματισμού Leadthrough***

Στον προγραμματισμό leadthrough, το ρομπότ κινείται κατά μήκος της επιθυμητής πορείας κινήσεων προκειμένου να καταγραφεί η πορεία στη μνήμη των ελεγκτών. Υπάρχουν δύο τρόποι leadthrough τον προγραμματισμό:

1. Τροφοδοτημένη leadthrough
2. Χειροκίνητη leadthrough

Η **τροφοδοτημένη Leadthrough** μέθοδος χρησιμοποιεί ένα χειριστήριο διδασκαλίας – teach pendant για να ελέγξει τους κινητήρες των αρθρώσεων, και να οδηγήσει το ρομποτικό βραχίονα και τον καρπό μέσω μιας σειράς σημείων στο χώρο. Κάθε σημείο καταγράφεται στη μνήμη για την επόμενη αναπαραγωγή του κατά τη διάρκεια του κύκλου εργασίας. Το χειριστήριο διδασκαλίας είναι συνήθως ένα μικρό φορητό παράθυρο ελέγχου με τους συνδυασμούς διακοπών αναστροφής, πινάκων, και κουμπιών για να ρυθμίσει τις φυσικές μετακινήσεις του ρομπότ και τις ικανότητες προγραμματισμού. Μεταξύ των διάφορων μεθόδων προγραμματισμού ρομπότ, η τροφοδοτημένη leadthrough μέθοδος είναι πιθανώς η πιο διαδεδομένη σήμερα. Περιορίζεται κατά ένα μεγάλο μέρος, στις από σημείο σε σημείο κινήσεις παρά τη συνεχή μετακίνηση λόγω της δυσκολίας που παρουσιάζει το χειριστήριο διδασκαλίας να ρυθμίσει τις σύνθετες γεωμετρικές κινήσεις στο χώρο. Ένας μεγάλος αριθμός βιομηχανικών ρομποτικών εφαρμογών αποτελείται από τις από σημείο σε σημείο κυκλοφορίες του ρομπότ. Αυτοί περιλαμβάνουν εργασίες όπως: μεταφοράς κομματιών, τη φόρτωση και την εκφόρτωση μηχανών, και τη σημειακή συγκόλληση.

Η **χειροκίνητη leadthrough** μέθοδος (επίσης μερικές φορές αποκαλούμενη μέθοδο "περάσματος") χρησιμοποιείται ευκολότερα για στον συνεχούς-πορείας προγραμματισμό όπου ο κύκλος κινήσεων περιλαμβάνει ομαλές σύνθετες καμπυλόγραμμες μετακινήσεις του ρομποτικού βραχίονα. Το πιο κοινό παράδειγμα αυτού του είδους εφαρμογής ρομπότ είναι βαφή ψεκασμού στην οποία ο καρπός του ρομπότ με το μπιστόλι ψεκασμού, που συνδέεται ως end effector, πρέπει να εκτελέσει ένα ομαλό, κανονικό σχέδιο κινήσεων προκειμένου να εφαρμοστεί το χρώμα ομοιόμορφα σε ολόκληρη την επιφάνεια που βάφεται. Συνεχίζοντας οι συγκολλήσεις τόξου είναι άλλο ένα παράδειγμα στο οποίο ο προγραμματισμός συνεχής-πορειών απαιτείται και αυτό πραγματοποιείται πολλές φορές με τη χειροκίνητη μέθοδο leadthrough.

Στη χειροκίνητη μέθοδο leadthrough, ο προγραμματιστής πιάνει φυσικά το ρομποτικό βραχίονα (συνήθως από το άκρο - end effector) και τον κινεί με το χέρι κατά μήκος του επιθυμητού κύκλου κινήσεων. Εάν το ρομπότ είναι μεγάλο και είναι δύσκολο να κινηθεί φυσικά, μια ειδική συσκευή προγραμματισμού αντικαθιστά συχνά το

πραγματικό ρομπότ. Αυτή η συσκευή έχει βασικά την ίδια γεωμετρία με το ρομπότ, αλλά είναι ευκολότερη στο χειρισμό κατά τη διάρκεια του προγραμματισμού. Ένα κουμπί διδασκαλίας βρίσκεται συχνά κοντά στον καρπό του ρομπότ (ή στην ειδική συσκευή προγραμματισμού) που είναι πιεσμένο κατά τη διάρκεια εκείνων των κυκλοφοριών του χειριστή που θα γίνει μέρος του προγραμματισμένου κύκλου. Αυτό δίνει στον προγραμματιστή τη δυνατότητα να κάνει τις ξένες κινήσεις του βραχίονα χωρίς αυτές να περιλαμβάνονται στο τελικό πρόγραμμα. Ο κύκλος κινήσεων διαιρείται σε εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες πολύ κοντινά μεταξύ τους σημεία στο χώρο κατά μήκος της πορείας και αυτά που καταγράφονται στη μνήμη των ελεγκτών.

Τα συστήματα ελέγχου και για τις δύο διαδικασίες leadthrough λειτουργούν για την καθεμιά σε δύο λειτουργίες: λειτουργία διδασκαλίας ή λειτουργία εκτέλεσης. Η λειτουργία διδασκαλίας χρησιμοποιείται για να προγραμματιστεί το ρομπότ και η λειτουργία εκτέλεσης χρησιμοποιείται για να εκτελέσει το πρόγραμμα.

Οι δύο μέθοδοι leadthrough είναι σχετικά απλές διαδικασίες που έχουν αναπτυχθεί και έχουν ενισχυθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων 20 ετών για να διδάξουν τα ρομπότ να εκτελέσουν τις απλές, επαναλαμβανόμενες διαδικασίες σε περιβάλλον εργοστασίων. Οι απαιτήσεις ικανότητας των προγραμματιστών είναι σχετικά μέτριες και αυτές οι διαδικασίες μπορούν να εκτελεστούν εύκολα στις εγκαταστάσεις εργασίας.

#### **5.2.3.2 Μέθοδος με γλώσσες προγραμματισμού**

Ο προγραμματισμός ρομπότ με τις γλώσσες προγραμματισμού ολοκληρώνεται κάπως όπως τον προγραμματισμό υπολογιστών. Ο προγραμματιστής δακτυλογραφεί το πρόγραμμα για ένα CRT (cathode ray tube) όργανο ελέγχου χρησιμοποιώντας μία υψηλού επιπέδου γλώσσα. Η διαδικασία εμπλουτίζεται συνήθως με τη χρησιμοποίηση των τεχνικών leadthrough για να διδαχθούν στο ρομπότ οι θέσεις των σημείων στο χώρο εργασίας. Οι γλώσσες προγραμματισμού άρχισαν να αναπτύσσονται στη δεκαετία του '70, με την πρώτη εμπορική γλώσσα να εμφανίζεται περί το 1979.



#### 5.2.4 Τύποι Κίνησης

Ένας ρομποτικός βραχίονας μπορεί να εκτελέσει τέσσερις διαφορετικούς τύπους κίνησης για την μεταφορά του άκρου του μέσα στον χώρο εργασίας. Ανάλογα με την εφαρμογή (εργασία) που επιθυμούμε να πραγματοποιήσουμε με ένα ρομποτικό βραχίονα, όλες οι μέθοδοι προγραμματισμού που αναφέρθηκαν προηγουμένως, μας επιτρέπουν να πραγματοποιήσουμε την επιθυμητή κίνηση του βραχίονα με τους ακόλουθους τρόπους:

1. **Περιστροφική κίνηση – Slew motion:** ο απλούστερος τύπος κίνησης. Το ρομπότ λαμβάνει την εντολή να «ταξιδέψει» από ένα σημείο σε ένα άλλο με την προκαθορισμένη από το σύστημα - default ταχύτητα.
2. **Παρεμβολική κίνηση αρθρώσεων – Joint interpolated motion:** ο ελεγκτής του ρομπότ υπολογίζει τον χρόνο που θα χρειαστεί κάθε μία από της αρθρώσεις ώστε να φτάσει στην τελική θέση της για μία εντεταλμένη από τον χρήστη/πρόγραμμα ταχύτητα.
3. **Παρεμβολική κίνηση ευθειών γραμμών – Straight line interpolation:** απαιτεί το άκρο του εργαλείου του ρομπότ να «ταξιδέψει» κατά μήκος μίας ευθείας πορείας η οποία προσδιορίζεται σε ορθογώνιες συντεταγμένες από την ευθεία που σχηματίζεται μεταξύ του αρχικού σημείο (έναρξη) προς το τελικό (επιθυμητό) σημείο ή από την κατά μήκος ορθοκανονική ευθεία ενός γνωστού άξονα. Ο συγκεκριμένος τύπος κίνησης είναι ιδιαίτερα σημαντικός σε εφαρμογές όπως η συγκόλληση τόξου, η συναρμολόγηση, η αποκοπή υλικού σε ευθεία πορεία, πρόσδεση τεμαχίων σε εργαλειομηχανές κ.α.
4. **Παρεμβολική κυκλική κίνηση:** Η κυκλική παρεμβολή απαιτεί από τον προγραμματιστή να καθορίσει έναν κύκλο στο χώρο εργασίας του ρομπότ. Αυτό γίνεται πιο βολικά με τη διευκρίνιση τριών σημείων που βρίσκονται κατά μήκος του κύκλου. Ο ελεγκτής κατασκευάζει έπειτα μια προσέγγιση του κύκλου με την επιλογή μιας σειράς προσπελάσιμων σημείων που βρίσκονται πιο κοντά στον καθορισμένο κύκλο. Οι κινήσεις που πραγματοποιούνται από

το ρομπότ αποτελούνται στην πραγματικότητα από τα τμήματα μικρών ευθύγραμμων τμημάτων. Η κυκλική παρεμβολή επομένως παράγει μια γραμμική προσέγγιση του κύκλου, οπότε θα μπορούσε κανείς να πει ότι η κατηγορία αυτή ανήκει σε αυτή της παρεμβολικής κίνησης ευθειών γραμμών. Εάν το πλέγμα των προσπελάσιμων σημείων είναι αρκετά πυκνό, η γραμμική προσέγγιση μοιάζει με έναν πραγματικό κύκλο. Η κυκλική παρεμβολή προγραμματίζεται ευκολότερα χρησιμοποιώντας μια κειμενική γλώσσα προγραμματισμού παρά με τις τεχνικές leadthrough.

5. **Ακανόνιστες ομαλοποιημένες κινήσεις:** Αυτός ο τύπος κίνησης προγραμματίζεται με την χειροκίνητη Leadthrough μέθοδο, χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η διδασκαλία του ρομποτικού βραχίονα για την εκτέλεση βαφής ψεκασμού ή τη συγκόλληση τόξων, όπου οι μετακινήσεις αποτελούνται από συνδυασμούς ομαλών τμημάτων κινήσεων. Αυτά τα τμήματα είναι μερικές φορές περίπου ευθείες, μερικές φορές καμπύλες (όχι απαραίτητα κυκλικές), και μερικές φορές κινήσεις μπρος-πίσω. Αναφερόμαστε σε αυτές τις μετακινήσεις ως ανώμαλες ομαλές κινήσεις και μια διαδικασία παρεμβολής περιλαμβάνεται προκειμένου να επιτευχθούν αυτές. Για να προσεγγίσει το ανώμαλο ομαλό σχέδιο που διδάσκεται από τον προγραμματιστή, η πορεία κινήσεων διαιρείται σε ακολουθία πολύ κοντινών κατά διαστήματα σημείων που καταγράφονται στη μνήμη του ελεγκτή. Αυτές οι θέσεις αποτελούν τα κοντινότερα προσπελάσιμα σημεία στην πορεία που ακολουθείται κατά τη διάρκεια του προγραμματισμού. Η πορεία μπορεί να αποτελείται από χιλιάδες μεμονωμένα σημεία που το ρομπότ πρέπει να αναπαράγει κατά τη διάρκεια της επόμενης εκτέλεσης του προγράμματος.

Η περιστροφική και η παρεμβολική κίνηση αρθρώσεων αναφέρονται και σαν μεταβάσεις «σημείο προς σημείο» (**point to point**). Με αυτούς τους τρόπους μετάβασης, η κίνηση που θα πραγματοποιήσει τελικά ο ρομποτικός βραχίονας είναι απροσδιόριστη, τόσο ως προς την τροχιά αλλά και ως προς τον προσανατολισμό. Καθώς όπως είδαμε παραπάνω, όταν αποθηκεύουμε μια θέση του ρομποτικού βραχίονα στο χώρο, στην μνήμη του ρομποτικού ελεγκτή αποθηκεύονται οι τιμές της

κάθε άρθρωσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το πρόγραμμα ελέγχου του ρομποτικού βραχίονα υπολογίζει τις αποστάσεις ή τις γωνίες που πρέπει να διανύσει κάθε άρθρωση για να φτάσει από τη μία θέση στην επόμενη, στη συνέχεια με βάση τη μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα κάθε άρθρωσης, υπολογίζει το χρόνο που χρειάζεται η κάθε άρθρωση για να φτάσει στην επιθυμητή θέση και με βάση των μεγαλύτερο από αυτούς τους χρόνους πραγματοποιεί την κίνηση (μετάβαση) κινώντας κάθε άρθρωση με τέτοια ταχύτητα ώστε να ξεκινήσουν από το ένα σημείο και να σταματήσουν ή να φτάσουν στο επόμενο ταυτόχρονα. Η χρήση αυτών των μεθόδων μετάβασης πολλές φορές είναι ιδιαίτερα σημαντική. Οι κύριοι λόγοι χρήσης της είναι κυρίως για την επίτευξη ταχύτερων μεταβάσεων, τον καθορισμό συγκεκριμένων θέσεων εργασίας του ρομποτικού βραχίονα και την αποφυγή εμποδίων.

Αντίστοιχα η παρεμβολική κίνηση ευθειών γραμμών, η παρεμβολική κυκλική κίνηση και οι ακανόνιστες ομαλοποιημένες κινήσεις αναφέρονται σαν **«μεταβάσεις συνεχούς διαδρομής»**. Ο χαρακτηρισμός είναι απολύτως λογικός αφού σε αυτούς τους τύπους κίνησης το άκρο του ρομποτικού βραχίονα πρέπει να ακολουθεί μία συγκεκριμένη τροχιά και πολλές φορές και συγκεκριμένο προσανατολισμό. Κατά τον προγραμματισμό ενός κύκλου εργασίας για ένα ρομπότ, συνήθως χρησιμοποιούνται διάφοροι τρόποι μετάβασης, ανάλογα με την εργασία που πραγματοποιεί ο βραχίονας σε κάθε κομμάτι του κύκλου εργασίας.

#### **5.2.4.1 Ανάγκες & περιορισμοί κατά την κίνηση**

Ανάλογα με την εργασία που επιθυμούμε να εκτελέσει ένας ρομποτικός βραχίονας σε κάθε σκέλος του κύκλου εργασίας του, προκύπτουν και οι λιγότερο ή περισσότερο αυστηρές προδιαγραφές, όσον αφορά τον τρόπο κίνησης του βραχίονα. Οι προδιαγραφές αυτές συνοψίζονται ως εξής:

1. Αδιάφορη κίνηση του άκρου του εργαλείου
2. Να ακολουθεί συγκεκριμένη τροχιά
3. Να έχει συγκεκριμένο προσανατολισμό
4. Να ακολουθεί συγκεκριμένη τροχιά, στην οποία κινείται με καθορισμένο προσανατολισμό

5. Περιορισμοί από συγκρούσεις κατά την κίνηση του βραχίονα με άλλα χωρικά αντικείμενα

Δεν είναι λίγα τα τμήματα του κύκλου εργασίας ενός βραχίονα που δεν μας ενδιαφέρει η μορφή της διαδρομής που θα ακολουθήσει το άκρο του εργαλείου, αλλά μόνο η αρχική θέση και η σωστή τοποθέτησή του στην τελική θέση. Τέτοια τμήματα είναι η κίνηση ενός αφόρτωτου βραχίονα από τη θέση απόθεσης τεμαχίων στη θέση παραλαβής, σε περιβάλλον χωρίς εμπόδια, η μετακίνηση από θέση σε θέση για πραγματοποίηση σημειακών συγκολλήσεων ή πολλές φορές και η μετακίνηση του βραχίονα στη πρώτη θέση του κύκλου εργασίας όταν αυτός βρίσκεται στη θέση στάσης. Όπως είναι φανερό, ο προγραμματισμός τέτοιου είδους κινήσεων πραγματοποιείται με την μέθοδο σημείο προς σημείο (point to point).

Η κίνηση του βραχίονα κατά τέτοιο τρόπο ώστε το άκρο του εργαλείου να ακολουθεί συγκεκριμένη τροχιά, είναι η πιο σύνηθες κατά τον προγραμματισμό των ρομποτικών βραχιόνων. Ακόμα και για τις απλές εφαρμογές που περιγράψαμε παραπάνω, και που σε γενικές γραμμές μπορούν να πραγματοποιηθούν με αδιάφορη κίνηση, πολλές φορές εμπόδια στο χώρο εργασίας του βραχίονα, όπως μηχανήματα κ.α. μπορεί να επιβάλουν την κίνηση σε συγκεκριμένη τροχιά για την αποφυγή συγκρούσεων. Επίσης η φόρτωση και ξεφόρτωση εργαλειομηχανών επιβάλει τέτοιου είδους κίνηση για να μπορέσει το ρομπότ να περάσει μέσα από την πόρτα της εργαλειομηχανής. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούμε κάποιον απ' τους τρόπους μετάβασης συνεχούς διαδρομής και κυρίως τις παρεμβολές ευθείας ή κυκλικής τροχιάς.

Σπανιότερη περίπτωση είναι να μας ενδιαφέρει μόνο ο προσανατολισμός που θα έχει το άκρο του εργαλείου κατά τη διάρκεια τις κίνησης του βραχίονα και να μην μας ενδιαφέρει η τροχιά που θα ακολουθήσει τέτοιες περιπτώσεις είναι η μεταφορά υγρών προϊόντων σε ανοιχτά δοχεία ή γενικότερα τεμαχίων που λόγω σχήματος ή ευαισθησίας δεν πρέπει να περιστραφούν κατά τη μεταφορά τους. Ο προγραμματιστής λοιπόν πρέπει να είναι σε θέση να διακρίνει και να αξιοποιήσει την ελευθερία επιλογής της τροχιάς, κατά τέτοιο τρόπο ώστε να πετύχει την πραγματοποίηση της κίνησης στον ελάχιστο χρόνο.

Οι περισσότερες εφαρμογές των ρομποτικών βραχιόνων σήμερα όπως η συναρμολόγηση μικρών ή μεγάλων προϊόντων, η συγκόλληση τόξου, η βαφή επίπεδων ή καμπύλων επιφανειών κ.α. απαιτούν για να γίνουν, την κίνηση του end tool, όχι μόνο σε καθορισμένη τροχιά αλλά και με συγκεκριμένο προσανατολισμό. Τέτοιες κινήσεις προγραμματίζονται ως επί των πλείστων με τον χειροκίνητο leadthrough προγραμματισμό και αποτελούν τα τμήματα αυτά του κύκλου εργασίας όπου η ακρίβεια και η ποιότητα της εργασίας του βραχίονα έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα από τον χρόνο διεξαγωγής αυτής.

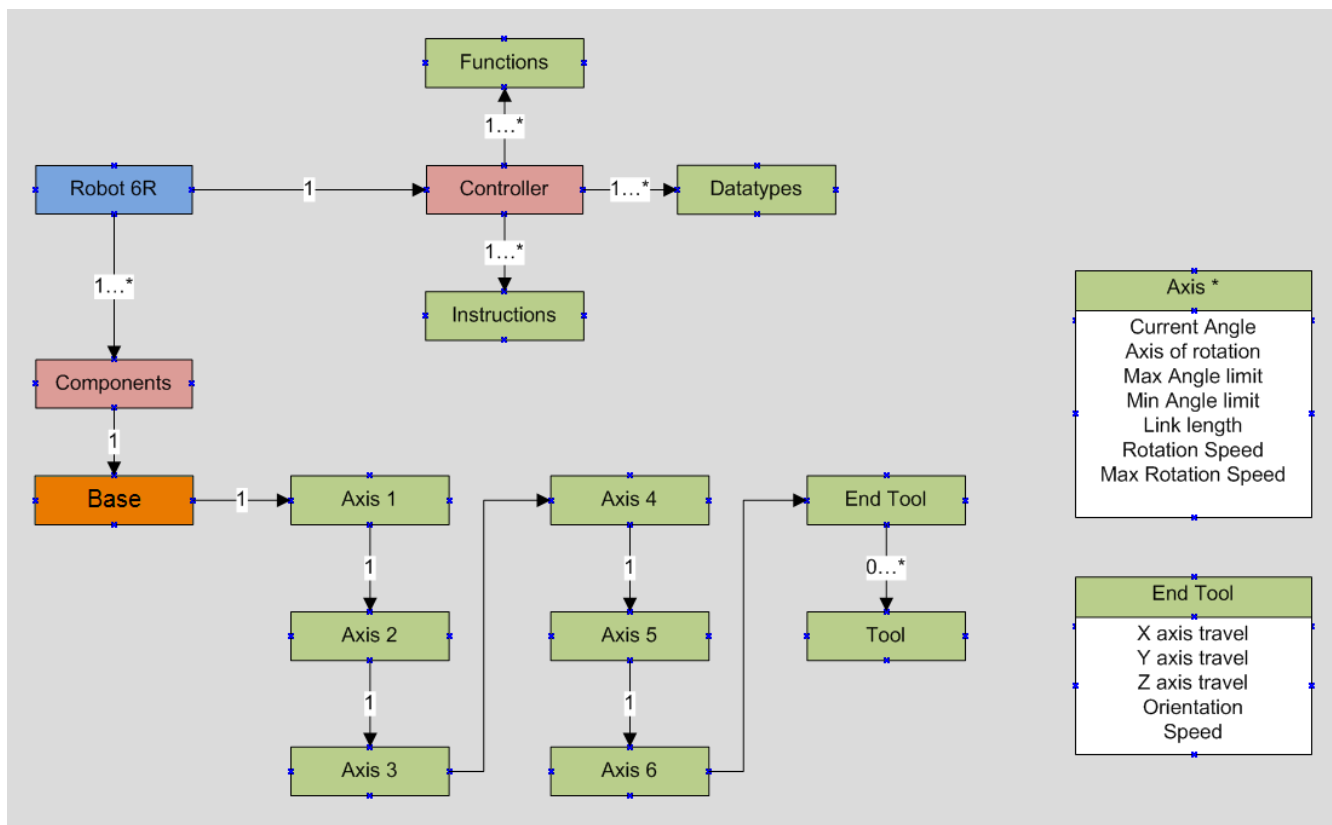
Τέλος κατά τον προγραμματισμό των κινήσεων ενός βραχίονα περιορισμοί προκύπτουν, όχι μόνον από τα εμπόδια που μπορεί να υπάρχουν κατά μήκος της τροχιάς του άκρου του εργαλείου αλλά και εμπόδια που μπορεί να παρουσιαστούν και να δημιουργήσουν συγκρούσεις με κάποιο από τα μπράτσα του βραχίονα. Όταν υπάρχουν τέτοιου είδους περιορισμοί, πρέπει ο προγραμματιστής να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός, γιατί μπορεί να μην γίνονται άμεσα αντιληπτοί, ωστόσο μπορεί να κρύβουν μεγάλους κινδύνους.

### **5.2.5 Σημασιολογικό μοντέλο ρομποτικών βραχιόνων 6R**

Σύμφωνα με τον Γωγουβίτη, προκύπτει με παρόμοια λογική το σημασιολογικό μοντέλο ενός ρομποτικού βραχίονα έξι περιστρεφόμενων αρθρώσεων. Η κλάση ρομπότ (*robot*) χωρίζεται και πάλι στις δύο υποκλάσεις των διαφορετικών μερών (*components*) του ρομπότ και του ελεγκτή (*controller*) της μηχανής. Τα μέρη αποτελούνται από τη βάση του ρομποτικού βραχίονα (*base*), τους άξονές του (*axis*), το άκρο του ρομπότ (*end tool*) και πιθανόν κάποιο εργαλείο (*tool*) στην περίπτωση που είναι προσαρμοσμένο πάνω στο end tool. Ο ελεγκτής λειτουργεί όπως αυτός μίας μηχανής CNC, αλλά προφανώς τα οι λειτουργίες (*functions*) αντιστοιχούν στις εσωτερικές εντολές και αλγορίθμους του ρομπότ, όπως άλλωστε και τα είδη δεδομένων (*datatypes*), αλλά και οι εντολές (*instructions*) που διαφέρουν από αυτές

του G-κώδικα και αντιστοιχούν στην υψηλού επιπέδου γλώσσα προγραμματισμού για τον προγραμματισμό ενός ρομποτικού βραχίονα.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα κατά UML του σημασιολογικού μοντέλου ενός ρομποτικού βραχίονα έξι περιστροφικών αρθρώσεων.



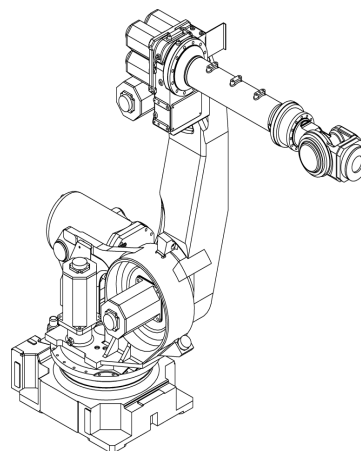
Σχήμα 20: Δομικό διάγραμμα αρθρωτών βραχιόνων (6R)

Όπως και προηγουμένως κάθε κλάση διακρίνεται από διαφορετικά χαρακτηριστικά (*attributes*), ενώ κάθε μία από τις κλάσεις που αναφέρεται σε γεωμετρικά αντικείμενα (*robot, components, axis, etc*) έχει σαν βασικά χαρακτηριστικά τη θέση, το μέγεθος και τον προσανατολισμό, χαρακτηριστικά τα οποία διατηρούν και οι υποκλάσεις της. Στο σχήμα είναι φανερές οι ιεραρχικές σχέσεις των κλάσεων, από την ροή των μεταξύ τους ενώσεων, ενώ για τις σημάνσεις των συνδέσμων ισχύει ότι και προηγουμένως. Τέλος παρουσιάζονται ξεχωριστά κάποια από τα επιπλέον χαρακτηριστικά που διαθέτουν οι κλάσεις (*Axis*) και (*End Tool*).

### 5.2.6 FANUC R2000iA/125L

Η σειρά μοντέλων R-2000iA είναι μια σειρά ρομποτικών βραχιόνων 6 περιστροφικών αρθρώσεων από την εταιρεία Fanuc. Χρησιμοποιούνται έξι σερβοκινητήρες για τον πλήρη έλεγχο κάθε άρθρωσης. Τα μοντέλα αυτά διακρίνονται για την ισχύ και την ανυψωτική τους ικανότητα, ενώ παράλληλα μπορούν να πετύχουν υψηλές ταχύτητες μετατόπισης. Το προφίλ τους είναι ιδιαίτερα λεπτό, κάτι που σε συνδυασμό με τον μεγάλο όγκο εργασίας τους (δυνατότητα να φτάσουν περιοχές πίσω από τον κάτω βραχίονα), τους προσφέρει μεγάλη ευελιξία, ελαχιστοποιεί παρεμβολές με περιφερειακά συστήματα και τα καθιστά απολύτως κατάλληλα για χρήση σε εσωτερικούς χώρους. Αυτοί οι υψηλής απόδοσης βιομηχανικοί βραχίονες αποτελούν μία προηγμένη εξέλιξη της βιομηχανίας και χαρακτηρίζονται σαν ρομπότ γενικού σκοπού, με μεγάλη ταχύτητα και «σκοράροντας» αρκετά πάνω από τον μέσο όρο σε πολλές κατηγορίες, αλλά χωρίς να διακρίνονται ιδιαίτερα σε κάποια από αυτές. Δεν χαρακτηρίζονται άδικα «ρομπότ για όλες τις δουλειές», αφού με τα κατάλληλα εργαλεία (end effectors) είναι ικανοί να εκτελέσουν ένα πλήθος εργασιών, όπως:

- Γενικές βιομηχανικές εφαρμογές
- Διαχείριση υλικού
- Διανομή
- Μεταφορά τεμαχίων
- Αφαίρεση υλικού
- Φόρτωση/εκφόρτωση μηχανών
- Παλλετοποίηση
- Σημειακή συγκόλληση

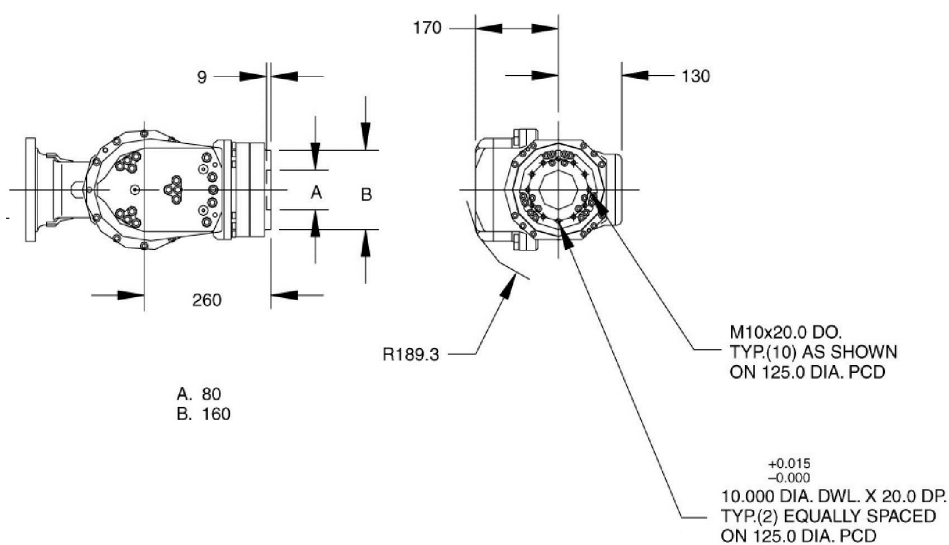


Σχήμα 21: Ισομετρικό σχήμα  
Fanuc R2000iA-125L

Παρακάτω παρατίθενται ο πίνακας με τεχνικά χαρακτηριστικά του ρομποτικού βραχίονα Fanuc R2000iA-125L καθώς δύο σχήματα στα οποία είναι διακριτά τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, αλλά και ο όγκος/χώρος εργασίας του.

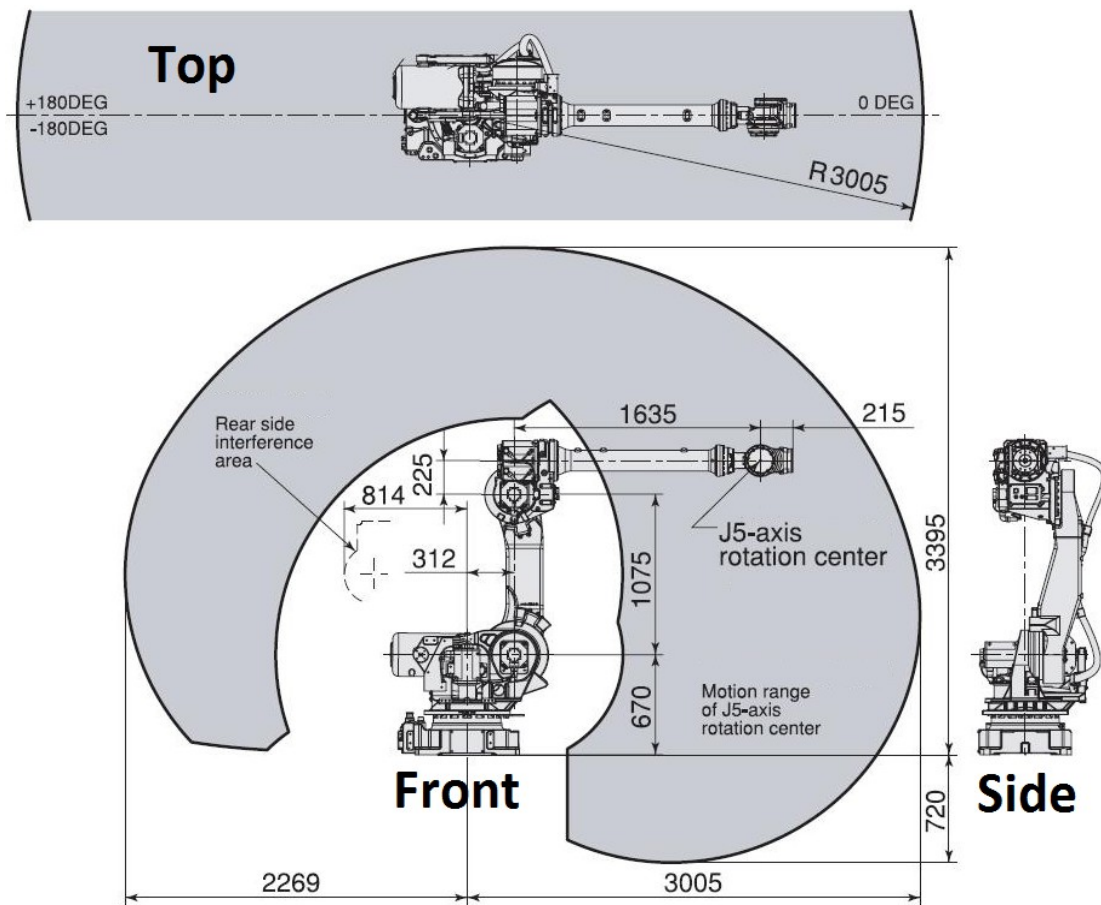
Fanuc R200iA/125L – Χαρακτηριστικά		
Τύπος	Αρθρωτός βιομηχανικός βραχίονας	
Ελεγχόμενοι άξονες	Έξι ( J1, J2, J3, J4, J5, J6 )	
Σύστημα οδήγησης	Ηλεκτρικό σύστημα οδήγησης με χρήση AC σερβοκινητήρων	
Προέκταση	3,01m	
Επαναληψιμότητα	±0,2 mm	
Ακτίνα παρεμβολής	583°	
Μάζα	1230 kg	
Τρόπος εγκατάσταση	Πάτωμα	
	<b>Εύρος περιστροφής</b>	<b>Μεγίστη ταχύτητα περιστροφής</b>
<b>J1 άξονας περιστροφής</b>	360° (6,28 rad)	105°/sec (1,83 rad/sec)
<b>J2 άξονας περιστροφής</b>	135° (2,36 rad)	105°/sec (1,83 rad/sec)
<b>J3 άξονας περιστροφής</b>	352° (6,14 rad)	105°/sec (1,83 rad/sec)
<b>J4 άξονας περιστροφής</b>	720° (12,56 rad)	170°/sec (2,97 rad/sec)
<b>J5 άξονας περιστροφής</b>	250° (4,36 rad)	170°/sec (2,97 rad/sec)
<b>J6 άξονας περιστροφής</b>	720° (12,56 rad)	260°/sec (4,54 rad/sec)
<b>Σκοπιμότητα</b>	Μακρύς βραχίονας και στήριξη στο πάτωμα	

Πίνακας 5.3: Τεχνικά Χαρακτηριστικά ρομποτικού βραχίονα Fanuc R2000iA-125L



Σχήμα 22: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά καρπού





Σχήμα 23: Ρομποτικός Βραχίονας Fanuc R2000iA-125L Όγκος εργασίας και γεωμετρικά χαρακτηριστικά

# 6

## *Κινηματική Ανάλυση αρθρώσεων*

### *ρομποτικών βραχιόνων 6R*

Κινηματική είναι η επιστήμη που μελετάει την κίνηση ανεξάρτητα από τις δυνάμεις οι οποίες την προκαλούν. Στη ρομποτική, η επιστήμη της κινηματικής αναφέρεται σε όλες τις γεωμετρικές και χρονικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν την κίνησή ενός ρομποτικού βραχίονα.

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η θέση και ο προσανατολισμός των αρθρώσεων ρομποτικών βραχιόνων 6R σε στατικές καταστάσεις. Κεντρικός στόχος είναι η προσομοίωση των πραγματικών κινήσεων και λειτουργικών χαρακτηριστικών που εκτελεί ένα βιομηχανικό ρομπότ 6R. Για το σκοπό αυτό, επιλύονται τα προβλήματα της ευθείας και αντίστροφης κινηματικής. Ο ρομποτικός έλεγχος στοχεύει στη δυνατότητα προγραμματισμού και μετακίνησης του ρομπότ σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου με περιστροφή των αρθρώσεών του.

Για την καλύτερη κατανόηση του κεφαλαίου, ο αναγνώστης καλείται να προστρέξει στα Παραρτήματα Α και Β. Στο Παράρτημα Α γίνεται μία εννοιολογική εισαγωγή στην μαθηματική χωρική αναπαράσταση. Στο Παράρτημα Β παρατίθενται βασικές τριγωνομετρικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στην ρομποτική και οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το Κεφάλαιο.

## **6.1 Ευθεία κινηματική ανάλυση ρομποτικού βραχίονα 6R**

Το πρόβλημα της ευθείας κινηματικής ενός ρομποτικού βραχίονα 6R έγκειται στον προσδιορισμό της σχετικής θέσης και προσανατολισμού του άκρου του ρομποτικού βραχίονα ως προς την βάση του, δεδομένων των τιμών περιστροφής των αρθρώσεων και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του. Συχνά ένα σύστημα συντεταγμένων τοποθετείται στο άκρο του ρομποτικού βραχίονα και αναφέρεται σαν tool frame.

Η σύμβαση για την γεωμετρική αναπαράσταση ενός βραχίονα ανάγεται στην εύρεση ενός ισοδύναμου  $4 \times 4$  ομογενή πίνακα μετασχηματισμού που συσχετίζει την χωρική μετατόπιση και περιστροφή του πλαισίου αναφοράς – frame του τελικού εργαλείου με το πλαίσιο αναφοράς της βάσης. Στην πράξη για τον υπολογισμό αυτό βρίσκονται οι θέσεις των συνδέσμων από αισθητήρες που τοποθετούνται στις αρθρώσεις. Υπολογίζοντας στην συνέχεια τις θέσεις των αξόνων των συνδέσμων σε σχέση με το σταθερό πλαίσιο αναφοράς της βάσης, βρίσκεται ο μετασχηματισμός, η μεταφορά και περιστροφή δηλαδή, του πλαισίου του εργαλείου ως προς το πλαίσιο της βάσης. Το πρόβλημα της ευθείας κινηματικής είναι σημαντικό για την ανάπτυξη αλγορίθμων συντονισμού του χειρισμού.

Για την εφαρμογή της ευθείας κινηματικής στο 3DVIA Virtools δεν ήταν απαραίτητη η επίλυση κάποιου μαθηματικού μοντέλου. Σε ένα ΕΠΕ η θέση και προσανατολισμός μίας εικονικής οντότητας είναι πάντα γνωστά στο σύστημα., όταν αυτή έχει οριστεί σωστά. Χρησιμοποιώντας στο Virtools τις ήδη διαθέσιμες «κλάσεις» και «συμπεριφορές» εύκολα προκύπτει ο πίνακας μετασχηματισμού. Μέσω αυτών δίνεται η δυνατότητα αναγνώρισης των χωρικών χαρακτηριστικών ενός ορισμένου σημείου στο χώρο, και στη προκειμένη περίπτωση του άκρου του ρομποτικού βραχίονα.

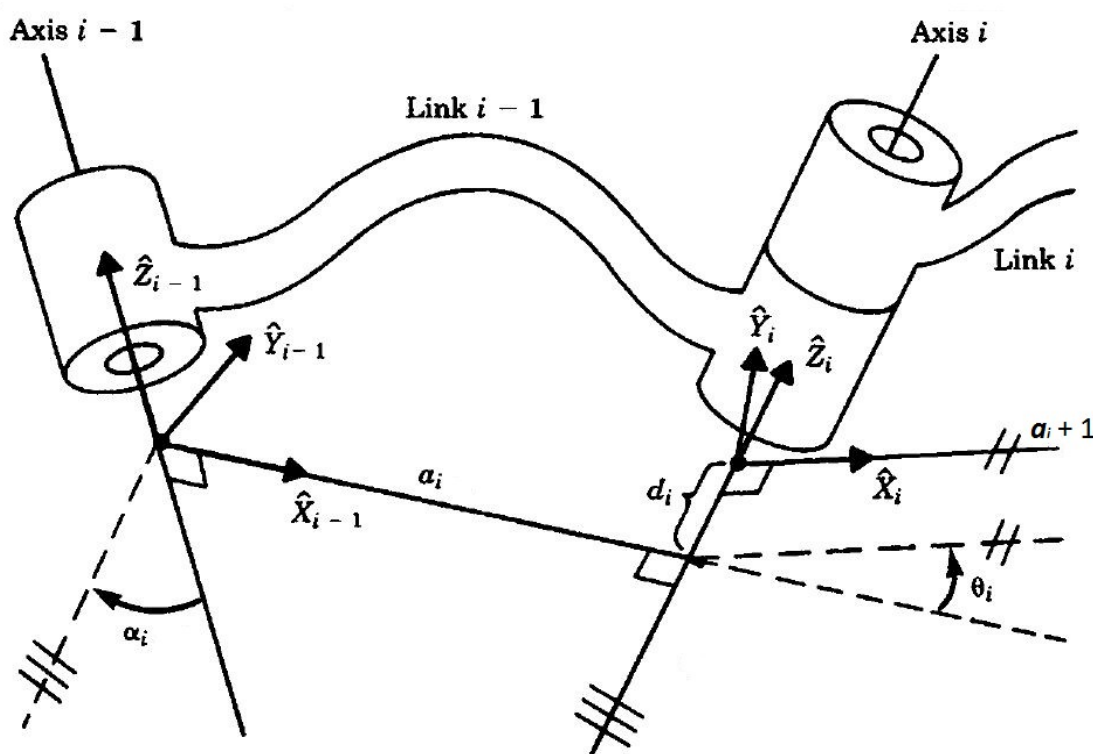
## **6.2 Γεωμετρική αναπαράσταση**

Η γεωμετρία ενός ρομποτικού μηχανισμού μπορεί να οριστεί σχετικά εύκολα, τοποθετώντας πλαίσια συστημάτων συντεταγμένων – 3D Frames σε κάθε έναν από τους συνδέσμους του. Ενώ τα frames αυτά μπορούν να τοποθετηθούν αυθαίρετα,

είναι πολύ πιο χρήσιμο τόσο για να είναι συνεπές το σύστημα, αλλά και για μαθηματική ευκολία, να χρησιμοποιηθεί μία σύμβαση για την τοποθέτηση των frames στους συνδέσμους. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Denavit-Hartenberg. Οι Denavit-Hartenberg πρότειναν έναν συστηματικό τρόπο τοποθέτησης των καρτεσιανών συστημάτων σε μία κινηματική αλυσίδα, με στόχο την τυποποίηση και απλοποίηση των αναγκαίων μετασχηματισμών. Πράγματι, σύμφωνα με την μέθοδο D-H χρησιμοποιείται η εξής τυποποιημένη μετάβαση από ένα καρτεσιανό σύστημα  $\{i-1\}$  στο επόμενο καρτεσιανό σύστημα  $\{i\}$  (Σχήμα 6.1).

Η αρίθμηση των φορέων/συνδέσμων (links) και των αρθρώσεων ακολουθεί τη σύμβαση

- Οι  $\dot{I}$  κινούμενοι φορείς (links) του ρομποτικού μηχανισμού αριθμούνται από το 1 έως το  $\dot{I}$ . Ο αριθμός της βάσης είναι 0.
- Οι  $\dot{I}$  αρθρώσεις του ρομποτικού μηχανισμού αριθμούνται από το 1 στο  $\dot{I}$ , με την άρθρωση  $\dot{I}$  να τοποθετείται μεταξύ των φορέων  $i-1$  και  $i$ .



Σχήμα 24: Θέση πλαισίων  $\{i-1\}$  και  $\{i\}$  σε έναν αρθρωτό μηχανισμό

Συνοπτικά, η διαδικασία τοποθέτησης πλαισίων περιγράφεται με τα εξής βήματα:

1. Αναγνώριση των αξόνων περιστροφής και σχεδιασμός γραμμών κατά μήκος τους. Για τα βήματα 2 έως 5 θεωρούμε δυο διαδοχικές τέτοιες γραμμές (που διέρχονται από τους άξονες  $i$  και  $i+1$ )
2. Αναγνώριση της κοινής καθέτου που σχηματίζεται ανάμεσα στους άξονες ή το σημείο τομής τους. Στο σημείο τομής ή στο σημείο όπου η κοινή κάθετος συναντιέται με τον άξονα  $i$ , τοποθετείται ένα πλαίσιο συστήματος συντεταγμένων - frame.
3. Ο άξονας  $\hat{Z}_i$  τοποθετείται παράλληλα με τον άξονα  $i$ .
4. Ο άξονας  $\hat{X}_i$  δείχνει προς το κανονικό πολύγωνο ή στην περίπτωση που οι άξονες τέμνονται, ο άξονας  $\hat{X}_i$  πρέπει να είναι κάθετος στο επίπεδο που ορίζουν οι δύο άξονες.
5. Τέλος, ο άξονας  $\hat{Y}_i$  τοποθετείται σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού.
6. Το frame  $\{0\}$  τοποθετείται να συμπίπτει με το frame  $\{1\}$  όταν η μεταβλητή της πρώτης άρθρωσης είναι μηδέν. Για το  $\{1\}$  επιλέγεται μια αρχική θέση και η κατεύθυνση του  $\hat{X}_i$  ελεύθερα αλλά γενικά με τρόπο ώστε όσο το δυνατόν περισσότερες παράμετροι του συνδέσμου να γίνουν μηδέν.

Αν τα πλαίσια των αρθρώσεων τοποθετηθούν στις αρθρώσεις σύμφωνα με την παραπάνω σύμβαση, ορίζονται οι παρακάτω σχέσεις για τις παραμέτρους των συνδέσμων:

- $a_n =$  η απόσταση μεταξύ των αξόνων  $\hat{Z}_i$  και  $\hat{Z}_{i-1}$  μετρημένη κατά μήκος του  $\hat{X}_{i-1}$
- $\alpha_n =$  η γωνία μεταξύ των  $\hat{Z}_i$  και  $\hat{Z}_{i-1}$  ως προς τον άξονα  $\hat{X}_{i-1}$
- $d_n =$  η απόσταση μεταξύ των αξόνων  $\hat{X}_{i-1}$  και  $\hat{X}_i$  μετρημένη κατά μήκος του  $\hat{Z}_i$  και
- $\theta_n =$  η γωνία μεταξύ του  $\hat{X}_{i-1}$  και  $\hat{X}_i$  μετρούμενη ως προς τον  $\hat{Z}_i$

Συνήθως επιλέγεται το  $a_i > 0$  επειδή αντιστοιχεί σε μια απόσταση ενώ τα  $a_i$ ,  $d_i$ ,  $\theta_i$  είναι προσημασμένες ποσότητες. Η σύμβαση που περιγράφηκε δεν οδηγεί σε μια μοναδική τοποθέτηση των πλαισίων στους συνδέσμους. Σε πρώτη φάση, όταν ο άξονας  $\hat{Z}_i$  τοποθετείται ώστε να είναι παράλληλος με τον άξονα της άρθρωσης  $n$ , υπάρχουν δύο κατευθύνσεις προς τις οποίες μπορεί να δείχνει. Επιπλέον, στην περίπτωση που οι άξονες δύο αρθρώσεων τέμνονται, (πχ  $a_i = 0$ ), τότε υπάρχουν δύο επιλογές για την κατεύθυνση του  $\hat{X}_i$ , που αντιστοιχεί στην επιλογή προσήμων στο κάθετο επίπεδο που περιέχει τα  $\hat{Z}_i$  και  $\hat{Z}_{i+1}$ . Όταν οι άξονες  $i$  και  $i+1$  είναι παράλληλοι. Η επιλογή της αρχικής θέσης του  $\{i\}$  επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε το  $d_i$  να είναι μηδέν.

### 6.3 Αντίστροφη κινηματική, οικογένειας ρομποτικών βραχιόνων 6R

Το πρόβλημα της αντίστροφης κινηματικής ενός ρομποτικού βραχίονα 6R έγκειται στον προσδιορισμό της στροφής των αρθρώσεων, αν δίνεται η θέση και ο προσανατολισμός του άκρου του ρομποτικού βραχίονα σε σχέση με τη βάση, καθώς και όλων των γεωμετρικών παραμέτρων των αρθρώσεων.

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  ${}^0T$  προκύπτουν εννιά εξισώσεις από τις οποίες μόνον τρεις εξισώσεις είναι ανεξάρτητες, οπότε μαζί με τις εξισώσεις από την στήλη του διανύσματος 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, αρκετές παράμετροι D-H ( $d_i$  και  $a_i$ ) είναι μηδενικές, ενώ οι παράμετροι  $\alpha_n$  είναι είτε  $0$  ή  $\pm 90^\circ$ . Συνοπτικά:

- 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

Για έναν ρομποτικό βραχίονα 6R είναι πιθανό να 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.

### 6.3.1 Υλοποίηση

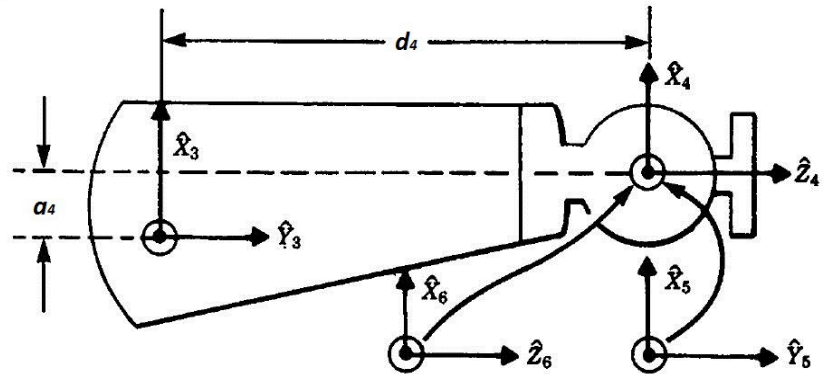
Για την εύρεση λύσης κλειστής μορφής στην αντίστροφη κινηματική ανάλυση, γίνεται χρήση της αρχής της απόπλεξης/αποσύζευξης (*decoupling*), η οποία επιτρέπει τον διαχωρισμό του προβλήματος σε δύο επιμέρους προβλήματα κατώτερης τάξης για τα οποία υπάρχει λύση κλειστής μορφής. Σύμφωνα, δε, με τον Pieper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

- βραχίονες με τρεις οποιοσδήποτε γραμμικούς άξονες, και
- βραχίονες με τρεις οποιοσδήποτε 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.

Η λύση λοιπόν που προτείνεται αντιστοιχεί σε βραχίονες που ανταποκρίνονται στις τιμές των παραμέτρων D-H του πίνακα 6.1, των οποίων η διαδικασία υπολογισμού περιγράφηκε στην παράγραφο 6.2.

	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	$0^\circ$	0	0	$q_1$
2	$-90^\circ$	$a_2$	$d_2$	$q_2$
3	$0^\circ$	$a_3$	$d_3$	$q_3$
4	$-90^\circ$	$a_3$	$d_4$	$q_4$
5	$90^\circ$	0	0	$q_5$
6	$-90^\circ$	0	0	$q_6$



Σχήμα 25: Παράμετροι D-H και τοποθεσία πλαισίων στον άνω βραχίονα (πήχη) ενός βιομηχανικού ρομπότ

Πίνακας 6.1: Παράμετροι D-H

### 6.3.2 Υπολογισμός $q_1, q_2, q_3$

Επιθυμούμε να λύσουμε τον πίνακα μετασχηματισμού  ${}^0T_6$  ως προς  $q_i$  όταν είναι γνωστές οι τιμές του  ${}^0T_6$ , όπου  $pw_x, pw_y, pw_z$  οι τιμές του διανύσματος θέσης του καρπού (wrist):

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & pw_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & pw_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & pw_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^0T_1(q_1) {}^1T_2(q_2) {}^2T_3(q_3) {}^3T_4(q_4) {}^4T_5(q_5) {}^5T_6(q_6), \quad (1)$$

για τον υπολογισμό της  $q_1$  επαναδιατυπώνουμε την παραπάνω εξίσωση μεταφέροντας στο αριστερό μέλος της εξίσωσης την ποσότητα  ${}^0T_1(q_1)$

$$[{}^0T_1(q_1)]^{-1} {}^0T_6 = {}^1T_2(q_2) {}^2T_3(q_3) {}^3T_4(q_4) {}^4T_5(q_5) {}^5T_6(q_6) = {}^1T_6,$$

αντιστρέφοντας τον  ${}^0T_1(q_1)$  προκύπτει:



$$\begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & 0 \\ -s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & pw_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & pw_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & pw_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^1r_{11} & {}^1r_{12} & {}^1r_{13} & {}^1p_x \\ {}^1r_{21} & {}^1r_{22} & {}^1r_{23} & {}^1p_y \\ {}^1r_{31} & {}^1r_{32} & {}^1r_{33} & {}^1p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

εξισώνοντας τα στοιχεία (2,4) και από τις δύο μεριές έχουμε:

$$\begin{aligned} [{}^0T(q_1)^{-1} \quad {}^0T]_{(2,4)} = {}^6T_{(2,4)} &\Rightarrow -s_1 pw_x + c_1 pw_y = {}^6T_{(2,4)} \Rightarrow \\ &\Rightarrow -s_1 pw_x + c_1 pw_y = d_3 + d_2 \end{aligned} \quad (2)$$

για την επίλυση αυτού του τύπου εξισώσεων αντικαθιστούμε με

$$\begin{aligned} pw_x &= \rho \cos \varphi \\ pw_y &= \rho \sin \varphi \end{aligned}, \text{ όπου } \begin{aligned} \rho &= \sqrt{pw_x^2 + pw_y^2} \\ \varphi &= \text{Atan2}(pw_y, pw_x) \end{aligned}$$

μετά την αντικατάσταση παίρνουμε:

$$\begin{aligned} c_1 s_\varphi - s_1 c_\varphi &= \frac{d_3 + d_2}{\rho} \Rightarrow \sin(\varphi - q_1) = \frac{d_3 + d_2}{\rho} \stackrel{\sin^2 + \cos^2 = 1}{\Rightarrow} \cos(\varphi - q_1) = \pm \sqrt{1 - \frac{(d_3 + d_2)^2}{\rho^2}} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \varphi - q_1 = \text{Atan2}\left(d_3 + d_2, \pm \sqrt{1 - \frac{(d_3 + d_2)^2}{\rho^2}}\right), \end{aligned}$$

$$\text{Άρα } q_1 = \text{Atan2}(pw_y, pw_x) - \text{Atan2}\left(d_3 + d_2, \pm \sqrt{pw_x^2 + pw_y^2 - (d_3 + d_2)^2}\right), \quad (Q1)$$

Με γνωστή πλέον την γωνία  $q_1$  είναι γνωστός ο πίνακας  ${}^0T(q_1)$ , από την

${}^0T(q_1)^{-1} \quad {}^0T = {}^6T$  υπολογίζονται και εξισώνονται τα στοιχεία (1, 4) και (3, 4) μεταξύ του δεξιού και του αριστερού μέλους:

$$\begin{aligned} c_1 pw_x + s_1 pw_y &= {}^6T_{(1,4)} \Rightarrow c_1 pw_x + s_1 pw_y = a_4 c_{23} - d_4 s_{23} + a_3 c_2 + a_2 \\ pw_z &= {}^6T_{(3,4)} \Rightarrow -pw_z = a_4 s_{23} + d_4 c_{23} + a_3 s_2 \end{aligned}$$

υψώνουμε στο τετράγωνο τις δύο τελικές εξισώσεις, μαζί τους και την (2):

$$\begin{aligned} [(c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2) + (d_4 s_{23} - a_4 c_{23})]^2 &= (a_3 c_2)^2 \\ [-(p w_z + a_4 s_{23} + d_4 c_{23})]^2 &= (a_3 s_2)^2 \\ (c_1 p w_y - s_1 p w_x)^2 &= (d_3 + d_2)^2 \end{aligned}$$

Στην συνέχεια προσθέτουμε κατά μέλη τις τρεις εξισώσεις και μετά την εκτέλεση των πράξεων προκύπτει:

$$p w_x^2 + p w_y^2 + p w_z^2 + a_2^2 - 2 a_2 (c_1 p w_x + s_1 p w_y) + a_4^2 + d_4^2 + 2 p w_z (a_4 s_{23} + d_4 c_{23}) + 2 (c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2) (d_4 s_{23} - a_4 c_{23}) = (d_3 + d_2)^2 + a_3^2, \quad (3)$$

η ποσότητα  $-2 a_2 (c_1 p w_x + s_1 p w_y)$  είναι ίση με:

$$\begin{aligned} -2 a_2 (c_1 p w_x + s_1 p w_y) &= -2 a_2 c_1 p w_x - 2 a_2 s_1 p w_y = \\ &= (p w_x - c_1 a_2)^2 - p w_x^2 - (c_1 a_2)^2 + (p w_y - s_1 a_2)^2 - p w_y^2 - (s_1 a_2)^2 = \\ &= (p w_x - c_1 a_2)^2 + (p w_y - s_1 a_2)^2 - p w_x^2 - p w_y^2 - a_2^2 \end{aligned}$$

αντικαθιστώντας το αποτέλεσμα στην προηγούμενη εξίσωση παίρνουμε:

$$p w_z^2 + (p w_x - c_1 a_2)^2 + (p w_y - s_1 a_2)^2 + a_4^2 + d_4^2 + 2 p w_z (a_4 s_{23} + d_4 c_{23}) + 2 (c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2) (d_4 s_{23} - a_4 c_{23}) = (d_3 + d_2)^2 + a_3^2$$

λαμβάνοντας υπόψιν ότι:

$$\left\{ \begin{array}{l} p w_z = -(a_4 s_{23} + d_4 c_{23} + a_3 s_2) \\ c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2 = a_4 c_{23} - d_4 s_{23} + a_3 c_2 \\ s_{23} = c_2 s_3 + s_2 c_3 \\ c_{23} = c_2 c_3 - s_2 s_3 \end{array} \right.$$

και ότι:

$$\begin{aligned} 2 p w_z (a_4 s_{23} + d_4 c_{23}) + 2 (c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2) (d_4 s_{23} - a_4 c_{23}) &= \\ = -2 (a_4 s_{23} + d_4 c_{23} + a_3 s_2) (a_4 s_{23} + d_4 c_{23}) + 2 (a_4 c_{23} - d_4 s_{23} + a_3 c_2) (d_4 s_{23} - a_4 c_{23}) &= \\ = -2 a_4^2 - 2 d_4^2 - 2 a_3 s_2 (a_4 s_{23} + d_4 c_{23}) + 2 a_3 c_2 (d_4 s_{23} - a_4 c_{23}) &= \\ = -2 a_4^2 - 2 d_4^2 - 2 a_3 [s_2 (a_4 s_{23} + d_4 c_{23}) + c_2 (a_4 c_{23} - d_4 s_{23})] &= \\ = -2 a_4^2 - 2 d_4^2 - 2 a_3 [s_2 [a_4 (c_2 s_3 + s_2 c_3) + d_4 (c_2 c_3 - s_2 s_3)] + c_2 [a_4 (c_2 c_3 - s_2 s_3) - d_4 (c_2 s_3 + s_2 c_3)]] &= \\ = -2 a_4^2 - 2 d_4^2 - 2 a_3 (a_4 c_3 - d_4 s_3) \end{aligned}$$

αντικαθιστούμε στην εξίσωση (3):

$$pw_z^2 + (pw_x - c_1 a_2)^2 + (pw_y - s_1 a_2)^2 - a_4^2 - d_4^2 - 2a_3(a_4 c_3 - d_4 s_3) = (d_3 + d_2)^2 + a_3^2$$

γράφουμε την παραπάνω εξίσωση στη μορφή  $C_1 \cos\theta_i + C_2 \sin\theta_i = C_3$

$$a_4 c_3 - d_4 s_3 = \frac{pw_z^2 + (pw_x - c_1 a_2)^2 + (pw_y - s_1 a_2)^2 - a_3^2 - a_4^2 - (d_3 + d_2)^2 - d_4^2}{2a_3}$$

από την οποία προκύπτει η λύση για την  $q_3$ :

$$q_3 = \text{Atan2}(a_4, d_4) - \text{Atan2}\left(K, \pm\sqrt{a_4^2 + d_4^2 - K^2}\right),$$

$$\text{όπου } K = \frac{pw_z^2 + (pw_x - c_1 a_2)^2 + (pw_y - s_1 a_2)^2 - a_3^2 - a_4^2 - (d_3 + d_2)^2 - d_4^2}{2a_3}$$

$$\text{ή αλλιώς } q_3 = 2\text{atan}^{-1}\left(\frac{-d_4 \pm \sqrt{a_4^2 + d_4^2 - K^2}}{a_4 + K}\right), \quad (\text{Q3})$$

Το  $\pm$  στις παραπάνω εξισώσεις οδηγεί σε δύο διαφορετικές λύσεις για την  $q_3$

Επαναδιατυπώνουμε την (1) κατά τέτοιο τρόπο ώστε όλο το αριστερό μέλος να είναι συναρτήσεως της  $q_3$  και γνωστών στοιχείων:

$$\begin{aligned} & {}^0T = {}^0T(q_1) {}^1T(q_2) {}^2T(q_3) {}^3T(q_4) {}^4T(q_5) {}^5T(q_6) \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow {}^0T = {}^0T {}^6T \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow [{}^0T]^{-1} {}^0T = {}^6T \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} c_1 c_{23} & s_1 c_{23} & -s_{23} & -a_3 c_3 - a_2 c_{32} \\ -c_1 s_{23} & -s_1 s_{23} & -c_{23} & a_3 s_3 + a_2 s_{32} \\ -s_1 & c_1 & 0 & -(d_3 + d_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & pw_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & pw_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & pw_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^6T, \quad (4)$$

Εξισώνοντας τα στοιχεία (1,4) και (2,4) και από τις δύο μεριές, προκύπτει:

$$\begin{aligned}
(1,4): & \quad c_1 c_{23} p w_x + s_1 c_{23} p w_y - s_{23} p w_z - a_3 c_3 - a_2 c_{23} = a_4 \\
(2,4): & \quad -c_1 s_{23} p w_x - s_1 s_{23} p w_y - c_{23} p w_z + a_3 s_3 + a_2 s_{23} = d_4
\end{aligned}
\left. \vphantom{\begin{aligned} (1,4): \\ (2,4): \end{aligned}} \right\} \Leftrightarrow$$

$$\begin{aligned}
& \Leftrightarrow \left. \begin{aligned} c_{23}(c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2) &= a_4 + a_3 c_3 + s_{23} p w_z \\ s_{23}(c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2) &= a_3 s_3 - d_4 - c_{23} p w_z \end{aligned} \right\}
\end{aligned}$$

Λύνουμε ταυτόχρονα τις τελευταίες δύο εξισώσεις ως προς  $C_{23}$  και  $S_{23}$ :

$$c_{23} = \frac{a_4 + a_3 c_3 + s_{23} p w_z}{c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2}, \quad s_{23} = \frac{a_3 s_3 - d_4 - c_{23} p w_z}{c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2}$$

$$\begin{aligned}
& s_{23}(c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2) = a_3 s_3 - d_4 - \frac{a_4 + a_3 c_3 + s_{23} p w_z}{c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2} p w_z \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow s_{23}(c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2) = a_3 s_3 - d_4 + \frac{(-a_4 - a_3 c_3) p w_z + s_{23} p w_z^2}{c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2} \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow s_{23}[(c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2)^2 + p w_z^2] = (-a_4 - a_3 c_3) p w_z + (a_3 s_3 - d_4)(c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2) \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow s_{23} = \frac{(-a_4 - a_3 c_3) p w_z + (a_3 s_3 - d_4)(c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2)}{p w_z^2 + (c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2)^2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& c_{23}(c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2) = a_4 + a_3 c_3 + \frac{a_3 s_3 - d_4 - c_{23} p w_z}{c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2} p w_z \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow c_{23}(c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2) = a_4 + a_3 c_3 + \frac{(a_3 s_3 - d_4) p w_z - c_{23} p w_z^2}{c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2} \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow c_{23}[(c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2)^2 + p w_z^2] = (a_3 s_3 - d_4) p w_z + (a_4 + a_3 c_3)(c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2) \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow c_{23} = \frac{(a_3 s_3 - d_4) p w_z + (a_4 + a_3 c_3)(c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2)}{p w_z^2 + (c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2)^2}
\end{aligned}$$

$$c_{23} = \frac{(a_3 s_3 - d_4) p w_z + (a_4 + a_3 c_3)(c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2)}{p w_z^2 + (c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2)^2}$$

$$s_{23} = \frac{(-a_4 - a_3 c_3) p w_z + (a_3 s_3 - d_4)(c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2)}{p w_z^2 + (c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2)^2}$$

Επειδή οι παρονομαστές είναι όμοιοι και θετικοί μπορούμε να λύσουμε ως προς το άθροισμα των γωνιών  $q_2$  και  $q_3$

$$q_{23} = \text{Atan}2 = \left\{ \begin{aligned} & (-a_4 - a_3 c_3) p w_z + (a_3 s_3 - d_4)(c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2), \\ & (a_3 s_3 - d_4) p w_z + (a_4 + a_3 c_3)(c_1 p w_x + s_1 p w_y - a_2) \end{aligned} \right\}, \quad (Q23)$$

Η εξίσωση αυτή δίνει τέσσερις λύσεις, σύμφωνα με τους τέσσερις δυνατούς συνδυασμούς λύσεων που προκύπτουν από τις λύσεις των  $q_1$  και  $q_3$ .

Με γνωστές πλέον τις  $q_3$  και  $q_{23}$  υπολογίζουμε τέσσερις δυνατές λύσεις για την  $q_2$  από τον τύπο:

$$q_2 = q_{23} - q_3, \quad (Q2)$$

### 6.3.3 Υπολογισμός $q_4, q_5, q_6$

Τώρα όλο το αριστερό μέλος της (4) είναι γνωστό. Εξισώνουμε τα στοιχεία (1,3) και (3,3) και από τις δύο μεριές:

$$\left. \begin{array}{l} (1,3): \quad r_{13}c_1c_{23} + r_{23}s_1c_{23} - r_{23}s_{23} = -c_4s_5 \\ (3,3): \quad -r_{13}s_1 + r_{23}c_1 = s_4s_5 \end{array} \right\} \Leftrightarrow \begin{array}{l} c_4s_5 = -r_{13}c_1c_{23} - r_{23}s_1c_{23} + r_{23}s_{23} \\ s_4s_5 = -r_{13}s_1 + r_{23}c_1 \end{array}$$

Με την προϋπόθεση ότι  $s_5 \neq 0$  λύνουμε ως προς  $q_4$ :

$$q_4 = \text{Atan2}(-r_{13}s_1 + r_{23}c_1, -r_{13}c_1c_{23} - r_{23}s_1c_{23} + r_{23}s_{23}), \quad (Q4)$$

Εάν  $s_5 = 0$ , έχουμε την ειδική περίπτωση συγγραμμικότητας των αξόνων 4 και 6, όπου αμφότεροι προκαλούν την ίδια κίνηση στο άκρο του εργαλείου. Σε αυτή την περίπτωση μπορούν βρεθεί λύση μόνο αν χρησιμοποιηθεί το άθροισμα ή η διαφορά των γωνιών  $q_4$  και  $q_6$ . Σε αυτή την περίπτωση ελέγχεται αν και οι δύο παράγοντες της εξίσωσης  $\text{Atan2}$  στην (Q4) είναι κοντά στο μηδέν. Τότε η  $q_4$  επιλέγεται αυθαίρετα και μετά τον υπολογισμό της  $q_6$  ξαναυπολογίζεται ανάλογα.

Λαμβάνουμε υπόψιν και πάλι την εξίσωση (4) την οποία και επαναδιατυπώνουμε ώστε όλο το αριστερό μέρος να ορίζεται από γνωστά στοιχεία και την γωνία  $q_4$ :

$$[{}^0_4T]^{-1} {}^0_6T = {}^6_4T = {}^5_4T {}^6_5T$$

Εξισώνουμε τα στοιχεία (1,3) και (3,3)

$$\begin{array}{l} (1,3): \quad r_{13}(c_1c_4c_{23} + s_1s_4) + r_{23}(s_1c_4c_{23} - c_1s_4) - r_{33}c_4s_{23} = -s_5 \\ (3,3): \quad -r_{13}c_1s_{23} - r_{23}s_1s_{23} - r_{33}c_{23} = c_5 \end{array}$$

και στη συνέχεια λύνουμε ως προς  $q_5$  :

$$q_5 = \text{Atan2}(s_5, c_5) \Leftrightarrow \text{Atan2}[-r_{13}(c_1 c_4 c_{23} + s_1 s_4) - r_{23}(s_1 c_4 c_{23} - c_1 s_4) + r_{33} c_4 s_{23}, -r_{13} c_1 s_{23} - r_{23} s_1 s_{23} - r_{33} c_{23}] \quad (\text{Q5})$$

Για άλλη μία φορά ακολουθούμε την ίδια μέθοδο και επαναδιατυπώνουμε την εξίσωση (4) για την εύρεση της  $q_6$  , οπότε υπολογίζουμε τον πίνακα  ${}^0_5T^{-1}$  και τον γράφουμε στην μορφή:

$$[{}^0_5T]^{-1} {}^0_6T = {}^6_5T$$

Εξισώνοντας τα στοιχεία (3,1) και (1,1), υπολογίζουμε:

$$(3,1): r_{11}(c_1 s_4 c_{23} - s_1 c_4) + r_{21}(s_1 s_4 c_{23} - c_1 c_4) - r_{31} s_4 s_{23} = -s_6$$

$$(1,1): r_{11}(c_1 c_4 c_5 c_{23} + s_1 s_4 c_5 - c_1 s_5 s_{23}) + r_{21}(s_1 c_4 c_5 c_{23} - c_1 s_4 c_5 - s_1 s_5 s_{23}) - r_{31}(c_4 c_5 s_{23} + s_5 c_{23}) = c_6$$

Επομένως υπολογίζεται η γωνία  $q_6$  : (Q6)

$$q_6 = (s_6, c_6)$$

Από τους συνδυασμούς των γωνιών  $q_1, q_2, q_3$  προκύπτουν τέσσερις λύσεις για τις  $q_4, q_5, q_6$  ενώ ακόμα τέσσερις λύσεις για τις τρεις τελευταίες προκύπτουν από την αναστροφή του καρπού και περιγράφονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} q_4' &= q_4 + 180^\circ \\ q_5' &= -q_5 \\ q_6' &= q_6 + 180^\circ \end{aligned}$$

Προκύπτουν λοιπόν οκτώ δυνατοί συνδυασμοί για τις αρθρώσεις. Η συνολική ροή υπολογισμού τους φαίνεται παρακάτω.

$$q_{1,1} \Rightarrow \begin{cases} q_{3,1} \Rightarrow q_{23,1} \Rightarrow q_{2,1} \Rightarrow \begin{cases} q_{5,1} \Rightarrow q_{6,1} \Rightarrow q_{4,1} \\ q_{5,2} \Rightarrow q_{6,2} \Rightarrow q_{4,2} \end{cases} \\ q_{3,2} \Rightarrow q_{23,2} \Rightarrow q_{2,2} \Rightarrow \begin{cases} q_{5,3} \Rightarrow q_{6,3} \Rightarrow q_{4,3} \\ q_{5,4} \Rightarrow q_{6,4} \Rightarrow q_{4,4} \end{cases} \end{cases}$$

$$q_{1.2} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} q_{3.3} \Rightarrow q_{23.3} \Rightarrow q_{2.3} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} q_{5.5} \Rightarrow q_{6.5} \Rightarrow q_{4.5} \\ q_{5.6} \Rightarrow q_{6.6} \Rightarrow q_{4.6} \end{array} \right. \\ \\ q_{3.4} \Rightarrow q_{23.4} \Rightarrow q_{2.4} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} q_{5.7} \Rightarrow q_{6.7} \Rightarrow q_{4.7} \\ q_{5.8} \Rightarrow q_{6.8} \Rightarrow q_{4.8} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Οι οκτώ συνδυασμοί πρέπει να ελεγχθούν ώστε να προκύψουν αυτοί που συμφωνούν με τον πίνακα-στόχο  ${}^0T$ . Από τους συνδυασμούς που συμφωνούν με τον πίνακα-στόχο, πρέπει να επιλεγεί ένας μόνο συνδυασμός. Εφόσον δεν υπάρχουν άλλοι περιορισμοί, η επιλογή αυτή γίνεται με μοναδικό κριτήριο την ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων κινήσεων. Στην περίπτωση δηλ που πρέπει να μετακινηθεί το ρομπότ από ένα σημείο που περιγράφεται με το πλαίσιο {A} σε ένα με πλαίσιο {B}, τότε από όσες λύσεις προκύπτουν από την αντίστροφη κινηματική ανάλυση και συμφωνούν με τον πίνακα-στόχο, επιλέγεται ο συνδυασμός που έχει το ελάχιστο συνολικό άθροισμα της διαφοράς στροφής των αρθρώσεων από το {A} στο {B}:

$$\sum_{i=1}^{i=\text{αριθμός σωστήν λύσεων}} |q_{\{A\}_i} - q_{\{B\}_j}|, \text{ για } j=6 \text{ (αρθρώσεις)}$$

Δεδομένου λοιπόν του τελικού σημείου του καρπού, καθώς και του τελικού προσανατολισμού του, μπορούμε να υπολογίσουμε οκτώ διαφορετικούς συνδυασμούς γωνιών για τις αρθρώσεις του ρομποτικού βραχίονα. Ο χρήστης όμως ποτέ δεν δίνει σαν input στο ρομπότ το προσανατολισμό και θέση του καρπού, παρά του τελικού άκρου του εργαλείου του. Ενώ όλα αυτά πρέπει να ορίζονται βάση ενός γνωστού συστήματος συντεταγμένων στο ρομπότ.

#### 6.4 Ευρέως χρησιμοποιούμενα «πλαίσια» στη ρομποτική

Για την καλύτερη προσέγγιση των παραπάνω διαδικασιών χρησιμοποιούνται ευρέως στο χώρο της ρομποτικής κάποια πλαίσια/frames που είναι γνωστά και σαν standard frames (Σχήμα 6.3):

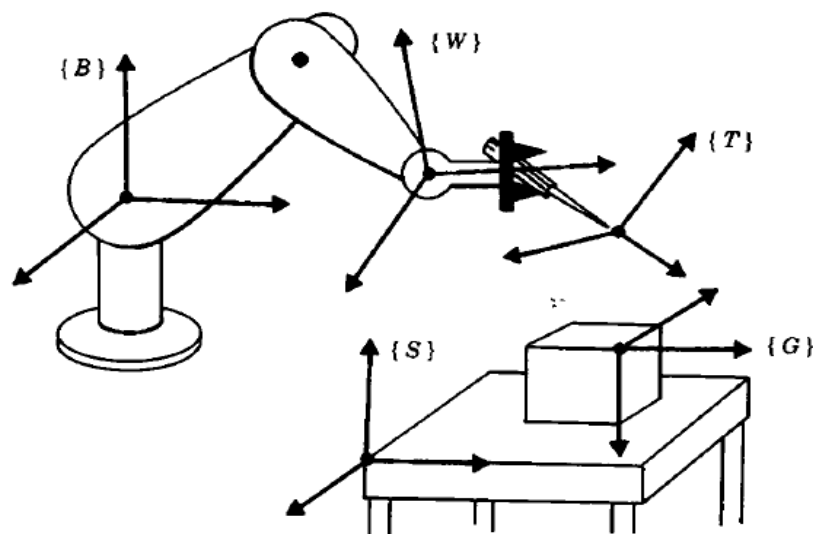
- Το frame της βάσης του ρομπότ «Base frame» το οποίο περιγράφεται σαν {B}

- Το frame του επιθυμητού σημείου προσέγγισης/στόχου, «Goal frame» ή  $\{G\}$
- Το frame του χώρου εργασίας του ρομπότ, «Station frame» ή  $\{S\}$
- Το frame του καρπού του ρομποτικού βραχίονα, «Wrist frame» ή  $\{W\}$
- Το frame του άκρου του εργαλείου του ρομπότ, «Tool frame» ή  $\{T\}$

Αρχικά ο χρήστης ορίζει στο σύστημα την θέση που επιθυμεί να βρίσκεται το σύστημα συντεταγμένων του σταθμού  $\{S\}$ . Αυτό ορίζεται ως προς το σύστημα συντεταγμένων της βάσης του ρομπότ  $\{B\}$ . Στην συνέχεια ο χρήστης ορίζει το σύστημα συντεταγμένων του εργαλείου  $\{T\}$ . Διαφορετικά εργαλεία ορίζονται από διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων, ενώ ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται καθώς το ίδιο εργαλείο ενσωματωμένο με διαφορετικούς τρόπους στο ρομπότ, μπορεί να περιγράφεται από διαφορετικό frame. Γενικά σαν  $\{T\}$  ορίζουμε το σημείο του εργαλείου που θέλουμε να ταυτιστεί με το τελικό σημείο προσέγγισης. Το  $\{T\}$  ορίζεται σχετικά με το  $\{W\}$ .

Ο χρήστης ορίζει το  $\{G\}$ , ως προς το  $\{S\}$ , κάθε φορά που ζητάει από το ρομπότ να εκτελέσει μία κίνηση. Η τελική περιγραφή του  $\{T\}$  θα πρέπει να ταυτίζεται με αυτή του  $\{G\}$  μετά το πέρας της κίνησης.

$$\{T\} = \{G\}$$



Σχήμα 26: Ευρέως χρησιμοποιούμενα frames



Ο αλγόριθμος υπολογισμού της αντίστροφης κινηματικής που περιγράψαμε παραπάνω λύνεται δεδομένου του frame του καρπού ως προς την βάση.

$${}^B_T = {}^B_S {}^S_G {}^G_T {}^T_W^{-1}$$

# 7

## *Ανάπτυξη ΕΠΕ με το λογισμικό*

### *3DVIA Virtools*

Η πλατφόρμα προγραμματισμού 3DVIA Virtools ήταν αυτή που επιλέχθηκε για την μοντελοποίηση του ΕΠΕ των μηχανών που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 5. Με το εξειδικευμένο αυτό εργαλείο προσομοιώσεων μπορεί κανείς να συνθέσει διαδραστικές εικονικές εφαρμογές χρησιμοποιώντας μία σειρά από πολλά διαφορετικά εργαλεία.

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στις δυνατότητες και τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί το συγκεκριμένο λογισμικό. Περιγράφονται οι βασικές αρχές προγραμματισμού με αυτό, τα βασικά μέρη του πυρήνα του και των εργαλείων που προσφέρονται στον χρήστη, καθώς και το γραφικό περιβάλλον διεπαφής. Οι Περιγραφές που δίνονται δεν μπορούν να αντικαταστήσουν ένα εγχειρίδιο χρήσης. Είναι όμως αρκετά περιεκτικές ώστε να ανταποκρίνονται στον στόχο τους, που δεν είναι άλλος από την εισαγωγή του αναγνώστη στην λογική προγραμματισμού ΕΠΕ με το Virtools.

## 7.1 3DVIA Virtools

Το 3DVIA Virtools είναι ένα λογισμικό πακέτο ανάπτυξης διαδραστικών εφαρμογών τρισδιάστατου περιεχομένου που χρησιμοποιεί ένα ευρύ σύνολο τεχνολογιών. Οι βασικές χρήσεις του Virtools ομαδοποιούνται σε πέντε βασικές κατηγορίες.

1. Εφαρμογή δημιουργίας συνθέσεων 3D Περιεχομένου      Authoring application
2. Μηχανή Διαχείρισης Συμπεριφορών      Behavioural Engine
3. Μηχανή Απεικόνισης Τρισδιάστατου Περιεχομένου      Rendering Engine
4. Διαδικτυακό Εργαλείο Αναπαραγωγής Πολυμέσων      Web Player
5. Εργαλείο ανάπτυξης λογισμικού      Software Development Kit (SDK)

Μέσα στο Virtools ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει συνθέσεις - compositions (cmo) εμπλουτισμένες με διαδραστικό τρισδιάστατο περιεχόμενο. Τα βασικά πρότυπα της βιομηχανίας των πολυμέσων όπως 3D μοντέλα, animations, εικόνες και ήχοι παίρνουν ζωή προσδίδοντάς τους «συμπεριφορές».

Σαν συμπεριφορά χαρακτηρίζεται μία περιγραφή του πώς ένα συγκεκριμένο αντικείμενο δρα μέσα στο εικονικό περιβάλλον. Για το λόγο αυτό, υπάρχει μια καθιερωμένη βιβλιοθήκη επαναχρησιμοποιούμενων στοιχείων δόμησης συμπεριφοράς (Behaviour Building blocks - BBs), διαθέσιμα μέσα στο Virtools, τα οποία επιτρέπουν στο χρήστη να δημιουργήσει σχεδόν οποιοδήποτε τύπου περιεχόμενο, μέσω ενός απλού γραφικού περιβάλλοντος, χωρίς να γράψει ούτε μία γραμμή κώδικα. Αυτά αποτελούν μέρος του **Behavioural Engine** το οποίο είναι και η κύρια άγουσα δύναμη πάνω στην οποία βασίζεται η σωστή λειτουργία του διαδραστικού τρισδιάστατου περιεχομένου που δημιουργείται, ενώ συχνά αναφέρεται και ως CK2, που είναι το όνομα του πυρήνα του λογισμικού. Το CK2 εκτελεί και επεξεργάζεται τις συνθέσεις (cmo), καθώς και διαχειρίζεται όλες τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ του χρήστη και των στοιχείων της σύνθεσης, τα οποία έχουν εμπλουτιστεί με συμπεριφορές (Behavioural Objects). Από την στιγμή που όλες οι συμπεριφορές έχουν υποστεί επεξεργασία για ένα δεδομένο πλαίσιο, το CK2 παρέχει τις κατάλληλες πληροφορίες στο Render Engine (CK2\_3D), έτσι ώστε τα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης να εμφανίζονται στον χρήστη.

Μέρος του Behavioural Engine είναι και ο VSL Editor (VSL - Virtools Scripting Language), ένα εργαλείο σύνταξης προγραμματιστικού κώδικα, το οποίο δίνει πρόσβαση στις τάξεις/κλάσεις (Classes) του Virtools SDK μέσω των γλωσσών προγραμματισμού JavaScript και LUA. Το VSL Editor παρέχει ένα σύστημα επισήμανσης κειμένου και μία ολοκληρωμένη και αυτοματοποιημένη προβολή των λειτουργικών μεταβλητών. Πέραν όμως αυτού, υπάρχει μία σειρά από στελέχη που βοηθούν το Behavioural Engine να εκτελεί τα καθήκοντά του. Ορισμένα από αυτά τα στελέχη (όπως το Time Manager) είναι ενσωματωμένα στο Behavioural Engine, ενώ άλλα (όπως το Sound Manager) αποτελούν ξεχωριστά μέρη.

Το **Render Engine** στοχεύει στην απεικόνιση γραφικών, εικόνων και του animation σε πραγματικό χρόνο. Επιπροσθέτως, το **Virtools SDK** είναι μια σειρά από εργαλεία ανάπτυξης, τα οποία επιτρέπουν στους προγραμματιστές την πρόσβαση σε όλη τη χαμηλού επιπέδου λειτουργία που άγεται από την πλατφόρμα Virtools. Με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού C++ οι προγραμματιστές μπορούν μέσω του SDK να συνθέσουν προσαρμοσμένα στοιχεία δόμησης (custom Building Blocks) καθώς και Media Importers, Managers και Render Engines της αρεσκείας τους, με σκοπό την αντικατάσταση ή εμπλουτισμό των ήδη υπαρχόντων.

Επιπλέον πλεονεκτήματα του είναι ότι προσφέρει ένα **Web Player** για την αναπαραγωγή συνθέσεων (cmo) μέσω ενός Internet explorer, αλλά και μία σειρά από βιβλιοθήκες που ενσωματώνονται στη σειρά 3DVIA Virtools. Μερικές από αυτές τις βιβλιοθήκες είναι :

- Physics Library – Βιβλιοθήκη Συμπεριφορών σχετικών με του νόμους της Φυσικής
- AI Library – Βιβλιοθήκη Συμπεριφορών Τεχνητής Νοημοσύνης
- Multiuser Server – Δίκτυο Πολλών Χρηστών
- VR Library – Βιβλιοθήκη Συμπεριφορών Εικονικής Πραγματικότητας

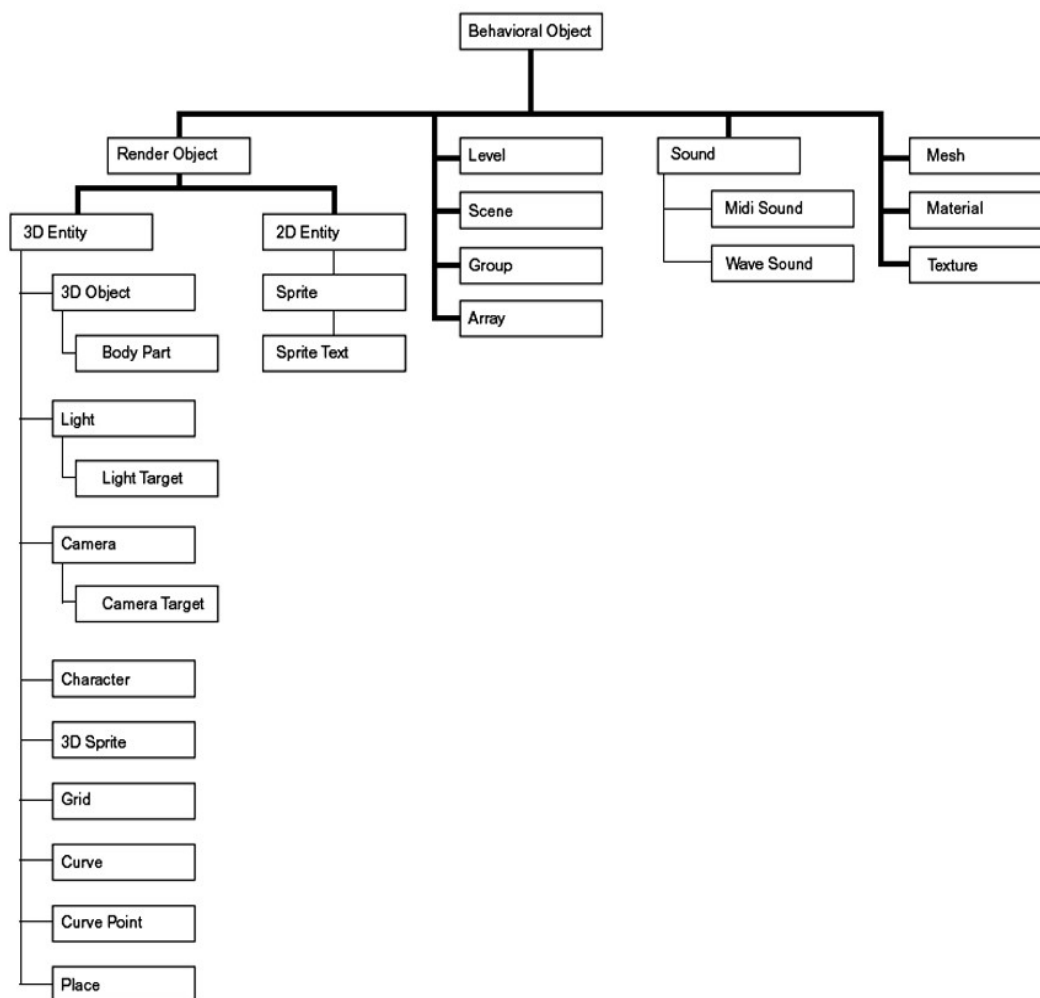
Για παράδειγμα, μέσω της Physics Library μπορεί να προσομοιωθεί οποιοδήποτε τρισδιάστατο εικονικό περιβάλλον ρεαλιστικά, διατηρώντας πολλές από τις φυσικές του ιδιότητες. Εικονικά περιβάλλοντα, συνδεδεμένα με φυσικές ιδιότητες, έχουν την

ικανότητα να υπακούν στους θεμελιώδεις φυσικούς νόμους του Νεύτωνα, της μάζας, της βαρύτητας, της τριβής, της ελαστικότητας, της κρούσης, των φυσικών περιορισμών μεταξύ αντικειμένων και προηγμένων φυσικών γνωρισμάτων που απαρτίζουν την άνωση, τη συμπεριφορά του αυτοκινήτου και τα δυναμικά πεδία. Πιο συγκεκριμένα, ο εντοπισμός της ακριβούς, σε πραγματικό χρόνο σύγκρουσης, συσχετισμένος με την προσομοίωση των φυσικών ιδιοτήτων, θεωρείται σημαντική λειτουργία στην πορεία της ανάπτυξης πραγματικών συστημάτων όπως αυτά των συστημάτων κατεργασιών, διότι αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να συμβάλει σημαντικά αφενός στο ρεαλισμό του εικονικού περιβάλλοντος και αφετέρου στη διαδικασία του σχεδιασμού εγκαταστάσεων.

## ***7.2 Ταξική Ιεραρχία και Σχεδιαστικά Στοιχεία***

Τα σχεδιαστικά στοιχεία στο περιβάλλον του Virtools διαχωρίζονται σε διαφορετικές τάξεις (classes) και συντελούν οντότητες που δημιουργούνται στο Virtools όπως οι Καμπύλες – Curves και Σκηνές – Scenes, αλλά και εξωτερικά μέσα τα οποία εισέρχονται στη Virtools πλατφόρμα όπως εικονικά μοντέλα, κινούμενα σχέδια (animation) και ήχοι. Κάθε σχεδιαστικό στοιχείο σε ένα ΕΠΕ είναι μία περίπτωση τάξης - κλάσης, που περιγράφεται από έναν συγκεκριμένο ταξικό ορισμό. Ο όρος "Ck Class" είναι αντιπροσωπευτικός για κάθε τάξη ή ταξικό ορισμό που χρησιμοποιείται από τον εικονικό κόσμο του Virtools πχ. CKCharacter, CKLight. Για παράδειγμα, υπάρχει μια τάξη φωτισμού μέσα σε ένα ΕΠΕ, στην οποία ανήκουν όλοι οι τύποι φωτός. Κάθε φως είναι μια περίπτωση τάξης φωτός κι έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, στα οποία συμπεριλαμβάνονται το χρώμα και το φάσμα ακτινοβολίας του φωτός κτλ.

Η ταξική ιεραρχία του Virtools, με την οποία αποσαφηνίζεται ο συσχετισμός των διαφορετικών τάξεων παριστάνεται στο διάγραμμα του σχήματος 7.1. Τα σχεδιαστικά στοιχεία ελέγχονται από εκτελεστικές μεθόδους οι οποίες είναι ενσωματωμένες μέσα σε συμπεριφορές και παραμετρικές λειτουργίες. Κάθε μοναδική CKClass μπορεί να υιοθετεί μόνο τον τύπο συμπεριφοράς που είναι ειδικά σχεδιασμένος για τα στοιχεία που ανήκουν σε αυτή τη CKClass.



Σχήμα 7.1: 3DVIA Virtools - Ταξική Ιεραρχία

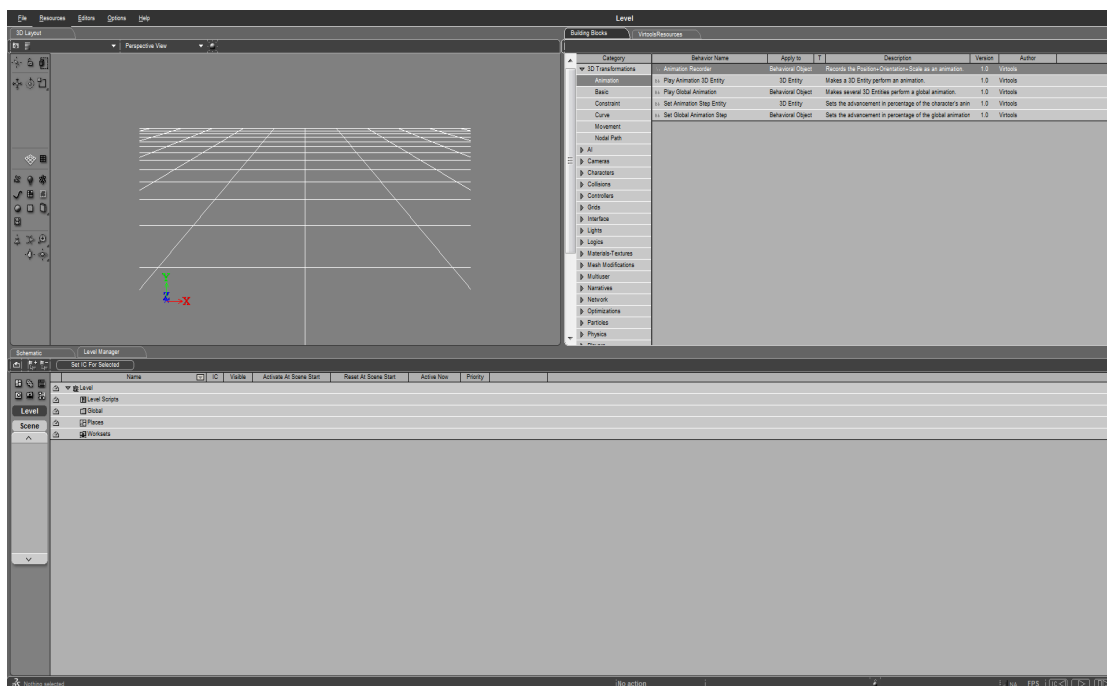
Για παράδειγμα, υπάρχει μια CKClass που ονομάζεται CKCamera. Μόνο οι CKCameras μπορούν να χρησιμοποιούν τις συμπεριφορές που είναι ειδικά σχεδιασμένες για κάμερες πχ. την Camera Orbit κτλ. Κάθε σχεδιαστικό στοιχείο έχει τα δικά του χαρακτηριστικά που εφαρμόζονται σε αντικείμενα της CKClass του. Αυτά τα χαρακτηριστικά προσαρμόζονται μέσω της εγκατάστασης της CKClass ή του προγραμματισμού συμπεριφοράς. Για παράδειγμα, ένα φως χαρακτηρίζεται από τον τύπο του φωτός, όπως: σημείο, διεύθυνση κτλ. , το χρώμα του φωτός όπως: άσπρο, μπλε κτλ., το φάσμα μέσα στο οποίο ακτινοβολεί και ούτω καθεξής. Αυτά τα χαρακτηριστικά ορίζονται μέσω της εγκατάστασης του φωτός ή ενός σχετικού προγραμματισμού συμπεριφοράς. Ανάλογα με τον τύπο των τάξεων, ένας αριθμός διαφορετικών ορισμών για σχεδιαστικά στοιχεία παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα σε αλφαβητική σειρά. Για περισσότερες λεπτομέρειες μπορεί να ανατρέξει κανείς στα εγχειρίδια λειτουργίας του Virtools.

<b>BeObject – Behavioural Object</b>	αντικείμενο στο οποίο εφαρμόζεται μια συμπεριφορά
<b>RenderObject</b>	αντικείμενο το οποίο απεικονίζεται/είναι ορατό στο Play Mode
<b>2D Entity(2Δ Οντότητα)</b>	αντικείμενο το οποίο έχει μήκος και πλάτος αλλά όχι βάθος
<b>Sprite Text(Κείμενο)</b>	δισδιάστατη οντότητα που χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση κειμένου μέσα σε ένα παράθυρο απεικόνισης
<b>Character (Χαρακτήρας)</b>	ένας τύπος τρισδιάστατης οντότητας που δρα σαν έξυπνη οντότητα, οδηγούμενης από το χρήστη του λογισμικού. Πχ οντότητες γνωστές και ως avatar ή πράκτορες
<b>Camera(Κάμερα)</b>	αντικείμενο που ορίζει μια οπτική γωνία
<b>Curve(Καμπύλη)</b>	ένα σύνολο από τρισδιάστατες οντότητες που ορίζουν μια καμπύλη στον τρισδιάστατο χώρο
<b>Grid(Πλέγμα)</b>	σύνολο 2Δ δεδομένων των οποίων η τιμή βασίζεται σε 3Δ συντεταγμένες
<b>Light(Φως)</b>	αντικείμενο που παρέχει φωτισμό
<b>Array(Πίνακας)</b>	ένα σύνολο δεδομένων εκφρασμένων σε μορφή πίνακα
<b>Group(Ομάδα)</b>	συλλογή στοιχείων χωρίς περιορισμούς ως προς τον τύπο τους.
<b>Level(Επίπεδο)</b>	το γονικό αντικείμενο - parent object (ύψιστης ιεραρχίας) ολόκληρης της σύνθεσης
<b>Material(Υλικό)</b>	τα επιφανειακά χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου
<b>Place(Μέρος)</b>	μία συλλογή από γεωγραφικά συσχετιζόμενα αντικείμενα
<b>Scene(Σκηνή)</b>	μία συλλογή από προσωρινά συσχετιζόμενα αντικείμενα
<b>Sound(Ήχος)</b>	ήχος αποθηκευμένος σε ψηφιακή μορφή
<b>Texture(Υφή)</b>	μία εικόνα που χρησιμοποιείται για να παρέχει υψηλή λεπτομέρεια στην επιφάνεια ενός αντικειμένου

Πίνακας 7.1: 3DVIA Virtools - Ορισμοί τάξεων/κλάσεων

### 7.3 Γραφικό περιβάλλον διεπαφής - Graphical User Interface (GUI)

Το Graphical User Interface χρησιμοποιείται σαν κύριος χώρος εργασίας κατά τη διάρκεια πολλαπλών φάσεων προγραμματισμού και VE ανάπτυξης. Η παρακάτω εικόνα δείχνει το GUI του Virtools κατά την εκκίνηση. Χρησιμοποιείται ένα σύστημα με καρτέλες και παράθυρα που μπορούν να μετακινηθούν, να αλλάξει το μέγεθος τους ή να εμφανίζονται σαν ξεχωριστά παράθυρα. Το ενεργό παράθυρο εμφανίζεται με μία μαύρη καρτέλα, ενώ όλα τα ανενεργά παράθυρα έχουν γκρι καρτέλες.

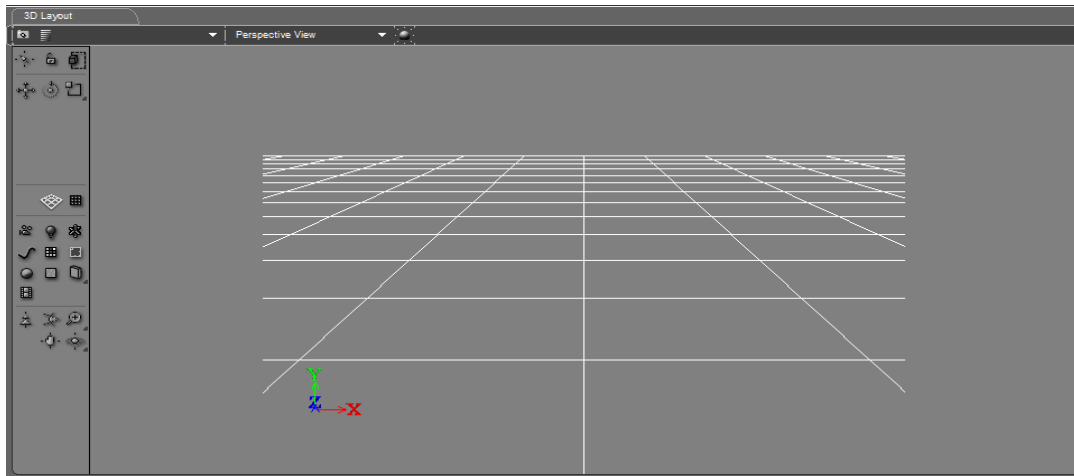


Σχήμα 7.2: Γραφικό Περιβάλλον Virtools - Κεντρικό παράθυρο

Το GUI του Virtools χωρίζεται αποτελεσματικά σε τρεις βασικές περιοχές, με μια γραμμή μενού στο πάνω μέρος και μια γραμμή κατάστασης στο κάτω μέρος. Η επάνω αριστερή περιοχή περιέχει το παράθυρο τρισδιάστατης διάταξης (3D layout window), η πάνω δεξιά περιοχή περιέχει τις καρτέλες δεδομένων πόρων και συμπεριφορών. Ενώ το κάτω μισό της οθόνης, το Διαχειριστή Επιπέδου - Level Manager και το παράθυρο Παραστατικής Σύνθεσης - Schematic, που χρησιμοποιούνται για την οργάνωση των συνθέσεων και τη δημιουργία δεσμών ενεργειών, αντίστοιχα.

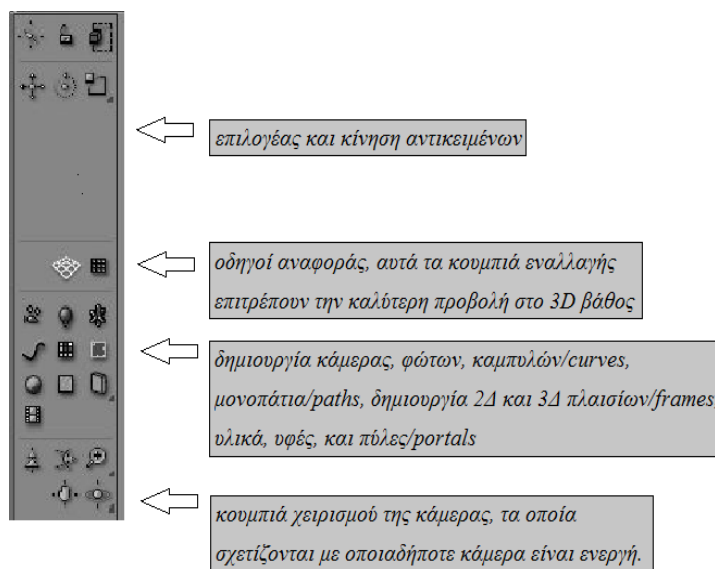


### 7.3.1 Το παράθυρο τρισδιάστατης διάταξης-3D Layout Window



Σχήμα 7.3: Παράθυρο τρισδιάστατης διάταξης - 3D Layout Window

Χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση του διαδραστικού περιεχομένου σε πραγματικό χρόνο και είναι εδώ όπου ο φυσικός κόσμος προσομοιώνεται. Τα κουμπιά στα αριστερά ελέγχουν την επιλογή και χειρισμό των αντικειμένων, δημιουργία νέων αντικειμένων, και τον χειρισμό της κάμερας. Από προεπιλογή, κοιτάμε τον υπάρχον εικονικό κόσμο μέσω μιας ενσωματωμένης "προοπτικής" κάμερας. Αυτή είναι διαθέσιμη μόνο στη λειτουργία σύνταξης.



Σχήμα 7.4: Επιλογές στο παράθυρο τρισδιάστατης διάταξης

Κατά μήκος του επάνω μέρους του παραθύρου μπορεί ο χρήστης να δει την τρέχουσα ενεργή κάμερα προβολής, αλλά και γενικές προτιμήσεις (που του επιτρέπουν πχ. να επιλέξει αυτό που βλέπει στο "authoring" ή "player" mode).

### 7.3.2 Level Manager, Schematic και γραμμή κατάστασης



Σχήμα 7.5: Διαχειριστής Επιπέδου - Level Manager

Στον Level Manager παρέχεται πρόσβαση σε όλα τα αντικείμενα και τα σενάρια του εικονικού κόσμου. Στο Schematic βρίσκονται τα σενάρια συμπεριφοράς που ενσωματώνονται στο ΕΠΕ.



Σχήμα 7.6: Γραμμή κατάστασης

Στην κάτω δεξιά γωνία της γραμμής κατάστασης (η γραμμή κατά μήκος του κάτω μέρους) είναι η επιλογή FPS – Frame Per Second (καρέ ανά δευτερόλεπτο), η επιλογή IC – Initial Conditions (αρχικές συνθήκες) με την οποία επανέρχεται η σύνθεση με όλα τα αντικείμενά της στις αρχικές συνθήκες που έχουν οριστεί, ένα κουμπί Play και ένα κουμπί Step, καθώς και συντεταγμένες. Επιπλέον υπάρχει ένα πεδίο καταγραφής πληροφοριών και συμβάντων, το οποίο, όταν ανοίξει, δίνει χρήσιμες πληροφορίες για την κατάσταση του συστήματος και τυχόν σφάλματα.

Άλλα σημαντικά εργαλεία τα που μπορεί να βρει ο χρήστης σε αυτό το επίπεδο είναι :

- **Εργαλείο εντοπισμού σφαλμάτων σεναρίων - Schematic Debugger:** για το συντονισμό του περιεχομένου.
- **Εργαλεία Εγκατάστασης Οντοτήτων - Entity Setup Tools:** για την επεξεργασία των παραμέτρων οποιουδήποτε αντικειμένου το οποίο έχει συμπεριφορές μέσα σε ένα εικονικό περιβάλλον.
- **Διαχειριστής Χαρακτηριστικών - Attribute Manager:** ο οποίος χρησιμοποιείται για να διευκολύνει την επεξεργασία των χαρακτηριστικών τιμών των αντικειμένων.

- **Διαχειριστής Ιεραρχιών - Hierarchy Manager:** για την παρουσίαση σε μορφή γραφήματος δέντρου των αντικειμένων που περιλαμβάνονται στα διαφορετικά επίπεδα. Την διαχείριση σχέσεων ιεραρχίας πατέρα – παιδιού (parent – child). Την απόδοση χαρακτηριστικών συμπεριφορών σε δισδιάστατες και τρισδιάστατες οντότητες. Την παραγωγή επαναχρησιμοποιούμενων συμπεριφορών (γνωστή και σαν inheritance) μέσω του συνδυασμού των ήδη προϋπαρχόντων.
- **Εργαλείο εντοπισμού σφαλμάτων παραμέτρων – Parameter Debugger:** για την επαλήθευση και την επεξεργασία των δεδομένων τιμών.
- **Διαχειριστής διαδρομών - Path Manager:** για την αναγνώριση διαδρομών προς πηγές δεδομένων που περιλαμβάνουν εικόνα, ήχο, βίντεο κτλ.
- **Διαχειριστής Δράσεων - Action Manager:** για την παραγωγή σεναρίων για συχνά χρησιμοποιούμενες λειτουργίες οι οποίες εκτελούν μια προκαθορισμένη εργασία πάνω σε μια παράμετρο ή μια επιλογή.
- **Profiler:** εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση και την καταγραφή του υπολογιστικού χρόνου που αφιερώνεται σε κάθε λειτουργία.

### 7.3.3 Data Resources and Building Blocks

Category	Behavior Name	Apply to	T	Description	Version	Author
3D Transformations	81) Add Child	3D Entity	T	Adds a child to the 3D Entity's hierarchy	1.0	Virtools
Animation	82) Rotate	3D Entity	T	Rotates the 3D Entity	1.0	Virtools
Basic	83) Rotate Around	3D Entity	T	Rotates a 3D Entity around another object	1.0	Virtools
Constraint	84) Scale	3D Entity	T	Scales the 3D Entity (relatively to its current size or not)	1.0	Virtools
Curve	85) Set Euler Orientation	3D Entity	T	Sets the orientation of a 3D Entity with Euler angles	1.0	Virtools
Movement	86) Set Local Matrix	3D Entity	T	Sets the Local Matrix of the 3D Entity	1.0	Virtools
Nodal Path	87) Set Orientation	3D Entity	T	Sets the orientation of a 3D Entity	1.0	Virtools
AI	88) Set Parent	3D Entity	T	Sets the Parent of a 3D Entity	1.0	Virtools
Cameras	89) Set Position	3D Entity	T	Sets the Position of a 3D Entity	1.0	Virtools
Characters	90) Set Quaternion Orientation	3D Entity	T	Sets the orientation of a 3D Entity with a quaternion	1.0	Virtools
Collisions	91) Set World Matrix	3D Entity	T	Sets the World Matrix of a 3D Entity	1.0	Virtools
Controllers	92) Translate	3D Entity	T	Translates a 3D Entity	1.0	Virtools
Grids						
Interface						
Lights						
Logics						
Materials-Textures						
Mesh Modifications						
Multituser						
Narratives						
Network						
Optimizations						
Particles						
Physics						
Players						
Shaders						
Sounds						
Video						
Visuals						
VR						
VSL						
Web						
World Environments						

Σχήμα 7.7: Καρτέλες δεδομένων

Το παράθυρο αυτό περιλαμβάνει δύο βασικές καρτέλες που λειτουργούν σαν βιβλιοθήκες δεδομένων. Στην καρτέλα Building Blocks διατίθενται έτοιμα δομικά διαγράμματα συμπεριφορών (BBs), ενώ στην Data Resources διατίθενται αναγνωρίσιμα δεδομένα από το σύστημα, που λειτουργούν σαν «πόροι» για την τροφοδοσία των συνθέσεων (όπως ένα 3D μοντέλο, μία εικόνα, ένας ήχος), αποθηκευμένα στη μορφή αρχείου (.nmo).

Όλα τα δεδομένα οργανώνονται σε μία δομή δένδρου. Κάνοντας κλικ σε έναν από τους δείκτες στο αριστερό τμήμα του παραθύρου αναπτύσσεται κάθε μία ενότητα με τα περιεχόμενά της στο δεξί τμήμα. Είναι δυνατή η αναπροσαρμογή του τρόπου παρουσίασης των δεδομένων σε καινούργιες κατηγορίες, όπως και ο εμπλουτισμός τους με καινούργια.

Για να συμπεριληφθεί κάποιος από τους έτοιμους πόρους και συμπεριφορές σε μία σύνθεση αρκούν απλές ενέργειες μεταφοράς και απόθεσης (drag and drop) τα από την πηγή τους μέσα στο παράθυρο τρισδιάστατης διάταξης ή και στο παράθυρο Schematic (στην περίπτωση των συμπεριφορών).

#### **7.4 Εισαγωγή στον Προγραμματισμό Συμπεριφορών**

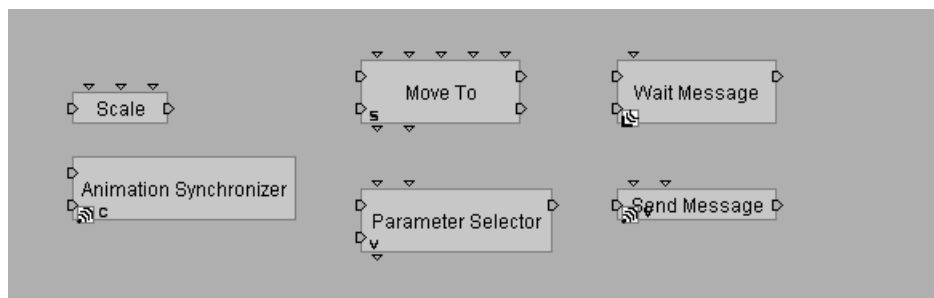
Μια συμπεριφορά ορίζεται σαν μια περιγραφή του πώς ένα σχεδιαστικό στοιχείο ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένη μορφή εισαγόμενων ερεθισμάτων. Αναθέτοντας μια συμπεριφορά σε ένα σχεδιαστικό στοιχείο, καθίσταται το στοιχείο διαδραστικό είτε με το χρήστη είτε με άλλα στοιχεία σε ένα εικονικό περιβάλλον. Με τις συμπεριφορές να είναι οι κύριες συλλήψεις στο περιβάλλον του Virtools, τα σχεδιαστικά στοιχεία μπορούν να θεωρηθούν εξολοκλήρου προερχόμενα από το Αντικείμενο Συμπεριφοράς (Behavioural Object - BeObject).

Μια συμπεριφορά μπορεί να εκφραστεί ως ένα στοιχείο δόμησης συμπεριφοράς - BB ή και σαν ένα Σενάριο - Script τα οποία αποτελούν την οπτική παρουσίαση της συμπεριφοράς και εφαρμόζονται σε ένα σχεδιαστικό στοιχείο μέσα από το Schematic View. Ένα σενάριο συνήθως είναι σε μορφή κειμένου. Παρόλα αυτά, το σενάριο που περιγράφεται είναι στην πραγματικότητα ένα σχηματικό διάγραμμα συμπεριφορών.

Υπάρχουν δύο μέρη που συνθέτουν ένα σενάριο κι αυτά είναι η επικεφαλίδα και το κυρίως σενάριο. Η επικεφαλίδα του σεναρίου επιδεικνύει τον ιδιοκτήτη και το όνομα του σεναρίου. Το κυρίως σενάριο συνήθως συντελείται από ένα ή περισσότερα στοιχεία δόμησης συμπεριφοράς, Γραφικά Συμπεριφοράς, Παραμέτρους, bLinks, pLinks και ούτω καθεξής. Η συνολική διαδικασία του προγραμματισμού συμπεριφοράς κανονικά αποτελείται από διάφορα εξαρτήματα και χαρακτηριστικά, τα οποία θα επεξηγούνται στις επόμενες παραγράφους.

#### 7.4.1 Στοιχεία Δόμησης Συμπεριφοράς BBs (Behaviour Building Blocks)

Είναι ο πρωταρχικός μηχανισμός που χρησιμοποιείται για να ενσωματώσει μια συγκεκριμένη εργασία και να εκπληρώσει συμπεριφορές. Υπάρχουν διάφοροι τύποι BBs, μερικοί από αυτούς παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.

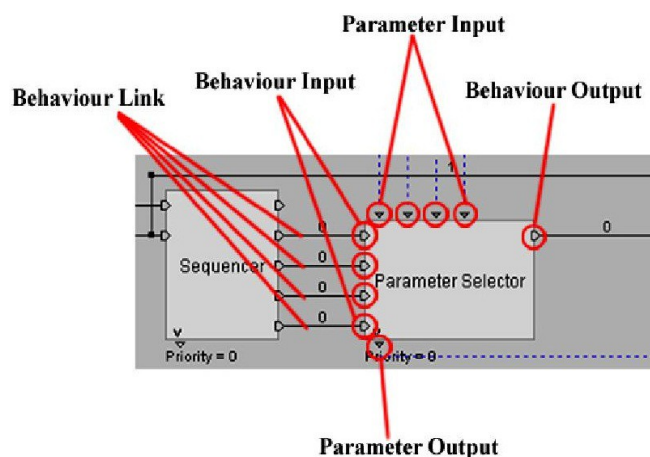


Σχήμα 7.8: Διάφορα Στοιχεία Δόμησης Συμπεριφοράς – Behaviour Building Blocks

#### 7.4.2 Πρωτογενή στοιχεία σύνθεσης των BBs

Ένα τυπικό Στοιχείο Δόμησης μπορεί να χωριστεί στα βασικά συστατικά στοιχεία:

- Εισαγωγή Συμπεριφοράς bIn (Behaviour Input)
- Εξαγωγή Συμπεριφοράς bOut (Behaviour Output)
- Σύνδεσμος Συμπεριφοράς bLink (Behaviour Link)
- Παράμετροι Εισόδου pIn (Parameter Input)
- Παράμετροι Εξόδου pOut (Parameter Output)
- Παράμετρος - Στόχος (Target Parameter)



Σχήμα 7.9: Πρωτογενή Στοιχεία Σύνθεσης ενός BB

Η Εισαγωγή Συμπεριφοράς - Behaviour Input εντοπίζεται στην αριστερή πλευρά ενός BB. Ένα BB έχει μία τουλάχιστον Εισαγωγή Συμπεριφοράς και ενεργοποιείται λαμβάνοντας ένα σήμα ενεργοποίησης σε ένα bIn. Όταν το BB ενεργοποιείται τότε και εκτελείται ένα μέρος ή ολόκληρος ο αλγόριθμος τον οποίο αντιπροσωπεύει.



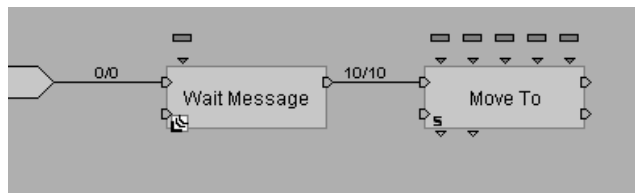
Σχήμα 7.10: Εισαγωγή Συμπεριφοράς - Behaviour Input

Αντίστοιχα ένα bOut ενεργοποιείται με το πέρας της επεξεργασίας που εκτελεί ένα BB στο αντίστοιχο frame/καρέ (της επαναληπτικής διαδικασίας).



Σχήμα 7.11: Εξαγωγή Συμπεριφοράς - Behaviour Output

Οι bLinks χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία συνδέσμων μεταξύ των BBs, από αυτούς καθορίζεται η συχνότητα με την οποία εκτελείται η διαδοχική επεξεργασία των BBs. Οι bLinks μεταδίδουν μια ροή ενεργοποίησης από το ένα BB στο άλλο, με σκοπό να επιτρέπουν τη διαδοχική εφαρμογή των συμπεριφορών. Ένας bLink μπορεί επίσης να συνδέσει το πρώτο BB με το σενάριο, καθώς και να συνδέσει bOuts με bIns. Επίσης, ένας bLink συνδέεται με μια καθυστέρηση, όπου η καθυστέρηση αυτή μπορεί να οριστεί κατά τη διάρκεια των πλαισίων συμπεριφοράς.



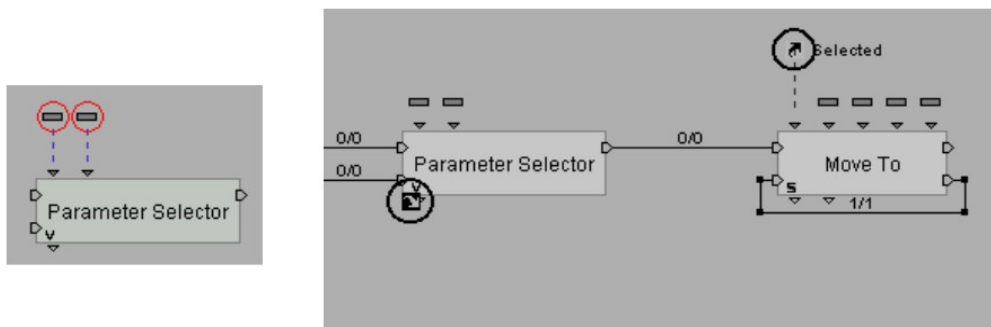
Σχήμα 7.12: Δύο Σύνδεσμοι Συμπεριφοράς – Behaviour Links, ο πρώτος σύνδεσμος από αριστερά έχει μία καθυστέρηση 0, ενώ ο δεύτερος 10

### 7.4.3 Παράμετροι – Parameters

Οι Παράμετροι χρησιμοποιούνται στη ορίζουν αλλά και μοιράζονται τιμές μεταξύ συμπεριφορών, δίνουν τιμές στα Χαρακτηριστικά των Αντικειμένων Συμπεριφοράς BeObjects. Οι Παράμετροι είναι παρόμοιες με τις μεταβλητές στον παραδοσιακό προγραμματισμό. Πολλές συμπεριφορές χρησιμοποιούν τις τιμές των pIns για τον έλεγχο της επεξεργασίας τους. Μια Παράμετρος έχει όνομα και τιμή που εκφράζονται με ένα δεδομένο τρόπο, όπως: 3D οντότητα (3D entity), χορδή (string), ακέραιος (integer), διάνυσμα (vector) κτλ. Είναι είτε στατική, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η τιμή της είναι σταθερή, είτε δυναμική, με τιμή που μεταβάλλεται ανάλογα με τους αντίστοιχους παράγοντες.

Οι Παράμετροι Εισόδου (pIn) είναι τα ορίσματα της συνάρτησης που περιέχεται σε ένα BB και μπορούν, εφόσον εφαρμοστούν, να επιτρέψουν την τροποποίηση του ονόματος και του τύπου τους. Οι Παράμετροι Εξόδου (pOut) είναι το αποτέλεσμα της συνάρτησης/αλγορίθμου του BB, που προκύπτουν μετά την εκτέλεσή του. Επίσης μπορούν να επιτρέψουν την τροποποίηση του ονόματος και του τύπου τους αν χρειαστεί. Περισσότερα για τις Παραμέτρους βρίσκονται στην ομώνυμη παράγραφο.

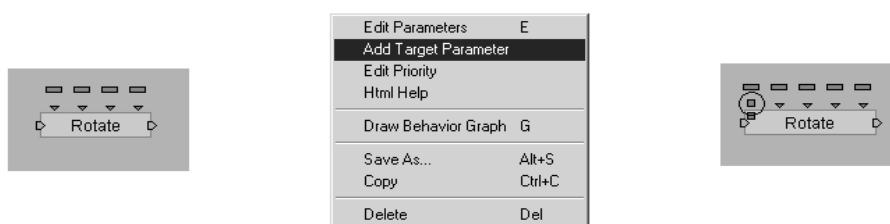
Η τιμή μιας παραμέτρου συχνά αποδίδεται σε μια Συμπεριφορά ή σε μια Λειτουργία Παραμέτρου, με τη βοήθεια ενός Συνδέσμου Παραμέτρων (pLink) ή μιας Συντόμευσης (Shortcut). Ένας Σύνδεσμος Παραμέτρων είναι μια σύνδεση που περνάει την τιμή μιας παραμέτρου από μια τοπική παράμετρο ή μια pOut, σε μια pIn. Αντίθετα με τα bLinks, δεν υπάρχει καμιά καθυστέρηση στη σύνδεση των pLinks. Συντομεύσεις Παραμέτρων χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του προγραμματισμού συμπεριφορών και συχνά περιλαμβάνουν έναν προορισμό και μια πηγή.



Σχήμα 7.13: Δύο Τοπικές Παράμετροι (Local Parameters) συνδεδεμένες με pLinks σε ένα BB και ζεύγη Παραμετρικών Συντομεύσεων

#### 7.4.4 Παράμετρος Στόχος – Target Parameter

Μια Παράμετρος - Στόχος είναι ένας συγκεκριμένος τύπος pIn που εφαρμόζεται για να ορίσει το στοιχείο που επηρεάζεται από το αντίστοιχο BB. Ουσιαστικά όταν ένα BB βρίσκεται σε ένα Σενάριο – Script απευθύνεται έμμεσα στον ιδιοκτήτη του συγκεκριμένου Script. Αλλά αν για παράδειγμα θέλουμε αυτό το BB να επηρεάσει ένα στοιχείο διαφορετικό από τον ιδιοκτήτη του script, τότε εφαρμόζουμε την παράμετρο – στόχο. Αν μία Παράμετρος – Στόχος δεν υπάρχει ήδη σε ένα BB (που μπορεί να την έχει – δεν δέχονται όλα τα BB αυτή την παράμετρο) τότε μπορεί να προστεθεί σε αυτό με δεξί κλικ και επιλογή “Add Target Parameter”. Αυτή συμβολίζεται με ένα τετράγωνο αντί του κλασσικού τριγωνικού συμβόλου για τις κανονικές παραμέτρους εισόδου - pIn.



Σχήμα 7.14: Παράμετρος Στόχος – Target Parameter

#### 7.4.5 Παραμετρικές Λειτουργίες - paramOp (Parameter Operations)

Οι Παραμετρικές Λειτουργίες ορίζονται ως απλές λειτουργίες που διεξάγονται πάνω σε μία Παράμετρο ή μεταξύ δύο Παραμέτρων. Μια paramOp μπορεί να εφαρμοστεί μόνο εφόσον το αποτέλεσμα απαιτείται από ένα BB ή από μια άλλη paramOp.



Οι paramOps κατηγοριοποιούνται σε τρεις τύπους σε σχέση με τις απαιτήσεις των διαφόρων εφαρμογών. Αυτοί είναι οι :

### 1. Ανάκτησης δεδομένων

Ανακτούν πολύτιμες πληροφορίες από το Behavioral Engine, όπως για παράδειγμα τη θέση ενός αντικειμένου στο χώρο (Get Position) ή τον προσανατολισμό του (Get Euler Orientation)

### 2. Μαθηματικών Λειτουργιών

Εφαρμόζονται ώστε να εκτελέσουν δυαδικές εξισώσεις πχ.  $C=A*B$ ,  $C=\sin(A)$ ,  $V3=Angle(V1, V2)$ ,  $V2=f*V1$  κτλ.

### 3. Μετατροπής τύπου

Μετατρέπουν έναν τύπο παραμέτρου σε έναν άλλο τύπο έτσι ώστε τα δεδομένα είναι στην επιθυμητή μορφή. Για παράδειγμα, μία γωνία μπορεί να μετατραπεί από μοίρες σε radians ή ακόμα και σε text string για την παρουσίασή της στο παράθυρο τρισδιάστατης διάταξης.



Σχήμα 7.15: Παραδείγματα paramOps των τριών διαφορετικών κατηγοριών

Οι paramOps μπορεί να είναι εξίσου χρήσιμες ως δομικά στοιχεία κατά τη δημιουργία σεναρίων. Ορισμένες λειτουργίες, ειδικά μερικά αιτήματα, μπορεί να γίνουν μόνο με την εκτέλεση μιας paramOp.

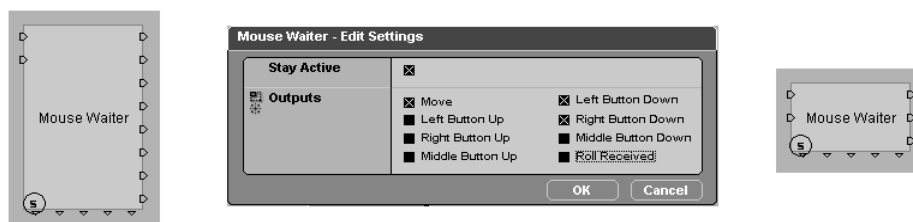
#### 7.4.6 Σύμβολα "C", "S" και "V"

Μερικά BBs επισημαίνονται με έναν από τους χαρακτήρες C, S ή V στην κάτω αριστερή γωνία. Ένα "C" στην κάτω αριστερή γωνία σημαίνει ότι το BB διαθέτει ένα προσαρμοσμένο παράθυρο διαλόγου για την διαμόρφωση πολύπλοκων παραμέτρων του. (πχ. Animation Synchronizer (Characters / Animation))



Σχήμα 7.16: Προσαρμοσμένο παράθυρο διαλόγου του BB – Animation Synchronizer

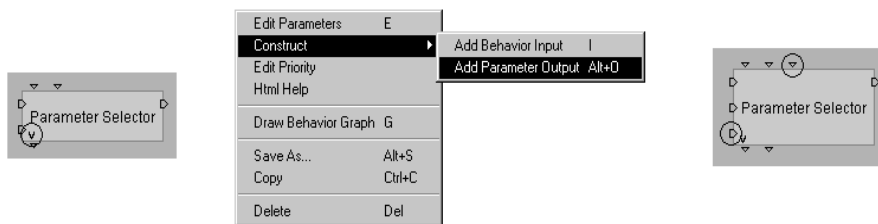
Ένα "S" στην κάτω αριστερή γωνία σημαίνει ότι το BB έχει Ρυθμίσεις. Οι Ρυθμίσεις συνήθως ελέγχουν τις παραμέτρους που υποβάλλονται σε επεξεργασία από το BB ή το πώς οι παράμετροι επεξεργάζονται από το BB. Για παράδειγμα το BB – Mouse Waiter (Controllers/Mouse) το οποίο υπολογίζει κανονικά 8 bOuts. Μπορεί κάποιος να χρειάζεται μόνο τις 3 από αυτές. Θέτοντας από τις ρυθμίσεις – Settings του BB να υπολογιστούν μόνο οι 3 αυτοί έξοδοι μπορεί κανείς να εξοικονομήσει πολύτιμο χρόνο επεξεργασίας.



Σχήμα 7.17: Μετά την επεξεργασία των ρυθμίσεων υπολογίζονται μόνο 3 bOuts

Ο χαρακτήρας "V" σημαίνει ότι αυτό έχει μεταβλητή διαμόρφωση. Δηλαδή, μπορεί κανείς να κάνει ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα:

- να προσθέσει bIns
- να προσθέσει bOuts
- να προσθέσει pIns
- να προσθέσει pOuts
- να αλλάξει κάποιους ή και όλους τους τύπους των pIns ή και των pOuts



Σχήμα 7.18: BB – Parameter Selector, ένα μεταβλητό BB

#### 7.4.7 Μηνύματα - Messages

Τα Μηνύματα - Messages, είναι ένα μέσο μετάδοσης πληροφοριών μεταξύ σχεδιαστικών στοιχείων ή μεταξύ σεναρίων συμπεριφοράς, που χρησιμοποιείται για να σηματοδοτήσει μια μεταβολή κατάστασης, να ενεργοποιήσει τις καταναεμημένες εργασίες, καθώς και να σηματοδοτήσει το πέρας των προτεινόμενων λειτουργιών. Ένα σχετικό BB περιέχει ένα αντίστοιχο εικονικό σύμβολο στο κάτω αριστερό μέρος, το οποίο αναπαριστά την ικανότητα του BB να αποστέλλει και να παραλαμβάνει μηνύματα μέσα στο εικονικό περιβάλλον. Η μετάδοση των μηνυμάτων έχει πάντα ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση ενός περάσματος μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας, το οποίο σημαίνει ότι υπάρχει καθυστέρηση ενός frame κατά το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την αποστολή μέχρι την παραλαβή του μηνύματος.

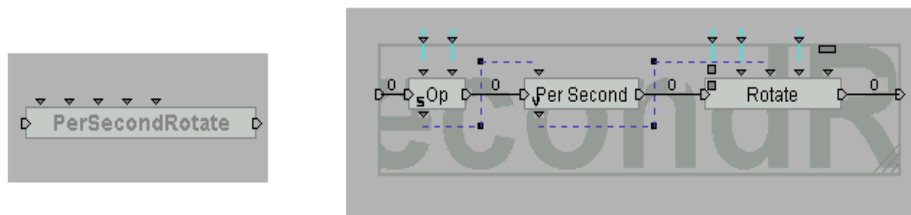


Σχήμα 7.19: BBs για την Αποστολή και την Παραλαβή Μηνυμάτων

#### 7.4.8 Γραφήματα Συμπεριφοράς BG – Behaviour Graphs

Ένα Γράφημα Συμπεριφοράς BG, αναγνωρίζεται ως μία οριζόμενη από το συγγραφέα συμπεριφορά, η οποία αποτελείται από ένα ή περισσότερα BBs, Παραμετρικές Διαδικασίες, Παραμέτρους, Συνδέσμους Παραμέτρων, Συνδέσμους Συμπεριφορών, Συντομεύσεις, Σχόλια και πιθανώς συσχετισμένα Γραφήματα Συμπεριφοράς κτλ. Ένα Γράφημα Συμπεριφοράς έχει μεγάλη ομοιότητα με ένα σενάριο - script συμπεριφοράς γιατί οι προγραμματιστές VE ενσωματώνουν μία συμπεριφορά σε ένα BG, μέσα στο οποίο η καθιερωμένη διαδραστικότητα και εφαρμογή αποθηκεύονται σε επαναχρησιμοποιήσιμη μορφή. Αυτό μπορεί να βελτιώσει την παραγωγικότητα του προγραμματισμού VE σε μελλοντικές εργασίες. Ένα Γράφημα Συμπεριφοράς επίσης

περιέχει rIns, bIns, bOuts και ούτω καθεξής. Αποτελεί κομμάτι ενός σεναρίου συμπεριφοράς ή και πλήρες σενάριο συμπεριφοράς, εφόσον επιτυγχάνεται η προβλεπόμενη λειτουργία. Γενικά ένα BG μπορεί να θεωρηθεί σαν προηγμένο BB κατασκευασμένο για να εκτελεί μία συγκεκριμένη εργασία πέρα από το πεδίο εφαρμογής των BBs παρέχονται από το Virtools. Επιπλέον, ένα BG μπορεί να «επεκταθεί» έτσι ώστε να απεικονίζει τα στοιχεία προγραμματισμού, καθώς και να «συμπίεστεί» έτσι ώστε να μην είναι φανερά τα στοιχεία προγραμματισμού, διευκολύνοντας έτσι τη ίδια τη διαδικασία προγραμματισμού.



Σχήμα 7.20: Παράδειγμα Γραφήματος Συμπεριφοράς συμπίεσμένο και σε επέκταση

## 7.5 Συμβατοί τύποι αρχείων

Η σύνθεση ενός ΕΠΕ στο Virtools είναι ένα αρχείο “.cmo”.

Η «μητρική» μορφή αρχείων για τις οντότητες στο Virtools είναι τα αρχεία “.nmo”. Αυτά μπορεί να περιέχουν ένα ή και περισσότερα αντικείμενα, όπως και κάμερες, φώτα, 3D frames κτλ. καθώς επίσης και εφαρμοσμένα σενάρια και συμπεριφορές πάνω σε αυτά. Επομένως ολόκληρες σκηνές – scenes ακόμα και μαζί με τα scripts τους, animations, τα υλικά και τις υφές τους μπορούν να εισαχθούν στο Virtools με αυτή τη μορφή αρχείου. Scripts μπορούν να αποθηκευτούν από το Virtools για επαναχρησιμοποίηση στη μορφή “.nms”.

Ορισμένες εφαρμογές όπως Maya και 3D Studio Max μπορούν να εξάγουν αρχεία της μορφής “.nmo” ενώ για μερικές άλλες χρησιμοποιούνται ειδικά plugins. Το πλεονέκτημα αυτών είναι ότι μέσα στις σχεδιαστικές λύσεις που προσφέρουν, περιλαμβάνεται ο σχεδιασμός πιο ευέλικτων και έξυπνων οντοτήτων, όπως είναι οι χαρακτήρες – characters ή avatars, αλλά και 3D κινούμενα σχέδια – 3D animations τα οποία προσφέρουν περισσότερες προς εκμετάλλευση δυνατότητες μέσα στο

περιβάλλον του Virtools. Εναλλακτικά αρχεία .vmo μπορούν να παραχθούν από το ίδιο το Virtools μετά την εισαγωγή των αντικειμένων σε κάποιους από τους τύπους αρχείων που υποστηρίζει:

- 3DXML
- VRML
- COLLADA
- 3DStudio (.3DS)
- DirectX (.X)

Κάθε ένας από τους παραπάνω τύπους αρχείων αποθηκεύει και συμπεριλαμβάνει διαφορετικού είδους πληροφορίες και αντίστοιχα συγκεκριμένες από αυτές μεταφέρονται στο Virtools. Τίθεται λοιπόν ζήτημα διαλειτουργικότητας (interoperability). Συγκεκριμένα αρχεία τύπου 3DXML υποστηρίζονται από τη Dassault Systèmes σε όλη τη σειρά προϊόντων της: Catia, Delmia, Enovia, Smarteam, SolidWorks.

Αρχεία πολυμέσων: Οι εικόνες μπορούν να εισάγονται και να αποθηκεύονται σε μορφή “.jpg”, “.bmp”, “.png”, “.tif”, “.TGA”, “.DDS” (αλλά όχι “.gif”). Τα βίντεο σε μορφή “.avi ” και οι ήχοι μπορεί να είναι “.wav”, “.mid” ή “.mp3”. Τα αρχεία χρειάζεται να βελτιστοποιηθούν προκαταβολικά σε λογισμικό ήχου ή αντίστοιχα εικόνας. Ενώ, χρησιμοποιώντας τον ανάλογο προγραμματισμό συμπεριφορών, μια σειρά από απλά ηχητικά και εικονικά εφέ μπορούν να δημιουργηθούν στο Virtools.

Για την «δημοσιοποίηση» ενός εικονικού κόσμου εξάγονται από το Virtools τα αρχεία .vmo. Αυτά μπορούν να αναπαραχθούν χρησιμοποιώντας το Web Player του Virtools. Ενώ για πιο εξειδικευμένες εφαρμογές μπορεί κανείς να δημιουργήσει το δικό του εκτελέσιμο αρχείο .exe χρησιμοποιώντας το SDK.

Τέλος για την μεταφορά της πληροφορίας από το Virtools σε σχεδιαστικά πακέτα υπάρχει μία σειρά από plugins κάθε ένα από τα οποία υποστηρίζει διαφορετικού τύπου αρχεία. Μερικά από αυτά είναι το Virtools CAD plugin, το Maya Exporter και 3DS Exporter.

# 8

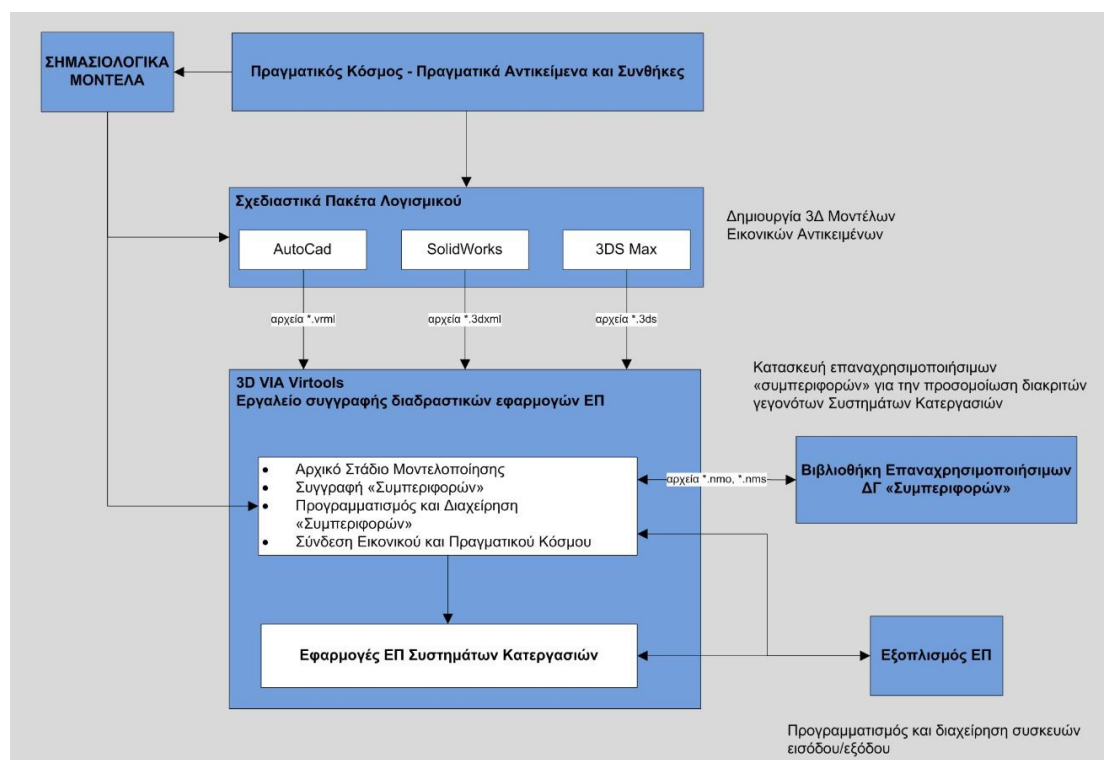
## *Πιλοτική Εφαρμογή*

Η βασική μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε και η οποία παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4, ήταν καθ' όλη τη διάρκεια μια συνεχής και ενσωματωμένη μέσα στη κατασκευή του ΕΠΕ διαδικασία. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στα «πρακτικά» βήματα υλοποίησης που εφαρμόστηκαν για την ανάπτυξη του εικονικού περιβάλλοντος. Παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο επιτεύχθηκε η μοντελοποίηση του ρομποτικού βραχίονα Fanuc R2000iA και του Mori Seiki NT4200. Το ενδιαφέρον προσανατολίζεται κυρίως στις επιπλέον συμπεριφορές που αναπτύχθηκαν για τις μηχανές αυτές στο Virtools. Αφενός στόχος είναι να γνωρίσει ο αναγνώστης τις «συμπεριφορές» που αναπτύχθηκαν και τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικές εφαρμογές για μοντελοποίηση επιπλέον μηχανών και αφετέρου να αποκτήσει μία πιο ειδική εικόνα για τον τρόπο με τον οποίο έγινε η ανάπτυξη του ΕΠΕ στο 3DVIA Virtools.

### **8.1 Πρακτικά βήματα υλοποίησης**

Το έργο μοντελοποίησης και σχεδιασμού δεν είναι διόλου μια πάγια διαδικασία παρά δυναμική, εξελίσσεται και αναπτύσσεται συνεχώς μέσα από διαφορετικά σενάρια, λάθη και διορθώσεις σε οποιαδήποτε σχεδιαστική φάση. Πάντα όμως, πρέπει πάντα να επιδιώκεται ο σωστός σχεδιασμός και η αποφυγή σφαλμάτων. Πέραν της γενικής

μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται, παρουσιάζονται στο συνοπτικό διάγραμμα του σχήματος 8.1 τα πρακτικά βήματα υλοποίησης που εφαρμόστηκαν. Αφού προηγήθηκε η προσέγγιση του προς μοντελοποίηση αντικειμένου και η περιγραφή του με σημασιολογικά μοντέλα που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, σειρά είχε η γεωμετρική μοντελοποίηση για την οποία χρησιμοποιήθηκαν τα σχεδιαστικά πακέτα AutoCad, SolidWorks και 3DS Max. Η μοντελοποίηση αυτή έγινε με βάση την προηγούμενη ανάλυση, ενώ πέραν των βασικών οντοτήτων της προσομοίωσης, δημιουργήθηκαν και αντικείμενα δευτερευούσης σημασίας για την ρεαλιστικότητα της προσομοίωσης. Όλα τα 3D αντικείμενα σώθηκαν στην κατάλληλη μορφοποίηση αρχείων για την εισαγωγή τους στο Virtools, όπου λαμβάνει μέρος η μοντελοποίηση των συμπεριφορών.



Σχήμα 27: Πρακτικά βήματα υλοποίησης

## 8.2 Αρχικό στάδιο μοντελοποίησης

Περιλαμβάνει όλες τις διεργασίες που είναι αναγκαίο να λάβουν μέρος πριν την έναρξη της μοντελοποίησης συμπεριφορών. Αυτές αναλύονται παρακάτω.

### **8.2.1 Εισαγωγή εικονικών αντικειμένων**

Τα αντικείμενα εισέρχονται στον εικονικό κόσμο ανάλογα με το σύστημα συντεταγμένων, την θέση και τον προσανατολισμό που διατηρούν στο αντίστοιχο σχεδιαστικό πακέτο κατά την εξαγωγή (Σχήμα 8.2). Για αυτό είναι απαραίτητη η γνώση της ακριβή θέσης των αντικειμένων στον χώρο κατά την διαδικασία σχεδιασμού τους, όπως και οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν.

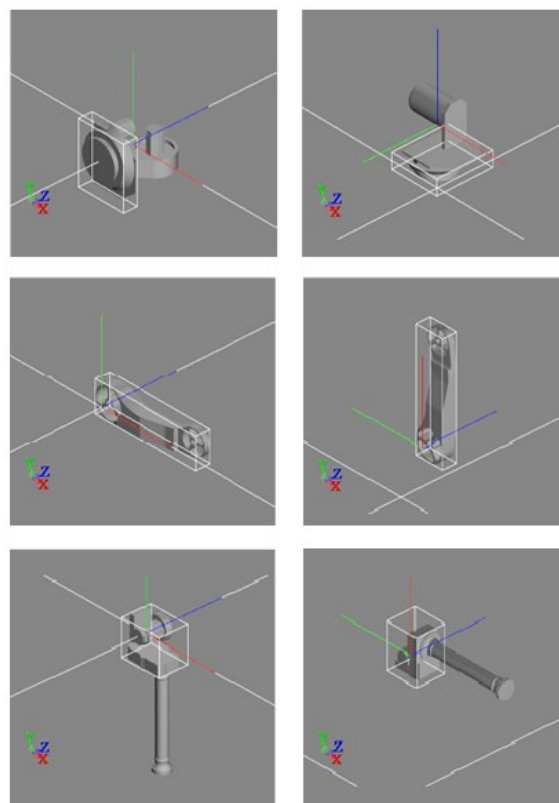
Ένα από τα προβλήματα που παρατηρήθηκε ήταν η περιστροφή του συστήματος συντεταγμένων κατά την εισαγωγή αντικειμένων VRML που είχαν δημιουργηθεί με το σχεδιαστικό πακέτο AutoCad. Αντίθετα δεν παρουσιάστηκε παρόμοιο πρόβλημα κατά την εισαγωγή των αρχείων \*.3dxml και \*.3ds, πέραν της λογικής αντιστροφής του άξονα Z, καθώς το Virtools χρησιμοποιεί αριστερόστροφο σύστημα συντεταγμένων (Παράρτημα Α).

### **8.2.2 Συναρμολόγηση οντοτήτων και δημιουργία σημείων ελέγχου με 3D Πλαίσια**

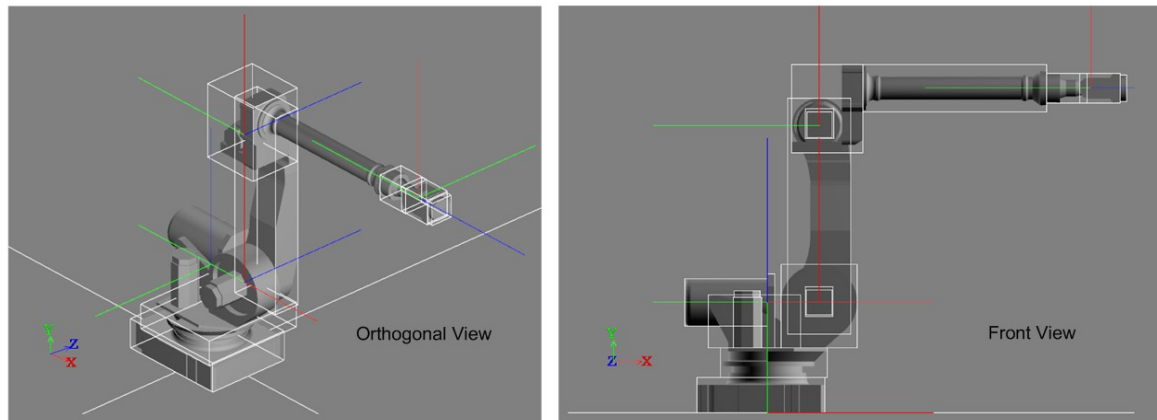
Στην περίπτωση που τα αντικείμενα εισάγονται ένα προς ένα στο Virtools τότε είναι αναγκαία η ανάλογη μετατόπιση και περιστροφή τους. Η θέση και προσανατολισμός των αντικειμένων, που επιλέγονται ήδη στα σχεδιαστικά πακέτα είναι στρατηγικής και λειτουργικής σημασίας. Για παράδειγμα αν εισαχθεί μόνο το τσωκ μιας εργαλειομηχανής είναι λογικό να τοποθετηθεί το αντιπροσωπευτικό του σύστημα συντεταγμένων στο κέντρο του, ώστε να ορίζεται ο άξονας περιστροφής. Το ίδιο συμβαίνει και για τους συνδέσμους του ρομποτικού βραχίονα ώστε να ορισθεί η θέση και ο άξονας των αρθρώσεων. Συνήθως μάλιστα για τον ορισμό της περιστροφής ενός 3D αντικειμένου, επιλέγεται ως άξονας περιστροφής ο άξονας Z.



Στο διπλανό σχήμα παρουσιάζεται το παράδειγμα εισαγωγής των συνδέσμων 1,2,3 του ρομποτικού βραχίονα, καθώς και η ανάλογη μετακίνηση και στροφή που τους επιβάλλεται ώστε να συναρμολογηθεί στο τέλος το ρομπότ (Σχήμα 8.3). Όπως φαίνεται, το αντιπροσωπευτικό σύστημα συντεταγμένων κάθε 3D οντότητας τοποθετήθηκε έτσι ώστε ο άξονας Z να ορίζει τις περιστροφικές αρθρώσεις. Ενώ ταυτόχρονα συμφωνεί με τον τρόπο τοποθέτησης των πλαισίων αναφοράς που ορίστηκε στο κεφάλαιο 6, ώστε να είναι δυνατός ο προσδιορισμός των παραμέτρων D-H, για την επίλυση του προβλήματος της αντίστροφης κινηματικής.



Σχήμα 28: Εισαγωγή συνδέσμων 1,2,3 του ρομπότ

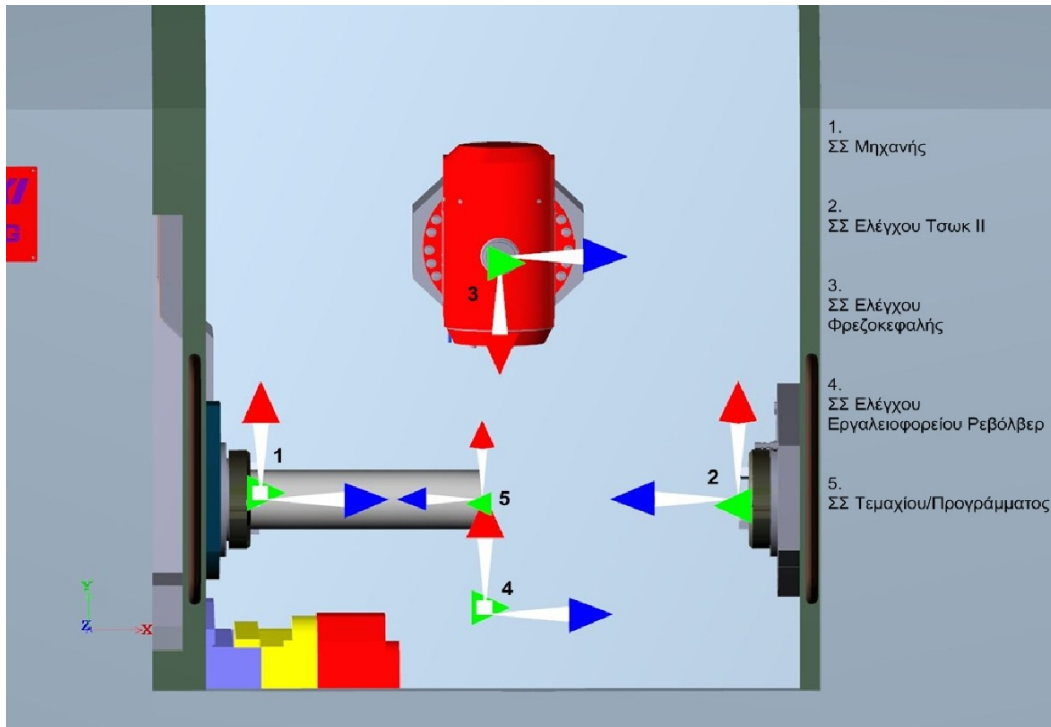


Σχήμα 29: Συναρμολογημένος ρομποτικός βραχίονας στο ΕΠΕ

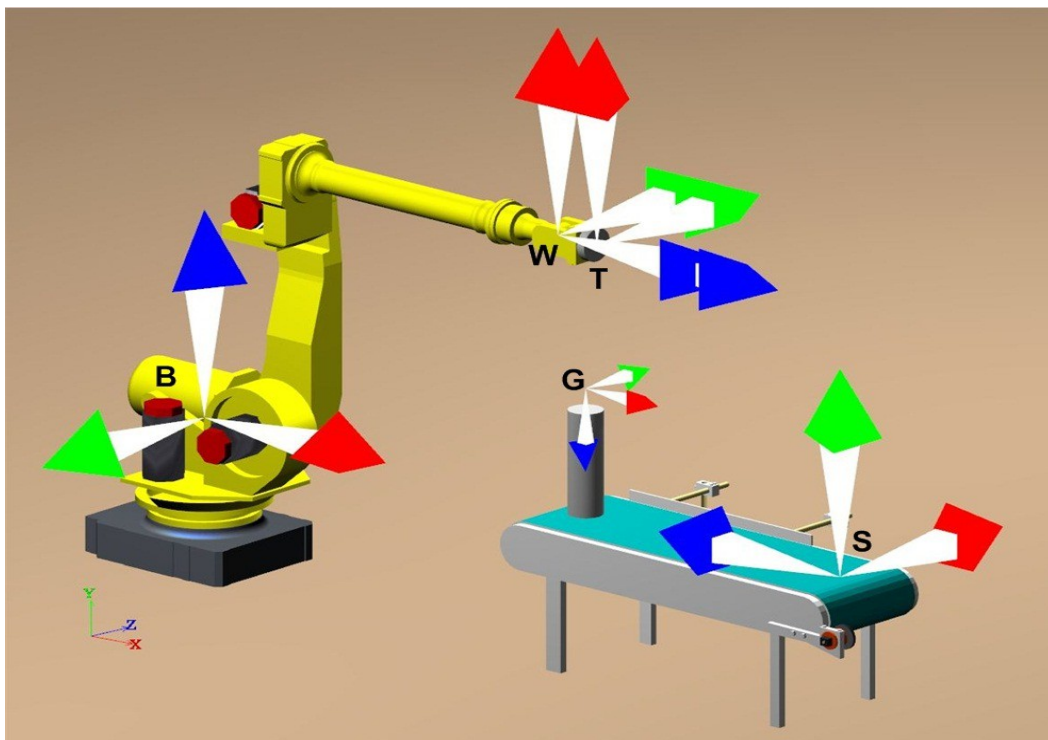
Όμως η διαδικασία εισαγωγής αντικειμένων ένα προς ένα είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα, εναλλακτικά προτείνεται η εισαγωγή μίας ομάδας αντικειμένων και στην συνέχεια η επισύναψη 3D Πλαισίων – 3D Frames στο Virtools σε συγκεκριμένες θέσεις ελέγχου. Γενικά τα 3D Πλαίσια χρησιμοποιούνται με δυο βασικούς τρόπους:

- Ορίζουν συστήματα συντεταγμένων τα οποία χρησιμοποιούνται για τον σχετικό, ως προς αυτά έλεγχο της θέσης, προσανατολισμού και στροφής των οντοτήτων.

- Ορίζουν άμεσα την θέση και τον προσανατολισμό 3Δ οντοτήτων κάνοντας χρήση ιεραρχικών συνθηκών(Δηλώντας μία 3Δ οντότητα σαν παιδί - child ενός 3Δ Πλαισίου).

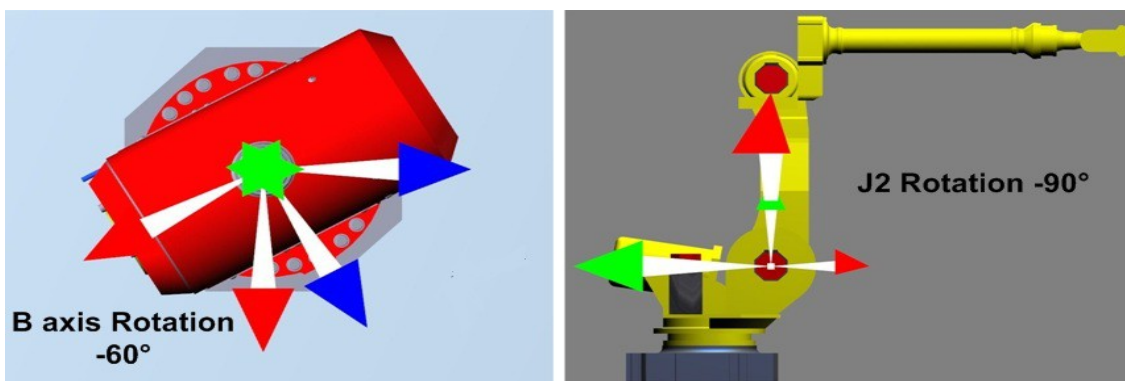


Σχήμα 30: 3Δ Πλαίσια για τον ορισμό των βασικών συστημάτων συντεταγμένων ελέγχου στο ΕΠΕ του κέντρο τόρνευσης

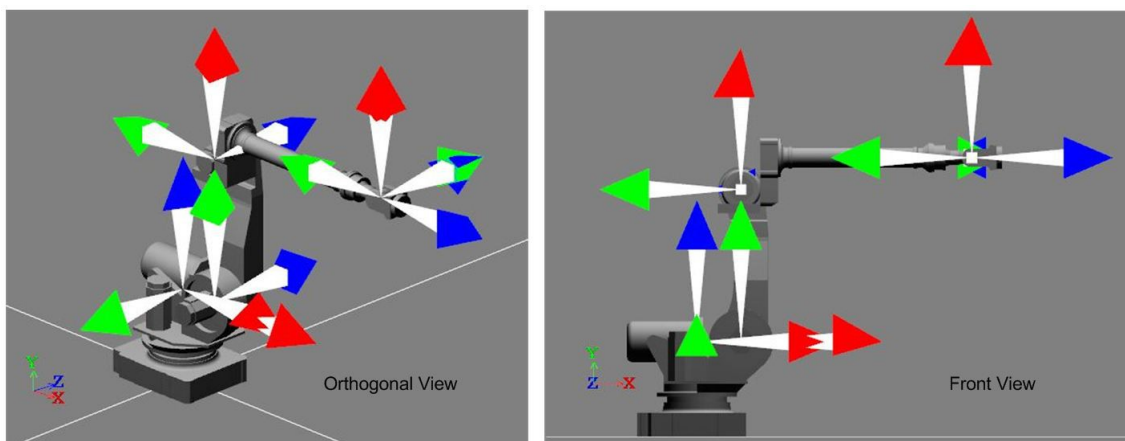


Σχήμα 31: 3Δ Πλαίσια για τον ορισμό βασικών συστημάτων συντεταγμένων ελέγχου στο ΕΠΕ του ρομποτικού βραχίονα

Για να είναι δυνατός ο υπολογισμός της γωνίας στροφής κάθε περιστρεφόμενης άρθρωσης χρησιμοποιείται ένα επιπλέον 3Δ Πλαίσιο σε κάθε άρθρωση  $n$  που ενώνει τους συνδέσμους  $n, n-1$ , λαμβάνοντας τον προσανατολισμό του συνδέσμου  $n$  (Σχήμα 8.7). Δημιουργείται έτσι ένα σύστημα αναφοράς για τον υπολογισμό της στροφής της  $n$  άρθρωσης, ενώ τα 3Δ Πλαίσια αυτά χρησιμοποιούνται και για τον υπολογισμό της παραμέτρου « $a$ » των D-H. Το ίδιο γίνεται για κάθε οντότητα της οποίας μας ενδιαφέρει η γωνία στροφής. Στους άξονες B και C του κέντρου κατεργασιών, τον ρόλο αυτό μπορούν να λάβουν τα 3Δ πλαίσια 1, 2, 3 του σχήματος 8.4 που χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα για τον έλεγχο της θέσης των οντοτήτων. Αυτό βέβαια σημαίνει ότι ο προσανατολισμός της αντίστοιχης οντότητας θα πρέπει να συμπίπτει με αυτόν του 3Δ Πλαισίου ελέγχου εκεί όπου η γωνία στροφής είναι ίση με μηδέν.



Σχήμα 32: 3Δ πλαίσια αναφοράς και 3Δ πλαίσια οντοτήτων (Φρεζοκεφαλή, Βραχίονας 2) για τον έλεγχο και υπολογισμό περιστροφής της

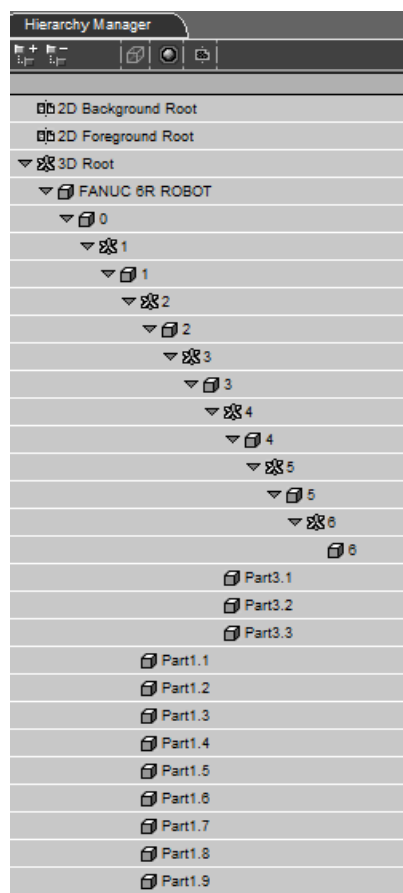


Σχήμα 33: 3Δ Πλαίσια αναφοράς για τον υπολογισμό περιστροφής των αρθρώσεων του ρομποτικού βραχίονα

### 8.2.3 Διαχείριση ιεραρχιών εικονικών αντικειμένων

Γίνεται μέσω του διαχειριστή ιεραρχιών (Παράγραφος 7.3.2) με απλές κινήσεις μεταφοράς και απόθεσης (drag n drop) των οντοτήτων «παιδιών» στις οντότητες «γονείς». Με τον καθορισμό των ιεραρχικών σχέσεων επιτυγχάνεται η παραγωγή επαναχρησιμοποιήσιμων συμπεριφορών μέσω του συνδυασμού ιεραρχίας και ήδη υπάρχοντων συμπεριφορών. Αυτό στον αντικειμενοστραφή προγραμματισμό είναι γνωστό και σαν κληρονομιά (inheritance) και αναφέρεται κυρίως στην ιεραρχία των κλάσεων. Ειδικά στην περίπτωση που ενδιαφέρει η κινηματική συμπεριφορά, ο καθορισμός των σχέσεων αυτών είναι αναγκαίος.

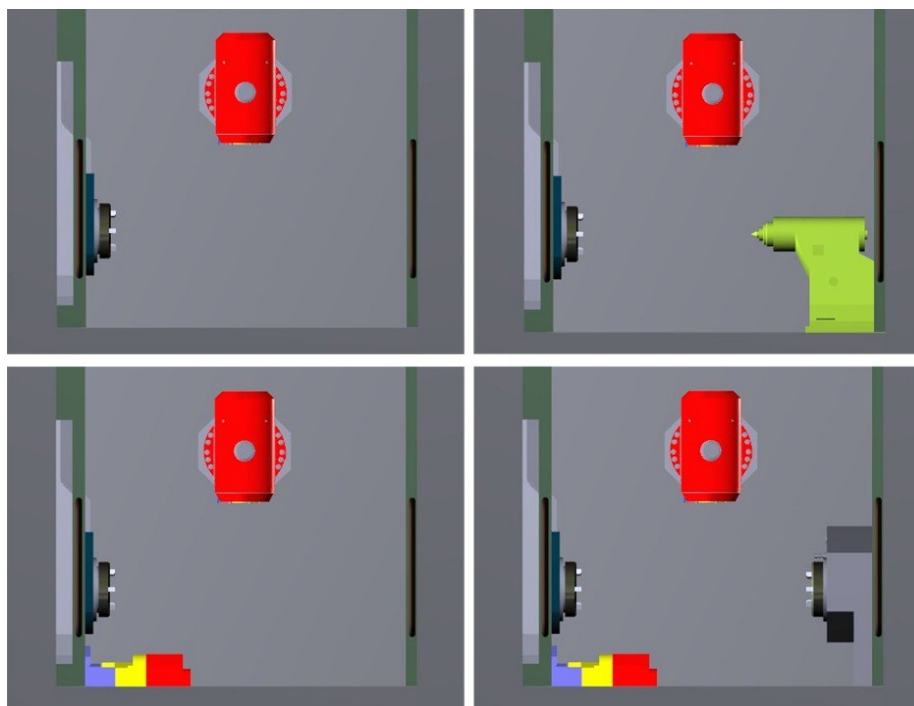
Σαν παράδειγμα αναφέρεται αυτό της κινηματικής αλυσίδας του ρομποτικού βραχίονα. Ο ρομποτικός βραχίονας χαρακτηρίζεται ως σύνθετη οντότητα, που αποτελείται από υπό-οντότητες. Τα μέλη του καλούνται να εκτελέσουν σύνθετες κινήσεις και κάθε κίνηση ανάλογα με τον σύνδεσμο τον οποίο ενεργοποιεί, μπορεί να καθορίσει την θέση και τις επιμέρους κινήσεις των υπόλοιπων μελών του βραχίονα. Για αυτό το λόγο κρίνεται απολύτως απαραίτητος ο καθορισμός της ιεραρχίας μεταξύ των οντοτήτων – μελών, ώστε να προσομοιωθεί σωστά η κινηματική αλυσίδα. Τα πλαίσια αναφοράς κάθε άρθρωσης, όπως μετράνε την στροφή των «n» αρθρώσεων, θα πρέπει να βρίσκονται πριν από την οντότητα του βραχίονα «n» στην κινηματική αλυσίδα (ορίζονται δηλ. σαν «γονείς», Σχήμα 8.8). Τέλος οι διάφορες οντότητες που δεν παίρνουν ενεργά μέρος στην κινηματική αλυσίδα, αλλά παθητικά, ορίζονται σαν «παιδιά» των οντοτήτων που μπορούν άμεσα να μεταβάλουν την θέση τους.



Σχήμα 34: Καθορισμός ιεραρχιών 3D οντοτήτων - μελών του βραχίονα

#### 8.2.4 Καθορισμός αρχικών συνθηκών οντοτήτων

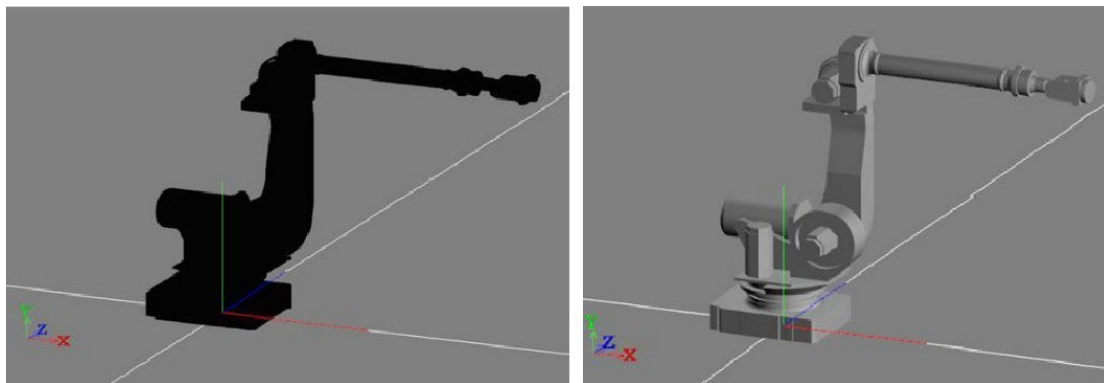
Τελευταίο ίσως βήμα σε αυτή την πρώτη φάση είναι ο καθορισμός των αρχικών συνθηκών – initial conditions των οντοτήτων του εικονικού κόσμου. Αυτές ορίζονται για κάθε οντότητα όπως προκύπτει από το διάγραμμα κλάσεων οντοτήτων. Αρχικές συνθήκες ουσιαστικά πρέπει να έχει κάθε οντότητα της οποίας οποιοδήποτε χαρακτηριστικό (πχ. θέση, προσανατολισμός, ιεραρχία, mesh, material, Array κτλ) υπόκειται σε πιθανές αλλαγές κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Κατά αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει ανάκτηση των αρχικών συνθηκών ώστε να ξεκινήσει η εφαρμογή από την αρχή. Όπως και με τις ιεραρχικές σχέσεις, οι αρχικές συνθήκες μπορεί να αλλάξουν για μία οντότητα κατά την διάρκεια εκτέλεσης της εφαρμογής, έτσι είναι δυνατό να γίνει ανάκτηση διαφόρων συνθηκών που εκτελέστηκαν σε μία προσομοίωση. Ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες μπορούν να εξεταστούν και διαφορετικά σενάρια προσομοιώσεων, έτσι στην περίπτωση του Mori Seiki μπορούν να εξεταστούν τα διαφορετικά σενάρια δομής της αρχιτεκτονικής του, αλλάζοντας τις αρχικές συνθήκες της προσομοίωσης.



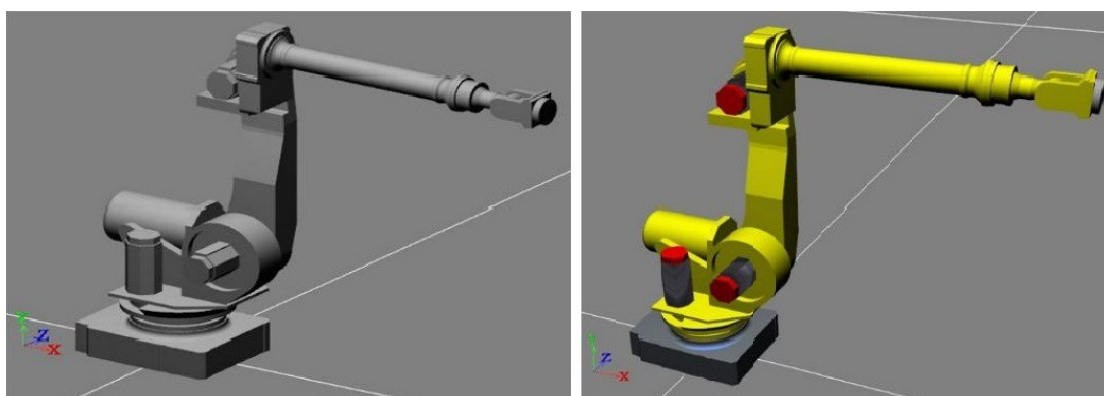
Σχήμα 35: Διαφορετικά σενάρια αρχιτεκτονικής δομής του Mori Seiki NT στο ΕΠΕ

Στις παραπάνω διεργασίες που περιγράφηκαν και τοποθετήθηκαν θεωρητικά στο αρχικό σχεδιαστικό στάδιο, θα μπορούσαν να προστεθούν αρκετές ακόμα, όπως ο καθορισμός υλικών/materials(Σχήμα 8.10) και υφών/textures των οντοτήτων,

κάμερες/cameras ή φώτα/lights(Σχήμα 8.11) κτλ. που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην δημιουργία μίας πιο ρεαλιστικής προσομοίωσης, όμως η αναλυτική περιγραφή τους ξεφεύγει από τα όρια της διπλωματικής αυτής.



Σχήμα 36: Εικονικός ρομποτικός βραχίονας πριν και μετά την δημιουργία φωτισμού



Σχήμα 37: Εικονικός ρομποτικός βραχίονας πριν και μετά τον καθορισμό υλικών και υφών

### **8.3 Μοντελοποίηση Δομικών Γραφημάτων Συμπεριφορών – ΔΓΣ**

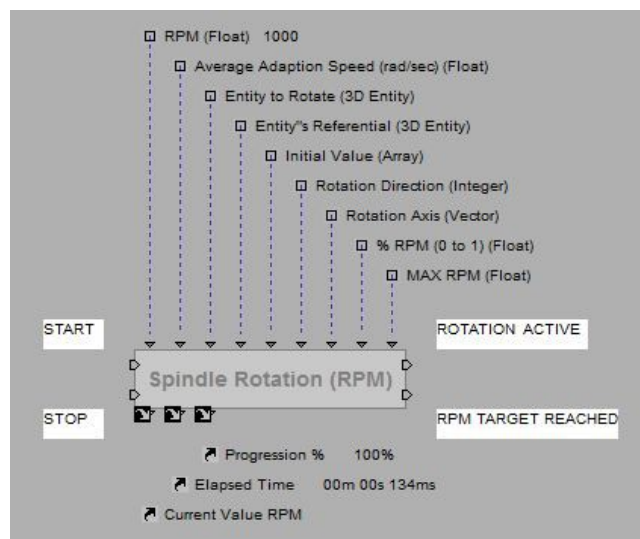
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα ΔΓΣ που δημιουργήθηκαν και ο τρόπος με τον οποίο μπορούν αυτά να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση μηχανών στα συστήματα κατεργασιών. Κατά την δημιουργία και προγραμματισμό τους, ήταν απαραίτητη η αποθήκευση, ανάκτηση και προσδιορισμός των παραμέτρων και δεδομένων του συστήματος. Αυτό λύθηκε με την δημιουργία πινάκων – Arrays μέσα στο Virtools και την αντιστοίχιση των κελιών τους με τις παραμέτρους. Με αυτό τον τρόπο οι πίνακες λειτουργούν σαν Βάσεις Δεδομένων. Στις παραμέτρους εισόδου ορισμένων ΔΓΣ συμπεριλαμβάνεται ο καθορισμός του πίνακα δεδομένων, ενώ σε άλλες περιπτώσεις επιβάλλεται να γίνει η σύνδεση.

Array Setup						
Current Axis Position						
Add Column    Add Row						
	0 : Q1	1 : Q2	2 : Q3	3 : Q4	4 : Q5	5 : Q6
0	0:34.6944	0:-103.068	0:14.8908	0:-111.19	0:5.03575	0:141.265

Σχήμα 38: Παράδειγμα πίνακα - Array για την αποθήκευση και ανάκτηση της περιστροφής των αρθρώσεων του ρομποτικού βραχίονα

### 8.3.1 Περιστροφική Κίνηση Ατράκτου (RPM) - Spindle Rotation (RPM)

Δυνατότητα συνεχούς περιστροφής μίας 3Δ οντότητας γύρω από έναν άξονα, με συγκεκριμένη ταχύτητα και φορά περιστροφής. Επιπλέον ορίζεται η μέγιστη ταχύτητα με την οποία μπορεί να περιστραφεί η πραγματική οντότητα. Όταν η αντίστοιχη εικονική φτάσει αυτό το όριο ταχύτητας δεν μπορεί να το ξεπεράσει. Αυτό το ΔΔ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιστροφή οποιουδήποτε 3Δ αντικειμένου του ΕΠΕ ικανοποιώντας τις παραπάνω απαιτήσεις. Τέτοιες οντότητες μπορεί να είναι το τσων ή η άτρακτος ενός εργαλείου περιστροφής.



Σχήμα 39: ΔΓΣ - Περιστροφή ατράκτου RPM

<b>Start</b>	Ενεργοποιεί την διαδικασία έναρξης περιστροφής της 3Δ οντότητας στην οποία εφαρμόζεται
<b>Stop</b>	Σταματάει την διαδικασία περιστροφής, θέτοντας τις στροφές περιστροφής RPM=0
<b>Rotation Active</b>	Ενεργοποιείται καθ όλη την διάρκεια που λαμβάνει μέρος μία περιστροφή
<b>RPM Target Reached</b>	Ενεργοποιείται όταν η 3Δ οντότητα κινείται πλέον με την επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής

<b>RPM</b>	Η επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής σε στροφές ανά λεπτό
<b>Average Acceleration (rad/sec<sup>2</sup>)</b>	Παράμετρος η οποία δημιουργήθηκε για την ρεαλιστικότητα της προσομοίωσης. Αντιπροσωπεύει την μέση τιμή με την οποία μεταβάλλεται η ταχύτητα περιστροφής.
<b>Entity to rotate (3D Entity)</b>	Η 3D οντότητα της οποίας επιδιώκεται η περιστροφή (στην συγκεκριμένη περίπτωση το κυρίως στέλεχος του τσωκ)
<b>Entity's Referential (3D Entity)</b>	Η 3D οντότητα με βάση την οποία ορίζεται ο άξονας περιστροφής. Στην περίπτωση που αφεθεί κενή, λαμβάνεται σαν αναφορά η ίδια οντότητα που θα περιστραφεί
<b>Target Array</b>	Ο πίνακας στον οποίο διατηρείται η τιμή της τρέχουσας ταχύτητας περιστροφής
<b>Rotation Direction</b>	Η φορά περιστροφής (λαμβάνει τιμές 1 ή -1 για δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη περιστροφή αντίστοιχα)
<b>Rotation Axis (vector)</b>	Ο άξονας περιστροφής γύρω από τον οποίο θα περιστραφεί η οντότητα. Λαμβάνεται ως προς την οντότητα αναφοράς. Η παράμετρος αυτή είναι ένα διάνυσμα – vector (πχ το διάνυσμα [1,0,0] αντιστοιχεί στον X άξονα της οντότητας αναφοράς)
<b>% RPM (Float)</b>	Παράμετρος η οποία δημιουργήθηκε για τον επιπλέον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής. Παίρνει τιμές από 0 έως 1, με το 1 να αντιστοιχεί στο 100% της παραμέτρου RPM.
<b>MAX RPM</b>	Ορίζει την μέγιστη ταχύτητα με την οποία μπορεί να περιστραφεί μία οντότητα.
<b>Current Value (RPM)</b>	Η ενεργή ταχύτητα περιστροφής σε στροφές ανά λεπτό
<b>Elapsed Time</b>	Χρόνος από την έναρξη της διαδικασίας μέχρι την επίτευξη της επιθυμητής ταχύτητας περιστροφής.
<b>Progression %</b>	Ποσοστό μεταξύ 0% και 100%, το οποίο προσδιορίζει την εξέλιξη της διαδικασίας.

Οι παράμετροι εξόδου Elapsed Time και Progression %, είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για τον έλεγχο παραμέτρων, σε περιπτώσεις ενεργοποίησης επιπρόσθετων διεργασιών.

Με την εισαγωγή του ΔΓΣ εισέρχεται ταυτόχρονα και ο πίνακας που μετονομάζεται ώστε να μην προκύψει σύγχυση στην συνέχεια (συνήθως λαμβάνει το όνομα της οντότητας στην

S Name Chuck 1	
0 : Current speed RPM	1 : Current Radius
0	0.0800
1000.0000	0.0800

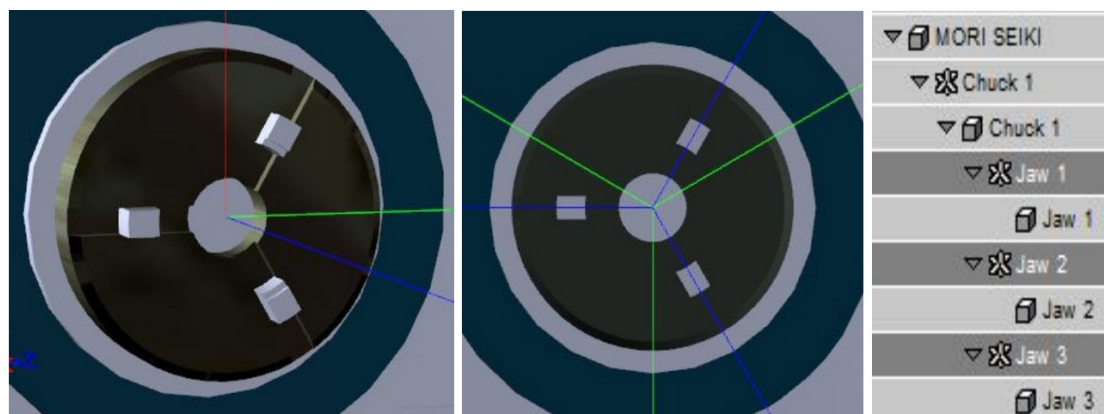
Σχήμα 40: Πίνακας δεδομένων τσωκ/ατράκτου

οποία εφαρμόζεται). Στο πρώτο κελί διατηρείται η τιμή της τρέχουσας ταχύτητας περιστροφής - Current Value RPM και στο δεύτερο η τιμή της ενεργής διαμέτρου ανοίγματος των «σιαγόνων» του τσωκ – Current Chuck Diameter. Στην περίπτωση



προφανώς που δεν εφαρμόζεται σε ένα τσωκ, αλλά σε άλλες οντότητες, τότε η δεύτερη στήλη μπορεί να διαγραφεί.

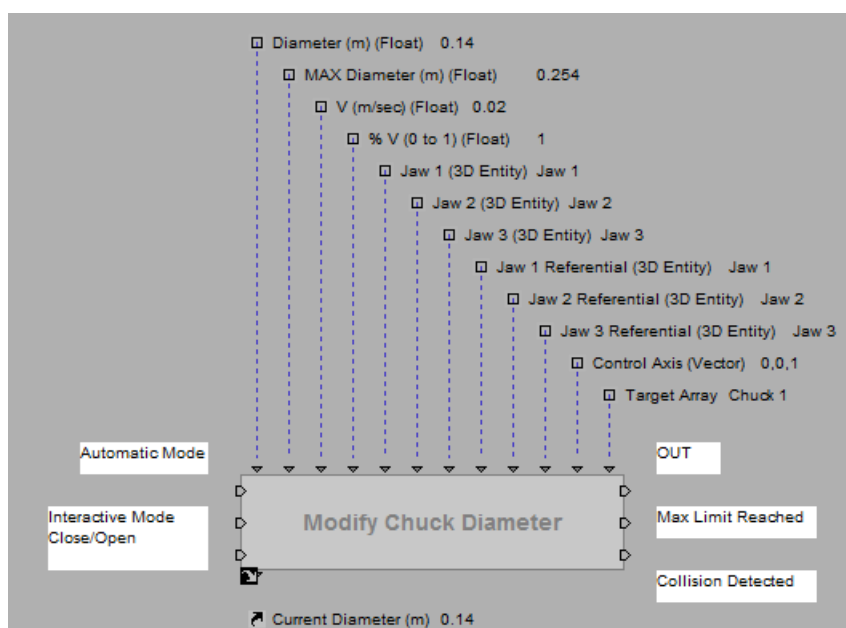
Στο σχήμα 8.15 παρατηρούνται οι 3Δ οντότητες και η διάταξή τους ώστε να είναι δυνατή η προσομοίωση. Οι άξονες που φαίνονται στις εικόνες είναι αυτοί των 3Δ Πλαισίων αναφοράς (παράμετρος Entity's Referential).



Σχήμα 41: 3Δ Πλαίσια αναφοράς για την περιστροφή και το άνοιγμα διαμέτρου του τσωκ

### 8.3.2 Προσδιορισμός Διαμέτρου του Τσωκ - *Modify Chuck Diameter*

Καλείται για τον προσδιορισμό του ανοίγματος της διαμέτρου του τσωκ για την συγκράτηση τεμαχίων. Διακρίνονται ουσιαστικά δύο διαφορετικοί τρόποι χρησιμοποίησης του. Ο πρώτος αναφέρεται στην αυτόματη λειτουργία, περίπτωση δηλ που ορίζεται μία τιμή διαμέτρου για το τσωκ με χρήση G-κώδικα ή μέσω του Ελεγκτή της μηχανής. Ο δεύτερος στην ημιαυτόματη – χειροκίνητη λειτουργία της μηχανής, όπου ο χρήστης μπορεί να «ανοίξει/κλείσει» την διάμετρο του τσωκ πχ. με το συνεχές πάτημα ενός κουμπιού από τον Ελεγκτή.



Σχήμα 42: ΔΓΣ - Προσδιορισμός Διαμέτρου του Τσωκ

<b>Automatic Mode</b>	Ενεργοποιεί την διαδικασία μετατόπισης των σιαγόνων του τσωκ στην τιμή διαμέτρου που καθορίζεται από την παράμετρο Diameter.
<b>Interactive Mode Close</b>	Ενεργοποιεί την διαδικασία μετατόπισης των σιαγόνων προς τα μέσα με μία ταχύτητα μετατόπισης V. Απαιτήση συνεχούς σήματος εισόδου
<b>Interactive Mode Open</b>	Ενεργοποιεί την διαδικασία μετατόπισης των σιαγόνων προς τα έξω με μία ταχύτητα μετατόπισης V. Απαιτήση συνεχούς σήματος εισόδου
<b>Out</b>	Ενεργοποιείται καθ όλη την διάρκεια εκτέλεσης μίας εκ των συμπεριφορών
<b>Max Limit Reached</b>	Ενεργοποιείται όταν η 3Δ οντότητα αποκτήσει την μέγιστη τιμή διαμέτρου
<b>Collision Detected</b>	Ενεργοποιείται στην περίπτωση που ανιχνευτεί σύγκρουση μεταξύ των σιαγόνων και κάποιου άλλης 3Δ οντότητας. (Χρήσιμη στην περίπτωση πρόσδεσης τεμαχίου στην εργαλειομηχανή)
<b>Diameter (m)</b>	Η επιθυμητή τιμή διαμέτρου για την αυτόματη λειτουργία
<b>Max Diameter (m)</b>	Η μέγιστη τιμή διαμέτρου στην οποία μπορεί να φθάσει το τσωκ, δηλ η μέγιστη τιμή διαμέτρου τεμαχίων που δύναται να προσδεθούν στο τσωκ
<b>V(m/sec)</b>	Η μέση ταχύτητα με την οποία γίνεται η μετατόπιση των σιαγόνων. Παράμετρος η οποία δημιουργήθηκε για την ρεαλιστικότητα της προσομοίωσης.
<b>% V (Float)</b>	Παράμετρος για τον επιπλέον έλεγχο της ταχύτητας μετατόπισης. Παίρνει τιμές από 0 έως 1, με το 1 να αντιστοιχεί στο 100% της ταχύτητας - V
<b>Jaw # (3D Entity)</b>	Οι 3Δ οντότητες των «σιαγόνων» του τσωκ.
<b>Jaw # Referential (3D Entity)</b>	Η 3Δ οντότητες με βάση τις οποίες ορίζονται οι άξονες μετατόπισης των σιαγόνων. Στην περίπτωση που αφηθούν κενές, λαμβάνονται σαν αναφορά οι ίδιες οντότητες που θα μετακινηθούν

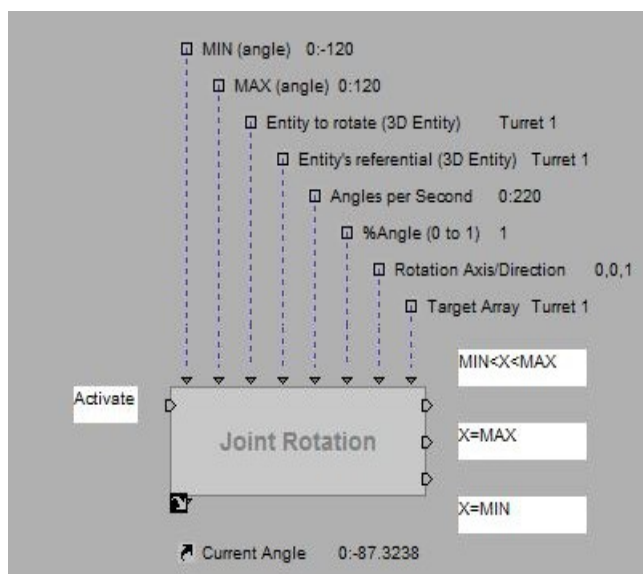
<b>Control Axis (vector)</b>	Ο άξονας κατά τον οποίο επιβάλλεται η μετατόπιση. Λαμβάνεται ως προς τις οντότητες αναφοράς. Η παράμετρος αυτή είναι ένα διάνυσμα – vector (πχ το διάνυσμα [1,0,0] αντιστοιχεί στον X άξονα της οντότητας αναφοράς)
<b>Target Array (Array)</b>	Ο πίνακας στον οποίο διατηρείται η τιμή της τρέχουσας διαμέτρου ανοίγματος του τσωκ.
<b>Current Diameter</b>	Η τρέχουσα τιμή διαμέτρου ανοίγματος του τσωκ.

Αυτό το ΔΓΣ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση οποιουδήποτε τσωκ μηχανής που διαθέτει τρία στελέχη σιαγόνων. Στην περίπτωση τσωκ με τέσσερα ή έξι στελέχη συγκράτησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν βάση για την δημιουργία ενός καινούργιου ΔΓΣ. Στο σχήμα 8.15 φαίνονται οι 3Δ οντότητες του τσωκ καθώς και οι οντότητες - 3Δ Πλαίσια που χρησιμοποιήθηκαν σαν αναφορά για τον προσδιορισμό των αξόνων μετατόπισης των σιαγόνων. Περιορισμός είναι ότι ενώ ορίζονται κάθε ένα από τα στελέχη που θα υποστούν την μετατόπιση, καθώς και οι οντότητες αναφορικά με τις οποίες θα κινηθούν, ο άξονας προσδιορισμού της μετατόπισης θα πρέπει να είναι ο ίδιος για κάθε μία από τις τρεις σιαγόνες.

### 8.3.3 Περιστροφή 3Δ Οντοτήτων

Δυνατότητα περιστροφής μίας 3Δ οντότητας γύρω από ορισμένο άξονα σε συγκεκριμένες τιμές στροφής, με συγκεκριμένη ταχύτητα και κατεύθυνση. Ιδιαίτερο πλεονέκτημα αυτής της συμπεριφοράς είναι ο περιορισμός της περιστροφικής κίνησης μεταξύ δύο ακραίων τιμών της μέγιστης και ελάχιστης επιτρεπτής στροφής. Διακρίνονται δύο διαφορετικές λειτουργίες, Χειροκίνητης και Αυτόματης προσομοίωσης, για τις οποίες κατασκευάστηκαν ξεχωριστά ΔΓΣ. Αυτά χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της περιστροφικής κίνησης των αρθρώσεων του ρομποτικού βραχίονα, αλλά και των αξόνων B, C του κέντρου τórνευσης.

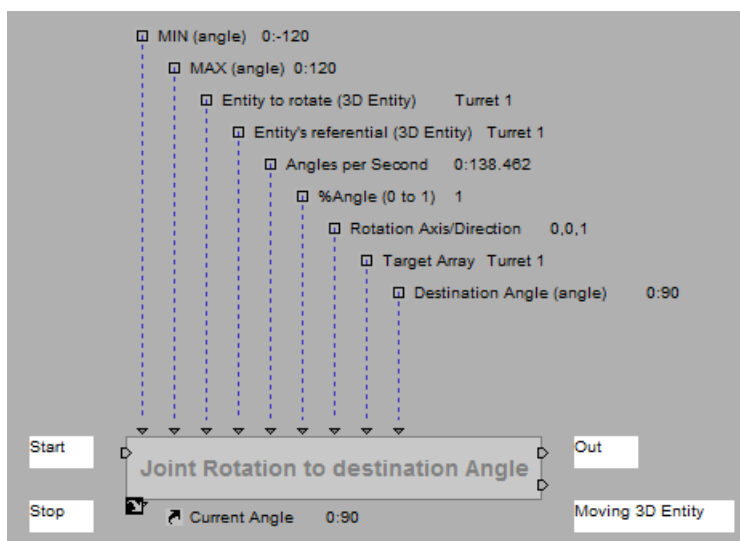
Προσομοίωση της **Χειροκίνητης λειτουργίας**, απαίτηση συνεχούς σήματος ενεργοποίησης εισόδου (πχ. Προσομοίωση εκπαίδευσης ρομποτικού βραχίονα με το χειριστήριο διδασκαλίας).



Σχήμα 43: ΔΓΣ - Χειροκίνητη Λειτουργία Περιστροφής 3Δ  
Οντότητων

<b>ACTIVATE 1</b>	Ενεργοποιεί την διαδικασία περιστροφής της 3Δ οντότητας ανάλογα με τα χαρακτηριστικά που προσδίδονται στις παραμέτρους εισόδου. Απαιτήση συνεχούς σήματος (όσο η διαδικασία είναι ενεργή η οντότητα περιστρέφεται με την αντίστοιχη ταχύτητα)
<b>MIN&lt;X&lt;MAX</b>	Ενεργοποιείται όσο η διαδικασία είναι ενεργή και εάν η τιμή στροφής της άρθρωσης βρίσκεται μεταξύ των ορίων (MIN, MAX)
<b>X=MAX</b>	Ενεργοποιείται όσο η διαδικασία είναι ενεργή και εάν η τιμή στροφής της άρθρωσης έχει φτάσει το μέγιστο όριο στροφής της.
<b>X=MIN</b>	Ενεργοποιείται όσο η διαδικασία είναι ενεργή και εάν η τιμή στροφής της άρθρωσης έχει φτάσει το μέγιστο όριο στροφής της.
<b>Entity to Rotate</b>	Η 3Δ οντότητα της οποίας επιδιώκεται η περιστροφή
<b>Entity's Referential</b>	Η 3Δ οντότητα ως προς την οποία θα επιτευχθεί η περιστροφή
<b>MIN X</b>	Το κατώτατο όριο στροφής της άρθρωσης
<b>MAX X</b>	Το μέγιστο όριο στροφής της άρθρωσης
<b>Indexing time - Angle per Second</b>	Η ταχύτητα με την οποία εκτελείται η περιστροφή σε μοίρες ανά δευτερόλεπτο.
<b>% Angle (Float)</b>	Παράμετρος για τον επιπλέον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής. Παίρνει τιμές από 0 έως 1, με το 1 να αντιστοιχεί στο 100% της ταχύτητας
<b>Rotation Axis – Direction (3D Vector)</b>	Προσδιορίζει τον άξονα περιστροφής ως προς την οντότητα αναφοράς καθώς και την κατεύθυνση περιστροφής. Πχ. Το διάνυσμα [0,0,-1] ορίζει σαν άξονα περιστροφής τον άξονα Z της οντότητας αναφοράς και κατεύθυνση ωρολογιακή (κανόνας δεξιού χεριού)
<b>Target Array</b>	Ο πίνακας όπου διατηρείται η τρέχουσα τιμή περιστροφής της άρθρωσης
<b>Current Angle</b>	Η ενεργή/τρέχουσα τιμή περιστροφής της 3Δ οντότητας ως προς την οντότητα αναφοράς.

Στην προσομοίωση της **Αυτόματης λειτουργίας** η ειδοποιός διαφορά είναι ότι η περιστροφή εκτελείται από τη θέση στροφής που βρίσκεται η οντότητα πριν την εκκίνηση της διαδικασίας έως μία τελική θέση προορισμού στροφής της οντότητας, με γραμμική παρεμβολή της γωνίας στροφής από την αρχική στην τελική τιμή.

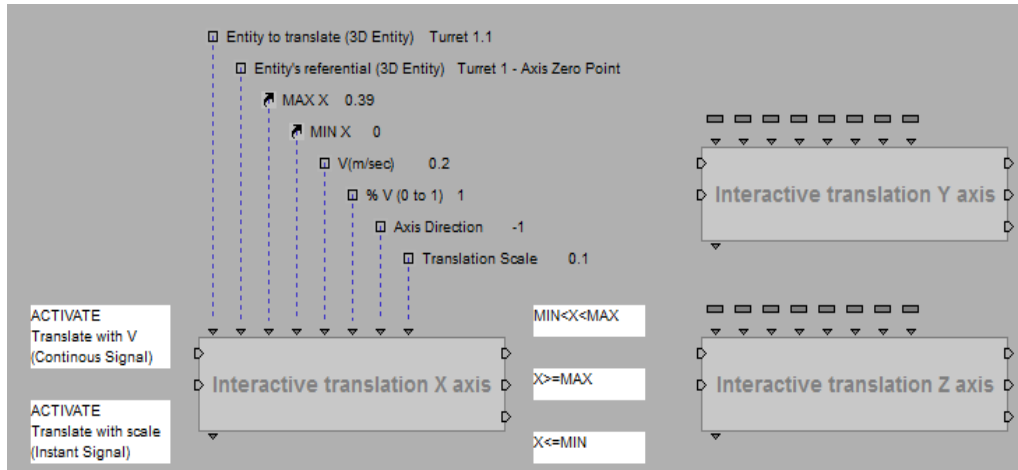


Σχήμα 44: ΔΓΣ - Αυτόματη Λειτουργία Περιστροφής 3Δ Οντοτήτων

Οι παράμετροι εισόδου είναι ακριβώς οι ίδιες με προηγουμένως, συμπεριλαμβανομένης επιπλέον της γωνίας προορισμού – Destination Angle που ορίζεται ως προς την οντότητα αναφοράς. Η είσοδοι «Activate» και «Stop» ενεργοποιούν και απενεργοποιούν την διαδικασία αντίστοιχα. Η έξοδος «Rotating 3D Entity» ενεργοποιείται καθ' όσο διαρκεί και η περιστροφή της οντότητας, ενώ η έξοδος «Out» μετά το πέρας της διαδικασίας περιστροφής.

### 8.3.4 Κίνηση 3Δ οντότητας κατά μήκος άξονα X,Y ή Z

Δυνατότητα κίνησης μίας 3Δ οντότητας κατά μήκος των αξόνων X, Y ή Z ενός συστήματος συντεταγμένων με ορισμένη ταχύτητα V. Τα ΔΓΣ που δημιουργήθηκαν αφορούν την προσομοίωση της Χειροκίνητης Λειτουργίας, ενώ διακρίνονται δύο διαφορετικοί τρόποι χρησιμοποίησής τους, ανάλογα με την επιλογή εισόδου και τον τύπο σήματος που επιλέγονται. Η συγκεκριμένες συμπεριφορές εφαρμόζονται για την «διαδραστική» προσομοίωση κίνησης οποιασδήποτε 3Δ οντότητας στον χώρο, πληρώνοντας πάντα τις συνθήκες κίνησης που ορίζονται από τις παραμέτρους εισόδου.



Σχήμα 45: ΔΓΣ - Κίνηση 3Δ οντότητας κατά μήκος άξονα X, Y ή Z (Χειροκίνητη Λειτουργία)

<b>ACTIVATE 1</b>	Ενεργοποιεί την διαδικασία μετατόπισης της 3Δ οντότητας που ορίζεται κατά μήκος του άξονα X ως προς την 3Δ οντότητα αναφοράς με ταχύτητα V. Απαιτήση συνεχούς σήματος εισόδου
<b>ACTIVATE 2</b>	Ενεργοποιεί την διαδικασία μετατόπισης της 3Δ οντότητας κατά μήκος του άξονα X ως προς την 3Δ οντότητα αναφοράς με ένα σταθερό βήμα/κλίμακα – scale και ταχύτητα V. Απαιτήση στιγμιαίου σήματος εισόδου.
<b>MIN&lt;X&lt;MAX</b>	Ενεργοποιείται όσο η διαδικασία είναι ενεργή και εάν η 3Δ οντότητα βρίσκεται μεταξύ των ορίων (MIN, MAX) του άξονα X
<b>X=MAX</b>	Ενεργοποιείται όσο η διαδικασία είναι ενεργή και εάν η 3Δ οντότητα βρίσκεται έχει φτάσει το μέγιστο όριο θέσης (MAX) στον άξονα X
<b>X=MIN</b>	Ενεργοποιείται όσο η διαδικασία είναι ενεργή και εάν η 3Δ οντότητα βρίσκεται έχει φτάσει το ελάχιστο όριο θέσης (MIN) στον άξονα X
<b>Entity to translate</b>	Η 3Δ οντότητα της οποίας επιδιώκεται η μετατόπιση
<b>Entity's Referential</b>	Η 3Δ οντότητα της ως προς την οποία θα επιτευχθεί η μετατόπιση
<b>MIN X</b>	Το κατώτατο όριο
<b>MAX X</b>	Το μέγιστο όριο
<b>V(m/sec)</b>	Η ταχύτητα με την οποία εκτελείται η μετατόπιση
<b>% V (Float)</b>	Παράμετρος για τον επιπλέον έλεγχο της ταχύτητας μετατόπισης. Παίρνει τιμές από 0 έως 1, με το 1 να αντιστοιχεί στο 100% της ταχύτητας - V
<b>Axis Direction</b>	Η κατεύθυνση της μετατόπισης. Τιμές -1/1 - αρνητικά/θετικά του άξονα X
<b>Translation Scale</b>	Η κλίμακα/βήμα της μετατόπισης. Χρειάζεται μόνο στην περίπτωση ενεργοποίησης της διαδικασίας από την είσοδο 2.
<b>Current X value</b>	Η ενεργή θέση της οντότητας ως προς τον άξονα που ορίζεται η μετατόπιση

Στην περίπτωση του Mori Seiki χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της χειροκίνητης λειτουργίας όλων των οντοτήτων του που δύναται να μετακινηθούν σε

κάποιους ή όλους τους άξονες X, Y και Z της μηχανής. Αυτές είναι τα εργαλειοφορεία φρέζας και τórνευσης, η πόντα, το δεύτερο τσoκ.

Αντίστοιχα στην περίπτωση του ρομποτικού βραχίονα χρησιμοποιούνται για την μετατόπιση του άκρου του εργαλείου του. Για να είναι όμως δυνατή η μετατόπιση αυτή θα πρέπει πάντα να γίνεται χρήση σε συνδυασμό με το ΔΓΣ που αναπτύχθηκε για την αντίστροφη κινηματικής του ρομποτικού βραχίονα. Η μετατόπιση επιβάλλεται στο 3Δ πλαίσιο Στόχου{G} του εργαλείου και ανάλογα με την καινούργια θέση υπολογίζονται οι νέες τιμές των έξι αρθρώσεων του βραχίονα. Επιπλέον αλλάζοντας το σύστημα συντεταγμένων αναφοράς (Entity's Referential) είναι δυνατό να εκτελείται η κίνηση σε διαφορετικούς άξονες X,YZ ως προς το 3Δ πλαίσιο της βάσης, του εργαλείου – καρπού ή του σταθμού εργασίας.

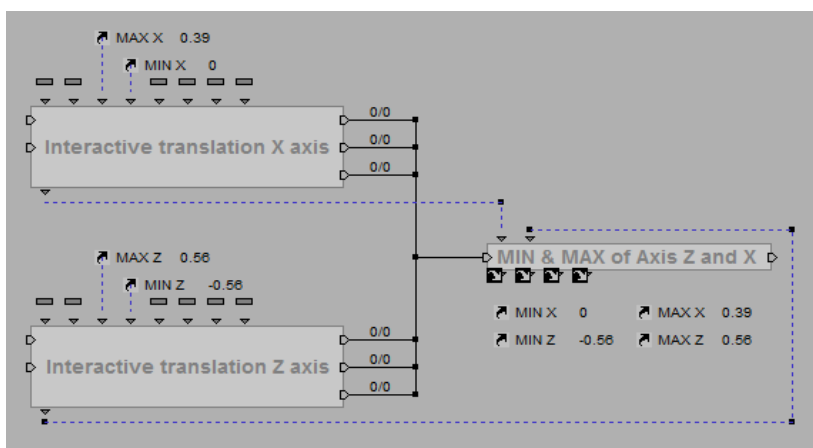
### 8.3.5 Περιορισμός της κίνησης

Τα ΔΓ σχεδιάστηκαν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η αλλαγή της θέσης ή του προσανατολισμού μίας οντότητας εντός δύο επιτρεπτόν ορίων τιμών MIN/MAX. Υπήρχαν όμως περιπτώσεις όπως αυτές των εργαλειοφορειών που το ελάχιστο ή μέγιστο όριο ανά άξονα δεν ήταν σταθερό. Από το Σχήμα 5.11 προκύπτουν οι περιοχές όπου μπορεί να μετακινηθεί η φρεζοκεφαλή και τα όρια κίνησης στους άξονες X και Z. Πάντα ως προς την αρχή των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων ελέγχου της φρεζοκεφαλής και ανάλογα με την περιοχή τιμών στην οποία βρίσκεται στον άξονα Z, προκύπτουν τα MIN και MAX όρια για τον άξονα X και αντίστοιχα. Τα όρια αυτά κατανέμονται ανά περιοχή σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα.

Z	MIN X	MAX X	X	MIN Z	MAX Z
$455 < Z \leq 560$	0	0	$X = 0$	-560	560
$400 < Z \leq 455$	-390	0	$-90 \leq X < 0$	-560	455
$-480 \leq Z \leq 400$	-750	0	$-390 \leq X < -90$	-530	560
$-530 \leq Z < -480$	-390	0	$-750 \leq X < -390$	-480	505
$-560 \leq Z < -530$	-90	0			

Πίνακας 8.1: Περιοχές εύρους κινήσεων Φρεζοκεφαλής

Δημιουργήθηκε ένα ΔΓ, το οποίο λαμβάνει της ενεργές τιμές της θέσης της Φρεζοκεφαλής στους άξονες X και Z, ως προς το σύστημα συντεταγμένων ελέγχου της. Αφού ελεγχθεί σε ποια περιοχή τιμών βρίσκεται η 3Δ οντότητα, προκύπτουν ανάλογα τα όρια MIN/MAX. Οι συντομεύσεις τους στην συνέχεια συνδέονται με τα ΔΓ μετατόπισης για την οριοθέτηση της κίνησης. Επειδή κάθε μηχανή είναι διαφορετική ήταν αρκετά δύσκολο να δημιουργηθεί ένα καθολικό ΔΓ για την επισήμανση των ορίων. Παρόλα αυτά η ανάπτυξη αυτής της συμπεριφοράς για μία συγκεκριμένη μηχανή είναι ιδιαίτερα εύκολη, αφού βασίζεται απλά στον έλεγχο μίας παραμέτρου μεταξύ περιοχών τιμών και ανάλογα με το αποτέλεσμα στην απόδοση τιμών στις παραμέτρους MIN/MAX.



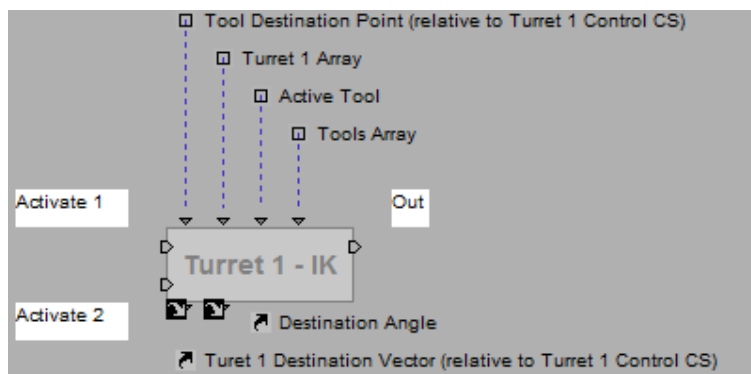
Σχήμα 46: Συνδεδασμένη λειτουργία ΔΓΣ για τον περιορισμό της κίνησης της Φρεζοκεφαλής εντός επιτρεπτόν ορίων

Οι κατάλληλες ενέργειες έγιναν και για τον καθορισμό των ορίων μετακίνησης του εργαλειοφορείου τórνευσης ρεβόλβερ, σύμφωνα με το Σχήμα 5.12.

### 8.3.6 Αντίστροφη Κινηματική εργαλειοφορείου Φρέζας και Τórνευσης

Δοθέντος του τελικού σημείου του εργαλείου ως προς το σύστημα συντεταγμένων ελέγχου του εργαλειοφορείου καθώς και της γωνίας προσανατολισμού του άξονα B. Υπολογίζεται η τελική θέση μετατόπισης του εργαλειοφορείου ως προς το σύστημα συντεταγμένων ελέγχου του.



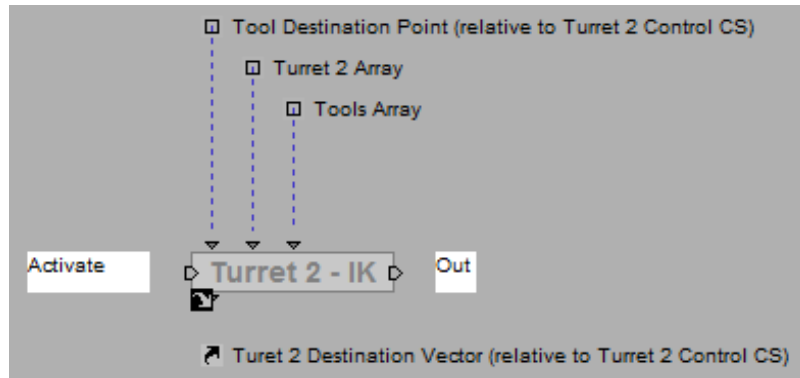


Σχήμα 47: ΔΓΣ - Αντίστροφης Κινηματικής εργαλειοφορείου Φρέζας

<b>ACTIVATE 1</b>	Ενεργοποιεί τον αλγόριθμο υπολογισμού της καινούργιας θέσης, λαμβάνοντας υπόψιν το τελικό σημείο και την <b>ενεργή</b> γωνία περιστροφής του άξονα B
<b>ACTIVATE 2</b>	Ενεργοποιεί τον αλγόριθμο υπολογισμού της καινούργιας θέσης, λαμβάνοντας υπόψιν το τελικό σημείο και μία <b>νέα - τελική</b> γωνία περιστροφής του άξονα B
<b>Out</b>	Ενεργοποιείται μετά το πέρας υπολογισμού της νέας θέσης
<b>Tool destination Point</b>	Το τελικό – επιθυμητό διάνυσμα θέσης του εργαλείου ως προς το σύστημα συντεταγμένων ελέγχου της Φρεζοκεφαλής
<b>B axis rotation angle</b>	Η επιθυμητή γωνία προσανατολισμού του άξονα B (λαμβάνεται υπόψιν μόνο στην περίπτωση ενεργοποίησης του ΔΓ από την είσοδο «activate 2»)
<b>Turret 1 Array</b>	Ο πίνακας με τις ενεργές τιμές δεδομένων της Φρεζοκεφαλής
<b>Tools Array</b>	Ο πίνακας με τις παραμέτρους των εργαλείων της Φρεζοκεφαλής
<b>Turret 1 Destination Vector</b>	Η τελική θέση μετατόπισης του εργαλειοφορείου ως προς το σύστημα συντεταγμένων ελέγχου του.
<b>Destination Angle</b>	Η γωνία περιστροφής του άξονα B για την προσέγγιση της τελικής θέσης

Για την λειτουργία του ΔΓΣ ορίζονται οι πίνακες {Turret 1} και {Tools}. Ο πίνακας {Turret 1} διατηρεί τα δεδομένα της ενεργής θέσης της Φρεζοκεφαλής (X,Y,Z), την γωνία προσανατολισμού του άξονα B, όπως και το ενεργό - «φορτωμένο» εργαλείο. Στον πίνακα {Tools} διατηρούνται τα απαραίτητα στοιχεία των εργαλείων που δύναται να «φορτωθούν» στην Φρεζοκεφαλή, όνομα, 3Δ οντότητα και το μήκος εργαλείου για τον υπολογισμό της καινούργιας θέσης.

Κατά αντίστοιχο τρόπο εφαρμόζεται και ο αλγόριθμος της αντίστροφης κινηματικής για το εργαλειοφορείο τόννευσης που υπολογίζει το τελικό σημείο μετατόπισης του εργαλειοφορείου ως προς το σύστημα συντεταγμένων ελέγχου του.

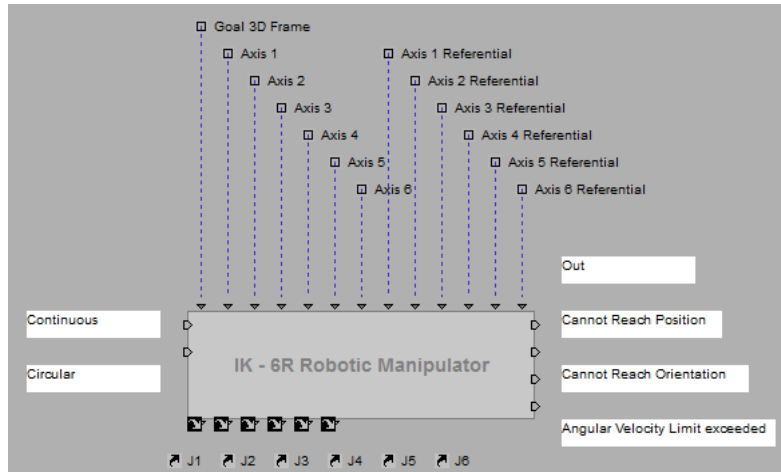


Σχήμα 48: ΔΓΣ - Αντίστροφης Κινηματικής εργαλειοφορείου Τόρνευσης

Η είσοδος Activate ενεργοποιεί το ΔΓΣ και έξοδος ενεργοποιείται μετά το πέρας της διαδικασίας υπολογισμού της θέσης. Οι παράμετροι εισόδου είναι η τελική θέση του εργαλείου ως προς το σύστημα συντεταγμένων ελέγχου, ο πίνακας {Turret 2} με τα δεδομένα της ενεργής θέσης του εργαλειοφορείου (X,Z) και του ενεργού - «φορτωμένου» εργαλείου, όπως και ο αντίστοιχος πίνακας {Tools} με τις προδιαγραφές των εργαλείων.

### 8.3.7 Αντίστροφη Κινηματική ρομποτικών βραχιόνων 6R

Με την εφαρμογή του αλγορίθμου επίλυσης της αντίστροφης κινηματικής του ρομποτικού βραχίονα δημιουργήθηκε το παρακάτω ΔΓΣ το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε ρομποτικό βραχίονα 6R, με μόνη απαίτηση την τοποθέτηση των συστημάτων συντεταγμένων των αρθρώσεων (ελέγχου και περιστροφής) κατά τον τρόπο που περιγράφεται στο κεφάλαιο 6. Το ΔΓΣ υπολογίζει τις απαραίτητες γωνίες στροφής των 6 αρθρώσεων ώστε να συμπίπτει το 3Δ πλαίσιο του εργαλείου {T} με το 3Δ Πλαίσιο του Στόχου {G} ως προς τη θέση και τον προσανατολισμό.



Σχήμα 49: ΔΓΣ - Αντίστροφης Κινηματικής Ρομποτικών Βραχιόνων 6R

<b>Continuous</b>	Ενεργοποιεί τον αλγόριθμο υπολογισμού στην περίπτωση ομαλής συνεχόμενης μετατόπισης του άκρου του εργαλείου (απαιτήση συνεχούς σήματος). Παρεμβολικές ή ακανόνιστες ομαλοποιημένες κινήσεις
<b>Circular</b>	Ενεργοποιεί τον αλγόριθμο υπολογισμού σε περίπτωση ταχείας περιστροφικής μετατόπισης του άκρου του εργαλείου – slew motion
<b>Out</b>	Ενεργοποιείται μετά το πέρας υπολογισμού της νέας θέσης
<b>Cannot reach Position</b>	Ενεργοποιείται στην περίπτωση που ο βραχίονας δεν μπορεί να προσεγγίσει το νέο σημείο του καρπού {W} (περίπτωση που το σημείο είναι εκτός του φακέλου εργασίας του ρομπότ)
<b>Cannot reach Orientation</b>	Ενεργοποιείται στην περίπτωση που ο καρπός {W} του βραχίονα μπορεί να προσεγγίσει την νέα θέση αλλά χωρίς να συμπίπτει ο προσανατολισμός, οπότε και το τελικό σημείο.
<b>Angular Velocity Limit Exceeded</b>	Ενεργοποιείται στην περίπτωση που κάποια από τις 6 αρθρώσεις ξεπεράσει την μέγιστη θεμιτή γωνιακή ταχύτητα σε περιπτώσεις ομαλής μετατόπισης του εργαλείου
<b>Goal 3D Frame</b>	Το 3D Πλαίσιο Στόχου του οποίου ο προσανατολισμός και η θέση επιχειρείται να συμπίπτει με το πλαίσιο του εργαλείου
<b>Axis {n}</b>	Οι 3Δ οντότητες των βραχιόνων, που θα υποστούν την περιστροφή (σχήμα 8.3)
<b>Axis {n} Referential</b>	Οι 3Δ οντότητες που ορίζουν τα πλαίσια αναφοράς για τον υπολογισμό της στροφής κάθε άρθρωσης (σχήμα 8.7)
<b>J{n}</b>	Οι γωνίες των 6 αρθρώσεων, ώστε το πλαίσιο του εργαλείου να συμπίπτει με αυτό του στόχου

Για την ορθή κινηματική προσομοίωση ενός ρομποτικού βραχίονα είναι απαραίτητη η συμπλήρωση του πίνακα {Robotic Axis Characteristics} από τον χρήστη. Στον πίνακα αυτό αναγράφονται τα απαραίτητα χαρακτηριστικά του ρομποτικού βραχίονα, ώστε να είναι αντιπροσωπευτική η λύση της αντίστροφης κινηματικής. Αυτά είναι το

μέγιστο και ελάχιστο όριο στροφής κάθε άρθρωσης, όπως και η μέγιστη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής τους.

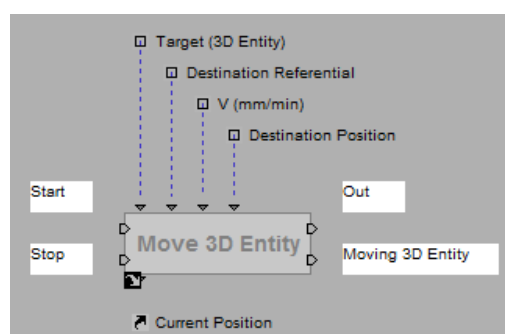
Array Setup				
Robotic Axis Characterist				
Add Column    Add Row				
	0 : J	1 : MIN	2 : MAX	3 : MAX Angular Speed (Angle per Second)
0	1	0:-180	0:180	0:105
1	2	0:-135	0:0	0:105
2	3	0:-240	0:85	0:105
3	4	0:-380	0:380	0:170
4	5	0:-125	0:125	0:170
5	6	0:-360	0:360	0:280

Σχήμα 50: Πίνακας χαρακτηριστικών των αρθρώσεων του ρομποτικού βραχίονα Fanuc R2000iA - 125R

### 8.3.8 Ευθύγραμμη μετατόπιση σε σημείο στο χώρο (X,Y,Z) με ταχύτητα V

Δυνατότητα ευθύγραμμης μετατόπισης μίας 3Δ οντότητας στην ζητούμενη θέση «στόχο» [X, Y, Z] ως προς ένα συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων με ταχύτητα V(mm/min). Ορίζεται η οντότητα που θα μετακινηθεί, το σημείο προορισμού - Destination Point, το σύστημα συντεταγμένων ως προς το οποίο ορίζεται το σημείο προορισμού και η γραμμική ταχύτητα μετατόπισης V(mm/min).

Χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της αυτόματης λειτουργίας μετατόπισης των οντοτήτων. Στις περιπτώσεις μετατόπισης των εργαλειοφορέων φρέζας/τόρνευσης και του ρομποτικού βραχίονα, χρησιμοποιείται πάντα σε συνδυασμό με τα ανάλογα ΔΓΣ της αντίστροφης κινηματικής. Ουσιαστικά σε κάθε περίπτωση, η οντότητα που μετατοπίζεται είναι αυτή του 3Δ πλαισίου Στόχου του εργαλείου. Η ταχύτητα V(mm/min) αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες περιπτώσεις με τον ρυθμό πρόωσης – feed rate του εργαλείου.



Σχήμα 51: ΔΓΣ - Ευθύγραμμη μετατόπιση 3Δ οντότητας στον χώρο (X, Y, Z)

Η Είσοδος «Start» ενεργοποιεί την διαδικασία, ενώ η «Stop» την σταματάει. Η Έξοδος «Out» ενεργοποιείται μετά το πέρας της διαδικασίας και η «Moving 3D Entity» καθ' όλη την διάρκεια που η διαδικασία είναι ενεργοποιημένη (δηλ μέχρι να τελειώσει η μετακίνηση της οντότητας). Η Παράμετρος Εξόδου «Current Position» ισοδυναμεί με το σημείο που βρίσκεται η οντότητα ως προς το σύστημα αναφοράς.

### **8.3.9 Αυτόματη Αλλαγή Εργαλείων**

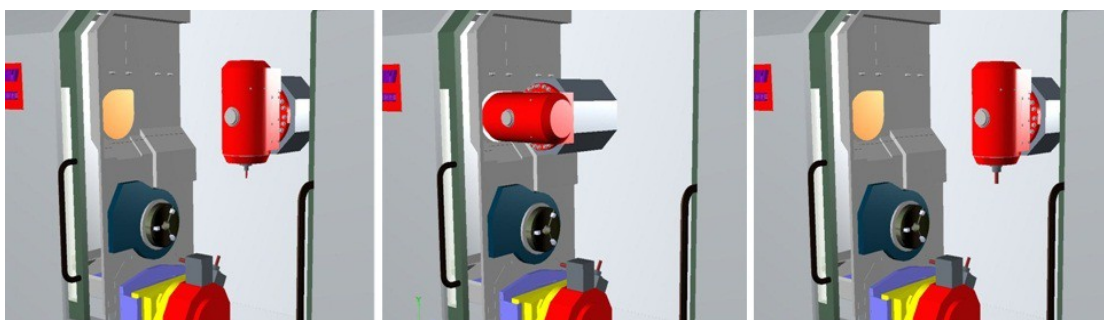
Δημιουργήθηκαν δυο πίνακες – Arrays για την διατήρηση δεδομένων των εργαλείων. Στον έναν αποθηκεύονται οι πληροφορίες των εργαλείων κοπής που δύναται να «φορτωθούν» στο εργαλειοφορείο φρέζας, ο πίνακας αυτός διαθέτει 20 σειρές, όση είναι και η χωρητικότητα της αποθήκης εργαλείων. Ο άλλος πίνακας χρησιμοποιείται για την αποθήκευση δεδομένων των εργαλείων που είναι «φορτωμένα» στο εργαλειοφορείο τόννευσης τύπου ρεβόλβερ, το οποίο έχει χωρητικότητα 12 εργαλείων. Στους πίνακες αποθηκεύονται προς το παρόν δεδομένα όπως το όνομα του εργαλείου T#, το μήκος – tool length, το πλάτος – tool width, που χρησιμοποιούνται και για τον υπολογισμό των σημείων προσέγγισης. Μελλοντικά οι πίνακες μπορούν να επεκταθούν και να προστεθούν και άλλες πληροφορίες χρήσιμες για το σύστημα. Επιπλέον διατηρούνται σαν παράμετροι τα 3Δ αντικείμενα που αντιπροσωπεύουν τα εργαλεία.

### **Αυτόματη Αλλαγή Εργαλείου Φρεζοκεφαλής**

Εύκολα με τις συμπεριφορές που αναπτύχθηκαν προσομοιώνεται η αυτόματη αλλαγή εργαλείου της φρεζοκεφαλής με τον προγραμματισμό εκτέλεσης των παρακάτω διεργασιών.

1. Η Φρεζοκεφαλή μεταφέρεται στο σημείο όπου είναι δυνατή η αλλαγή εργαλείου παίρνοντας τον κατάλληλο προσανατολισμό. Η μετατόπιση γίνεται με την μέγιστη δυνατή ταχύτητα.
2. Ταυτόχρονα η πόρτα της αποθήκης εργαλείων ανοίγει.
3. Ανάλογα με το εργαλείο που έχει επιλεγεί να «φορτωθεί» πληροφορείται το σύστημα από τον αντίστοιχο πίνακα – Array ποια 3Δ οντότητα θα πρέπει να τοποθετηθεί στην φρεζοκεφαλή.

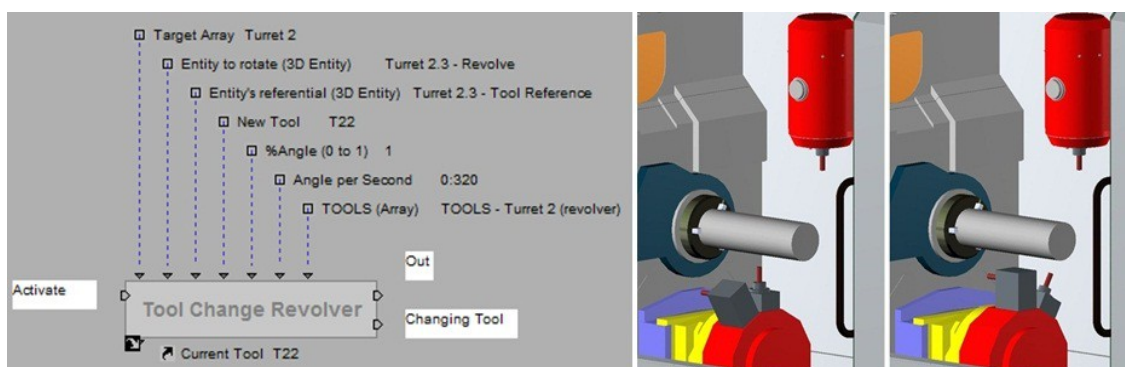
4. Ανάλογα με το μήκος του καινούργιου εργαλείου φορτώνεται η 3Δ οντότητα στο σύστημα. Ενώ η οντότητα του παλιού εργαλείου μετατοπίζεται σε σημείο που να μην είναι ορατή.
5. Αλλάζει η ιεραρχία. Το παλιό εργαλείο παύει να είναι παιδί της οντότητας Spindle της Φρεζοκεφαλής και την θέση του παίρνει η οντότητα του καινούργιου εργαλείου.
6. Η Φρεζοκεφαλή επιστρέφει στο αρχικό σημείο που είχε πριν «καλεστεί» η συμπεριφορά αλλαγής εργαλείου.



Σχήμα 52: Αυτόματη αλλαγή εργαλείου Φρεζοκεφαλής

### Αυτόματη αλλαγή εργαλείου σε εργαλειοφορείο τύπου Ρεβόλβερ

Για την αλλαγή εργαλείου του εργαλειοφορείου τórνευσης – ρεβόλβερ, δημιουργήθηκε ένα ΔΓΣ που μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε οντότητα τύπου ρεβόλβερ με την ανάλογη διαμόρφωση του αντίστοιχου πίνακα εργαλείων του.



Σχήμα 53: ΔΓΣ - Αυτόματη αλλαγή εργαλείου σε εργαλειοφορείο τύπου Ρεβόλβερ

<b>ACTIVATE</b>	Ενεργοποιεί την διαδικασία μετατόπισης της 3Δ οντότητας που ορίζεται κατά μήκος του άξονα X ως προς την 3Δ οντότητα αναφοράς με ταχύτητα V. Απαιτήση συνεχούς σήματος εισόδου
<b>Out</b>	Ενεργοποιείται μετά το πέρας της διαδικασίας αλλαγής του εργαλείου
<b>Changing Tool</b>	Ενεργοποιείται όσο η διαδικασία καθόσον διαρκεί η αλλαγή εργαλείου
<b>Target Array</b>	Ο πίνακας όπου διατηρείται το ενεργό εργαλείο
<b>Entity to Rotate</b>	Η 3Δ οντότητα της οποίας επιδιώκεται η περιστροφή
<b>Entity's Referential</b>	Η 3Δ οντότητα ως προς την οποία θα επιτευχθεί η περιστροφή
<b>New Tool</b>	Το νέο εργαλείο που θα «φορτωθεί»
<b>V(m/sec)</b>	Η ταχύτητα με την οποία εκτελείται η περιστροφή
<b>% V (Float)</b>	Παράμετρος για τον επιπλέον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής. Παίρνει τιμές από 0 έως 1, με το 1 να αντιστοιχεί στο 100% της ταχύτητας - V
<b>TOOLS (Array)</b>	Ο πίνακας όπου διατηρούνται τα χαρακτηριστικά του εργαλείου. Από εδώ η διαδικασία διαβάζει την γωνία στροφής που αντιστοιχεί σε κάθε εργαλείο και ανάλογα εκτελείται η περιστροφή για την αλλαγή εργαλείου
<b>Current X value</b>	Το ενεργό εργαλείο του εργαλειοφορείου ρεβόλβερ

## 8.4 Προγραμματισμός και Διαχείριση Συμπεριφορών

Με τις συμπεριφορές που προγραμματίστηκαν και παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, μπορούν να δημιουργηθούν διάφοροι συνδυασμοί μεταξύ τους, αλλά και με τα ήδη υπάρχοντα ΔΔ συμπεριφορών του Virtools. Οι συνδυασμοί αυτοί μεταφράζονται σε αλληλουχίες εκτέλεσης διαδικασιών. Κατά τον τρόπο αυτό μπορεί να προγραμματιστεί η ταυτόχρονη και διαδοχική προσομοίωση συμπεριφορών σε όλους τους άξονες του κέντρου κατεργασιών ή του ρομποτικού βραχίονα. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα από τις πιο βασικές λειτουργίες που υλοποιήθηκαν ως δείγμα των δυνατοτήτων του ΕΠΕ χρησιμοποιώντας τα παραπάνω ΔΓΣ.

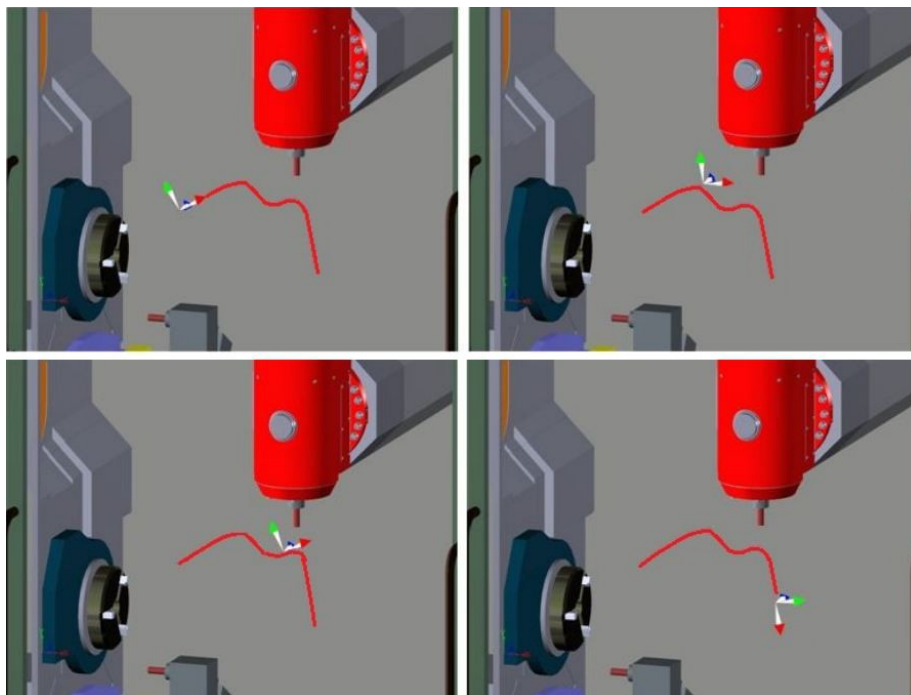
### 8.4.1 Μετατόπιση ακολουθώντας ορισμένη τροχιά

Η χάραξη συγκεκριμένης τροχιάς από το εργαλείο του ρομποτικού βραχίονα, όπως και ο συγχρονισμός και ταυτόχρονος έλεγχος των τεσσάρων αξόνων στα κέντρα τόννευσης και κατεργασιών είναι σχετικά δύσκολος, ειδικά σε περιπτώσεις που το εργαλείο καλείται να ακολουθήσει περίπλοκες τροχιές.

Τέτοιου είδους προσομοιώσεις είναι δυνατόν να επιτευχθούν εύκολα χρησιμοποιώντας συνδυασμούς των συμπεριφορών που επιλύουν τα προβλήματα της αντίστροφης κινηματικής και των ήδη υπαρχόντων του Virtools. Μοναδική απαίτηση στις συγκεκριμένες περιπτώσεις είναι η 3Δ οντότητα της τροχιάς. Για την εικονοποίηση αυτής χρησιμοποιούνται 3Δ καμπύλες – 3D Curves. Τέτοιες καμπύλες μπορούν να δημιουργηθούν στο 3DVIA Virtools χρησιμοποιώντας το ανάλογο εργαλείο ή ακόμα να εισαχθούν από ένα τρισδιάστατο σχεδιαστικό πακέτο. Εναλλακτικά μπορούν να διαβαστούν τα διαδοχικά σημεία που σχηματίζουν μία καμπύλη από έναν πίνακα ή ένα αρχείο .txt ώστε να εισαχθούν στον εικονικό κόσμο σαν 3Δ οντότητες. Τέλος μπορούν να δημιουργηθούν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, με την σχετική κίνηση των οντοτήτων κατά την χειροκίνητη ή αυτόματη λειτουργία, ακόμα και λαμβάνοντας σημεία από το πραγματικό περιβάλλον με χρήση ειδικού εξοπλισμού, περίπτωση που προσφέρει επιπλέον δυνατότητες στο σύστημα και εξετάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

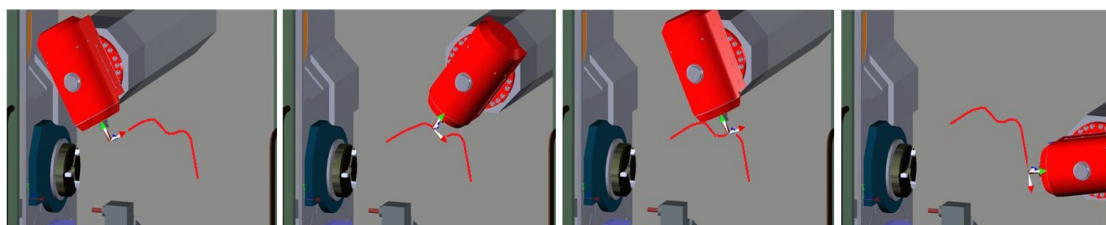
Είναι δυνατή η μετακίνηση μίας 3Δ οντότητας κατά μήκος μίας καμπύλης – Curve, με ταυτόχρονο έλεγχο του προσανατολισμού της, θέτοντας έναν άξονα της οντότητας να είναι εφαπτόμενος με τον άξονα της καμπύλης. Λαμβάνοντας την θέση και προσανατολισμό αυτής της οντότητας ενεργοποιούνται τα ΔΓΣ της αντίστροφη κινηματικής ώστε να συμπίπτει το άκρο του εργαλείου με την οντότητα ή και τον προσανατολισμό της αν αυτό είναι απαραίτητο. Στο σχήμα 8.26 φαίνεται μία τέτοια καμπύλη και η κατά μήκος της μετακίνηση ενός 3Δ πλαισίου, με τον άξονα X του πλαισίου εφαπτόμενο στην καμπύλη. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το πλαίσιο αυτό θεωρείται το πλαίσιο Στόχος {G} του εργαλείου της Φρεζοκεφαλής.





Σχήμα 54: Μετατόπιση του 3D πλαισίου Στόχου της Φρεζοκεφαλής κατά μήκος συγκεκριμένης τροχιάς με τον άξονα X εφαπτόμενο σε αυτή

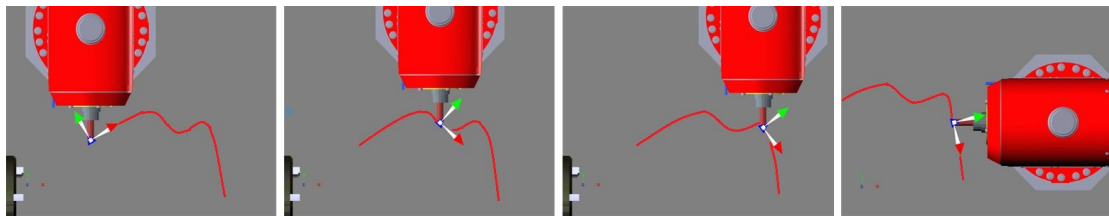
Λαμβάνοντας τον προσανατολισμό του πλαισίου αλλά και την θέση του στο χώρο ως προς το πλαίσιο ελέγχου του εργαλειοφορείου, ενεργοποιείται ο αλγόριθμος της αντίστροφης κινηματικής. Το αποτέλεσμα είναι η μετατόπιση της Φρεζοκεφαλής με το άκρο του εργαλείου πάντα κάθετο στην 3D καμπύλη τροχιάς.



Σχήμα 55: Μετατόπιση Φρεζοκεφαλής κατά μήκος συγκεκριμένης τροχιάς, κάθετο ως προς αυτή προσανατολισμό

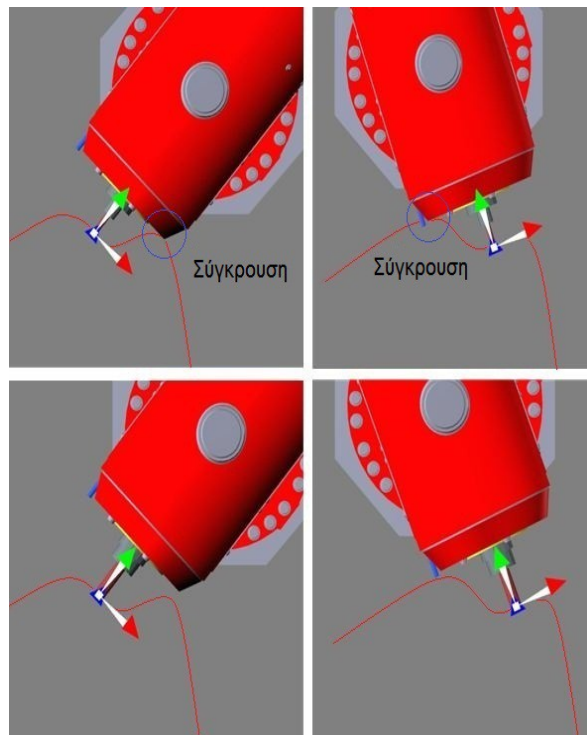
με

Η διαδικασία μπορεί να εκτελεστεί χωρίς να είναι αναγκαία η συνθήκη καθετότητας, μπορεί δηλ να οριστεί η γωνία του άξονα B με την οποία εκτελείται η κοπή κατά μήκος της τροχιάς. Στο παράδειγμα του σχήματος 8.28 το εργαλείο ακολουθεί την ίδια τροχιά, με γωνία του άξονα  $B=0^\circ$  και  $B=-90^\circ$  για το τελευταίο κομμάτι της καμπύλης, καθώς διαφορετικά υπάρχει σύγκρουση με την καμπύλη /τεμάχιο.



Σχήμα 56: Μετατόπιση Φρεζοκεφαλής κατά μήκος τροχιάς με καθορισμένο από το χρήστη προσανατολισμό

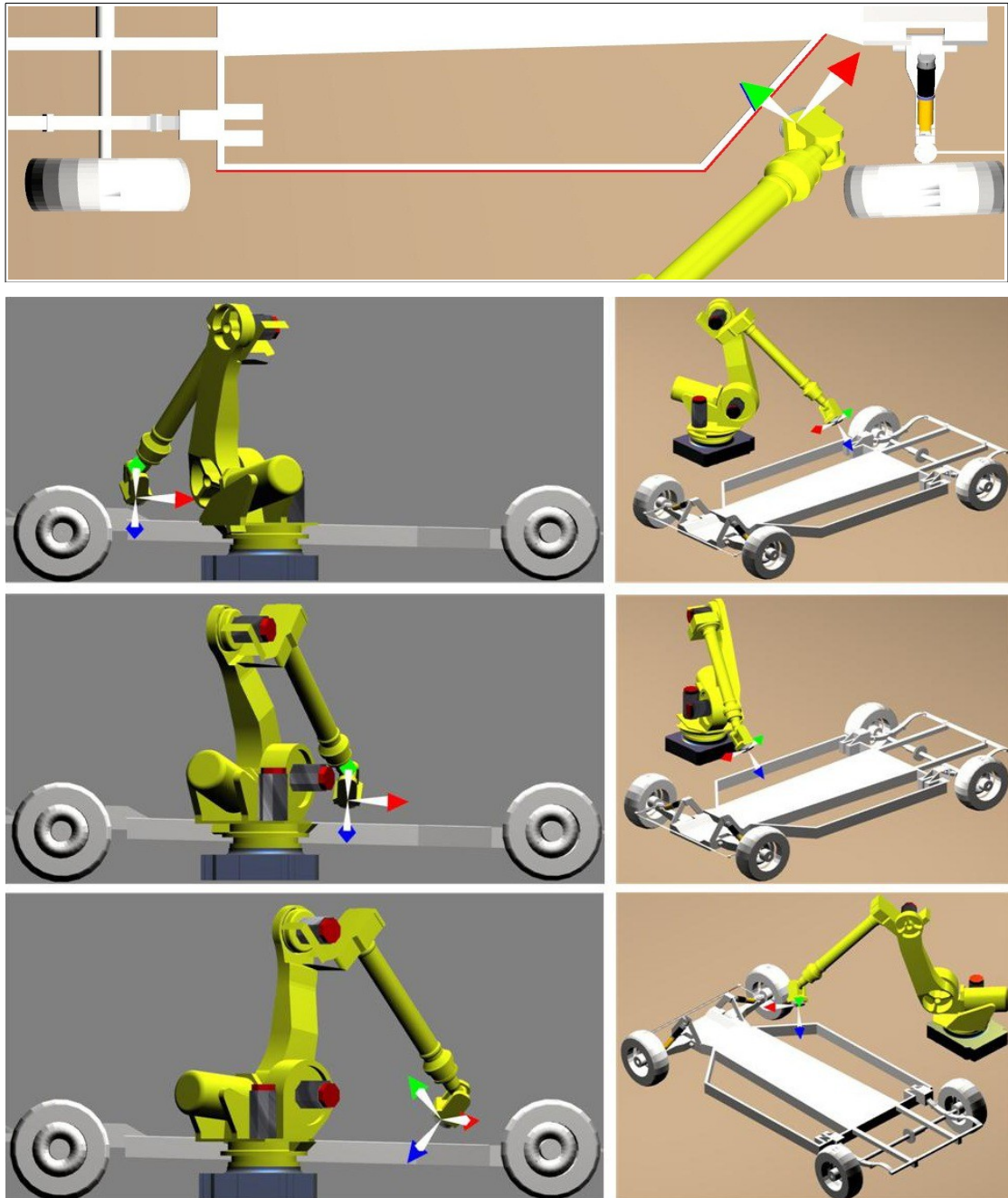
Από την οπτικοποίηση της διαδικασίας κοπής κατά μήκος μίας συγκεκριμένης τροχιάς είναι δυνατόν να βγουν επιπλέον συμπεράσματα για την δυνατότητα κατεργασιμότητας ενός τεμαχίου. Στο σχήμα 8.31 προσομοιώνεται η κινηματική κοπής κατά μήκος τροχιάς με δύο διαφορετικά εργαλεία. Και στις δύο περιπτώσεις το εργαλείο είναι πάντα κάθετο στην τροχιά. Όπως φαίνεται η κοπή με το πρώτο εργαλείο κρίνεται αδύνατη, καθώς παρατηρείται σύγκρουση του εργαλειοφορέα με την καμπύλη/τεμάχιο σε δύο σημεία.



Σχήμα 57: Σύγκριση κινηματικής της κοπής κατά μήκος τροχιάς με δύο διαφορετικά εργαλεία

Στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιώντας μακρύτερο εργαλείο η σύγκρουση αποφεύγεται.

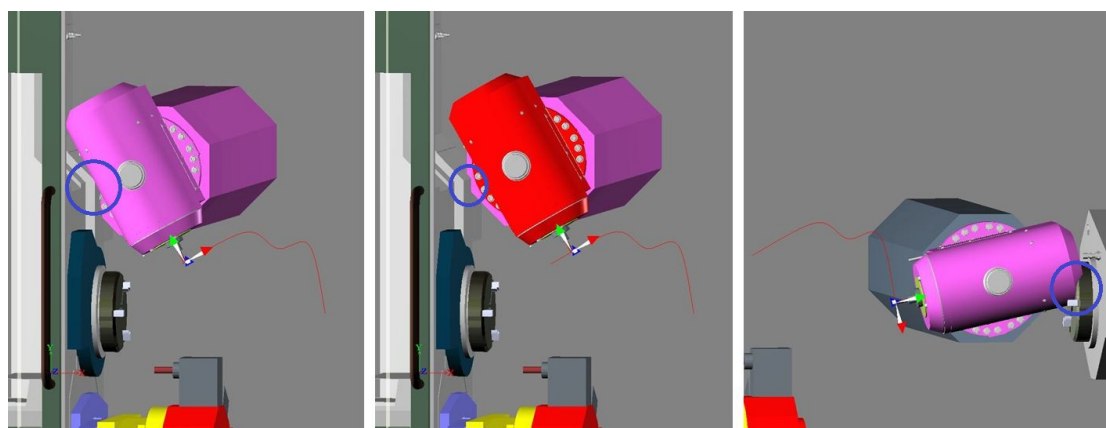
Η ίδια λογική υιοθετείται και για την προσομοίωση διαφόρων κινήσεων του ρομποτικού βραχίονα όταν είναι γνωστή η τροχιά. Στο παράδειγμα του σχήματος ο ρομποτικός βραχίονας εκτελεί συγκόλληση τόξου κατά μήκος τροχιάς, διατηρώντας γωνία  $45^\circ$  ως προς αυτή. Σημειώνεται ότι ο συγκεκριμένος βραχίονας δεν χρησιμοποιείται στην πράξη για συγκόλληση τόξου, το παράδειγμα είναι μόνο για επίδειξη των δυνατοτήτων του εικονικού μοντέλου.



Σχήμα 58: Συγκόλληση τόξου με ρομποτικό βραχίονα κατά μήκος ορισμένης τροχιάς

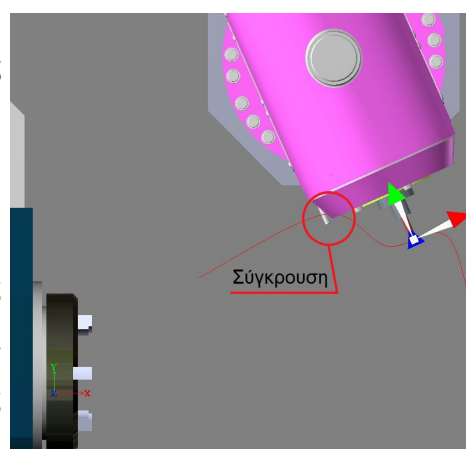
#### 8.4.2 Μηχανισμός ανίχνευσης συγκρούσεων

Η ανίχνευση σύγκρουσης αναφέρεται τυπικά στο υπολογιστικό πρόβλημα ανίχνευσης του σημείου τομής δύο ή περισσότερων αντικείμενων. Είναι σημαντικό μέρος της ανάπτυξης στα συστήματα εικονικής πραγματικότητας και έχει ιδιαίτερες εφαρμογές στην ρομποτικούς μηχανισμούς. Το Virtools προσφέρει την δυνατότητα ανίχνευσης της σύγκρουσης μεταξύ εικονικών αντικειμένων και ταυτόχρονα παρέχει την δυνατότητα διαχείρισης συγκρούσεων. Στις εφαρμογές που μελετήθηκαν κάτι τέτοιο ήταν ιδιαίτερα σημαντικό αφού προσδίδει στο σύστημα επιπλέον δυνατότητες ελέγχου. Κάνει τις προσομοιώσεις πιο ρεαλιστικές και κυρίως ενημερώνει τον χρήστη σε περιπτώσεις που η εκτέλεση κινήσεων είναι αδύνατη λόγω παρεμβολής άλλων αντικειμένων. Επιπλέον, η ανίχνευση συγκρούσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν συνθήκη πυροδότησης μίας σειράς επαγόμενων συμβάντων στο σύστημα.



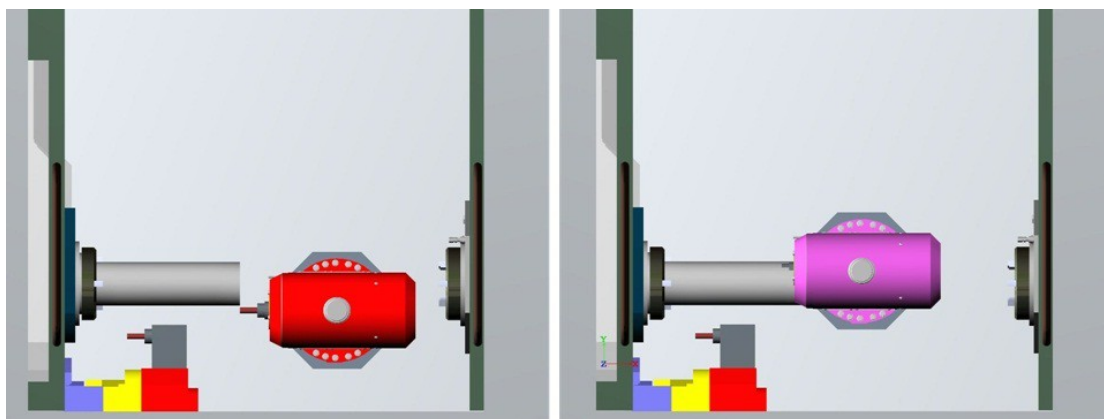
Σχήμα 59: Ανίχνευση συγκρούσεων Φρεζοκεφαλής

Στο παραπάνω σχήμα επαναλαμβάνεται το παράδειγμα του σχήματος 8.29. Ο χρήστης ενημερώνεται από το σύστημα για την ανίχνευση σύγκρουσης με την αλλαγή χρώματος του αντικείμενου που συγκρούεται. Η φαινομενικά αποδεκτή κίνηση του σχήματος 8.29 κρίνεται αδύνατη σε συγκεκριμένα σημεία της τροχιάς. Ο ίδιος μηχανισμός χρησιμοποιείται και για την ανίχνευση σύγκρουσης με την καμπύλη (Σχήμα 8.32).



Σχήμα 60: Ανίχνευση σύγκρουσης Φρεζοκεφαλής με την καμπύλη τροχιάς

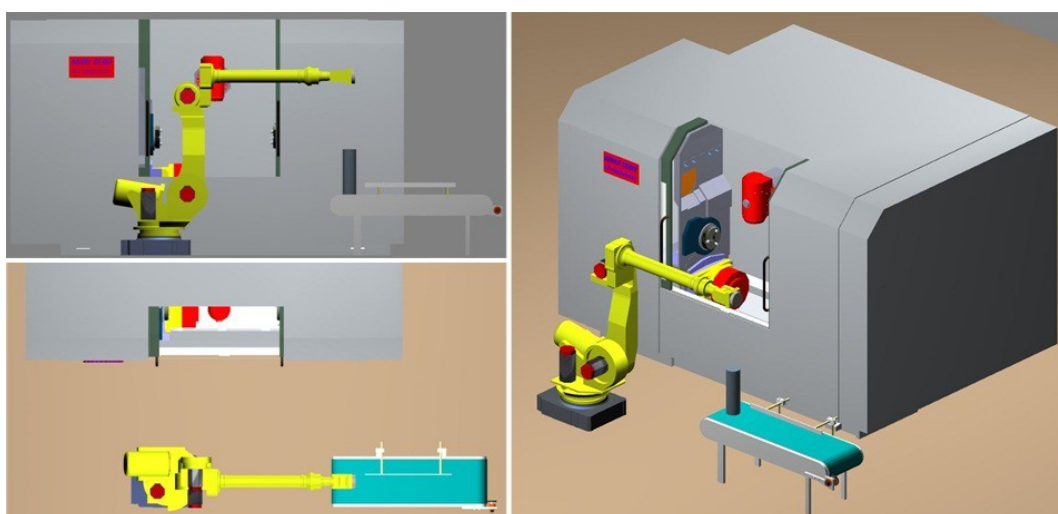
Προσοχή επίσης χρειάζεται κατά την αυτόματη αλλαγή εργαλείου της Φρεζοκεφαλής. Η διαδικασία αυτή δεν μπορεί να εκτελεστεί από οποιοδήποτε σημείο, καθώς πιθανόν να υπάρχουν αντικείμενα που να εμποδίζουν την κίνηση. Στο σχήμα 8.35 καλείται η αλλαγή εργαλείου μετά την κοπή προσώπου του τεμαχίου. Η Φρεζοκεφαλή προκείμενου να προσεγγίσει το σημείο αλλαγής εργαλείων με μία ευθύγραμμη κίνηση, συγκρούεται με το τεμάχιο. Επιβάλλεται η μεταφορά της Φρεζοκεφαλής σε ασφαλές σημείο για την αλλαγή εργαλείου.



Σχήμα 61: Σύγκρουση Φρεζοκεφαλής - τεμαχίου

#### 8.4.3 Σύνθεση αλληλουχίας κινήσεων

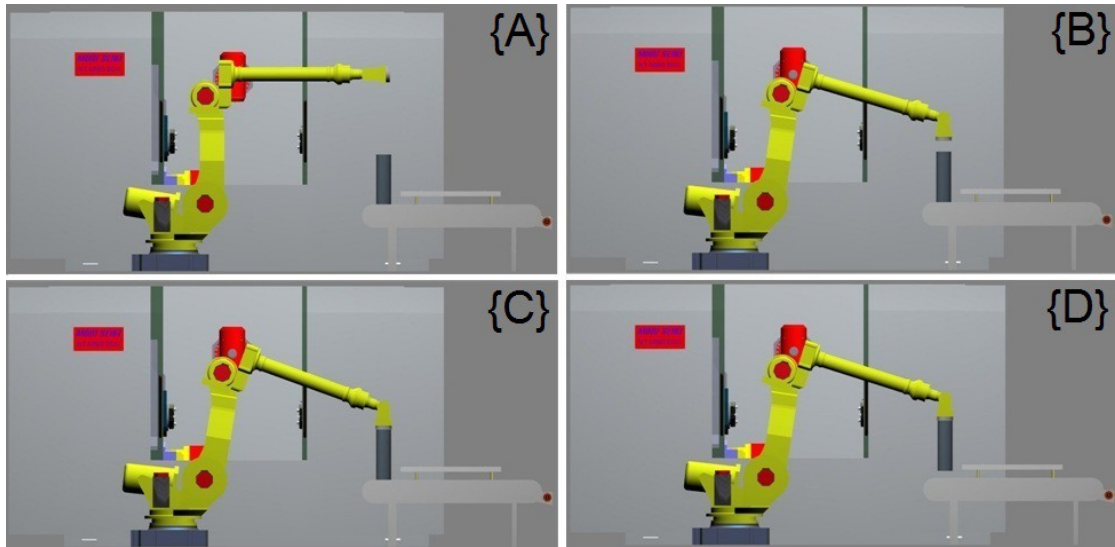
Για την ανάπτυξη της συγκεκριμένης ενότητας χρησιμοποιείται η περίπτωση ενός Εικονικού Ρομποτικού Κυττάρου Κατεργασιών. Στο παράδειγμα αυτό, το κύτταρο αποτελείται απλουστευμένα από το κέντρο τόννευσης Mori Seiki NT 4250, τον Ρομποτικό Βραχίονα Fanuc R2000iA-125R και μία μεταφορική ταινία (Σχήμα 8.36).



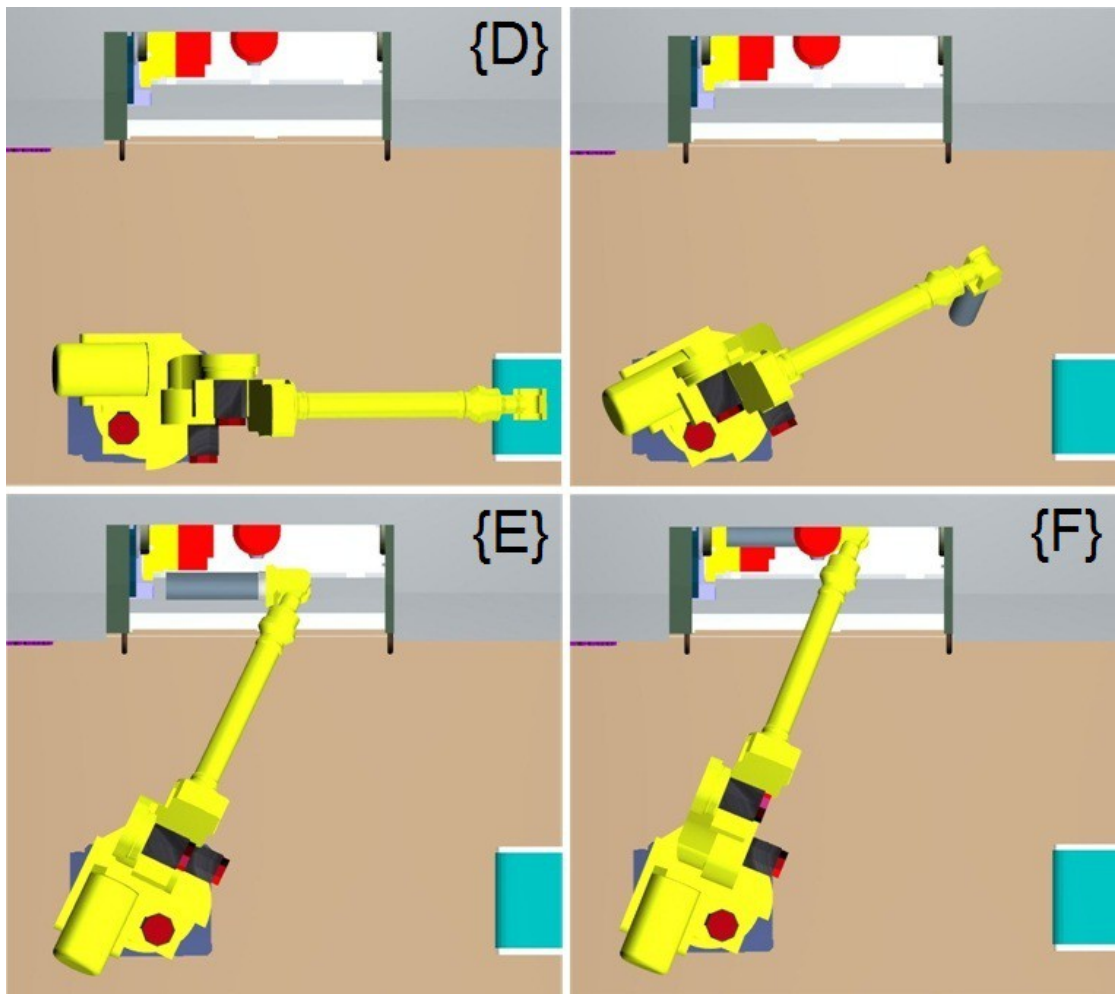
Σχήμα 62: Παράδειγμα Εικονικού Ρομποτικού Κυττάρου Κατεργασιών

Η αλληλουχία κινήσεων που διερευνάται είναι η μεταφορά και απόθεση ενός κυλινδρικού τεμαχίου από την μεταφορική ταινία στο τσωκ της εργαλειομηχανής, όπου και «προσδένεται» για την μετέπειτα κατεργασία του. Χρησιμοποιώντας τα ΔΓΣ της ευθείας και αντίστροφης κινηματικής επιλέχθηκαν οι απαραίτητες θέσεις για την επίτευξη της διαδικασίας και προσομοιώσής της. Οι θέσεις αυτές, όπως και τα χαρακτηριστικά μετατόπισης από την μία στην άλλη αποθηκεύτηκαν σε έναν πίνακα – Array απ’ όπου καλούνται στην συνέχεια για την εκτέλεση της διεργασίας. Παρακάτω περιγράφεται η αλληλουχία των κινήσεων και ενεργειών σε διαδοχικά βήματα:

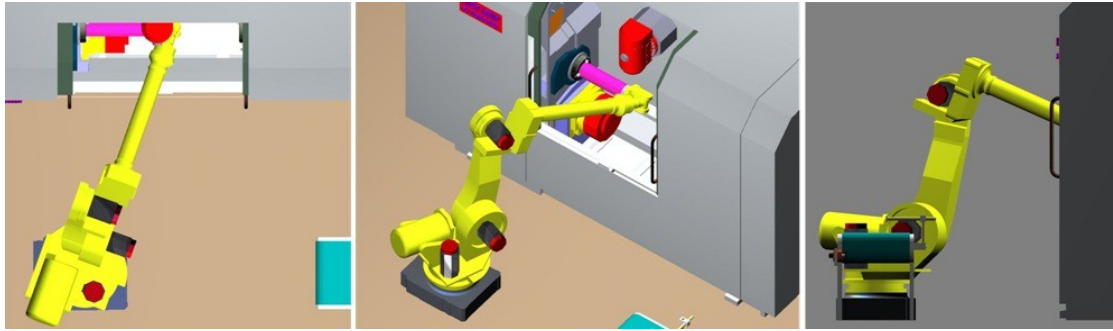
1. Ο ρομποτικός βραχίονας ξεκινά από την αρχική θέση {A} και με μία περιστροφική κίνηση των αρθρώσεών του (slew motion) μετατοπίζεται στην θέση {B} η οποία βρίσκεται 10cm πάνω από το τεμάχιο και ο προσανατολισμός του ρομπότ «κοιτάει» προς το τεμάχιο.
2. Στην συνέχεια εκτελείται μία γραμμική κίνηση του άκρου το εργαλείου στον άξονα Z με ασφαλή ταχύτητα έως την θέση {C} όπου το εργαλείο προσεγγίζει το τεμάχιο. Από την ανίχνευση σύγκρουσης μεταξύ τεμαχίου και άκρου του εργαλείου του ρομποτικού βραχίονα, αλλάζει η ιεραρχία και πλέον το τεμάχιο θεωρείται «παιδί» του άκρου του εργαλείου
3. Στην θέση {D} το τεμάχιο έχει ανυψωθεί κατά 5cm από την επιφάνεια της μεταφορικής ταινίας, λόγω της γραμμική κίνησης του εργαλείου στον άξονα Z
4. Στην συνέχεια εκτελείται ευθύγραμμη μεταφορική κίνηση του τεμαχίου από την θέση {D} στην {E}, με ταυτόχρονη αλλαγή του προσανατολισμού του ώστε να είναι δυνατή η πρόσδεση του στην εργαλειομηχανή.
5. Ευθύγραμμη μετατόπιση του τεμαχίου από την θέση {E} στην {F}, όπου συμπίπτει ο άξονας Z συμμετρίας του τεμαχίου με τον άξονα περιστροφής του Τσωκ
6. Ευθύγραμμη μετατόπιση από την θέση {F} στην {G}, θέση πρόσδεσης του τεμαχίου. Με την ανίχνευση σύγκρουσης τεμαχίου και Τσωκ εργαλειομηχανής αλλάζει και πάλι η ιεραρχία του τεμαχίου, το οποίο δηλώνεται πλέον «παιδί» του Τσωκ.



Σχήμα 63: Αλληλουχία Κινήσεων {A}-{D} Ρομποτικού Βραχίονα για την «φόρτωση» κυλινδρικού τεμαχίου στην Εργαλειομηχανή

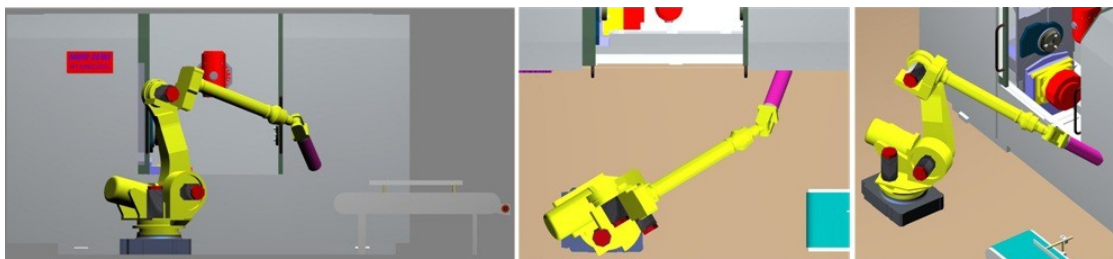


Σχήμα 64: Αλληλουχία κινήσεων για την «φόρτωση» του τεμαχίου στην Εργαλειομηχανή

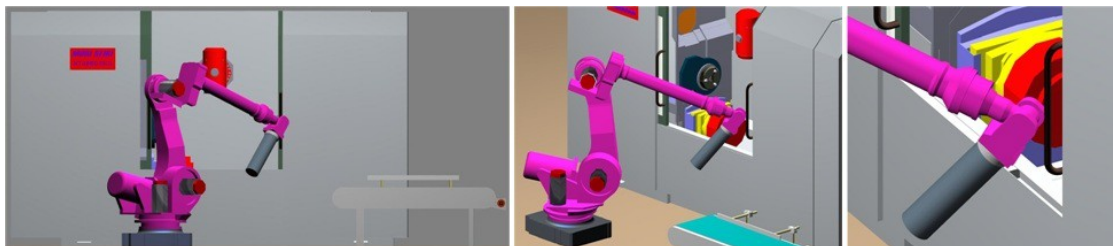


Σχήμα 65: Τοποθέτηση και πρόσδεση τεμαχίου στο Τσωκ

Για την επιλογή των συγκεκριμένων θέσεων βασικά κριτήρια ήταν η ασφαλής, επιτρεπτή και γρήγορη μετατόπιση του τεμαχίου στο κέντρο τόννευσης. Με τον διαδραστικό έλεγχο του ρομποτικού βραχίονα στις λειτουργίες ευθείας και αντίστροφης κινηματικής ήταν εύκολος ο έλεγχος διαφόρων σεναρίων και η αποδοχή/απόρριψη κινήσεων και θέσεων του ρομποτικού βραχίονα με βάση τα παραπάνω κριτήρια. Καθοριστικό στοιχείο του ελέγχου ήταν ο μηχανισμός ανίχνευσης συγκρούσεων. Για παράδειγμα η απευθείας ευθύγραμμη μετατόπιση του τεμαχίου από την μεταφορική ταινία στην θέση {E}, στην περίπτωση που ο προσανατολισμός του καρπού αλλάζει κατά την φορά του σχήματος 8.39, καταλήγει σε σύγκρουση του τεμαχίου με το κυρίως σώμα της εργαλειομηχανής. Για την αποφυγή της σύγκρουσης επιλέχτηκε η μεταβολή του προσανατολισμού του καρπού όπως περιγράφεται στο Σχήμα 8.40, όμως και πάλι η σύγκρουση ήταν αναπόφευκτη, αυτή τη φορά μεταξύ του καρπού του ρομπότ και το χερούλι της πόρτας.



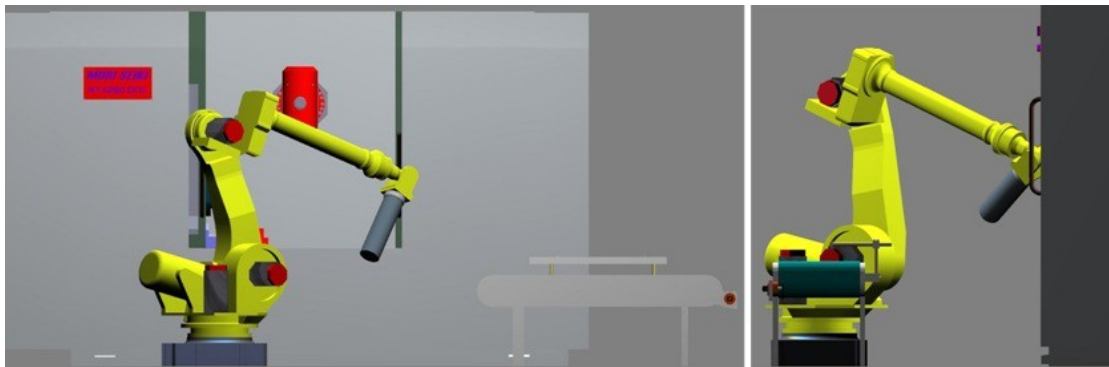
Σχήμα 66: Περίπτωση σύγκρουσης τεμαχίου με την εργαλειομηχανή κατά την μεταφορά



Σχήμα 67: Σύγκρουση του καρπού του ρομπότ με το χερούλι της πόρτας της Εργαλειομηχανής κατά την ευθύγραμμη μετατόπιση από τη θέση {B} στην {E}



Τελικά η αποφυγή οποιασδήποτε σύγκρουσης επιτυγχάνεται, όπως φάνηκε και αρχικά, με την μεταφορά του τεμαχίου στην θέση {D} και ταυτόχρονη μεταβολή του προσανατολισμού του καρπού όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.41. Τα συμπεράσματα όμως που προκύπτουν είναι πολλαπλά καθώς να μεν επιτυγχάνεται έτσι η ασφαλής μεταφορά του τεμαχίου, όμως η πιο γρήγορη διαδρομή δεν παύει να είναι αυτή της ευθύγραμμης μετατόπισης από την θέση {B} στην {E}. Επομένως ανάλογα με το σενάριο παραγωγής που μπορεί να επιλεγεί για το συγκεκριμένο κύτταρο ίσως θα ήταν πιο αποδοτικός ένας έλεγχος για την βελτιστοποίηση της σχετικής θέσεως μεταξύ κύριας μηχανής, ρομποτικού βραχίονα και μεταφορικής ταινίας. Για παράδειγμα με μία μικρή μετατόπιση της μεταφορικής ταινίας προς τον ρομποτικό βραχίονα ίσως να μπορούσε να αποφευχθεί η σύγκρουση του σχήματος 8.40 και η απευθείας μεταφορά του τεμαχίου στην εργαλειομηχανή.



Σχήμα 68: Εναλλακτική διαδρομή για την αποφυγή σύγκρουσης

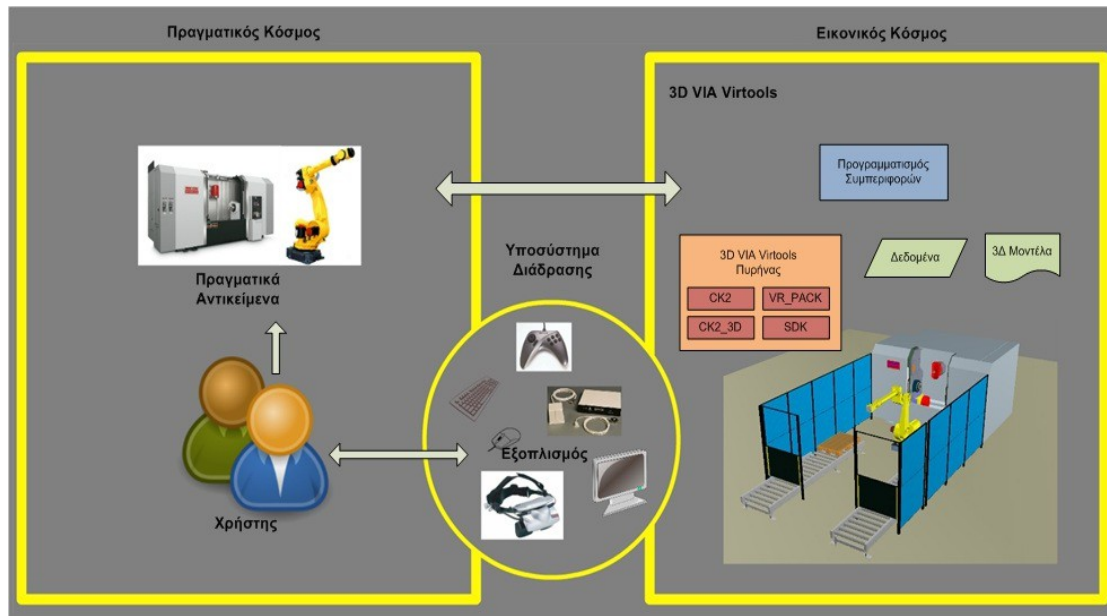
# 9

## *Σύστημα και Διάδραση*

Στο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διάρθρωση του συστήματος με έμφαση στα χαρακτηριστικά διασύνδεσης Πραγματικού και Εικονικού Κόσμου. Μελετάται η διάδραση μεταξύ χρήστη και συστήματος όπως και η ενσωμάτωση των δυνατοτήτων του εξοπλισμού.

### **9.1 Δομή του συστήματος**

Η πιο γενική και αντιπροσωπευτική έκφραση ενός συστήματος ΕΠ, είναι ο διαχωρισμός του στα δύο βασικά υποσυστήματα, Εικονικού και Πραγματικού, παρουσιάζοντας παράλληλα τους τρόπους σύνδεσης και αλληλεξάρτησης των δύο κόσμων, που συντελούν το υποσύστημα Διάδρασης. Δίνοντας έμφαση στα βασικά δομικά χαρακτηριστικά που συγκροτούν το σύστημα που προτείνεται, παρουσιάζεται το απλουστευτικό διάγραμμα του σχήματος 9.1. Στο Υποσύστημα του Πραγματικού Κόσμου συναντάμε το υποκείμενο του συστήματος, τον χρήστη, όπως και τις πραγματικές οντότητες των οποίων επιχειρείται η μοντελοποίηση και προσομοίωση. Στον εικονικό κόσμο συναρτήσεις και δεδομένα μετουσιώνονται σε εικονικές συμπεριφορές για τα 3D Μοντέλα. Το Virtools αναλαμβάνει τόσο τον προγραμματιστικό ρόλο όσο και αυτόν της διαχείρισης και αναπαράστασης της εικονικής εφαρμογής.



Σχήμα 69: Δομή του Συστήματος

## 9.2 Υποσύστημα Διάδρασης

Το υποσύστημα Διάδρασης περιλαμβάνει στοιχεία, με τον κατάλληλο συνδυασμό των οποίων, επιτυγχάνεται ο συσχετισμός και η αλληλεπίδραση μεταξύ των διαστάσεων εικονικού και πραγματικού. Αυτά τα στοιχεία, είναι διασταλτικά, όλοι οι τρόποι με τους οποίους μπορεί ο χρήστης να επικοινωνήσει με το εικονικό περιβάλλον. Ουσιαστικά το υποσύστημα διάδρασης εμπεριέχεται και στους δύο κόσμους. Ο εξοπλισμός με τον οποίο επιτυγχάνεται η επικοινωνία αποτελεί μέρος του πραγματικού κόσμου, χρειάζεται όμως να μεταφραστούν οι πληροφορίες αυτές σε οδηγίες και δεδομένα που μπορούν να αξιοποιηθούν από το σύστημα και αντίστροφα.

Καθώς αντικειμενικός στόχος της εργασίας ήταν η διερεύνηση των δυνατοτήτων προγραμματισμού μέσω του 3DVIA Virtools και η δημιουργία μίας βάσης για μελλοντική διερεύνηση, παραλήφθηκε ο επιπλέον σχεδιασμός ενός γραφικού περιβάλλοντος διεπαφής, κάτι που έτσι κι αλλιώς αποσκοπεί περισσότερο στην περίπτωση δημιουργίας μίας τελικής και αυτόνομης – standalone εφαρμογής. Αντίθετα διερευνήθηκε ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο βασικός εξοπλισμός που αποτελεί ένα επιτραπέζιο σύστημα εικονικής πραγματικότητας αλλά και πιο εξειδικευμένος εξοπλισμός ΕΠ που αναβαθμίζει το σύστημα σε μερικής

εμβύθισης, συνδυάζοντας τις συμπεριφορές που προγραμματίστηκαν γύρω από το

αρχικό πλαίσιο χρηστικότητα και προσομοίωσης πραγματικών συνθηκών. Παρακάτω θα γίνει μία αναλυτική περιγραφή του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε και των δυνατοτήτων του.

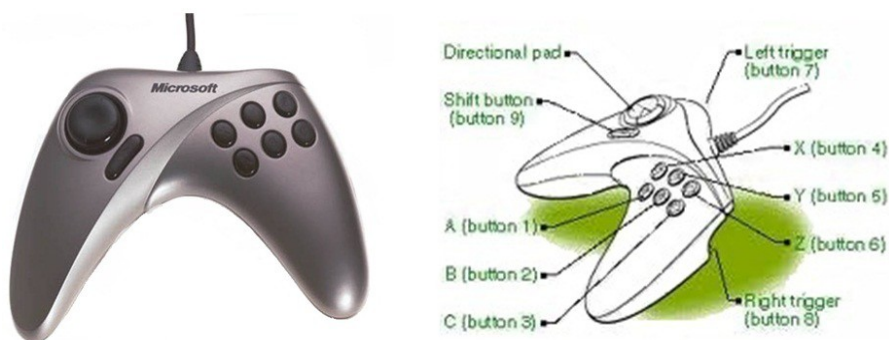
### **9.2.1 Εξοπλισμός**

Στην πιο απλή της μορφή, η επικοινωνία επιτυγχάνεται μέσω ενός επιτραπέζιου συστήματος εικονικής πραγματικότητας, (Desktop Virtual Reality System), που αποτελείται από τον υπολογιστή και το λογισμικό όπου «τρέχει» η εφαρμογή, καθώς και τις συσκευές εισόδου – εξόδου: οθόνη, πληκτρολόγιο, ποντίκι και χειριστήριο – Gamepad. Για την αναβάθμιση του συστήματος σε μερικής εμπύθισης χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον ένα προβολικό σύστημα επιπροσωπίδας,(HMD), που αντικαθιστά οθόνης και ένας μαγνητικός ανιχνευτής έξι βαθμών ελευθερίας. Παρακάτω περιγράφονται πιο αναλυτικά οι συσκευές αυτές και τα χαρακτηριστικά τους, πέραν αυτών της οθόνης, πληκτρολογίου και ποντικιού που θεωρήθηκε ότι δεν χρίζουν περιγραφής.

### **9.2.2 Συσκευή χειρισμού ηλεκτρονικών παιχνιδιών - GamePad**

Η συσκευή χειρισμού Microsoft SideWinder GamePad Pro είναι μια συσκευή εισόδου, σχεδιασμένη ώστε ο χρήστης να αξιοποιεί ταυτόχρονα τα δύο του χέρια για την εισαγωγή πληροφοριών στο σύστημα. Το σώμα της συσκευής αποτελείται από δύο λαβές περιφερειακά των οποίων βρίσκονται εργονομικά τοποθετημένα πλήκτρα εκκίνησης ενεργειών. Η συσκευή διαθέτει ένα πλήκτρο πολλαπλών κατευθύνσεων διπλής ακρίβειας, καθώς και 8 προγραμματιζόμενα κουμπιά, μεταξύ των οποίων και δύο σκανδάλες (triggers). Το πλήκτρο πολλαπλών κατευθύνσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ψηφιακό αλλά και αναλογικό έλεγχο. Στην απλή περίπτωση του ψηφιακού ελέγχου λειτουργεί σαν ένα πλήκτρο 8 κατευθύνσεων, αναγνωρίζοντας τις βασικές κινήσεις (πάνω, κάτω, δεξιά, αριστερά και των τεσσάρων διαγωνίων). Ωστόσο σε αναλογική λειτουργία μετατρέπεται σε ένα πλήκτρο ελεύθερης διακύμανσης προς όλες τις κατευθύνσεις. Το μεγάλο πλεονέκτημα σε αυτή την περίπτωση είναι ότι συμπεριφέρεται με ευαισθησία στην πίεση, κάτι το οποίο ήταν

ιδιαίτερα χρήσιμο σε πολλές περιπτώσεις. Με την χρήση του επιπλέον πλήκτρου Shift πολλαπλασιάζεται κατά συνθήκη η λειτουργικότητα όλων των πλήκτρων.



Σχήμα 70: Χειριστήριο - GamePad Microsoft SideWinder GamePad Pro

### 9.2.3 Προβολικό Σύστημα Επιπροσωπίδας (Head Mounted Display – HMD)

Το προβολικό σύστημα επιπροσωπίδας 3DVISOR - eMagin Z80, 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).

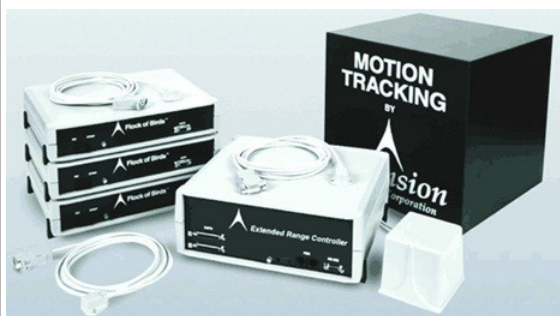
Τεχνικά Χαρακτηριστικά HMD eMagin Z800 3DVISOR	
Αντίστοιχο μέγεθος θέασης	Οθόνη διαγωνίου 2.67m σε απόσταση 3.65 m
Εύρος θέασης	~ 40°
Ανίχνευση κεφαλής	360° οριζόντια, > 60° κάθετα
Λόγος πλευρών	4:3
Ανάλυση	800x600 ανά οθόνη (1.44MP)
Αριθμός χρωμάτων	24-bit (>16.7m)
Φωτεινότητα	>50cd/m2
Αντίθεση	>200:1
Στερεοσκοπική προβολή	Ναι
Μέγεθος ελεγκτή	6.1''x3.45''x1.15'' (ΜxΠxB)
Βάρος	<227g
Κατανάλωση	<1.25W
Παροχή ρεύματος	USB ή 5V DC
Είσοδος σήματος	RGB D-sub
Έξοδος ήχου	Στερεοφωνικά ακουστικά
Είσοδος ήχου	Ενσωματωμένο μικρόφωνο



### 9.2.4 Μαγνητικός ανιχνευτής θέσης 6 βαθμών Ελευθερίας

Ο μαγνητικός ανιχνευτής Ascension Flock of Birds (FOB) έχει ικανότητα ανίχνευσης κίνησης έξι βαθμών ελευθερίας για κάθε αισθητήρα, προσφέροντας έως και 144 μετρήσεις θέσης και προσανατολισμού ανά δευτερόλεπτο. Έγινε χρήση του με έναν αισθητήρα, όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση έως και 4 αισθητήρων ταυτόχρονα με χρήση ξεχωριστών επεξεργαστών για κάθε έναν από αυτούς. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα είναι ότι τα παλμικά μαγνητικά πεδία του διαπερνούν όλα τα μη μεταλλικά αντικείμενα ενώ ακόμα και στην περίπτωση ύπαρξης μεταλλικών δομών στο γύρω περιβάλλον προσφέρει αξιόπιστα αποτελέσματα συγκριτικά με άλλες μαγνητικές συσκευές εντοπισμού. Ιδιότητα που τον καθιστά κατάλληλο για χρήση σε πραγματικά περιβάλλοντα συστημάτων κατεργασιών.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά Ascension Flock of Birds	
Διαστάσεις Πομπού	9,6 cm κύβος με 3,05 m καλώδιο
Διαστάσεις Αισθητήρα	25,4 x 25,4 x 20,3 mm
Περιοχή Κάλυψης	±3.05 m προς οποιαδήποτε κατεύθυνση
Εμβέλεια Περιστροφής	± 180° Azimuth & Roll, ± 90° Elevation
Στατική Ακρίβεια	Θέσης: 1,8 mm RMS
	Προσανατολισμού: 0,5° RMS
Στατική Ανάλυση	Θέσης: 0,5 mm στα 30.5cm
	Προσανατολισμός: 0,1° στα 30.5cm
Ρυθμός Ενημέρωσης	Έως και 144 μετρήσεις / δευτερόλεπτο
Αποτελέσματα δεδομένων	συντεταγμένες θέσης (X, Y, Z) και γωνίες προσανατολισμού (A, B, C) ή μήτρα περιστροφής
Διασύνδεση	Θύρα RS-232 με δυνατότητα επιλογής Baud rate έως 115.200
Format	Binary



### **9.3 Χρήση του εξοπλισμού**

Το Virtools προσφέρει ΔΔ ειδικά για ελεγκτές – controllers όπως το πληκτρολόγιο, το ποντίκι και χειριστήρια (joysticks/gamepads). Ενώ με την προσθήκη και χρήση του VR Pack προσφέρονται δυνατότητες χειρισμού και διαχείρισης επιπλέον συσκευών στις οποίες συμπεριλαμβάνονται και ο μαγνητικός ανιχνευτής θέσης FOB, αλλά και το σύστημα επιπροσωπίδας eMagin Z800.

#### **9.3.1 Ποντίκι**

Στην περίπτωση του επιτραπέζιου συστήματος το ποντίκι χρησιμοποιήθηκε για τον χειρισμό των καμερών του εικονικού κόσμου. Ο προσανατολισμός μίας κάμερας μπορεί να αλλάζει ανάλογα με την σχετική κίνηση του ποντικιού στην οθόνη, ενώ λειτουργίες εστίασης (zoom in/out) ενεργοποιούνται ανάλογα με την κατεύθυνση περιστροφής της ροδέλας. Επιπλέον, με το ποντίκι ο χρήστης επιλέγει τα αντικείμενα που προτίθεται να χειριστεί με τις υπόλοιπες συσκευές, στην περίπτωση χειροκίνητης λειτουργίας.

#### **9.3.2 Πληκτρολόγιο**

Το πληκτρολόγιο χρησιμοποιήθηκε για τον χειρισμό των εικονικών αντικειμένων στην περίπτωση χειροκίνητης λειτουργίας. Αυτό έγινε δεσμεύοντας συγκεκριμένα μηνύματα ανά πλήκτρο και κυρίως προσομοιώνοντας μηνύματα του χειριστηρίου – joystick που είναι και η βασική συσκευή χειρισμού των εικονικών αντικειμένων. Παράλληλα με το πάτημα ή την απελευθέρωση πλήκτρων, ρυθμίστηκε η ενεργοποίηση διαφορετικών συμπεριφορών της αυτόματης λειτουργίας των μηχανών ή άλλες δευτερεύουσες ενέργειες, όπως το άνοιγμα και κλείσιμο των θυρών του κέντρου κατεργασιών. Οι συμπεριφορές για την προσομοίωση της «αυτόματης» λειτουργίας μοντελοποιήθηκαν κατά τέτοιο τρόπο ώστε όταν λαμβάνουν ένα σήμα εισόδου να εκτελούν την διαδικασία που καθορίζεται από τις παραμέτρους εισόδου τους. Αυτό δίνει την δυνατότητα χρήσης τους με εντολές G-κώδικα, οι οποίες εισάγονται σε μορφή κειμένου από το πληκτρολόγιο. Για αυτό χρειάστηκε η μεταγλώττιση των εντολών της γλώσσας προγραμματισμού G-κώδικα σε μηνύματα – messages που ανάλογα με την εντολή G ενεργοποιούν την αντίστοιχη συμπεριφορά

και θέτουν τις αντίστοιχες παραμέτρους. Κάτι τέτοιο επιτεύχθηκε πειραματικά για απλές εντολές χειρισμού των εργαλειοφορείων όπως τις G00, G01 και εντολές T για την αλλαγή εργαλείου. Για την μεταγλώττιση των εντολών χρησιμοποιήθηκαν τα ειδικά ΔΔ που παρέχει το Virtools για την αναγνώριση κειμένου – string.

### **9.3.3 Χειριστήριο**

Μέσω του χειριστηρίου πραγματοποιείται λήψη απλών μηνυμάτων χειριστή – Joystick/Gamepad. Ανάλογα με τις οδηγίες που δίνονται, τα μηνύματα αυτά μπορεί να ενεργοποιήσουν συμπεριφορές. Γενικά, μπορούν να δεσμευτούν συγκεκριμένα μηνύματα ανά εντολή, τα οποία κατά συνθήκη ενεργοποιούν διαφορετικές λειτουργίες. Το χειριστήριο είναι η βασική συσκευή χειρισμού των εικονικών οντοτήτων κατά την χειροκίνητη λειτουργία τους. Με το πλήκτρο πολλαπλών κατευθύνσεων πετυχαίνεται η μετακίνηση των οντοτήτων σε διαφορετικούς άξονες. Στην περίπτωση του Mori Seiki διακρίνονται 4 διαφορετικές λειτουργίες (τσωκ 2 ή πόντα, εργαλειοφορείο τόννου και φρέζας) στην περίπτωση του ρομποτικού βραχίονα επιχειρήθηκε η χρήση του σαν ένα χειριστήριο διδασκαλίας - teach pendant. Επιτεύχθηκε η διαφορετική επιλογή των αρθρώσεων ανάλογα με τα 6 κουμπιά και περιστροφή τους με χρήση του πλήκτρου πολλαπλών κατευθύνσεων. Στην περίπτωση της αντίστροφης κινηματικής χρησιμοποιήθηκε για την μετατόπιση και περιστροφή του άκρου του ρομποτικού βραχίονα στον χώρο. Σε κάθε περίπτωση είναι δυνατή η αποθήκευση διαφόρων θέσεων για μελλοντική χρήση.

Δυνατότητες ελέγχου στην περίπτωση χειρισμού του Mori Seiki:

- Κίνηση της Φρεζοκεφαλής στους άξονες X, Y, Z της μηχανής
- Περιστροφική κίνηση του άξονα B Φρεζοκεφαλής
- Κίνηση του εργαλειοφορείου Τόννευσης Ρεβόλβερ στους άξονες X και Z
- Κίνηση του Τσωκ 2 ή εναλλακτικά της πόντας κατά μήκος του άξονα Z

Δυνατότητες ελέγχου στην περίπτωση χειρισμού του ρομποτικού βραχίονα:

- Περιστροφική κίνηση όλων των αρθρώσεων του βραχίονα (ευθεία κινηματική)

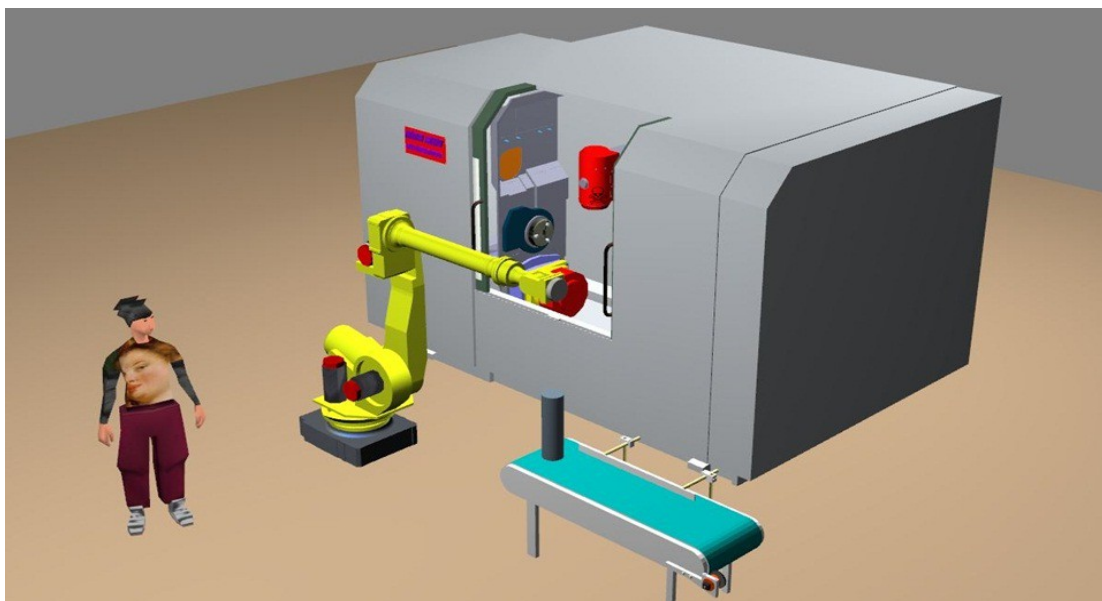


- Μετατόπιση και περιστροφή στους άξονες X, Y, Z του 3D πλαισίου Στόχου {G} του εργαλείου ως προς ένα πλαίσιο αναφοράς (περίπτωση αντίστροφης κινηματικής)

#### 9.3.4 Προβολικό Σύστημα Επιπροσωπίδας

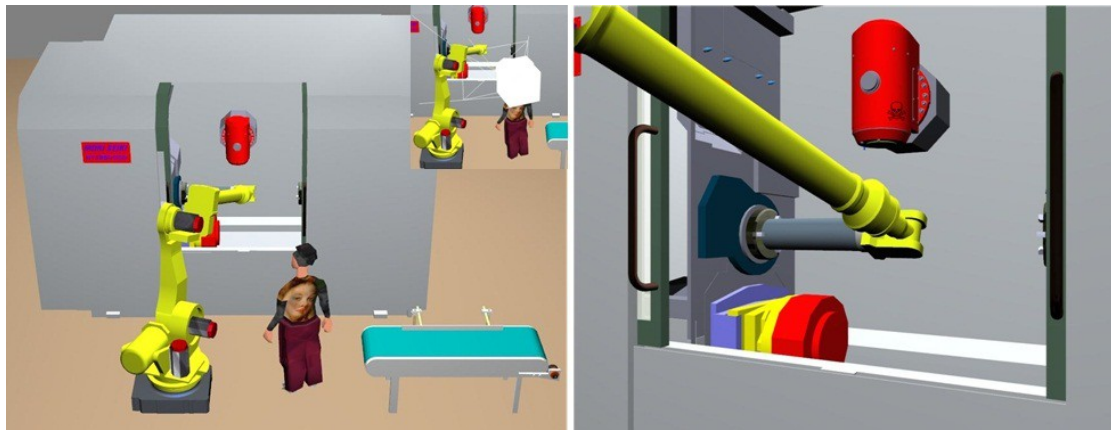
Το προβολικό σύστημα επιπροσωπίδας χρησιμοποιείται σαν συσκευή εξόδου αλλά και εισόδου. Μέσω αυτού επιτυγχάνεται η εμπύθιση του χρήστη στο εικονικό περιβάλλον. Ο χρήστης βιώνει την εικονική προσομοίωση σε πρώτο πρόσωπο. Η δυνατότητα ανίχνευσης θέσης τριών βαθμών ελευθερίας που προσφέρει, χρησιμοποιείται για την μεταβολή της κάμερας θέασης ανάλογα με την κίνηση του κεφαλιού του χρήστη.

Για την πιο ρεαλιστική ένταξη του χρήστη στο εικονικό περιβάλλον χρησιμοποιήθηκε ένας από τους ήδη υπάρχοντες χαρακτήρες – avatars που προσφέρει το Virtools. Με τον τρόπο αυτό το σύστημα ενισχύεται με την εικονική υπόσταση του ειδώλου του χρήστη, προσφέροντας μεγαλύτερο επίπεδο αλληλεπίδρασης. Με την περιήγηση του χρήστη στο εικονικό περιβάλλον του συστήματος κατεργασιών είναι πιο εύκολο να εντοπιστούν με μία πρώτη ματιά οι ασφαλείς ζώνες εργασίας. Εξάγονται συμπεράσματα για την λειτουργικότητα της χωροταξικής διάταξης των μηχανών, όσον αφορά την ευκολία με την οποία μπορεί ο χρήστης να κινείται στο περιβάλλον.



Σχήμα 71: Είδωλο Χαρακτήρα στο εικονικό κύτταρο κατεργασιών

Για τη λειτουργία αυτή δημιουργήθηκε μία εικονική κάμερα στο Virtools η οποία κινείται μαζί με τον χρήστη και βρίσκεται στο επίπεδο των ματιών του. Η κίνηση του κεφαλιού του χρήστη λαμβάνει τον προσανατολισμό της από τον ανιχνευτή θέσης του προβολικού συστήματος επιπροσωπίδας, ενώ η θέση του στον χώρο μεταβάλλεται με εντολές από το χειριστήριο ή τα πλήκτρα κατεύθυνσης του πληκτρολογίου. Στο προβολικό σύστημα επιπροσωπίδας προβάλλεται η λήψη από την συγκεκριμένη κάμερα. Για την ρεαλιστικότητα της προσομοίωσης χρησιμοποιούνται τα ΔΔ συμπεριφορών ανίχνευσης συγκρούσεων του χρήστη με τα εικονικά αντικείμενα, περιορίζοντας την κίνησή του στα όρια της απεικόνισης του πραγματικού χώρου, ώστε να μην «διαπερνά» τα εικονικά αντικείμενα.



Σχήμα 72: Διαδραστική κάμερα θέσης από τον χαρακτήρα στο προβολικό σύστημα επιπροσωπίδας

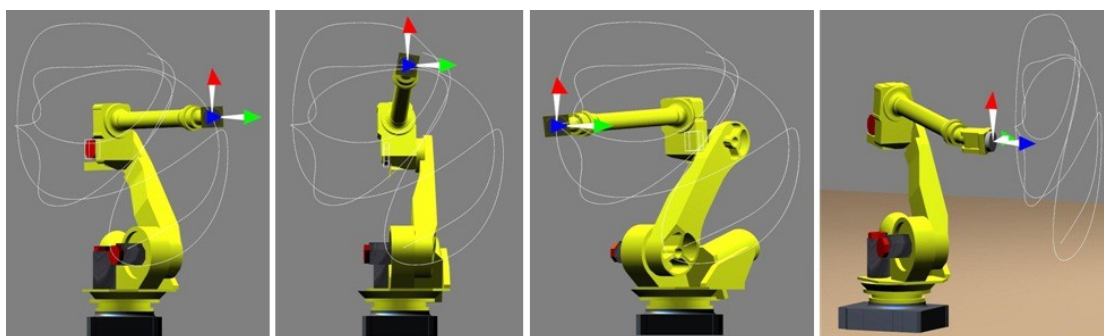
### 9.3.5 Μαγνητικός ανιχνευτής θέσης – FOB

Η χρήση του ανιχνευτή θέσης συμβάλλει στην ισχυρότερη σύζευξη του πραγματικού με τον εικονικό κόσμο. Ουσιαστικά συνδέει σημεία του πραγματικού κόσμου με τα αντίστοιχα του εικονικό, λαμβάνοντας την σχετική θέση και προσανατολισμό του αισθητήρα ως προς τον πομπό. Στο εικονικό περιβάλλον δημιουργούνται δύο αντιπροσωπευτικά 3Δ πλαίσια, για τη θέση του πομπού και του αισθητήρα με αποτέλεσμα το 3Δ πλαίσιο του εικονικού αισθητήρα να αντιστοιχεί στην θέση και προσανατολισμό του πραγματικού ως προς τον πομπό.

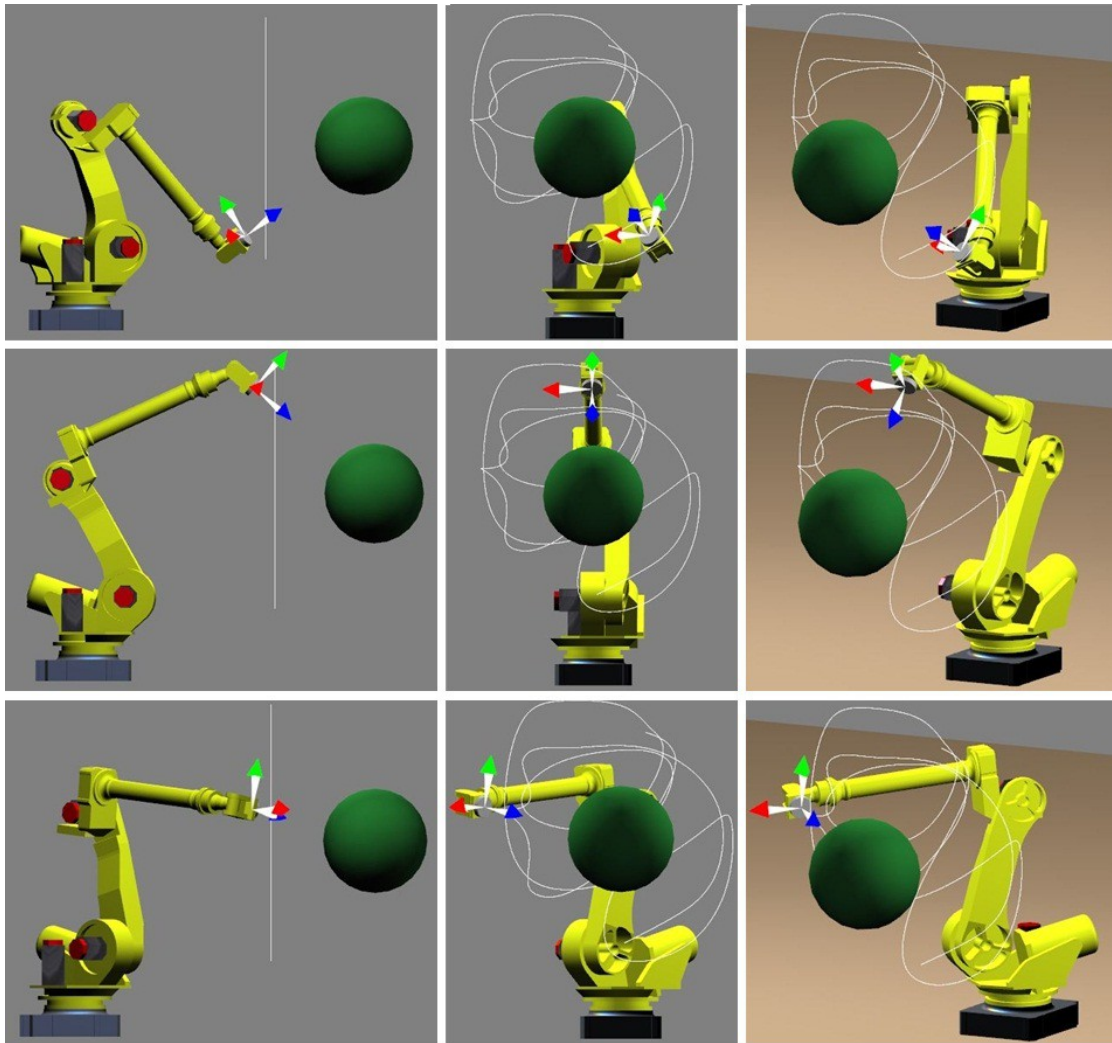
Τα πλεονεκτήματα της χρήσης είναι πολλαπλά. Το 3Δ πλαίσιο του αισθητήρα χρησιμοποιείται για τον χειρισμό κυρίως του 3Δ πλαισίου Στόχου {G} του ρομποτικού βραχίονα ή το αντίστοιχο του εργαλείου της Φρεζοκεφαλής. Έτσι δίνεται η

δυνατότητα λήψης ενός ή περισσότερων σημείων τα οποία θα προσεγγίσουν οι μηχανές, είτε ως τελικό στόχο, είτε διαγράφοντας συγκεκριμένη τροχιά. Η χρήση μπορεί να γίνει σε λειτουργία πραγματικού χρόνου – real time και μη. Στην περίπτωση πραγματικού χρόνου προσφέρει ένα υψηλό επίπεδο διάδρασης του χρήστη με το ελεγχόμενο εικονικό αντικείμενο. Το αποτέλεσμα είναι η ρύθμιση της κίνησης και θέσης του ρομποτικού βραχίονα, απλά με την κίνηση του χεριού του χρήστη, ενώ με απλή περιστροφή του καρπού του ρυθμίζεται και ο προσανατολισμός του καρπού του ρομπότ. Στα πειράματα που έγιναν για την εξυπηρέτηση του κέντρου κατεργασιών από τον ρομποτικού βραχίονα, ο χρήστης κατέληγε πολύ πιο γρήγορα στην εξαγωγή τροχιάς ελεύθερης συγκρούσεων συγκριτικά με τις άλλες εικονικές μεθόδους. Σημαντικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι μπορεί να προσομοιωθεί η χειροκίνητη leadthrough μέθοδος προγραμματισμού των ρομποτικών βραχιόνων (μέθοδος περάσματος) καταγράφοντας τη συνεχή πορεία του άκρου του εργαλείου.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται το κοινό παράδειγμα εφαρμογής του ρομποτικού βραχίονα για βαφή με ψεκασμό. Η τα σημεία της τροχιάς λήφθηκαν με τον ανιχνευτή κίνησης – FOB. Στο πρώτο σχήμα γίνεται χρήση του προσανατολισμού όπως λήφθηκε από τον ανιχνευτή (έγινε προσπάθεια να διατηρείται όσο γινόταν σταθερός αν και υπάρχει πάντα η δυνατότητα για διόρθωσή τους στην συνέχεια). Στο δεύτερο σχήμα διατηρείται η τροχιά αλλά αλλάζει ο προσανατολισμός, κάνοντας χρήση της συνθήκη να «κοιτάει» πάντα προς το ίδιο σημείο. Τα σημεία αυτά είναι δυνατόν να εξαχθούν από το σύστημα στη μορφοποίηση αρχείου .txt την χρήση από ένα πραγματικό σύστημα.



Σχήμα 73: Λήψη τροχιάς και προσανατολισμός με χρήση του FOB



Σχήμα 74: Λήψη τροχιάς με χρήση του FOB και δημιουργία συνθήκης για τον προσανατολισμό του καρπού, ώστε να «κοιτάει» πάντα το κέντρο της σφαίρας

# 10

## *Συμπεράσματα*

### *10.1 Συνεισφορά*

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μια μεθοδολογία ανάπτυξης μοντέλων συστημάτων κατεργασιών σε ένα περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας. Στον πυρήνα αυτού του συστήματος βρίσκεται η εφαρμογή Virtools, μία βιβλιοθήκη επαναχρησιμοποιήσιμου κώδικα συμπεριφορών η οποία χρησιμοποιήθηκε για την επέκταση και ανάπτυξη συμπεριφορών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα συστήματα κατεργασιών. Η ενισχυμένη αυτή βιβλιοθήκη, σε συνδυασμό με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, αποτελούν τη βασική συνεισφορά της εργασίας αυτής. Τα πειράματα τα οποία εκτελέστηκαν αναδεικνύουν τις δυνατότητες και πλεονεκτήματα του συστήματος, ενώ παράλληλα αποτελούν μια επιβεβαίωση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε. Συγκεκριμένα η συνεισφορά της εργασίας συνοψίζεται στους παρακάτω άξονες:

1. Μεθοδολογία υλοποίησης διαδραστικής εικονικής προσομοίωσης συστημάτων κατεργασιών με το λογισμικό 3DVIA Virtools.
2. Κινηματική και λειτουργική προσομοίωση των διαφόρων μερών του κέντρου τόννευσης Mori Seiki NT 4250.
3. Ευθεία και αντίστροφη κινηματική και λειτουργική προσομοίωση του αρθρωτού ρομποτικού βραχίονα Fanuc R2000iA - 125R.

4. Διαδραστική προσομοίωση της χειροκίνητης λειτουργίας των εικονικών μηχανών, χρησιμοποιώντας συμβατικό αλλά και εξειδικευμένο εξοπλισμό εικονικής πραγματικότητας
5. Δημιουργία βιβλιοθήκης επαναχρησιμοποιήσιμου κώδικα με την μορφή «συμπεριφορών» στο Virtools, των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν, με δυνατότητα εφαρμογής τους σε αρθρωτούς ρομποτικούς βραχίονες - 6R ή μέρη εργαλειομηχανών που παρουσιάζουν αντίστοιχα κινηματικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά.

## ***10.2 Δυνατότητες και πλεονεκτήματα του συστήματος***

Με τις συμπεριφορές που προγραμματίστηκαν κατέστη δυνατό να προσδιοριστούν τα εικονικά πρότυπα πολύπλοκων μηχανών με σαφήνεια και να προσομοιωθούν ρεαλιστικά, ως προς τη λειτουργικότητά, κινηματική και δυναμική τους συμπεριφορά. Επιπλέον, το υψηλό επίπεδο αλληλεπίδρασης που επιτεύχθηκε με τη χρήση και το συντονισμό διαδραστικού εξοπλισμού, επέτρεψε την εξίσου ρεαλιστική προσομοίωση των εμπλεκόμενων ανθρώπινων ενεργειών. Χάρης στο συνδυασμό των παραπάνω χαρακτηριστικών, το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών, υπό τη σκοπιά του Virtual Manufacturing.

Αφενός, η διερεύνηση μηχανικών και φυσικών χαρακτηριστικών των μηχανών και της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση συστημάτων. Κάτι που μπορεί να βοηθήσει στη λήψη αποφάσεων σχετικά με το σχεδιασμό, την ανάπτυξη, τη λειτουργία και συνεργασία των μηχανών του εκάστοτε συστήματος. Στο πλαίσιο αυτό, μπορεί να εξεταστεί ο παράγοντας δυσκολίας συναρμολόγησης - αποσυναρμολόγησης ή κατεργασιμότητας ενός τεμαχίου-εξαρτήματος, και ο χρόνος εκτέλεσης των ενεργειών αυτών. Τέτοιου είδους ενέργειες μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσω offline προσομοιώσεων ή ακόμα και σε πραγματικό χρόνο, ενώ οι μέθοδοι ελέγχου που αναπτύχθηκαν μέσω του διαδραστικού εξοπλισμού, την διαχείριση συμπεριφορών και την ανίχνευση συγκρούσεων, παρέχουν υψηλό βαθμό αξιοπιστίας και οικονομία χρόνου στις μελέτες αυτές. Συγκεκριμένα μέσω της χρήσης του μαγνητικού ανιχνευτή θέσης σε πραγματικά ρομποτικά περιβάλλοντα κατεργασιών, το σύστημα θα μπορούσε να

ενταχθεί στην παραγωγή προσφέροντας άμεσα και γρήγορα αποτελέσματα, αξιοποιήσιμα από τα πραγματικά συστήματα.

Από εργονομικής πλευράς, οι προσομοιώσεις αυτές συμβάλλουν στην αποτελεσματική διεξαγωγή συμπερασμάτων για την χωροταξική διάταξη των μηχανών. Το γεγονός ότι ο χρήστης μπορεί να συμπεριληφθεί στην προσομοίωση επιτρέπει την διεξαγωγή περαιτέρω πειραμάτων εργονομίας, ώστε να αξιολογηθεί το επίπεδο δυσκολίας εκτέλεσης διεργασιών από τους εργαζομένους. Τέλος το σύστημα είναι εξίσου κατάλληλο ώστε να αξιοποιηθεί για εκπαιδευτικούς σκοπούς τόσο στον προγραμματισμό και έλεγχο ρομποτικών βραχιόνων αλλά και εργαλειομηχανών.

### ***10.3 Μελλοντικές Επεκτάσεις***

Η επιτυχία της υλοποίησης της παραπάνω μοντελοποίησης αποτελεί ένα σταθερό σημείο πάνω στο οποίο μπορεί να βασιστεί περαιτέρω μελέτη. Η επεκτασιμότητα του συστήματος που αναπτύχθηκε επιτρέπει την προσθήκη πληθώρας νέων χαρακτηριστικών και λειτουργιών σε πολλαπλά επίπεδα. Αναλυτικά οι πιθανές επεκτάσεις μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω βασικές κατηγορίες.

#### **1. Συμπεριφορές**

Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται οι επεκτάσεις που αφορούν στον προγραμματισμό επιπλέον συμπεριφορών για την λειτουργία και διαχείριση των υπάρχοντων αντικειμένων. Για παράδειγμα λειτουργίες προσομοίωσης που αφορούν την μηχανική της κοπής ή επιπλέον συμπεριφορές για τον συγχρονισμό της λειτουργίας των μηχανών. Θα μπορούσε να επεκταθεί η αυτόματη λειτουργία των μηχανών προγραμματίζοντας έναν μεταφραστή εντολών G κώδικα σε σήματα και μηνύματα που ενεργοποιούν συμπεριφορές των μηχανών. Επιπλέον θα ήταν χρήσιμη η επέκταση των αλγορίθμων της αντίστροφης κινηματικής των εργαλειοφορέων, ώστε να γίνονται οι υπολογισμοί βάση της πλήρους αντιστάθμισης του εργαλείου, ανάλογα με τις διαδικασίες κοπής.

## 2. Αντικείμενα

Στο σύστημα μπορεί να συμπεριληφθεί η μοντελοποίηση νέων αντικειμένων με τις ήδη υπάρχουσες συμπεριφορές καθώς και νέοι τύποι αντικειμένων αφού πρώτα προηγηθεί η κατάλληλη ανάλυσή τους μέσω σημασιολογικών μοντέλων. Στην περίπτωση προγραμματισμού συμπεριφορών για νέα αντικείμενα μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε. Οι νέες συμπεριφορές θα πρέπει να κινούνται στα εννοιολογικά πλαίσια των ήδη υπάρχόντων και να εντάσσονται και αυτές στο πεδίο προσομοίωσης συγκεκριμένων λειτουργιών των μηχανών, αφήνοντας χώρο για την παραμετροποίησή τους υπό συγκεκριμένες περιπτώσεις. Παραδείγματα νέων αντικειμένων που μπορούν να ενσωματωθούν σχετικά εύκολα στο σύστημα είναι οχήματα αυτόματης πλοήγησης εξοπλισμένα με ρομποτικούς βραχίονες διαχείρισης υλικού ή γερανογέφυρες.

## 3. Εξοπλισμός

Η κατηγορία περιλαμβάνει την προσθήκη νέων συσκευών εξοπλισμού διάδρασης και το συγχρονισμό τους με διαδικασίες και συμπεριφορές του συστήματος. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε η προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας πολλαπλούς ανιχνευτές θέσης και προσανατολισμού είτε για την ανίχνευση κινήσεων του χρήστη ή αντικειμένων του περιβάλλοντος εργασίας. Κατ' αυτόν τον τρόπο θα ήταν δυνατή η πλήρης εμπύθιση του χρήστη στον εικονικό κόσμο και η εκτέλεση λεπτομερέστερων μελετών εργονομικού ενδιαφέροντος τόσο από πλευράς καταπόνησης του χρήστη αλλά και βελτιστοποίησης εκτέλεσης εργασιών.

## 4. Δημιουργία αυτόνομων εφαρμογών

Με πυρήνα τη δουλειά που έχει γίνει και τις πιθανές επεκτάσεις της, θα μπορούσαν να επιλεγούν εφαρμογές για προσομοίωση, προσανατολισμένες σε συγκεκριμένες ανάγκες. Να βρεθούν δηλαδή λύσεις για συγκεκριμένα προβλήματα, στα πλαίσια που προαναφέρθηκαν, όπως σχεδιασμού, διαχείρισης, εικονικής παρακολούθησης και ελέγχου, εργονομίας, εκπαίδευσης κλπ.



Συνοψίζοντας το προτεινόμενο εικονικό περιβάλλον αποτελεί ένα πεδίο ρεαλιστικού πειραματισμού και διερεύνησης εναλλακτικών σχεδίων παραγωγής, διάταξης των μηχανών, γενικά συγκριτικής μελέτης πολλών διαφορετικών σεναρίων με έμφαση στο χρήστη, τα οποία δεν θα ήταν δυνατόν να μελετηθούν στο φυσικό σύστημα, λόγω μεγάλου κόστους σε χρόνο και χρήμα. Παρέχει ευελιξία μελέτης εναλλακτικών σεναρίων με στόχο τη βελτιστοποίηση της παραγωγής σε πολλαπλούς άξονες.

## Βιβλιογραφία

Banerjee, P., Zetu, D.(2001). *Virtual Manufacturing*. New York: John Wiley & Sons.

Βοσνιάκος, Γ.(2005) *Συστήματα Κατεργασιών. Πρόχειρες Σημειώσεις*. Αθήνα.

Vosniakos, G. (2002). Intelligent software systems in CNC manufacturing. Στο C.Leondes (Επιμ.Εκδ.) *Intelligent Systems : Techniques and Applications* (230-275), CRC Press.

Bordegoni, M.,Hemmje, M.(1993). A dynamic gesture language and graphical feedback for interaction in a 3d user interface. *Computer Graphics Forum*, 12 (3), 1-11.

Chryssolouris, G., Mavrikios, D., Papakostas, N., Mourtzis, D., Michalos, G.,Georgoulas, k.(2008). Digital Manufacturing: History, Perspectives, and Outlook. *ImechE* 223, 451-461.

Consoni, M., Souza, F., Sacco, M., Porto, A.(2006). Virtual Manufacturing as a Way for the Factory of the Future. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17, 725-735.

Craig, J. (1955). *Introduction to Robotics, Mechanics and Control*(2η εκδ.). Addison-Wesley Publishing Company, United States.

Γωγουβίτης, Ξ. (2010). *Εικονικά Συστήματα Κατεργασιών Βασισμένα σε Ευφυή Αντικείμενα*. Διδακτορική Διατριβή: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Dorozhkin, D., Vance, J., Rehn, G., Lemessi, M.(2010). Coupling of Interactive Manufacturing Operations Simulation and Immerse Virtual Reality. *Virtual Reality*, 16, 15-23

- Eastgate, R. (2001). The Structured Development of Virtual Environments: Enhancing Functionality and Interactivity. PhD Thesis: City University, London.
- Ellis, S. (1993). Virtual Reality. Proceedings. *IEEE 1993 Symposium on Research Frontiers*, 33-40.
- Ellis, S. (1994). What are virtual environments?. *IEEE: Computer Graphics & Applications*, 14(1), 17-22.
- Gabbard, J., Hix, D. (1997). A taxonomy of usability characteristics in virtual environments ( Ανάκτηση από: Technical Report <http://csgrad.cs.vt.edu/~jgabbard/ve/taxonomy>): Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Gou, H., Huang, B., Liu, W., Li, X. (2003). A framework for Virtual Enterprise Operation Management. *Computers in Industry*, 50(3), 333-352.
- Heilig, M. (1955). *The Cinema of the Future*. Expacios .
- Kao, Y., Cheng, H., Chen, Y. (2006). Development of a Virtual Controller Integrating Virtual and Physical CNC. *Materials Science Forum*, 505-507, 631-636.
- Kaur, K. (1998). Designing virtual environments for usability. PhD: City University, London.
- Khan, W., Raouf, A., Cheng, K. (2011). *Virtual Manufacturing*. Berlin: Springer.
- Kim, B., Choi, K., Choi, B. (2004). R&D Activities in Korea on Virtual Manufacturing. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 3(2), 193-204.

- Lederer, G. (1995). Making Virtual Manufacturing a Reality, *Industrial Robot*. MCB University Press, 22(4).
- 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.
- Mujber, T., Szecsi, T., Hashmi, M. (2004). Virtual Reality Applications in Manufacturing process Simulation. *Journal of Materials Processing Technology 155-156*, 1834-1838.
- Nielsen, J. (1994). Heuristic Evaluation. Στο Nielsen, J. & Mack, R.L. (Εκδ.Επιμ.) Usability Inspection Methods,(25–62), New York: John Wiley & Sons.
- Obitko, M., Vrba, P., Mařvk, V., Radakovič, M. & Kadera, P. (2010). Applications of Semantics in Agent-Based Manufacturing Systems. *Informatica*, 34, 315–330.

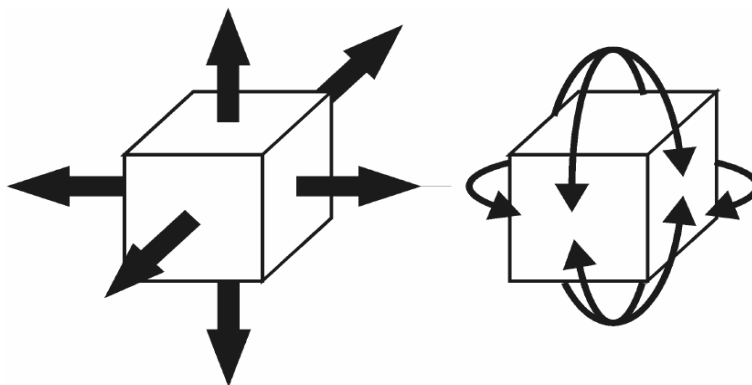
- Poh, Y., Nee, A., Youcef-Toumi, K., Ong, S. (2005). Facilitating Mechanical Design with Augmented Reality, *Singapore-MIT Alliance Symposium*, Singapore.
- Prevost, D., Lavernhe, S., Lartigue, C., Dumur, D. (2011). Feed Drive Modelling for the Simulation of Tool Path Tracking in Multi-Axis High Speed Machining. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, 4, 266-284.
- Reichenbach, T., Kovacic, Z. (2003). Derivation of Kinematic Parameters From a 3D Robot Model Used For Collision-free Path Planning. CD-ROM Proceedings of the 11th Mediterranean Conference on Control and Automation, Rhodos.
- Schneiderman, B. (1998). *Designing the User Interface* (3η εκδ). Addison-Wesly, New York.
- Sisiliano, B., Khatib, O. (2008) Handbook of Robotics. Springer. Berlin
- Stanney, K. M., Mollaghasemi, M., Reeves, L., Breaux, R., Graeber, D. A. (2003). Usability engineering of virtual environments (VEs): Identifying multiple criteria that drive effective VE system design. *International Journal of Human Computer Studies*, 58(4), 447-481.
- Venkateswaran, J., Manmohan, M., Son Y., 2001, Virtual Manufacturing - Online Control of Shop Floor Operations. *Proceedings of 16th International Conference on Production Research*, Prague, Czech Republic.
- 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*, Tsukuba, Japan, 38-43.
- 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, 66. 206-211. SPIE.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Μαθηματικά για Εικονικούς κόσμους

Στα εικονικά περιβάλλοντα, όπως ακριβώς και στον πραγματικό τρισδιάστατο κόσμο, καλούμαστε να ορίσουμε μοναδικά κάθε σημείο του χώρου. Έτσι, η αναπαράσταση των σημείων στον εικονικό κόσμο γίνεται με τις ίδιες τεχνικές που χρησιμοποιούνται και στον πραγματικό κόσμο. Σε αυτό το επίπεδο λοιπόν ο εικονικός κόσμος, από τη σκοπιά των μαθηματικών και της γεωμετρίας, δε διαφέρει σε τίποτα από τον πραγματικό. Τα βασικά μαθηματικά που χρησιμοποιούνται στα γραφικά υπολογιστών και στα εικονικά περιβάλλοντα, εντάσσονται στο μαθηματικό πεδίο της γραμμικής άλγεβρας και της αναλυτικής γεωμετρίας. Η αναπαράσταση σημείων, πιο συγκεκριμένα, στηρίζεται στη διανυσματική ανάλυση και τη θεωρία πινάκων.

Στο χώρο των τριών διαστάσεων η σχετική κίνηση που μπορεί να πραγματοποιήσει ένα συμπαγές σώμα, ως προς ένα άλλο που θεωρείται ακίνητο, χωρίζεται σε 6 βασικές επιμέρους κινήσεις: 3 μεταφορικές κινήσεις στις διευθύνσεις των αξόνων του τρισσορθογωνίου συστήματος συντεταγμένων και 3 περιστροφικές κινήσεις γύρω από αυτούς.



Σχήμα Α1: Οι 6 βαθμοί ελευθερίας ενός συμπαγούς σώματος (α) μεταφορικοί (β) περιστροφικοί

Προκύπτει λοιπόν αρχικά η ανάγκη αναπαράστασης των θέσεων και προσανατολισμών των αντικειμένων (τεμαχίων, εργαλείων, μηχανισμών κτλ.) στον χώρο των τριών διαστάσεων.

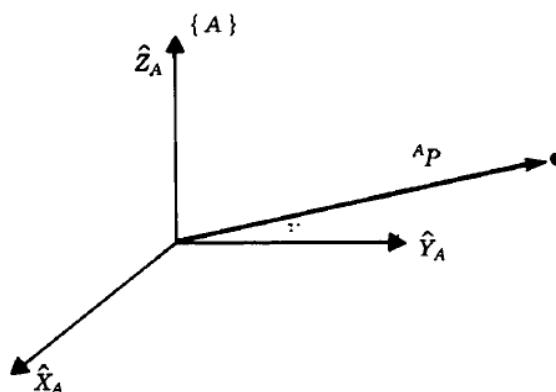
Για τον ορισμό και τον χειρισμό των μαθηματικών εκφράσεων που αντιπροσωπεύουν αυτές τις θέσεις και προσανατολισμούς πρέπει πρώτα να ορισθούν συστήματα συντεταγμένων και συμβάσεις για την αναπαράσταση. Στον πραγματικό κόσμο, και αντίστοιχα στον εικονικό, θεωρούμε ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων βάσει του οποίου αναπαριστώνται σημεία και αντικείμενα με τις ιδιότητες θέσης και προσανατολισμού τους ή ακόμα και άλλα καρτεσιανά συστήματα.

### A1.1 Αναπαράσταση της θέσης ενός σημείου και μετατόπιση

Από την στιγμή που ορίζεται ένα σύστημα συντεταγμένων μπορούμε να ορίσουμε οποιοδήποτε σημείο στο χώρο με ένα διάνυσμα 3x1 το οποίο ονομάζεται διάνυσμα θέσης (position vector). Στην μαθηματική του έκφραση το διάνυσμα αυτό γράφεται με τέτοιον τρόπο ώστε να προσδιορίζει το σύστημα συντεταγμένων βάσει του οποίου έχει οριστεί.

$${}^A P_B = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = [p_x \ p_y \ p_z]^T$$

Τα στοιχεία του διανύσματος είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες του σημείου B στο σύστημα συντεταγμένων {A}, που είναι οι προβολές του διανύσματος  ${}^A P_B$  πάνω στους αντίστοιχους άξονες του συστήματος {A}.



Σχήμα A2: Διάνυσμα ως προς πλαίσιο αναφοράς

Η μετατόπιση ενός σημείου στον χώρο είναι μία μεταφορά του σημείου αυτού σε μια συγκεκριμένη απόσταση κατά μήκος της κατεύθυνσης ενός δοσμένου διανύσματος.

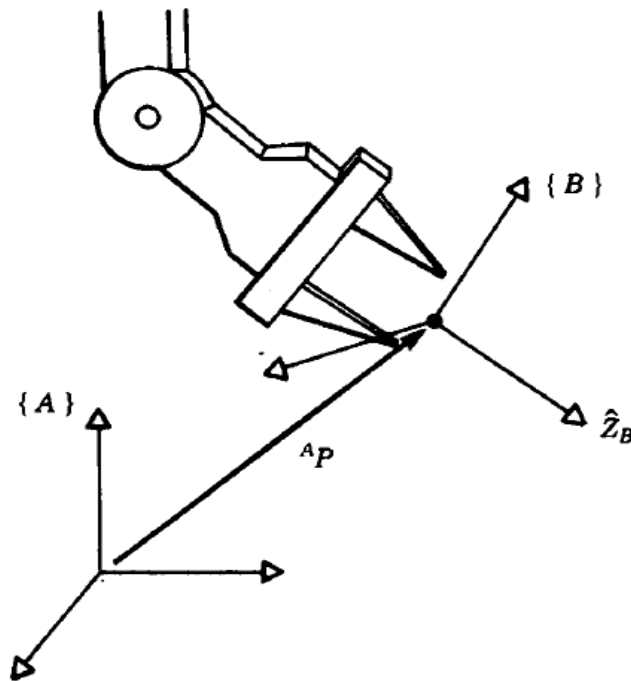


Η απόσταση της μετατόπισης αυτής ισούται με το μέτρο του διανύσματος θέσης

$$|P| = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}$$

### A1.2 Αναπαράσταση του προσανατολισμού ενός σημείου και περιστροφή

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω για την περιγραφή ενός αντικειμένου στο χώρο δεν αρκεί μόνο η θέση αλλά είναι απαραίτητος και ο προσανατολισμός του. Για τον σκοπό αυτό θα πρέπει να τοποθετηθεί ένα σύστημα συντεταγμένων στο προς περιγραφή αντικείμενο και στην συνέχεια να δοθεί η περιγραφή του συστήματος αυτού σε σχέση με το σύστημα αναφοράς.



Σχήμα A3: Εντοπισμός θέσης και προσανατολισμού αντικειμένου

Αν εκφράσουμε τα μοναδιαία διανύσματα της βάσης του {B}  $\hat{X}_B, \hat{Y}_B, \hat{Z}_B$  ως προς το {A}, τότε έχουμε  ${}^A\hat{X}_B, {}^A\hat{Y}_B, {}^A\hat{Z}_B$ . Ο προσανατολισμός του συστήματος συντεταγμένων {B} ως προς το {A} βρίσκεται αν ενώσουμε τα τρία αυτά διανύσματα με την παραπάνω σειρά σαν τις στήλες ενός πίνακα 3x3. Ο πίνακας αυτός ονομάζεται πίνακας στροφής, αναπαριστά την περιστροφή του συστήματος {B} ως προς το {A} και συμβολίζεται  ${}^A_R_B$

$${}^A_B R = \begin{bmatrix} {}^A \hat{X}_B & {}^A \hat{Y}_B & {}^A \hat{Z}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

Τα στοιχεία του πίνακα αυτού είναι ο πολλαπλασιασμός των διανυσμάτων της βάσης του {B} με αυτά της βάσης του {A} και επειδή τα διανύσματα αυτά είναι μοναδιαία διανύσματα και ως γνωστόν ο πολλαπλασιασμός δύο μοναδιαίων διανυσμάτων είναι το συνημίτονο της μεταξύ τους γωνίας, τα στοιχεία του πίνακα στροφής αναφέρονται και σαν συνημίτονα κατεύθυνσης.

$${}^A_B R = \begin{bmatrix} {}^A \hat{X}_B & {}^A \hat{Y}_B & {}^A \hat{Z}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{X}_B \cdot \hat{X}_A & \hat{Y}_B \cdot \hat{X}_A & \hat{Z}_B \cdot \hat{X}_A \\ \hat{X}_B \cdot \hat{Y}_A & \hat{Y}_B \cdot \hat{Y}_A & \hat{Z}_B \cdot \hat{Y}_A \\ \hat{X}_B \cdot \hat{Z}_A & \hat{Y}_B \cdot \hat{Z}_A & \hat{Z}_B \cdot \hat{Z}_A \end{bmatrix}$$

Είναι φανερό ότι οι γραμμές του πίνακα  ${}^A_B R$  είναι τα μοναδιαία διανύσματα του {A} σχετικά με το {B}:

$${}^A_B R = \begin{bmatrix} {}^A \hat{X}_B & {}^A \hat{Y}_B & {}^A \hat{Z}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^B \hat{X}_A^T \\ {}^B \hat{Y}_A^T \\ {}^B \hat{Z}_A^T \end{bmatrix}$$

για αυτό η στροφή του {A} ως προς το {B}  ${}^B_A R$  δίνεται από τον ανάστροφο  ${}^A_B R^T$

$${}^B_A R = {}^A_B R^T$$

από αυτό φαίνεται ότι ο αντίστροφος ενός πίνακα στροφής είναι ίσος με τον ανάστροφό του. Αυτό μπορεί εύκολα να αποδειχθεί γεωμετρικά:

$${}^A_B R^T {}^A_B R = \begin{bmatrix} {}^A \hat{X}_B^T \\ {}^A \hat{Y}_B^T \\ {}^A \hat{Z}_B^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^A \hat{X}_B & {}^A \hat{Y}_B & {}^A \hat{Z}_B \end{bmatrix} = I_3 \quad \text{όπου } I_3 \text{ ο μοναδιαίος πίνακας } 3 \times 3,$$

επομένως  ${}^A_B R = {}^B_A R^{-1} = {}^B_A R^T$

Πράγματι από την γραμμική άλγεβρα είναι γνωστό ότι ο αντίστροφος ενός πίνακα με ορθοκανονικές στήλες είναι ίσος με τον ανάστροφό του και εδώ ο πίνακας  ${}^A_B R$  είναι ένας ορθογώνιος πίνακας.

### A1.3 3Δ Πλαίσιο – 3D Frame

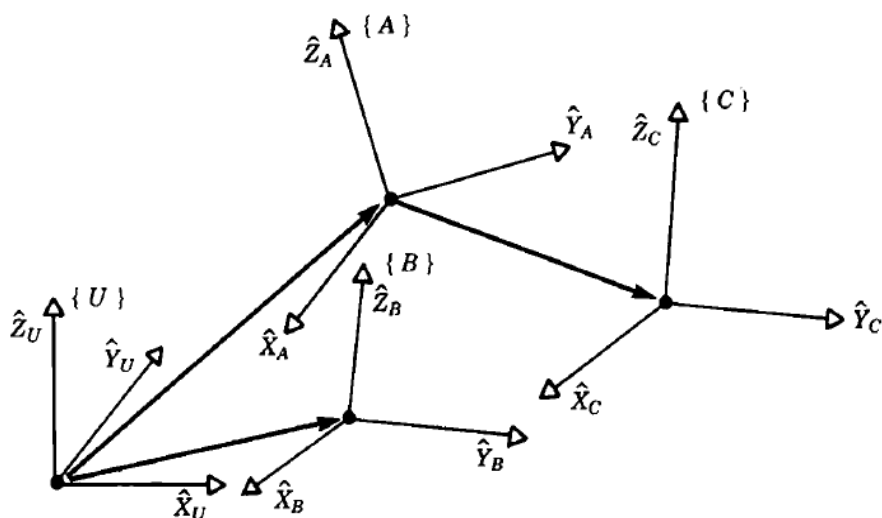
Το ζευγάρι θέσης και προσανατολισμού, λόγω της συχνής χρήσης του στην ανάλυση της τρισδιάστατης κίνησης μηχανολογικών και ρομποτικών μηχανισμών καθώς και στα γραφικά υπολογιστών, ορίζει μια οντότητα που καλείται πλαίσιο - frame. Ένα πλαίσιο αποτελείται από ένα σύνολο 4 διανυσμάτων που μας δίνουν πληροφορίες θέσης και προσανατολισμού. Τα 4 αυτά διανύσματα αντιπροσωπεύουν το διάνυσμα θέσης και τον πίνακα στροφής.

Ουσιαστικά ένα 3Δ πλαίσιο μεταφράζεται σαν ένα σύστημα συντεταγμένων, το οποίο πέρα από τον πίνακα στροφής περιλαμβάνει και ένα διάνυσμα θέσης. Ο διάνυσμα θέσης αυτό αποτελεί το κέντρο αυτού του συστήματος συντεταγμένων σε σχέση με κάποιο άλλο πλαίσιο.

Για παράδειγμα το πλαίσιο {B} περιγράφεται από τον πίνακα στροφής  ${}^A R_B$  και το διάνυσμα θέσης  ${}^A P_B$  που προσδιορίζει την αρχή των αξόνων του πλαισίου {B}.

$$\{B\} = \left\{ {}^A R_B, {}^A P_B \right\}$$

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται τα πλαίσια {A} και {B} που ορίζονται ως προς το καθολικό σύστημα συντεταγμένων {U}, ενώ το πλαίσιο {C} ορίζεται ως προς το πλαίσιο {A}.  ${}^U R_C = {}^U R_A {}^A R_C$



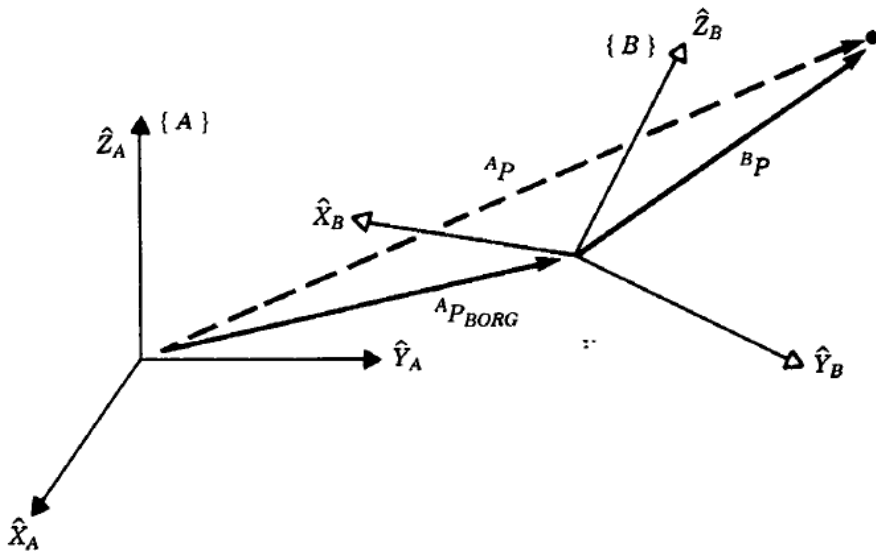
Σχήμα A4: Παραδείγματα διαφορετικών πλαισίων

Συνοπτικά, ο πίνακας στροφής  ${}^j R_i$  :

- μετασχηματίζει ένα διάνυσμα εκφρασμένο στο πλαίσιο {i} σε ένα διάνυσμα εκφρασμένο στο πλαίσιο {j}
- παρέχει μία αναπαράσταση του προσανατολισμού του πλαισίου {i} ως προς το πλαίσιο {j}
- αναπαριστά την στροφή του πλαισίου {i} ως προς το πλαίσιο {j}

#### A1.4 Ομογενής μετασχηματισμός

Με τον ομογενή μετασχηματισμό ένα διάνυσμα θέσης και ένας πίνακας περιστροφής μπορούν να παρασταθούν μαζί, με ένα συμβολισμό.



Σχήμα A5: Γενική μορφή μετασχηματισμού διανύσματος

Στο προηγούμενο παράδειγμα όπου το πλαίσιο {B} είναι γνωστό ως προς το {A}, για την έκφραση οποιουδήποτε διανύσματος  ${}^A P$  ως προς το {A} όταν είναι γνωστό το  ${}^B P$  χρησιμοποιούμε την παρακάτω έκφραση:  ${}^A P = {}^A R^B P + {}^A P_B$

Αυτή η εξίσωση μπορεί γραφτεί :

$$\begin{bmatrix} {}^A P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A R^B & {}^A P_B \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B P \\ 1 \end{bmatrix},$$

όπου

$${}^A_B T = \begin{bmatrix} {}^A_B R & {}^A P_B \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad \text{ή} \quad {}^A_B T = \begin{bmatrix} {}^A_B R & \vdots & {}^A P_B \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 \end{bmatrix}$$

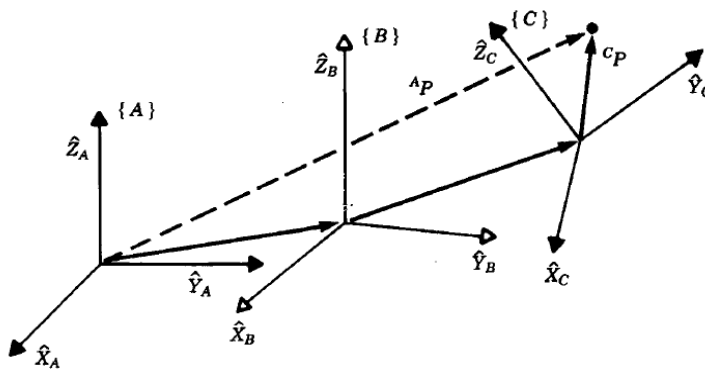
ο ομογενής 4x4 πίνακας μετασχηματισμού.

Ο πίνακας  ${}^A_B T$  μετασχηματίζει διανύσματα από το σύστημα συντεταγμένων  $\{B\}$  στο  $\{A\}$ . Ο αντίστροφός του  ${}^A_B T^{-1}$  μετασχηματίζει διανύσματα από το σ.σ.  $\{A\}$  στο  $\{B\}$ .

$${}^A_B T^{-1} = {}^B_A T = \begin{bmatrix} {}^A_B R^T & -{}^A_B R^T {}^A P_B \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$$

Ο πίνακας μετασχηματισμού  ${}^A_B T$  χρησιμοποιείται :

- για την αναπαράσταση πλαισίων: ο πίνακας  ${}^A_B T$  περιγράφει το πλαίσιο  $\{B\}$  σχετικά με το  $\{A\}$ ,  
όπου οι στήλες της περιστροφής  ${}^A_B R$  είναι τα μοναδιαία διανύσματα που ορίζουν την κατεύθυνση των αξόνων του  $\{B\}$  και η στήλη του διανύσματος θέσης  ${}^j P_i$  τοποθετεί στον χώρο το κέντρο της αρχής των αξόνων του  $\{B\}$
- για τον μετασχηματισμό διανυσμάτων μεταξύ πλαισίων: ο πίνακας  ${}^A_B T$  μεταφέρει το διάνυσμα  ${}^B P$  στο  ${}^A P$ ,  ${}^A P = {}^A_B T {}^B P$
- σαν τελεστής: ο πίνακας  $T$  δρα σαν τελεστής στο διάνυσμα  ${}^A P_1$ , το οποίο περιστρέφει κατά  $R$  και μετακινεί κατά  $|P| = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}$  για να δημιουργήσει το διάνυσμα  ${}^A P_2$ . Ο μετασχηματισμός ο οποίος περιστρέφει κατά  $R$  και μετακινεί κατά  $|P|$  είναι η ίδια με τον μετασχηματισμό που περιγράφει ένα πλαίσιο περιστραμμένο κατά  $R$  και μετακινημένο κατά  $|P|$  σε σχέση με ένα πλαίσιο αναφοράς.



Σχήμα Α6: Ένωση πλαισίων, καθένα ορίζεται ως προς το προηγούμενό του

### A2.1 Γωνίες Euler

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή, τρεις είναι οι παράμετροι που χρειάζονται για τον προσδιορισμό του προσανατολισμού ενός σημείου στον χώρο, ενώ ο πίνακας στροφής διαθέτει εννέα στοιχεία. Συνεπώς τα εννέα στοιχεία του πίνακα δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους αλλά συνδέονται με 6 σχέσεις. Δεδομένου ότι τόσο τα διανύσματα βάσης του πλαισίου συντεταγμένων  $\{i\}$  όσο και του  $\{j\}$  είναι ορθογώνια

μεταξύ τους, το ίδιο θα ισχύει και για τα διανύσματα-στήλες του πίνακα  ${}^i R_j$  που προκύπτουν από το εσωτερικό γινόμενο αυτών των διανυσμάτων. Από τις 6 σχέσεις που προκύπτουν λόγω της ορθογωνιότητας του πίνακα στροφής, τρεις απαιτούν τα διανύσματα-στήλες του πίνακα να έχουν μήκος ίσο με τη μονάδα και άλλες τρεις απαιτούν τα διανύσματα -στήλες να είναι ορθογώνια.

$$R = [\hat{X} \ \hat{Y} \ \hat{Z}]$$

$$|\hat{X}| = |\hat{Y}| = |\hat{Z}| = 1$$

$$\hat{X} \cdot \hat{Y} = \hat{X} \cdot \hat{Z} = \hat{Y} \cdot \hat{Z} = 0$$

Για την αναπαράσταση λοιπόν του προσανατολισμού ενός σημείου στο χώρο χρειάζονται τουλάχιστον τρεις αριθμοί. Κάποιες από τις αναπαραστάσεις που χρησιμοποιούνται ευρέως στα γραφικά υπολογιστών αλλά και στη ρομποτική και απαιτούν τρεις αριθμούς, είναι:

- ZYX γωνίες Euler (roll, pitch, yaw)
- XYZ σταθερές γωνίες

και δύο αναπαραστάσεις με 4 αριθμούς:

- Άξονα – Γωνίας
- Quaternions

Παρακάτω γίνεται μια περιγραφή των συμβάσεων των ZYX γωνιών Euler και XYZ σταθερών γωνιών για το λόγο ότι αυτές χρησιμοποιούνται από το graphic engine του Virtools. Αυτές οι συμβάσεις χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση της στροφής του πλαισίου {B} ως προς το {A} ένα διάνυσμα με τρεις γωνίες:  $R(\alpha, \beta, \gamma)$  και κάθε μία από αυτές απαιτεί την εκτέλεση τριών περιστροφών, υπό των γωνιών του διανύσματος, γύρω από συγκεκριμένους κύριους άξονες και σύμφωνα με μία συγκεκριμένη κάθε φορά αλληλουχία.

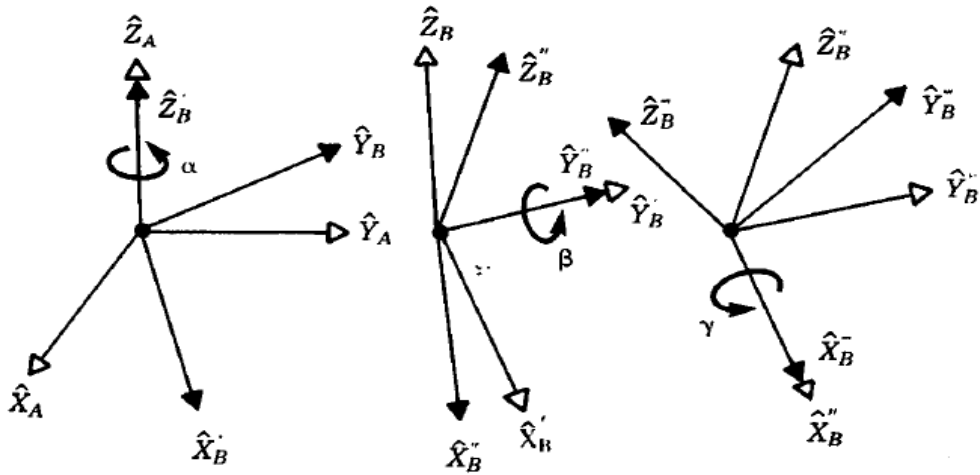
### **A2.2 Euler**

Στις γωνίες Euler, κάθε γωνία αναπαριστά μία περιστροφή γύρω από τους άξονες του κινούμενου πλαισίου. Κατά αυτό τον τρόπο ο προσανατολισμός του κινούμενου πλαισίου μετά από την εκτέλεση των περιστροφών, εξαρτάται απόλυτα από την σύμβαση που χρησιμοποιήθηκε για την περιστροφή των αξόνων.

### **A2.3 ZYX γωνίες Euler**

Ξεκινάμε με τα πλαίσια {A} και {B} τα οποία συμπίπτουν τόσο ως προς την θέση αλλά και τον προσανατολισμό. Στην συνέχεια περιστρέφουμε το πλαίσιο {B} ως προς τον εαυτό του κατά τις γωνίες  $(\alpha, \beta, \gamma)$ . Κάθε περιστροφή λαμβάνει μέρος γύρω από τους τρεις άξονες του κινούμενου frame {B} με την εξής σειρά:

1. Περιστρέφουμε το frame {B} κατά τον άξονα  $\hat{Z}_B$  κατά μία γωνία  $\alpha$
2. Περιστρέφουμε το frame {B} κατά τον άξονα  $\hat{Y}_B$  κατά μία γωνία  $\beta$
3. Περιστρέφουμε το frame {B} κατά τον άξονα  $\hat{X}_B$  κατά μία γωνία  $\gamma$



Σχήμα A7: ZYX γωνίες Euler

Όπως είναι φανερό, το όνομα ZYX γωνίες Euler προκύπτει απ' το ότι οι περιστροφές εκτελούνται διαδοχικά γύρω από τους άξονες Z, Y, X με την σειρά που γράφονται.

Αν σκεφτούμε τις επιμέρους περιστροφές που πραγματοποιούνται σαν τρεις φάσεις της περιγραφής του frame {B} σχετικά με το {A}, παίρνουμε:

$${}^A_B R = {}^A_{B'} R \quad {}^{B'}_{B''} R \quad {}^{B''}_B R$$

Ο πίνακας στροφής του {B} ως προς το {A}  ${}^A_B R$  υπολογίζεται :

$${}^A_B R_{XYZ}(\alpha, \beta, \gamma) = R_Z(\alpha) R_Y(\beta) R_X(\gamma) = \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow {}^A_B R_{XYZ}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix}$$

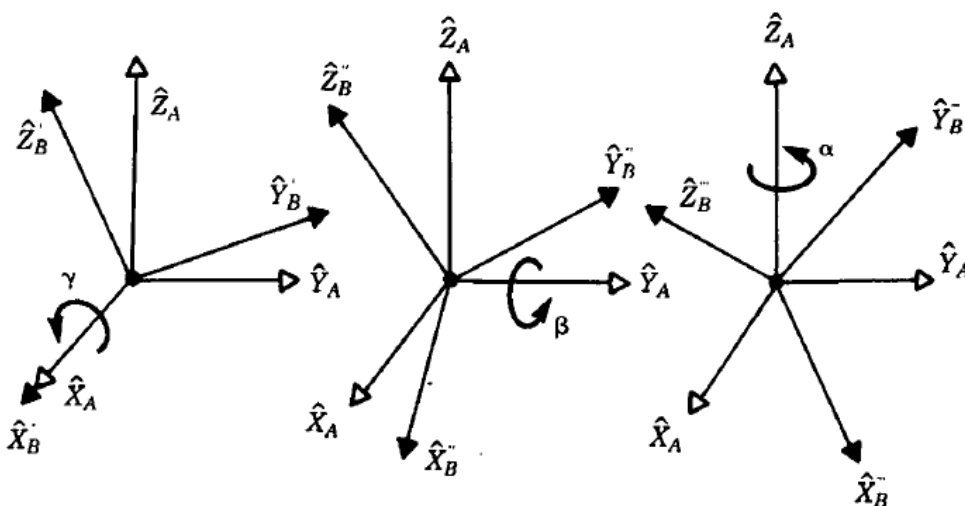
Είναι πολύ σημαντικό να καταλάβει κανείς την σειρά με την οποία δρουν οι περιστροφές, καθώς αν αλλάξει η σειρά, τότε θα αλλάξει και η τελική περιστροφή του {B} ως προς το {A}, οπότε η παραπάνω έκφραση είναι σωστή μόνο για περιστροφές που εκτελούνται με την σειρά : ως προς  $\hat{Z}_B$  κατά  $\gamma$ , ως προς  $\hat{Y}_B$  κατά  $\beta$  και ως προς  $\hat{X}_B$  κατά  $\alpha$ .



### A2.4 XYZ σταθερές γωνίες

Σε αυτή την περίπτωση κάθε περιστροφή λαμβάνει μέρος όχι γύρω από τους άξονες του κινούμενου συστήματος, όπως στις γωνίες Euler, αλλά γύρω από αυτούς του σταθερού. Και πάλι ξεκινάμε με τα frames  $\{A\}$  και  $\{B\}$  τα οποία συμπίπτουν τόσο ως προς την θέση αλλά και τον προσανατολισμό. Στην συνέχεια περιστρέφουμε το frame  $\{B\}$  ως προς το σταθερό frame  $\{A\}$  κατά τις γωνίες  $(\gamma, \beta, \alpha)$ . Κάθε περιστροφή λαμβάνει μέρος γύρω από τους τρεις άξονες του σταθερού πλαισίου  $\{A\}$  με την εξής σειρά:

1. Περιστρέφουμε το πλαίσιο  $\{B\}$  κατά τον άξονα  $\hat{X}_A$  κατά μία γωνία  $\gamma$
2. Περιστρέφουμε το πλαίσιο  $\{B\}$  κατά τον άξονα  $\hat{Y}_A$  κατά μία γωνία  $\beta$
3. Περιστρέφουμε το πλαίσιο  $\{B\}$  κατά τον άξονα  $\hat{Z}_A$  κατά μία γωνία  $\alpha$



Σχήμα A8: XYZ σταθερές γωνίες

Ο πίνακας στροφής του  $\{B\}$  ως προς το  $\{A\}$   ${}^A_B R$  βρίσκεται:

$${}^A_B R_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha) = R_Z(\alpha) R_Y(\beta) R_X(\gamma) = \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow {}^A_B R_{XYZ}^{fxd}(\gamma, \beta, \alpha) = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix}$$

Είναι φανερό ότι το αποτέλεσμα είναι ακριβώς το ίδιο με αυτό που προέκυψε από τις τρεις περιστροφές που εκτελέστηκαν ακριβώς με την αντίθετη σειρά γύρω από τους ίδιους άξονες αλλά ως προς το κινούμενο σύστημα.

$${}^A_B R_{XYZ}^{fd}(\gamma, \beta, \alpha) = {}^A_B R_{XYZ}(\alpha, \beta, \gamma)$$

Αυτό το αποτέλεσμα ισχύει γενικά: τρεις περιστροφές γύρω από τους άξονες ενός σταθερού πλαισίου, καταλήγουν στο ίδιο αποτέλεσμα τελικού προσανατολισμού όπως αν οι τρεις ίδιες περιστροφές εκτελεστούν με την ανάποδη σειρά ως προς τους άξονες του κινούμενου πλαισίου. Επίσης για την παραπάνω περίπτωση, όπου χρησιμοποιούμε τους πίνακες περιστροφής σαν τελεστές σκεφτόμαστε την σειρά με την οποία εκτελείται κάθε περιστροφή (ξεκινώντας από δεξιά).

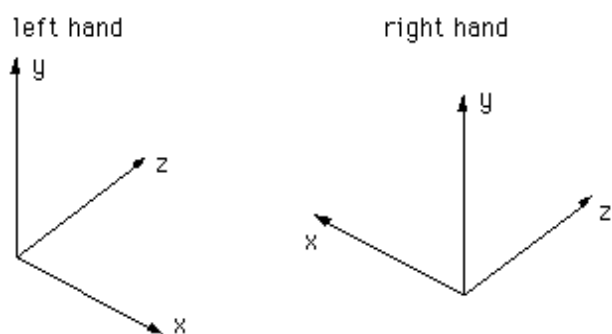
Οι συμβάσεις που περιγράφηκαν εδώ είναι ουσιαστικά παραδείγματα από τις 24 δυνατές συμβάσεις που μπορούν να προκύψουν από τους συνδυασμούς περιστροφών των αξόνων: 12 για τις γωνίες Euler και 12 για σταθερές γωνίες. Αυτές οι συμβάσεις ονομάζονται στο σύνολό τους - angle set conventions, ενώ στην πραγματικότητα λόγω της δυικής σχέσης που υπάρχει, μεταξύ των γωνιών Euler και των σταθερών γωνιών, υπάρχουν 12 μοναδικές παραμετροποιήσεις ενός πίνακα στροφής, χρησιμοποιώντας διαδοχικές περιστροφές ως προς κύριους άξονες.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι λύσεις του προβλήματος, η εύρεση δηλ των γωνιών  $(\alpha, \beta, \gamma)$  για κάθε σύμβαση, δεδομένου ενός πίνακα περιστροφής. Φυσικά οι λύσεις των γωνιών  $(\alpha, \beta, \gamma)$  για τις XYZ σταθερές γωνίες ταυτίζεται με την λύση των ZYX Euler.

Πίνακας στροφής:	Z-Y-Z γωνίες Euler $(\alpha, \beta, \gamma)$	Z-Y-X γωνίες Euler $(\alpha, \beta, \gamma)$ :
${}^A_B R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$	$\beta = \text{Atan2}(\sqrt{r_{31}^2 + r_{32}^2}, r_{33})$ $a = \text{Atan2}\left(\frac{r_{23}}{s\beta}, \frac{r_{13}}{s\beta}\right)$ $\gamma = \text{Atan2}\left(\frac{r_{32}}{s\beta}, -\frac{r_{31}}{s\beta}\right)$	$\beta = \text{Atan2}(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2})$ $a = \text{Atan2}\left(\frac{r_{21}}{c\beta}, \frac{r_{11}}{c\beta}\right)$ $\gamma = \text{Atan2}\left(\frac{r_{32}}{c\beta}, \frac{r_{33}}{c\beta}\right)$

### A2.5 Δεξιόστροφα και αριστερόστροφα συστήματα συντεταγμένων και μετατροπές

Στην εικόνα 9 φαίνεται μια τυπική αναπαράσταση του δεξιόστροφου και του αριστερόστροφου συστήματος συντεταγμένων. Ως σημείο αναφοράς του συστήματος ορίζεται το  $O(0,0,0)$  και κάθε σημείο του χώρου εκφράζεται σε σχέση με αυτό.



Σχήμα A9: Συστήματα συντεταγμένων  
(α)αριστερόστροφο, (β)δεξιόστροφο

**Μετατροπή θέσης:** Προκειμένου ένα σημείο του χώρου, εκφρασμένο στο δεξιόστροφο σύστημα συντεταγμένων, να εκφραστεί στο αριστερόστροφο και αντίστροφα, αρκεί η αντιστροφή ενός από τους τρεις άξονες του συστήματος συντεταγμένων. Έτσι ένα σημείο  $P_{\text{right}}(x,y,z)$  του δεξιόστροφου αντιστοιχεί στο  $P_{\text{left}}(x,-y,z)$  στο αριστερόστροφο.

$$P_l = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = S_y P_r$$

**Μετατροπή περιστροφής:** Μια σύνθετη περιστροφή αποτελείται από διαδοχικές περιστροφές γύρω από τους τρεις άξονες και εκφράζεται από τον πίνακα περιστροφής (rotation matrix). Έτσι στο δεξιόστροφο σύστημα είναι  $P'_r = R_r \cdot P_r$  όπου  $P'_r$  η νέα θέση,  $P_r$  η προηγούμενη και  $R_r$  ο πίνακας στροφής. Δεδομένου ότι  $P_l = S_y P_r$  και  $P'_l = S_y P'_r$ , έχουμε  $P'_l = S_y P'_r = S_y R_r P_r = (S_y R_r S_y) P_l$ . Με βάση τα παραπάνω οι πίνακες στροφής αριστερόστροφου και δεξιόστροφου συστήματος συντεταγμένων συνδέονται με τη σχέση  $R_l = S_y R_r S_y$

**Μετατροπή 3Δ Πλαισίου:** Για τη μετατροπή ενός πλαισίου από το δεξιόστροφο σε ένα αριστερόστροφο σύστημα συντεταγμένων χρησιμοποιούμε, κατ' αντιστοιχία με τα παραπάνω, τον ομογενή μετασχηματισμό

Πολλές φορές στη ρομποτική καλούμαστε να μετατρέψουμε ένα σύστημα συντεταγμένων από αριστερόστροφο σε δεξιόστροφο και αντίστροφα. Στο σύστημα αριστερόστροφον συντεταγμένων για παράδειγμα το σύστημα συντεταγμένων του τελικού στοιχείου δράσης είναι κι αυτό αριστερόστροφο όπως το καθολικό σύστημα. Οι κατευθύνσεις αποτελούν τις στήλες του πίνακα στροφής. Αντίστοιχα, σε ένα δεξιόστροφο σύστημα συντεταγμένων, το τελικό στοιχείο δράσης χρησιμοποιεί δεξιόστροφες συντεταγμένες, όπως ακριβώς συμβαίνει στον πραγματικό κόσμο. Το γεγονός ότι πρέπει να αλλάξει η «φορά (Handness) και του κόσμου και του στοιχείου δράσης καθιστά αυτή τη μετατροπή κάπως πιο πολύπλοκη.

Αρχικά, για να μετατρέψουμε το δεξιόστροφο (right handed) στοιχείο δράσης σε αριστερόστροφο η  $y$  συνιστώσα των διανυσμάτων κατά τους τρεις άξονες λαμβάνεται ως η αντίθετή της. Το βήμα αυτό εισάγει τα διανύσματα στο αριστερόστροφο σύστημα συντεταγμένων. Στη συνέχεια, λαμβάνεται το αντίθετο του διανύσματος κατά τον  $y$  άξονα κατεύθυνσης ώστε να γίνει διάνυσμα της αντίθετης κατεύθυνσης.

Χρησιμοποιώντας συμβολισμό πινάκων, η αλλαγή του πρόσημου της  $y$  συνιστώσας ισοδυναμεί με τον πολλαπλασιασμό του πίνακα στροφής με τον πίνακα  $S_y$ . Η αλλαγή των προσήμων της πρώτης στήλης του πίνακα στροφής που εκφράζει την κατεύθυνση προς τα δεξιά ώστε να εκφράζει την κατεύθυνση προς τα αριστερά, ισοδυναμεί με τον πολλαπλασιασμό του γινομένου από τα δεξιά με τον διαγώνιο πίνακα  $S_y$ .

Έτσι στη γενική περίπτωση περίπτωση περιστροφής γύρω από τους τρεις άξονες, έχουμε:

$$T_l = S_y T_r S_y$$

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Τριγωνομετρία

### ***B1.1 Ευρέως χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις στην Ρομποτική***

**Συμβολισμοί:**

$$\begin{array}{lll} \cos(\theta_i) = c_i & \cos(\theta_i + \theta_j) = c_{ij} & \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k) = c_{ijk} \\ \sin(\theta_i) = s_i & \sin(\theta_i + \theta_j) = s_{ij} & \sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k) = s_{ijk} \end{array}$$

**Ταυτότητες:**

$$\begin{array}{ll} s_{ij} = s_i c_j + c_i s_j & s^2 + c^2 = 1 \\ c_{ij} = c_i c_j - s_i s_j & \end{array}$$

$$\sin(\alpha/2) = \pm \sqrt{\frac{1-\cos(\alpha)}{2}} \qquad \sin(\alpha) = \frac{\tan(\alpha)}{\pm \sqrt{1+\tan(\alpha)^2}}$$

$$\cos(\alpha/2) = \pm \sqrt{\frac{1+\cos(\alpha)}{2}} \qquad \cos(\alpha) = \frac{1}{\pm \sqrt{1+\tan(\alpha)^2}}$$

$$\begin{array}{l} \frac{d}{dx} \sin(x) = \cos(x) \\ \frac{d}{dx} \cos(x) = -\sin(x) \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} \sin(\Delta\varphi) \approx \Delta\varphi - (\Delta\varphi)^3/6 \approx \Delta\varphi \\ \cos(\Delta\varphi) \approx 1 - (\Delta\varphi)^2/2 \approx 1 \end{array} \right\} \text{ for } \Delta\varphi \approx 0$$

### ***B1.2 Οι συναρτήσεις τόξου εφαπτομένης atan() και atan2()***

Η συνάρτηση τόξου εφαπτομένης atan(x) ή arctan(x), βρίσκεται και σαν atan2(y,x) ή arctan2(y,x). Οι παραπάνω αποτελούν τυποποιημένες μαθηματικές συναρτήσεις που περιλαμβάνονται στις περισσότερες «βιβλιοθήκες» των υψηλού επιπέδου γλωσσών προγραμματισμού.

Η συνάρτηση  $\alpha = \text{atan}(x)$  είναι η αντίστροφη της  $\tan(\alpha) = x$ , και επιστρέφει μία τιμή στο

$$\text{εύρος } -\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$$

Η συνάρτηση  $\alpha = \text{atan2}(y, x)$  είναι η αντίστροφη της  $\tan(\alpha) = \frac{y}{x}$ . Υπολογίζει την αντίστροφη εφαπτομένη των δύο μεταβλητών  $y$  και  $x$ , τα πρόσημα των οποίων χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του τεταρτημορίου στο οποίο ανήκει το αποτέλεσμα. Η συνάρτηση αυτή επιστρέφει ένα αποτέλεσμα στο εύρος  $-\pi \leq \alpha \leq \pi$ . Η σχέση μεταξύ των  $\text{atan}(x)$  και  $\text{atan2}(y, x)$ , έχει ως εξής:

$$\text{atan2}(y, x) = \begin{cases} \text{atan}\left(\frac{y}{x}\right) & \in [0, \frac{\pi}{2}] & \text{if } \begin{cases} y > 0 \\ x > 0 \end{cases} & \begin{matrix} \text{1st} \\ \text{quad.} \end{matrix} \\ \pi - \text{atan}\left(\frac{y}{|x|}\right) & \in [\frac{\pi}{2}, \pi] & \text{if } \begin{cases} y > 0 \\ x < 0 \end{cases} & \begin{matrix} \text{2nd} \\ \text{quad.} \end{matrix} \\ -\pi + \text{atan}\left(\frac{|y|}{x}\right) & \in [-\frac{\pi}{2}, -\pi] & \text{if } \begin{cases} y < 0 \\ x < 0 \end{cases} & \begin{matrix} \text{3rd} \\ \text{quad.} \end{matrix} \\ -\text{atan}\left(\frac{|y|}{x}\right) & \in [0, -\frac{\pi}{2}] & \text{if } \begin{cases} y < 0 \\ x > 0 \end{cases} & \begin{matrix} \text{4th} \\ \text{quad.} \end{matrix} \end{cases}$$

Σημαντική επίσης είναι η ταυτότητα:  $\text{atan2}(y, x) = \frac{\pi}{2} - \text{atan2}(x, y)$  (1)

### B1.3 Εξίσωση $\cos(\varphi)a - \sin(\varphi)b = p$

Στην αντίστροφη κινηματική υπάρχει πολλές φορές η ανάγκη λύσης της υπερβατικής εξίσωσης

$$\cos(\varphi)a - \sin(\varphi)b = p \tag{2}$$

δοσμένων των παραμέτρων  $a$ ,  $b$  και  $p$ , ώστε να υπολογιστεί στην συνέχεια η:

$$q = \sin(\varphi)a + \cos(\varphi)b \tag{3}$$

Το πρόβλημα μπορεί να οριστεί και αντίστροφα, επίλυση δηλ της

$$\sin(\varphi)a + \cos(\varphi)b = q$$

και υπολογισμός του

$$p = \cos(\varphi)a - \sin(\varphi)b$$

#### B1.3.1 Συνήθης λύση

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για την επίλυση αυτών των εξισώσεων είναι με την χρήση των αντικαταστάσεων:

$$a = r \sin(\alpha) \text{ και } b = r \cos(\alpha) \text{ , όπου } \alpha = \text{atan2}(a, b) \text{ και } r = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Οπότε η (1) γίνεται:  $\cos(\varphi)r\sin(\alpha) - \sin(\varphi)r\cos(\alpha) = r\sin(\alpha-\varphi) = p$

$$\text{ή } \sin(\alpha-\varphi) = \frac{p}{r} \quad (4)$$

$$\text{Άρα: } \cos(\alpha-\varphi) = \pm\sqrt{1-\sin(\alpha-\varphi)^2} = \sqrt{1-\left(\frac{p}{r}\right)^2} \quad (5)$$

Συνδυάζοντας τις (4) και (5), προκύπτει:

$$\tan(\alpha-\varphi) = \frac{p}{\pm\sqrt{r^2-p^2}}$$

$$\text{ή } \varphi = \alpha - \text{atan2}(\pm\sqrt{r^2-p^2}, p) \\ = \text{atan2}(a, b) - \text{atan2}(\pm\sqrt{a^2+b^2-p^2}, p) \quad (6)$$

Λόγω της (1) η (6) μπορεί να γραφεί:

$$\varphi = \text{atan2}(p, \pm\sqrt{a^2+b^2-p^2}) - \text{atan2}(b, a)$$

Επομένως:

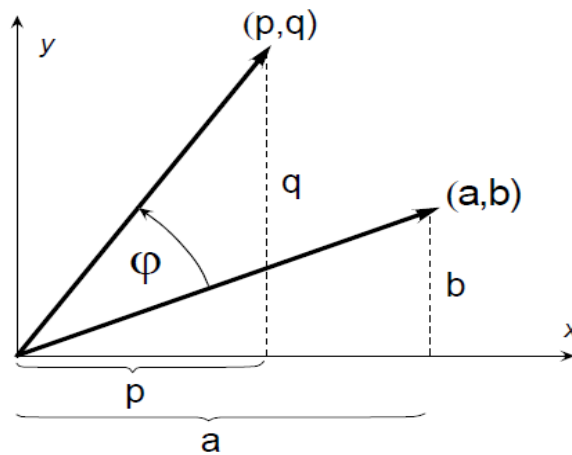
$$\begin{aligned} q &= \sin(\varphi)a + \cos(\varphi)b \\ &= \sin(\varphi)r\sin(\alpha) + \cos(\varphi)r\cos(\alpha) \\ &= r\cos(\alpha-\varphi) \\ &= r(\pm\sqrt{1-\sin(\alpha-\varphi)^2}) \\ &= \pm\sqrt{r^2-p^2} \\ &= \pm\sqrt{a^2+b^2-p^2} \end{aligned}$$

### ***B1.3.2 Εναλλακτική προσέγγιση του προβλήματος***

Μια πιο δομημένη προσέγγιση είναι να εξετάσει κανείς τις δυο εξισώσεις γράφοντας τις στη μορφή πίνακα:

$$\begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}$$

Αυτές ορίζουν την 2Δ περιστροφή του διανύσματος (a,b) κατά γωνία  $\varphi$ , οπότε και προκύπτει το διάνυσμα (p,q). Καθώς με την περιστροφή δεν αλλάζει το μέγεθος των διανυσμάτων, έχουμε:  $a^2+b^2 = p^2+q^2$



Από το παραπάνω σχήμα είναι εμφανές ότι:  $\varphi = \text{atan2}(q, p) - \text{atan2}(b, a)$

Χρησιμοποιώντας τις τελευταίες δύο εξισώσεις μπορούν να λυθούν τα παρακάτω προβλήματα:

$\left. \begin{array}{l} \text{Λύση:} \quad \cos(\varphi) a - \sin(\varphi) b = p \\ \text{Υπολογισμός:} \quad q = \sin(\varphi) a + \cos(\varphi) b \end{array} \right\} \begin{array}{l} q = \pm \sqrt{a^2 + b^2 - p^2} \\ \varphi = \text{atan2}(q, p) - \text{atan2}(b, a) \end{array}$
---

και

$\left. \begin{array}{l} \text{Λύση:} \quad \sin(\varphi) a + \cos(\varphi) b = q \\ \text{Υπολογισμός:} \quad p = \cos(\varphi) a - \sin(\varphi) b \end{array} \right\} \begin{array}{l} p = \pm \sqrt{a^2 + b^2 - q^2} \\ \varphi = \text{atan2}(q, p) - \text{atan2}(b, a) \end{array}$
---