ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ & ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ
ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ: ΚΑΘ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΧΡΥΣΟΛΟΥΡΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ
ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΕΡΓΟΝΟΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΚΑΙ
ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

ΜΕΝΕΛΑΟΣ Κ. ΠΑΠΠΑΣ
ΔΙΠΛ. ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

ΠΑΤΡΑ
ΜΑΡΤΙΟΣ 2009

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ & ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ
ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ: ΚΑΘ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΧΡΥΣΟΛΟΥΡΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ
ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΕΡΓΟΝΟΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΚΑΙ
ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

ΜΕΝΕΛΑΟΣ Κ. ΠΑΠΠΑΣ
ΔΙΠΛ. ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

ΠΑΤΡΑ
ΜΑΡΤΙΟΣ 2009

Copyright © Μενέλαος Κ. Παππάς, 2009

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα (E-mail: pappas@lms.mech.upatras.gr).

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών ή του Πανεπιστημίου Πατρών.

**ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΑΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΤΑΜΕΛΟΥΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ
ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΨΗΦΙΟΥ
ΔΙΔΑΚΤΟΡΑ Κ. ΜΕΝΕΛΑΟΥ Κ. ΠΑΠΠΑ**

Η Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή, αποτελούμενη από τους κ.κ. **Γεώργιο Χρυσολούρη, Καθηγητή** του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών (επιβλέποντα), **Νικόλαο Ανυφαντή, Καθηγητή** του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών και **Χρήστο Παπαδόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή** του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, σύμφωνα με την υπ' αριθμ. **6/18-5-2004** απόφαση της Γενικής Συνέλευσης Ειδικής Σύθεσης (Γ.Σ.Ε.Σ.) του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, συμπληρώθηκε σε **Επταμελή Εξεταστική Επιτροπή** με τους κ.κ. **Νικόλαο Ασπράγκαθο, Καθηγητή** του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, **Αργύρη Δέντσορα, Αναπληρωτή Καθηγητή** του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, **Γεώργιο Αθανασίου, Επίκουρο Καθηγητή** του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών και **Θεόδωρο Παπαθεοδώρου, Καθηγητή** του Τμήματος Μηχανικών Η/Υ & Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών, σύμφωνα με την υπ' αριθμ. **5/29-1-2008** απόφαση της Γενικής Συνέλευσης Ειδικής Σύθεσης (Γ.Σ.Ε.Σ.) του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών.

Η συνεδρίαση της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής πραγματοποιήθηκε στην **αίθουσα Συνεδριάσεων** του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, στις **25 Φεβρουαρίου 2009**, ημέρα **Τετάρτη**, και ώρα **2:00 μ.μ.**, κατά την οποία η διατριβή με τίτλο «**Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Μοντελοποίησης Ανθρώπινης Κίνησης για τη Βελτίωση του Εργονομικού Σχεδιασμού Προϊόντων και Σταθμών Εργασίας – Εφαρμογή στην Αυτοκινητοβιομηχανία**» υποστηρίχθηκε από τον υποψήφιο διδάκτορα **κ. Μενέλαο Κ. Παππά**. Στη συνέχεια υπεβλήθησαν ερωτήσεις προς τον υποψήφιο διδάκτορα, σχετικές με το περιεχόμενο της διατριβής του, οι οποίες σκοπό είχαν τον έλεγχο της επιστημονικής συγκρότησης του υποψηφίου, της γνώσης του θέματος της διατριβής του και των σχετιζομένων με αυτή θεμάτων του οικείου επιστημονικού κλάδου. Οι απαντήσεις που δόθηκαν από τον υποψήφιο διδάκτορα κάλυψαν σε ικανοποιητικό βαθμό τις ερωτήσεις της εξεταστικής επιτροπής, ολοκληρώνοντας με τον τρόπο αυτό τη διαδικασία εξέτασης του υποψηφίου διδάκτορα.

Μετά την αποχώρηση του υποψηφίου και των ακροατών από την αίθουσα, η επιτροπή συζήτησε επί της γενόμενης εξέτασεως και απεφάσισε ομόφωνα να κάνει δεκτή τη διδακτορική διατριβή, καθώς αποτελεί πρωτότυπη και ουσιαστική συμβολή στην επιστήμη και ο υποψήφιος την υπερασπίστηκε με άκρως ικανοποιητικό τρόπο. Για τους λόγους αυτούς η επιτροπή αποφάσισε να βαθμολογήσει τη διδακτορική διατριβή με βαθμό «ΑΡΙΣΤΑ».

Η ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Χρυσολούρης Γεώργιος , Καθηγητής (Επιβλέπων)

Ανυφαντής Νικόλαος , Καθηγητής

Παπαδόπουλος Χρήστος , Αναπληρωτής Καθηγητής

Ασπράγκαθος Νικόλαος , Καθηγητής

Δέντσορας Αργύρης , Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθανασίου Γεώργιος , Επίκουρος Καθηγητής

Παπαθεοδώρου Θεόδωρος , Καθηγητής

Αφιερώνεται...

στην οικογένειά μου

&

στη σύντροφό μου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Από το εδάφιο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς όλους εκείνους τους ανθρώπους που συνετέλεσαν με τον δικό τους ξεχωριστό τρόπο στην ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής. Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστώ τον επιβλέποντα της διατριβής μου κ. *Γεώργιο Χρυσολούρη*, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών και Διευθυντή του Εργαστηρίου Συστημάτων Παραγωγής και Αυτοματισμού, ο οποίος έδειξε εμπιστοσύνη στο πρόσωπό μου, προσφέροντάς μου την ευκαιρία να αποκτήσω τόσο πνευματική όσο και ηθική κατάρτιση μέσα από ένα ταξίδι αναζήτησης, έρευνας και ακαδημαϊκής εμπειρίας...

Θα ήθελα ακολούθως να ευχαριστήσω τους κ.κ. *Νικόλαο Ανυφαντή*, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών και κ. *Χρήστο Παπαδόπουλο*, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών -μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής- οι οποίοι συνέβαλαν στην καθοδήγηση και ολοκλήρωσή της διατριβής μου, μέσω των εποικοδομητικών τους συμβουλών. Ευχαριστώ επίσης τους κ.κ. *Νικόλαο Ασπράγκαθο*, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, κ. *Αργύρη Δέντσора*, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, κ. *Γεώργιο Αθανασίου*, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών και κ. *Θεόδωρο Παπαθεοδώρου*, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών, για τη συμβολή τους στην τελική διαμόρφωση της διατριβής μου, ως μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής.

Στη συνέχεια θα ήθελα να εκφράσω ολόψυχα τις ευχαριστίες μου στους ανθρώπους που συνεργαζόμασταν στην ίδια ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Συστημάτων Παραγωγής και Αυτοματισμού όλα αυτά τα χρόνια και πιο συγκεκριμένα στους συναδέλφους και φίλους *Βασιλική Καραμπάτσου* Δρ. Μηχανολόγο Μηχανικό και *Κοσμά Αλεξόπουλο* Δρ. Μηχανικό Η/Υ και Πληροφορικής για την αμέριστη βοήθεια, τις πολύτιμες συμβουλές και την ουσιαστική συμβολή τους όλα αυτά τα χρόνια. Ευχαριστώ επίσης τον *Δημήτριο Μαυρίκιο* Δρ. Μηχανολόγο Μηχανικό για την καθοδηγητική συμβολή του σε ερευνητικά θέματα και τους *Παντελή Γώγο* Διπλ. Μηχανολόγο Μηχανικό και *Ηλία Ντελή* Διπλ. Μηχανικό Η/Υ και Πληροφορικής για την τεχνική συμβολή και συνεργασία τους στο πεδίο έρευνας της διδακτορικής μου διατριβής. Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστώ τον κ. *Δημήτρη Μούρτζη*, Λέκτορα του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών καθώς επίσης και τις γραμματείες του εργαστηρίου κ.κ. *Αντζελα Σμπαρούνη* και *Βάσω Βελαώρα* για τη βοήθεια τους σε κάθε περίπτωση που αυτή κρίθηκε αναγκαία.

Δε θα μπορούσα φυσικά να παραλείψω να εκφράσω τις πιο θερμές μου ευχαριστίες στους πιο σημαντικούς ανθρώπους της ζωής μου, τους γονείς μου *Κώστα* και *Νατάσα*, την αδερφή μου *Τζένη*, την αρραβωνιαστικιά μου *Τζούλια* και τους *φίλους μου*, που πίστεψαν σε μένα προσφέροντάς μου αδιάκοπη και πολύτιμη ηθική στήριξη και συμπαράσταση όλο αυτό το χρονικό διάστημα, καθώς επίσης και για την υπομονή και κατανόηση που έδειξαν σε όλες τις δύσκολες στιγμές αυτού του πολύχρονου ταξιδιού... Ειλικρινά, η ύπαρξη των ανθρώπων αυτών στο πλευρό μου συνετέλεσε καθοριστικά στην αναπόσπαστη αφοσίωση μου στο δύσκολο αυτό εγχείρημα.

Μενέλαος Κ. Παππάς

Πάτρα, Μάρτιος 2009

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ
ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΕΡΓΟΝΟΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΚΑΙ
ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο αξιόπιστος και αποτελεσματικός ανθρωποκεντρικός σχεδιασμός προϊόντων και διαδικασιών παραγωγής αποτελεί μείζον ζήτημα της κατασκευαστική βιομηχανίας. Για το λόγο αυτό, πλήθος ελέγχων που αφορούν στη λειτουργικότητα, την ασφάλεια και την άνεση, τόσο των προϊόντων που χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο, όσο και των διαδικασιών παραγωγής που συμμετέχει ο ανθρώπινος παράγοντας, πραγματοποιούνται και αξιολογούνται σε περιβάλλον Η/Υ με τη χρήση λογισμικών προσομοίωσης και εικονικής πραγματικότητας. Η ρεαλιστική και αξιόπιστη αναπαράσταση της ανθρώπινης κίνησης μέσα σε εικονικό περιβάλλον, αποτελεί στις μέρες μας επιτακτική ανάγκη. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη μιας νέας μεθοδολογίας μοντελοποίησης της ανθρώπινης κίνησης, που βασίζεται στην προσαρμογή μιας υπάρχουσας κίνησης σε νέα ανθρωπομετρικά δεδομένα και περιορισμούς του περιβάλλοντος εργασίας (εικονικού πρωτοτύπου ή σταθμού εργασίας). Η προτεινόμενη προσέγγιση αποσκοπεί στη δημιουργία ρεαλιστικών και αξιόπιστων κινήσεων ψηφιακών ανθρωποειδών με στόχο την προσομοίωσή τους σε εικονικό περιβάλλον, ώστε να εξαχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα κατά την εργονομική αξιολόγηση του σχεδιασμού προϊόντων και σταθμών εργασίας σε γραμμή παραγωγής.

Αρχικά, γίνεται εισαγωγή τόσο στη σπουδαιότητα, όσο και στα προβλήματα του εργονομικού σχεδιασμού με χρήση ψηφιακών ανθρωποειδών, που αποτέλεσαν και το κύριο έναυσμα της παρούσας έρευνας. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, που αφορούν σε μεθόδους μοντελοποίησης της ανθρώπινης κίνησης με χρήση τεχνολογίας ψηφιακών ανθρωποειδών, καθώς και σε λογισμικά προσομοίωσης ανθρώπινης συμπεριφοράς και εργονομικού σχεδιασμού.

Στη συνέχεια, παρατίθεται μια εκτεταμένη ανάλυση που έχει ως στόχο τη βαθύτερη κατανόηση της ανθρώπινης κίνησης. Η ανάλυση αυτή βασίζεται στη θεωρία του Στατιστικού Σχεδιασμού Πειραμάτων και χρησιμοποιεί πειραματικά δεδομένα καταγραφής ανθρώπινων κινήσεων. Η Ανάλυση της Διακύμανσης χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό των ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών που επηρεάζουν περισσότερο την ανθρώπινη κίνηση, καθώς και για την ποσοτικοποίηση της επιρροής τους στη διαφοροποίηση της κίνησης. Βάσει των αποτελεσμάτων της Ανάλυσης της Διακύμανσης, γίνεται ανάπτυξη ημι-εμπειρικών, προσθετικών μοντέλων κίνησης, τα οποία συσχετίζουν την επίδραση των ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών με τις τροχιές των αισθητήρων που τοποθετούνται πάνω στο ανθρώπινο σώμα για την καταγραφή της κίνησης.

Ακολουθεί η στοιχειοθέτηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας μοντελοποίησης. Δεδομένου ότι η ανθρώπινη κίνηση αναλύεται σε ένα σύνολο διαδοχικών στιγμιοτύπων, η μεθοδολογία μοντελοποίησης αποσκοπεί στη δημιουργία στάσεων σώματος ψηφιακού ανθρωποειδούς για κάθε

στιγμιότυπο του επιθυμητού σεναρίου κίνησης. Ως σενάριο κίνησης ορίζεται κάθε δυνατός συνδυασμός “εργασίας – ψηφιακού ανθρωποειδούς – περιβάλλοντος εργασίας”. Για τη δημιουργία ενός στιγμιότυπου της νέας κίνησης, ο αλγόριθμος της μεθοδολογίας παράγει τυχαίες εναλλακτικές στάσεις σώματος, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα την αποφυγή τόσο των μη-ρεαλιστικών στάσεων, όσο και των στάσεων που δεν ικανοποιούν τους περιορισμούς του νέου σεναρίου κίνησης. Η βασική ιδέα της μεθοδολογίας μοντελοποίησης στηρίζεται στη θεωρία λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων, η οποία χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των εναλλακτικών και την τελική επιλογή των βέλτιστων στάσεων σώματος, για τη σύνθεση της νέας κίνησης. Τα κριτήρια αφορούν αφενός στην εξασφάλιση της ρεαλιστικότητας της κίνησης και αφετέρου στην ικανοποίηση των νέων χωρικών περιορισμών, που προκύπτουν από τις γεωμετρικές τροποποιήσεις του περιβάλλοντος εργασίας.

Έπεται η περιγραφή των βοηθητικών και δομικών στοιχείων του συστήματος υλοποίησης, καθώς και ο αναλυτικός σχεδιασμός του. Το σύστημα που αναπτύχθηκε αποτελείται από τα ακόλουθα δομικά στοιχεία: i) τη βάση δεδομένων, στην οποία αποθηκεύονται οι κινήσεις αναφοράς, τα ψηφιακά ανθρωποειδή, τα περιβάλλοντα εργασίας και τα αρχεία περιγραφής εργασιών, ii) το μηχανισμό που παράγει τις εναλλακτικές στάσεις σώματος λαμβάνοντας υπ’ όψη τους νέους περιορισμούς, iii) τα κριτήρια αξιολόγησης των εναλλακτικών κινήσεων, που αφορούν στην ομοιότητα των γωνιών των αρθρώσεων του σώματος και στην ομοιότητα της θέσης του άκρου εργασίας, iv) τον πίνακα αποφάσεων, ο οποίος υπολογίζει το δείκτη αξιολόγησης για κάθε εναλλακτική, βάσει των κριτηρίων αξιολόγησης, v) το μηχανισμό συνολικής αξιολόγησης των εναλλακτικών, ο οποίος υπολογίζει τον τελικό δείκτη αξιολόγησης, βάσει των δεικτών αξιολόγησης του πίνακα αποφάσεων και των βαρών των κριτηρίων, vi) το μηχανισμό κατάταξης των εναλλακτικών στάσεων, ο οποίος κατατάσσει τις εναλλακτικές, βάσει του τελικού δείκτη αξιολόγησης, και επιλέγει τη βέλτιστη στάση σώματος για κάθε στιγμιότυπο κίνησης. Το σύστημα που αναπτύχθηκε παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας προσαρμοσμένων κινήσεων ψηφιακών ανθρωποειδών που ικανοποιούν τις νέες συνθήκες και περιορισμούς. Οι νέες συνθήκες και περιορισμοί προέρχονται από την τροποποίηση των ανθρωπομετρικών διαστάσεων του ψηφιακού ανθρωποειδούς που εκτελεί την κίνηση, ή / και από την τροποποίηση της γεωμετρίας του περιβάλλοντος εργασίας, όπου εκτελείται η κίνηση.

Η αξιολόγηση της αξιοπιστίας της προτεινόμενης μεθοδολογίας μοντελοποίησης παρουσιάζεται μέσα από μια σειρά πειραμάτων εκτέλεσης της πιλοτικής εφαρμογής από το χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας. Η πιλοτική εφαρμογή αποσκοπεί στην εργονομική αξιολόγηση του σχεδιασμού του εσωτερικού ενός επιβατηγού αυτοκινήτου, επικεντρώνοντας στην επιλογή της βέλτιστης θέσης του καθίσματος του οδηγού και της εσωτερικής λαβής της πόρτας. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης καταδεικνύει τις δυνατότητες πρόβλεψης του αλγορίθμου όταν τροποποιούνται, τόσο τα ανθρωπομετρικά, όσο και οι διαστάσεις του περιβάλλοντος εργασίας. Ο αλγόριθμος δημιουργεί ρεαλιστικές και αξιόπιστες ανθρώπινες κινήσεις οι οποίες μπορούν να συντελέσουν στη βελτίωση του εργονομικού σχεδιασμού προϊόντων και διαδικασιών παραγωγής.

**DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR DIGITAL HUMAN MOTION
MODELLING TO IMPROVE THE ERGONOMIC DESIGN OF PRODUCTS
AND WORKSPACES. APPLICATION IN AUTOMOTIVE INDUSTRY**

ABSTRACT

The efficient and reliable human-centred design of products and processes is a major goal of the manufacturing industry. Thus, numerous aspects related to performance, safety and ergonomics, need to be verified using Simulation and Virtual Reality techniques, in the context of the product development procedure. The realistic and accurate representation of human motion in Virtual Environment is crucial for the reliability of the simulation results. In this context, this dissertation focuses on the design and development of a novel methodology for human motion modelling, based on the adaptation of a given motion of a digital human model to new anthropometrics and environment's constraints (related to virtual prototype or workspace). The proposed approach aims at the generation of realistic and reliable digital human motions in order to drive computer manikins into a Virtual Environment, so as to obtain reliable evaluation results during ergonomic design of a product or a production line's workspace.

The introductory chapter presents both the importance and the limitations of the ergonomic design using computer manikins, which consisted the major motivation of this research work. State-of-the-art is presented next, concerning other approaches related to human motion modeling using computer manikins, as well as software tools for digital human modeling and ergonomic design.

Next chapter presents an extensive analysis, which focuses on the better understanding of the human motion. This analysis is based on a Statistical Design Of Experiments (SDoE) and makes use of experimental motion captured data. Analysis of Variance (ANOVA) was performed for the determination of the impact factor of the anthropometric parameters influencing the human motion path. Semi-empirical additive models was developed next, based on the results of this analysis, which connects the effect of anthropometrics with the trajectories of the markers that are attached on the human body during the motion capture procedure.

The composing of the proposed motion modelling methodology is following. Given that human motion is analysed by a set of sequential motion frames, the modelling methodology aims at the generation of digital human's postures for each frame of the desirable motion scenario. Motion scenario is each possible combination of "task – computer manikin – environment". For the creation of a new motion's frame, the algorithm of the methodology generates alternative postures, ensuring the rejection of non-realistic and constraint-violating postures. The basic concept of the modelling methodology is based on the multi-criteria decision making, which is used for the alternatives' evaluation and the selection of the best-ranked human postures that constitute the new human motion.

The criteria concern both the extensionality of the new motion and the satisfaction of the new constraints, related to the geometric modifications of the working environment.

The description of the primary and secondary components of the implemented system, as well as their detailed design are presented next. The developed system consists of the following primary components: i)the data base, which includes reference motions, computer manikins, virtual environments and tasks , ii)the alternative generation mechanism, which takes into account the new constraints, iii)the evaluation criteria of alternatives, which are related to joint angles' and end-effector's similarity, iv)the decision matrix, which calculates the evaluation score of each alternative posture, based on the criteria, v)the aggregation mechanism, which calculates the utility score of each alternative, based on the evaluation scores and the weights of the criteria, vi)the ranking mechanism, which sorts the alternatives based on the utility score and selects the best-ranked alternative for each motion frame. The developed system enables the creation of adapted motions for digital humans that satisfies the new conditions and constraints. The new conditions and constraints come from the modification of the anthropometrics of the digital human model that realize the motion and/or the modification of the shape/geometry of the working environment.

The evaluation of the proposed methodology's efficiency is illustrated through a set of experiments through the pilot application coming from the automotive industry. The pilot application aims at the ergonomic evaluation of the interior design of a passenger car, focusing mainly on the position optimization for the driver's seat and the door's handle. The evaluation demonstrates the prediction capabilities of the algorithm, when both anthropometrics and environment parameters are modified. The algorithm generates accurate and realistic human motions that can be efficiently used in order to improve the computer-aided ergonomic design of manufacturing products and processes.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	V
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	VII
ABSTRACT	IX
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	XI
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	XIII
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	XVII
ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ	XIX
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ	1
1.2 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	4
2 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ	7
2.1 ΕΡΓΟΝΟΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	7
2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΕΡΓΟΝΟΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	10
2.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	21
2.4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	24
3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	25
3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	27
3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΘΡΩΠΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ	32
3.3 ΠΡΟ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	33
3.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	39
3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ	53
4 ΣΤΟΙΧΕΙΟΘΕΤΗΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ	55
4.1 ΦΑΣΕΙΣ ΜΙΑΣ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ.....	55
4.2 ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ.....	59
4.3 ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ.....	64
5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	67
5.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	67
5.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΚΙΝΗΣΕΩΝ.....	71
5.3 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	79
6 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	81
6.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	81

6.2	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ	82
6.3	ΓΡΑΦΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΧΡΗΣΤΗ.....	83
7	ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ	91
7.1	ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	91
7.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ.....	92
7.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	93
7.4	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΟΥΣ.....	94
7.5	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ	98
7.6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	100
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	109
8.1	ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΗ / ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ	109
8.2	ΓΕΝΙΚΕΥΣΗ / ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΕΡΕΥΝΑΣ	112
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	117
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι – ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ	123
	ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	123
	ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ 1 ^{ΟΥ} ΝΕΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΟΥΣ:	124
	ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ 2 ^{ΟΥ} ΝΕΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΟΥΣ:	125
	ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ 3 ^{ΟΥ} ΝΕΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΟΥΣ:	126
	ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ 4 ^{ΟΥ} ΝΕΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΟΥΣ:	127
	ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ 5 ^{ΟΥ} ΝΕΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΟΥΣ:	128
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ – ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	129
	ΑΡΧΕΙΟ XML ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΟΥΣ.....	130
	ΑΡΧΕΙΟ XML ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	133
	ΑΡΧΕΙΟ RMR ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΟΥΣ.....	135
	ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ	139
	ΛΙΣΤΑ ΠΡΟΣΩΠΙΚΩΝ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ.....	141
	ΣΕ ΔΙΕΘΝΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ	141
	ΣΕ ΚΕΦΑΛΑΙΑ ΔΙΕΘΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ	141
	ΣΕ ΔΙΕΘΝΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ	142
	ΣΕ ΕΘΝΙΚΑ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ.....	144

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 1-1. ΓΡΑΦΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΧΡΗΣΤΗ ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	6
ΣΧΗΜΑ 2-1. ΕΡΓΟΝΟΜΙΑ ΚΑΙ ΟΙ ΣΧΕΤΙΚΟΙ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΙ ΚΛΑΔΟΙ	9
ΣΧΗΜΑ 2-2. ΕΡΓΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΧΩΡΩΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΡΩΤΟΤΥΠΩΝ	11
ΣΧΗΜΑ 2-3. ΕΡΓΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΙΚΟΝΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΕΜΒΥΘΙΣΗΣ	13
ΣΧΗΜΑ 2-4. RAMSIS [HUMAN SOLUTIONS, 2009]	17
ΣΧΗΜΑ 2-5. DELMIA V5 HUMAN [DASSAULT SYSTEMES, 2009]	17
ΣΧΗΜΑ 2-6. JACK [UNIGRAPHICS SOLUTIONS, 2009]	18
ΣΧΗΜΑ 2-7. SAFEWORK PRO [SAFEWORK INC., 2009]	18
ΣΧΗΜΑ 2-8. ANYBODY [ANYBODY TECHNOLOGY, 2009]	19
ΣΧΗΜΑ 2-9. SAMMIE [SAMMIE CAD LTD., 2009]	19
ΣΧΗΜΑ 2-10. MANNEQUINPRO [NEXGEN ERGONOMICS INC., 2009]	20
ΣΧΗΜΑ 2-11. BOEING HUMAN MODELING SYSTEM [BOEING CO., 2009]	20
ΣΧΗΜΑ 2-12. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΧΕΡΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ [RIGOTTI <i>ET AL.</i> , 2001]	22
ΣΧΗΜΑ 2-13. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ [FARAWAY <i>ET AL.</i> , 1999]	22
ΣΧΗΜΑ 2-14. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ <i>B-SPLINE</i> [VSR, 2009]	23
ΣΧΗΜΑ 3-1. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ	26
ΣΧΗΜΑ 3-2. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΩΝ ΣΤΟ ΣΩΜΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ ΑΠΟ ΟΠΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΙΝΗΣΕΩΝ [LAB, 2001]	30
ΣΧΗΜΑ 3-3. ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΣΩΜΑ ΚΑΙ ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ [LAB, 2001]	30
ΣΧΗΜΑ 3-4. ΤΜΗΜΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΩΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΩΝ ΚΙΝΗΣΕΩΝ [LAB, 2001]	31
ΣΧΗΜΑ 3-5. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΕΙΣΟΔΟΥ-ΕΞΟΔΟΥ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΟΔΗΓΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΑΠΟ ΟΡΘΙΑ ΣΤΑΣΗ [LAB, 2001]	34
ΣΧΗΜΑ 3-6. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΕΝΟΣ “ΚΡΙΣΙΜΟΥ” ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΑ ΣΤΟ ΧΩΡΟ, ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΟΔΗΓΟΥ, ΓΙΑ ΟΛΟΥΣ ΤΟΥΣ ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΝΤΕΣ	36
ΣΧΗΜΑ 3-7. ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΑΠΟΛΥΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ (ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ) ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΩΝ ΚΙΝΗΣΕΩΝ [LAB, 2001]	37
ΣΧΗΜΑ 3-8. ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΟΔΗΓΟΥ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΑΝ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΝΤΕΣ [LAB, 2001]	41
ΣΧΗΜΑ 3-9. (Α) ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ (ΑΝΑΣΤΗΜΑ, ΠΛΑΤΟΣ ΛΕΚΑΝΗΣ, ΕΥΛΥΓΙΣΙΑ) ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ <i>X</i> ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΑ 14 ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ <i>Y</i> , (Β) ΚΥΚΛΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΣΤΗΝ ΤΡΟΧΙΑ ΤΟΥ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΑ 14 ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ <i>X</i>	44

ΣΧΗΜΑ 3-10. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ (ΑΝΑΣΤΗΜΑ, ΠΛΑΤΟΣ ΛΕΚΑΝΗΣ, ΕΥΛΥΓΙΣΙΑ) ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Χ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Υ.....	45
ΣΧΗΜΑ 3-11. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ (ΑΝΑΣΤΗΜΑ, ΠΛΑΤΟΣ ΛΕΚΑΝΗΣ, ΕΥΛΥΓΙΣΙΑ) ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Ζ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Υ.....	46
ΣΧΗΜΑ 3-12. ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΟΣΟΣΤΩΝ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ (ΑΝΑΣΤΗΜΑ, ΠΛΑΤΟΣ ΛΕΚΑΝΗΣ, ΕΥΛΥΓΙΣΙΑ) ΣΤΗΝ ΤΡΟΧΙΑ ΤΩΝ “ΚΡΙΣΙΜΩΝ” ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΩΝ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Χ.....	47
ΣΧΗΜΑ 3-13. ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΟΣΟΣΤΩΝ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ (ΑΝΑΣΤΗΜΑ, ΠΛΑΤΟΣ ΛΕΚΑΝΗΣ, ΕΥΛΥΓΙΣΙΑ) ΣΤΗΝ ΤΡΟΧΙΑ ΤΩΝ “ΚΡΙΣΙΜΩΝ” ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΩΝ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Ζ.....	48
ΣΧΗΜΑ 3-14. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ “ΚΡΙΣΙΜΩΝ” ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΩΝ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Χ, ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΝΤΑ 11.....	51
ΣΧΗΜΑ 3-15. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ “ΚΡΙΣΙΜΩΝ” ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΩΝ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Ζ, ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΝΤΑ 11.....	52
ΣΧΗΜΑ 4-1. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΡΓΟΝΟΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Η/Υ: ΟΙ ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΦΑΣΕΙΣ.....	57
ΣΧΗΜΑ 4-2. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΡΓΟΝΟΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Η/Υ: ΤΑ ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	58
ΣΧΗΜΑ 4-3. ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕ ΟΠΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΙΧΜΑΛΩΤΙΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	60
ΣΧΗΜΑ 4-4. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΟΥΣ ΑΠΟ ΑΝΘΡΩΠΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	60
ΣΧΗΜΑ 4-5. ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ (ΘΕΣΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ).....	61
ΣΧΗΜΑ 4-6. ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ (ΤΡΟΧΙΕΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΩΝ) ΣΕ ΨΗΦΙΑΚΟ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΕΣ.....	61
ΣΧΗΜΑ 4-7. ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΡΟΧΙΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΣΕ ΓΩΝΙΕΣ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΟΥΣ.....	61
ΣΧΗΜΑ 4-8. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	61
ΣΧΗΜΑ 4-9. ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΑΠΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΧΜΑΛΩΤΙΣΗΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	62
ΣΧΗΜΑ 4-10. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	62
ΣΧΗΜΑ 4-11. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	63
ΣΧΗΜΑ 5-1. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ-ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ.....	70
ΣΧΗΜΑ 5-2. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ.....	71
ΣΧΗΜΑ 5-3. Η ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΒΑΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΧΩΡΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ.....	75
ΣΧΗΜΑ 5-4. (Α) ΑΡΧΙΚΗ ΤΡΟΧΙΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (Β) Η ΤΡΟΧΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΖΕΤΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΩΝ <i>ADAPTATION IN/OUT</i> ΠΕΡΙΟΔΩΝ (Γ) Η ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΡΟΧΙΑ ΟΤΑΝ ΤΟ ΝΕΟ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΕΣ ΕΙΝΑΙ ΤΟ ΙΔΙΟ ΜΕ ΤΟ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΕΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (Δ) Η ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΤΡΟΧΙΑ ΟΤΑΝ ΤΟ ΝΕΟ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΕΣ ΕΙΝΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΑΠΟ ΤΟ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΕΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	76
ΣΧΗΜΑ 5-5. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΕ ΝΕΟ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΕΣ ΜΕ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΧΩΡΙΚΟΥ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ (SC).....	77
ΣΧΗΜΑ 6-1. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	81
ΣΧΗΜΑ 6-2. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (<i>USE CASE DIAGRAM</i>).....	82
ΣΧΗΜΑ 6-3. ΓΡΑΦΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΧΡΗΣΤΗ: ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ.....	83
ΣΧΗΜΑ 6-4. ΕΠΙΛΟΓΗ XML ΑΡΧΕΙΟΥ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	84
ΣΧΗΜΑ 6-5. ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΟΥ ΕΧΕΙ ΦΟΡΤΩΘΕΙ.....	84
ΣΧΗΜΑ 6-6. ΕΠΙΛΟΓΗ ΝΕΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΟΥΣ.....	85
ΣΧΗΜΑ 6-7. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΩΝ ΤΗΣ ΝΕΑΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	86
ΣΧΗΜΑ 6-8. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	86

ΣΧΗΜΑ 6-9. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΝΕΑΣ ΘΕΣΗΣ (ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ) ΤΗΣ ΛΑΒΗΣ ΤΗΣ ΠΟΡΤΑΣ.....	87
ΣΧΗΜΑ 6-10. ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ	88
ΣΧΗΜΑ 6-11. Η ΜΠΑΡΑ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ	88
ΣΧΗΜΑ 6-12. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	89
ΣΧΗΜΑ 7-1. ΡΥΘΜΙΖΟΜΕΝΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ [LAB-INRETS, 2003].....	91
ΣΧΗΜΑ 7-2. ΤΡΙΑ ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΑ-ΚΛΕΙΔΙΑ (KEY-FRAMES) ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ “ΑΝΟΙΓΜΑ ΠΟΡΤΑΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ”: (Α) ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΚΡΑΤΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΤΙΜΟΝΙΟΥ (Β) ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΠΙΑΣΙΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΛΑΒΗΣ ΤΗΣ ΠΟΡΤΑΣ (Γ) ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΠΟΥ ΤΟ ΧΕΡΙ ΑΦΗΝΕΙ ΤΗ ΛΑΒΗ.....	92
ΣΧΗΜΑ 7-3. ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	93
ΣΧΗΜΑ 7-4. ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΟΥΣ <i>RAMSIS</i> – “ΣΤΑΣΗ ΜΗΔΕΝ” [HUMAN SOLUTIONS, 2009]	94
ΣΧΗΜΑ 7-5. ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΠΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ (4 ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ, 10 ΒΑΘΜΩΝ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ).....	95
ΣΧΗΜΑ 7-6. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΡΩΤΗΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ. Η ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΑΚΡΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΟΥΣ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΣΗ ΤΗΣ ΛΑΒΗΣ ΤΗΣ ΠΟΡΤΑΣ ΣΤΟ ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ 46, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΗ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΜΝΑ	102
ΣΧΗΜΑ 7-7. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ. Η ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΑΚΡΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΛΑΒΗ ΤΗΣ ΠΟΡΤΑΣ ΣΤΟ ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ 46, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΗΣ ΛΑΒΗΣ ΠΟΡΤΑΣ ΚΑΙ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΜΝΑ.....	103
ΣΧΗΜΑ 7-8. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΡΙΤΗΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ. Η ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΑΚΡΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΝΕΩΝ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΛΑΒΗ ΤΗΣ ΠΟΡΤΑΣ ΣΤΟ ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ 46, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΤΗΣ ΛΑΒΗΣ ΚΑΙ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΜΝΑ	105
ΣΧΗΜΑ 7-9. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΟΤΑΝ ΑΛΛΑΖΟΥΝ ΜΟΝΟ ΤΑ ΑΝΘΡΩΠΟΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ: (Α) ΠΕΝΤΕ ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΑ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ, (Β) ΚΑΙ (Γ) ΤΑ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΑ ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ, ΓΙΑ ΤΟ ΝΕΟ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΕΣ ΜΕ $MNA=10$ ΚΑΙ $MNA=10000$ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ	106
ΣΧΗΜΑ 7-10. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΕ ΕΙΚΟΝΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ, ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ <i>RAMSIS</i> , ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	107
ΣΧΗΜΑ 8-1. Η ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΛΥΠΤΕΙ ΕΝΑ ΕΥΡΥ ΦΑΣΜΑ ΠΛΗΘΥΣΜΙΑΚΟΥ ΣΤΟΧΟΥ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΤΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ	110
ΣΧΗΜΑ 8-2. ΕΡΓΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΤΟ <i>RAMSIS</i> , ΚΑΝΟΝΤΑΣ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ [CHRYSSOLOURIS <i>ET AL.</i> , 2004] ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΔΥΣΦΟΡΙΑΣ (<i>DISCOMFORT SCORE</i>) ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΑ ΣΤΗ ΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ, ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΚΙΝΗΣΗΣ	113
ΣΧΗΜΑ 8-3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΟΥ ΤΙΜΟΝΙΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ..	114
ΣΧΗΜΑ 8-4. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ	114
ΣΧΗΜΑ 8-5. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΚΑΜΠΙΝΑΣ ΕΠΙΒΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΙΛΟΤΗΡΙΟΥ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ	114

ΣΧΗΜΑ 8-6. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΤΑΘΜΩΝ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΡΑΓΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΤΩΝ ΡΑΦΙΩΝ [ΜΑΝΡΙΚΙΟΣ <i>ET AL.</i> , 2007]	115
ΣΧΗΜΑ 8-7. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΤΑΘΜΩΝ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ ΠΛΑΪΝΟΥ ΤΖΑΜΙΟΥ ΣΕ ΨΥΓΕΙΟ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ [ΡΑΡΡΑΣ <i>ET AL.</i> , 2007].	115
ΣΧΗΜΑ 8-8. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ “ΑΝΟΙΓΜΑ ΠΟΡΤΑΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ” ΣΤΟ ΕΙΚΟΝΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ <i>JACK</i> [HUMOSIM, 2009]	115
ΣΧΗΜΑ 8-9. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟΥ	116

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΓΕΘΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΑΝΘΡΩΠΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ [LAB, 2001] .	28
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-2. ΑΝΘΡΩΠΟΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΝΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ [LAB, 2001]	29
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-3. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΛΕΧΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΥΡΟΙ ΤΙΜΩΝ	32
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-4. ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΕΝΑΡΞΗΣ ΚΑΙ ΛΗΞΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΓΙΑ ΟΛΟΥΣ ΤΟΥΣ ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΝΤΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ	35
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-5. L4 ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΩΝ ΜΗΤΡΩΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ..	42
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-6. ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (L4 ΠΙΝΑΚΑΣ)	43
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-7. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ (ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΚΙΝΗΣΗΣ: 7, ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΑΣ: 14, ΑΞΟΝΑΣ Z)	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-8. ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗΣ	51
ΠΙΝΑΚΑΣ 7-1. ΕΠΙΤΡΕΠΤΑ ΟΡΙΑ ΤΙΜΩΝ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΗΣ ΛΑΒΗΣ ΤΗΣ ΠΟΡΤΑΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ Η	93
ΠΙΝΑΚΑΣ 7-2. ΕΥΡΟΣ ΕΠΙΤΡΕΠΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΤΩΝ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ	98
ΠΙΝΑΚΑΣ 7-3. ΕΥΡΟΣ ΕΠΙΤΡΕΠΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΓΩΝΙΩΝ ΤΩΝ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ	98
ΠΙΝΑΚΑΣ 7-4. ΧΩΡΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ “ΑΝΟΙΓΜΑ ΠΟΡΤΑΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ”	99
ΠΙΝΑΚΑΣ 7-5. ΑΝΘΡΩΠΟΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΝΕΩΝ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΩΝ (ΟΛΕΣ ΟΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΜΜ)	101
ΠΙΝΑΚΑΣ 7-6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΡΩΤΗΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ. Η ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΑΚΡΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΟΥΣ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΣΗ ΤΗΣ ΛΑΒΗΣ ΤΗΣ ΠΟΡΤΑΣ ΣΤΟ ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ 46, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΗ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ MNA	101
ΠΙΝΑΚΑΣ 7-7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ. Η ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΑΚΡΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΛΑΒΗ ΤΗΣ ΠΟΡΤΑΣ ΣΤΟ ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ 46, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΤΗΣ ΛΑΒΗΣ ΚΑΙ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ MNA	102
ΠΙΝΑΚΑΣ 7-8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΡΙΤΗΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ. Η ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΑΚΡΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΝΕΩΝ ΑΝΘΡΩΠΟΕΙΔΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΛΑΒΗ ΤΗΣ ΠΟΡΤΑΣ ΣΤΟ ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ 46, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΤΗΣ ΛΑΒΗΣ ΚΑΙ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ MNA	104
ΠΙΝΑΚΑΣ 8-1. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	111

ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

- BC_{new} : το διάνυσμα που περιγράφει τους περιορισμούς κίνησης των αρθρώσεων (*Body Constraints*) του νέου ανθρωποειδούς
- c_1 : ο δείκτης αξιολόγησης του *Joint Angle – JA* κριτηρίου
- c_2 : ο δείκτης αξιολόγησης του *End-Effector – EE* κριτηρίου
- c_{maxq} : η μέγιστη τιμή του κριτηρίου q για όλες τις εναλλακτικές στάσεις σώματος
- c_{minq} : η ελάχιστη τιμή του κριτηρίου q για όλες τις εναλλακτικές στάσεις σώματος
- c_{mq} : ο δείκτης αξιολόγησης των m εναλλακτικών του κριτηρίου q
- c_{mq}^* : ο κανονικοποιημένος δείκτης αξιολόγησης των m εναλλακτικών του κριτηρίου q
- $d\theta_{j-}$: η μέγιστη μείωση για δύο διαδοχικές τιμές της j γωνίας περιστροφής, κατά τη διάρκεια ολόκληρης της κίνησης αναφοράς, με $j \in [1, K]$
- $d\theta_{j+}$: η μέγιστη αύξηση για δύο διαδοχικές τιμές της j γωνίας περιστροφής, κατά τη διάρκεια ολόκληρης της κίνησης αναφοράς, με $j \in [1, K]$
- i : το στιγμιότυπο κίνησης, με $i \in [1, n]$
- j : ο αύξων αριθμός της γωνίας περιστροφής, με $j \in [1, K]$
- K : το πλήθος των δυνατών περιστροφών (βαθμών ελευθερίας) των αρθρώσεων της κινηματικής αλυσίδας του ψηφιακού ανθρωποειδούς
- L : το πλήθος των μελών της κινηματικής αλυσίδας του ανθρωποειδούς
- l_l : το μήκος του μέλους l της κινηματικής αλυσίδας, του ανθρωποειδούς αναφοράς, με $l \in [1, L]$
- l'_l : το μήκος του μέλους l της κινηματικής αλυσίδας του νέου ανθρωποειδούς, με $l \in [1, L]$
- L_{new} : το διάνυσμα που περιγράφει τις διαστάσεις των μελών της κινηματικής αλυσίδας του νέου ανθρωποειδούς
- L_{ref} : το διάνυσμα που περιγράφει τις διαστάσεις των μελών της κινηματικής αλυσίδας του ανθρωποειδούς αναφοράς
- $M(i)$: το διάνυσμα που περιγράφει τη στάση σώματος ψηφιακού ανθρωποειδούς στο χρονικό στιγμιότυπο i , με $i \in [1, n]$

- $M'(l)$: το διάνυσμα που περιγράφει την αρχική στάση σώματος του νέου ανθρωποειδούς στη νέα (παραγόμενη) κίνηση
- n : το πλήθος των στιγμιότυπων κίνησης
- q : ο αύξων αριθμός του κριτηρίου αξιολόγησης, με $q=1$ για το JA και $q=2$ για το EE κριτήριο αξιολόγησης
- S : το διάνυσμα που περιγράφει τους περιορισμούς ταχύτητας (*Speed*) της κίνησης
- SC : το διάνυσμα που περιγράφει τους χωρικούς περιορισμούς (*Spatial Constraints*) της κίνησης
- u_j : ο συντελεστής βαρύτητας της γωνίας j στον τελικό δείκτη αξιολόγησης, με
- $$\sum_{j=1}^K u_j = 1, \text{ με } u_j \in [0, 1]$$
- $utility_m$: ο τελικός δείκτης αξιολόγησης για την εναλλακτική στάση m , με $m \in [1, MNA]$
- w_q : το βάρος του κριτηρίου q
- $X(i), Y(i), Z(i)$: οι συντεταγμένες του άκρου εργασίας του ανθρωποειδούς αναφοράς στο στιγμιότυπο κίνησης i , με $i \in [1, n]$
- $X'(i), Y'(i), Z'(i)$: οι συντεταγμένες του άκρου εργασίας του νέου ανθρωποειδούς στο στιγμιότυπο κίνησης i , με $i \in [1, n]$
- $\theta_j(i)$: η τιμή της j γωνίας περιστροφής του ανθρωποειδούς αναφοράς στο στιγμιότυπο κίνησης i , με $j \in [1, K]$ και $i \in [1, n]$
- $\theta'_j(i)$: η τιμή της j γωνίας περιστροφής του νέου ανθρωποειδούς στο στιγμιότυπο κίνησης i , με $j \in [1, K]$ και $i \in [1, n]$
- $\theta_{jmin}, \theta_{jmax}$: τα φυσικά (επιτρεπτά) όρια περιστροφής της γωνίας περιστροφής j , με $j \in [1, K]$

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Το πρόβλημα

Με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων και την ικανοποίηση των καταναλωτών, οι βιομηχανίες σήμερα στοχεύουν σε έναν πιο αποδοτικό και αξιόπιστο ανθρωποκεντρικό σχεδιασμό τόσο των προϊόντων, όσο και των διαδικασιών παραγωγής τους [Chryssolouris *et al.*, 2001]. Ο εργονομικός σχεδιασμός αποτελεί τόσο επιθυμητή όσο και επιβαλλόμενη συνθήκη για τη δημιουργία ενός νέου περιβάλλοντος εργασίας, προϊόντος ή συστήματος, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί από ανθρώπους [Karabatsou, 2004]. Για την υποστήριξη του εργονομικού σχεδιασμού, έχουν πραγματοποιηθεί πολύχρονες μελέτες και οι λύσεις που χρησιμοποιούνται και προσφέρουν αξιόπιστα αποτελέσματα, μπορούν να επικεντρωθούν στις παρακάτω:

- ⇒ έλεγχος εργονομίας μέσα από πειράματα σε πραγματικούς χώρους και με πραγματικά πρωτότυπα προϊόντων,
- ⇒ έλεγχος εργονομίας με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και τεχνικών εικονικής πραγματικότητας με την εμπύθιση του ανθρώπου σε περιβάλλοντα αλληλεπίδρασης,
- ⇒ έλεγχος εργονομίας με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και τεχνικών ψηφιακών ανθρωποειδών.

Στην πρώτη περίπτωση, για την εκτέλεση των πειραμάτων συμμετέχουν άνθρωποι με διαφορετικά ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά, οι οποίοι καλούνται να χρησιμοποιήσουν ένα προϊόν ή να εκτελέσουν μια παραγωγική διαδικασία σε πραγματικές συνθήκες και να αξιολογήσουν ποιοτικά το προϊόν ή τη διαδικασία σε σχέση με εργονομικά κριτήρια, συνηθέστερα μέσω ερωτηματολογίων. Η λύση αυτή ενέχει αυξημένη επικινδυνότητα για τους εμπλεκόμενους και απαιτεί επίσης πολύ χρόνο και κόστος καθώς και χρήση εξοπλισμού και πραγματικών χώρων, με ταυτόχρονη απασχόληση αρκετών εργαζομένων και μελετητών. Ένα επιπλέον μειονέκτημα της προσέγγισης αυτής αποτελεί το γεγονός ότι τα εργονομικά αποτελέσματα βασίζονται στην υποκειμενική αντίληψη των εμπλεκομένων, το οποίο ενέχει την πιθανότητα εξαγωγής λάθος συμπερασμάτων, ειδικότερα σε περιπτώσεις όπου το αντιπροσωπευτικό δείγμα συμμετεχόντων είναι πολύ μικρό.

Στη δεύτερη περίπτωση, για την εκτέλεση των πειραμάτων συμμετέχουν άνθρωποι με διαφορετικά ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά, οι οποίοι όμως καλούνται να

χρησιμοποιήσουν ένα προϊόν ή να εκτελέσουν μια παραγωγική διαδικασία εμβυθισμένοι σε ένα εικονικό περιβάλλον, με τη χρήση περιφερειακών συσκευών εικονικής πραγματικότητας. Η λύση αυτή καλύπτει το πρόβλημα χρήσης πραγματικών χώρων, προσφέρει ποιοτική αξιολόγηση των προϊόντων ή των διαδικασιών, αλλά παραμένει η ανάγκη εκτέλεσης πειραμάτων από διαφορετικούς ανθρώπους και προστίθεται η ανάγκη ανάπτυξης και ενσωμάτωσης εργονομικών μοντέλων εφόσον απαιτηθεί η ανάκτηση ποσοτικών αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο.

Στην τρίτη περίπτωση, για την εκτέλεση των πειραμάτων, τα οποία πραγματοποιούνται σε εικονικό περιβάλλον, ψηφιακά ανθρωποειδή αντικαθιστούν τον άνθρωπο, λαμβάνοντας διαφορετικά ανθρωπομετρικά δεδομένα και εκτελώντας εικονικές διαδικασίες, με δυνατότητα λήψης ποσοτικών εργονομικών αποτελεσμάτων, βασισμένων όμως σε ενσωματωμένα εργονομικά μοντέλα και αναγνωρισμένες προδιαγραφές (*ergonomics guidelines*) που καλύπτουν ευρύ φάσμα εργονομικών απαιτήσεων.

Αυτή η τελευταία περίπτωση αξιολογείται ως η καλύτερη, κυρίως για πρακτική βιομηχανική χρήση και ο βασικότερος λόγος είναι ότι παρέχει ευελιξία στη χρήση, χωρίς την απαίτηση συμμετεχόντων με διαφορετικά χαρακτηριστικά, παρέχει σχετικά εύκολο χειρισμό και είναι εμπορικά διαθέσιμη. Παρόλα αυτά όμως, όπως προκύπτει και από την βιβλιογραφική έρευνα που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο, τα υπάρχοντα λογισμικά εργαλεία ψηφιακών ανθρωποειδών παρουσιάζουν ορισμένες σημαντικές αδυναμίες που κυρίως αφορούν:

- ⇒ Στην έλλειψη της τυχειότητας του ανθρώπινου παράγοντα κατά την εκτέλεση εργασιών. Το πρόβλημα αναφέρεται στην αδυναμία των περισσότερων ψηφιακών ανθρωποειδών να επιλέγουν αυτόματα τον τρόπο εκτέλεσης μιας εργασίας που ενδιαφέρει κυρίως τα λογισμικά εργαλεία για εφαρμογές διασκέδασης. Για βιομηχανικές εφαρμογές το πρόβλημα αυτό δεν απαιτεί λύση μιας και στο πλαίσιο τέτοιων εφαρμογών οι κινήσεις που μελετούνται είναι απολύτως συγκεκριμένες και προκαθορισμένες από το χρήστη.
- ⇒ Στη δυσκολία καθορισμού επιθυμητών ανθρωπομετρικών δεδομένων στο σώμα των ανθρωποειδών. Τα περισσότερα λογισμικά διαθέτουν βάσεις δεδομένων, οι οποίες υποστηρίζουν τη δυνατότητα χρήσης εκατοστημορίου του συνολικού εύρους των ανθρωπομετρικών δεδομένων για τη δημιουργία ενός ανθρωποειδούς (π.χ. τη δημιουργία ενός άνδρα που να ανήκει στο 95ο εκατοστημόριο (*95th percentile*) του πληθυσμού που έχει καταχωρηθεί στη βάση δεδομένων). Η χρήση των

εκατοστημορίων δίνει σωστά αποτελέσματα για προβλήματα μικρής σπουδαιότητας, όπως για παράδειγμα το πρόβλημα των διαστάσεων μιας πόρτας. Σε περιπτώσεις, όμως, στις οποίες απαιτείται χρήση συγκεκριμένου πληθυσμιακού στόχου (π.χ. Έλληνες οδηγοί, ηλικίας 25-45 ετών), παρουσιάζονται αρκετά μειονεκτήματα, που οδηγούν συνήθως σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα εκατοστημόρια αφορούν στον συγκεκριμένο πληθυσμό από τον οποίο προέκυψε η βάση δεδομένων καθώς επίσης και σε συγκεκριμένη διάσταση που μετρήθηκε, δεδομένα που τις περισσότερες φορές είναι άγνωστα στον χρήστη ενός συστήματος ψηφιακών ανθρωποειδών, με επίπτωση στην αξιοπιστία των εργονομικών αποτελεσμάτων. Για την επίλυση του προβλήματος, οι περισσότερες εταιρείες παρέχουν εκτός από το λογισμικό προσομοίωσης και ένα επιπλέον εργαλείο για συλλογή ανθρωπομετρικών δεδομένων μέσω σάρωσης ανθρώπινων σωμάτων.

⇒ Στην έλλειψη δυνατότητας προσομοίωσης μιας υπάρχουσας κίνησης σε νέες συνθήκες. Αποτελεί το πιο βασικό πρόβλημα των ψηφιακών ανθρωποειδών που χρησιμοποιούνται για μελέτη εργονομικών αποτελεσμάτων. Ουσιαστικά αναφέρεται στην έλλειψη ενσωματωμένου συστήματος, ικανού να δημιουργεί και να προσομοιώνει νέες κινήσεις οδήγησης ψηφιακών ανθρωποειδών, λαμβάνοντας υπόψη υπάρχουσες (καταγεγραμμένες) ρεαλιστικές κινήσεις, ανθρωπομετρικά δεδομένα και διαστάσεις χώρων εργασίας ή προϊόντων. Οι επιπτώσεις της έλλειψης αυτής της δυνατότητας, δημιουργεί δυσκολίες στην εκτέλεση εργασιών από διαφορετικά ανθρωποειδή ή σε διαφορετικά προϊόντα / χώρους εργασίας με βάση ρεαλιστικές κινήσεις, οδηγώντας σε προσεγγιστικά εργονομικά αποτελέσματα.

Η συνεχώς αυξανόμενη χρήση των ψηφιακών ανθρωποειδών για τον εργονομικό έλεγχο προϊόντων και σταθμών εργασίας από τη βιομηχανία, από τη μία μεριά, και η ύπαρξη των προαναφερόμενων προβλημάτων / αδυναμιών, που εμποδίζουν τη σωστή μοντελοποίηση της κίνησης των ανθρωποειδών για την παραγωγή φυσικών, ρεαλιστικών κινήσεων και την εξαγωγή αποδεκτών εργονομικών αποτελεσμάτων, από την άλλη, αποτέλεσε το έναυσμα για την ερευνητική ενασχόληση στο θέμα. Στόχος της εργασίας υπήρξε η εύρεση μιας λύσης που να μπορεί να παράγει (δημιουργεί) κινήσεις οδήγησης ψηφιακών ανθρωποειδών, λαμβάνοντας υπόψη πλήθος παραμέτρων, περιορισμών και κριτηρίων αξιολόγησης. Έναν ακόμα βασικό στόχο της διατριβής αποτέλεσε η δυνατότητα ενσωμάτωσης της προτεινόμενης λύσης σε υπάρχοντα λογισμικά εργαλεία μοντελοποίησης ψηφιακών ανθρωποειδών (*Digital Human Modeling – DHM*).

1.2 Ερευνητικό αντικείμενο της διατριβής

Ο εργονομικός σχεδιασμός προϊόντων και παραγωγικών διαδικασιών αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην ανάπτυξη ανταγωνιστικών προϊόντων [Chrysosolouris, 2005]. Η αναζήτηση λύσεων τα προηγούμενα χρόνια οδήγησε στη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών για την εξάλειψη της ανάγκης εκτέλεσης των χρονοβόρων και δαπανηρών πειραμάτων εργονομικής αξιολόγησης σχεδιασμού, από πραγματικούς ανθρώπους σε φυσικά πρωτότυπα και σε πραγματικούς χώρους εργασίας. Για το σκοπό αυτό όμως, απαιτείται η ύπαρξη ενός αξιόπιστου συστήματος παραγωγής πλήθους πειραμάτων, σχεδιασμένων εξ ολοκλήρου σε ελεγχόμενα ψηφιακά περιβάλλοντα, κάνοντας χρήση προγραμμάτων σχεδιασμού με υπολογιστή (*Computer Aided Design - CAD*) και τεχνολογίας ψηφιακών ανθρωποειδών (*Digital Human Modeling - DHM*). Η δημιουργία όμως, μιας ρεαλιστικής και αξιόπιστης προσομοίωσης της ανθρώπινης κίνησης σε υπολογιστή, προϋποθέτει τη χρήση μιας υπάρχουσας καταγεγραμμένης κίνησης από άνθρωπο, η οποία από τη φύση της ικανοποιεί τις προϋποθέσεις ρεαλισμού και αξιοπιστίας. Η δυνατότητα δημιουργίας ρεαλιστικών κινήσεων, με βάση υπάρχουσες πραγματικές κινήσεις και πλήθους άλλων παραμέτρων, πρέπει να μπορεί να ενσωματωθεί σε σύστημα παραγωγής και προσομοίωσης κινήσεων για οδήγηση διαφόρων ανθρωποειδών σε ψηφιακά περιβάλλοντα εργασίας.

Ελλείπει λοιπόν τέτοιων διαθέσιμων συστημάτων, το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι ο σχεδιασμός και η πιλοτική υλοποίηση μιας μεθοδολογίας μοντελοποίησης κίνησης ανθρωπίνου σώματος, βασιζόμενης στην προσαρμογή μιας υπάρχουσας κίνησης σε νέες συνθήκες και περιορισμούς, τόσο για την υποστήριξη της ρεαλιστικής και αξιόπιστης προσομοίωσης κίνησης ψηφιακών ανθρωποειδών σε εικονικό περιβάλλον εργασίας, όσο και της δυνατότητας λήψης αποδεκτών εργονομικών αποτελεσμάτων κατά την αξιολόγηση του σχεδιασμού προϊόντων και σταθμών εργασίας. Η μοντελοποίηση της ανθρώπινης κίνησης που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής συμπεριλαμβάνει μόνο παραμέτρους κινηματικής (π.χ. μετατόπιση, ταχύτητα, περιστροφή) και όχι δυναμικής ανάλυση της κίνησης (π.χ. αδράνεια, ροπή αρθρώσεων, βαρύτητα, μυϊκή δύναμη).

Η ερευνητική συμβολή της παρούσας διατριβής έγκειται στην προσέγγιση του προβλήματος προσαρμογής μιας καταγεγραμμένης κίνησης αναφοράς (*motion adaptation problem*) σε νέες συνθήκες (*conditions*), που μπορούν να αφορούν είτε σε αλλαγή των ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών, είτε σε αλλαγή της γεωμετρίας του προϊόντος ή του

χώρου εργασίας, ή ακόμα και στο συνδυασμό των παραπάνω δυο τροποποιήσεων των αρχικών συνθηκών της κίνησης.

Για την υλοποίηση της μεθοδολογίας σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε σύστημα (Σχήμα 1-1), βασισμένο σε αλγόριθμο αναζήτησης (*heuristic algorithm*) ο οποίος ενσωματώνει τη θεωρία λήψης αποφάσεων με χρήση πολλαπλών κριτηρίων (*Multi-Criteria Decision Making – MCDM*) [Chryssolouris, 1987; Chryssolouris *et al.*, 1992; Triantaphyllou, 2000; Triantaphyllou *et al.*, 2001], το οποίο επιτρέπει την προσαρμογή μιας κίνησης αναφοράς (*reference motion*), η οποία πραγματοποιήθηκε από έναν άνθρωπο ή ένα ψηφιακό ανθρωποειδές αναφοράς (*reference manikin*) σε αλληλεπίδραση με ένα περιβάλλον εργασίας:

- ⇒ σε ένα νέο ψηφιακό ανθρωποειδές διαφορετικών ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών (*new manikin*), χωρίς να αλλαχθεί το περιβάλλον, ή
- ⇒ σε ένα νέο περιβάλλον, χωρίς να αλλαχθούν τα αρχικά ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά του ψηφιακού ανθρωποειδούς, ή
- ⇒ σε ένα νέο ψηφιακό ανθρωποειδές διαφορετικών ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών (*new manikin*) και σε ένα νέο περιβάλλον.

Το σύστημα αποτελείται από βοηθητικά στοιχεία (που έχουν ήδη αναπτυχθεί ή ήταν διαθέσιμα) και δομικά στοιχεία (που αναπτύχθηκαν εξολοκλήρου στο πλαίσιο της διατριβής), τα οποία αναφέρονται ονομαστικά στη συνέχεια και περιγράφονται διεξοδικά στο κεφάλαιο 4.

- ⇒ Βοηθητικά στοιχεία μεθοδολογίας μοντελοποίησης:
 - Σύστημα καταγραφής κινήσεων
 - Λογισμικό δημιουργίας ψηφιακών ανθρωποειδών
 - Σύστημα ανακατασκευής κινήσεων σε εικονικό περιβάλλον
 - Βάση δεδομένων κινήσεων και ανθρωποειδών
 - Σύστημα επιλογής κινήσεων από βάση δεδομένων
 - Λογισμικό δημιουργίας εικονικού περιβάλλοντος εργασίας
- ⇒ Δομικά στοιχεία μεθοδολογίας μοντελοποίησης:
 - Σύστημα εισαγωγής δεδομένων εισόδου
 - Αλγόριθμος προσαρμογής κινήσεων
 - Μηχανισμός παραγωγής εναλλακτικών στάσεων
 - Μηχανισμός καθορισμού κριτηρίων αξιολόγησης
 - Πίνακας αποφάσεων

- Μηχανισμός καθορισμού βάρους κριτηρίων
- Μηχανισμός συνάθροισης
- Μηχανισμός κατάταξης και επιλογής βέλτιστης λύσης

Προκειμένου να αξιολογηθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία, η λειτουργία του συστήματος εξετάστηκε στο πλαίσιο πιλοτικής εφαρμογής ελέγχου εργονομίας θέσης οδηγού επιβατηγού αυτοκινήτου, κάνοντας χρήση του λογισμικού *Ramsis* [Human Solutions, 2009]. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μεθοδολογία είναι εφαρμόσιμη και το σύστημα μπορεί να παράγει ακριβείς και ρεαλιστικές κινήσεις από τις οποίες προκύπτουν αποδεκτά εργονομικά αποτελέσματα.

Σχήμα 1-1. Γραφικό περιβάλλον χρήστη υλοποιημένου συστήματος

Η ερευνητική συμβολή της παρούσας εργασίας, όσον αφορά στη βελτίωση της τρέχουσας βιομηχανικής πρακτικής, μπορεί να συνοψισθεί στα ακόλουθα σημεία :

- ⇒ Προσέγγιση των διαδικασιών εργονομικού σχεδιασμού προϊόντων και διαδικασιών παραγωγής, χρησιμοποιώντας ψηφιακά ανθρωποειδή, για την εξαγωγή πιο αξιόπιστων ποσοτικών εργονομικών αποτελεσμάτων.
- ⇒ Παραγωγή ρεαλιστικών και αξιόπιστων κινήσεων για την προσομοίωση ελεγχόμενης κίνησης (που υπόκειται σε περιορισμούς) ψηφιακών ανθρωποειδών διαφορετικών διαστάσεων σε νέους χωρικούς περιορισμούς, του περιβάλλοντος εργασίας. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να δημιουργηθούν πολλά υποθετικά (εικονικά) σενάρια αξιολόγησης εργονομικού σχεδιασμού για διάφορους συνδυασμούς ψηφιακών ανθρωποειδών και περιβαλλόντων εργασίας, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη πραγματοποίησης των αντίστοιχων πραγματικών πειραμάτων που θα ανέβαζε κατά πολύ το κόστος και το χρόνο εκπλήρωσής τους.

2 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

2.1 Εργονομικός σχεδιασμός προϊόντων και σταθμών εργασίας

Από την έναρξη της βιομηχανοποίησης, η εμπλοκή του ανθρώπου στις παραγωγικές διαδικασίες και η ανάγκη για σχεδιασμό και δημιουργία “καλών” συνθηκών εργασίας, οδήγησαν στην ίδρυση ενός ξεχωριστού επιστημονικού κλάδου. Ήδη από το 1857, στην Πολωνία παρουσιάστηκε στο περιοδικό “*Nature and Industry*” η πρόταση του W. Jastrzebowski να “... δοθεί προσοχή στην ερευνητική προσέγγιση προβλημάτων που έχουν σχέση με την εργασία και να δημιουργηθεί μια ξεχωριστή επιστήμη με σκοπό την απόκτηση των καλύτερων εργασιακών αποτελεσμάτων με την λιγότερη προσπάθεια και με την υψηλότερη ικανοποίηση της προσωπικής και κοινής ευημερίας, λειτουργώντας δίκαια σύμφωνα με την προσωπική συνείδηση του εργαζομένου και των υπολοίπων”. Ονόμασε, δε, την προτεινόμενη αυτή επιστήμη “*Ergonomics - Εργονομία*”. Παρ’ όλα αυτά το όνομα αυτό ξεχάστηκε αργότερα [Helander, 1995].

Ξεκινώντας από τα μέσα του περασμένου αιώνα, αρκετές ενέργειες, οι οποίες συνέβησαν σε διάφορες χώρες, οδήγησαν στην πραγματική ερευνητική προσέγγιση της ανθρώπινης εργασίας. Η πλειοψηφία της επιστημονικής κοινότητας θεωρούσε ότι αφού ήταν εφικτό να μεταφερθούν οι κανόνες της παραδοσιακής φυσικής στα περισσότερα φαινόμενα της φύσης το ίδιο θα μπορούσε να συμβεί και στην ζωή των ανθρώπων. Σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες, όπως επίσης και στις ΗΠΑ, άρχισε να αναπτύσσεται η επιστήμη που σήμερα είναι γνωστή (στην Ευρώπη) ως Εργονομία. Στις ΗΠΑ, η εργονομία είναι σχεδόν συνώνυμη με τον κλάδο της επιστήμης της μηχανικής, ο οποίος ασχολείται με τον ανθρώπινο παράγοντα (*Human Factors Engineering* ή *Human Factors*). Στην Ευρώπη, η έννοια “*ergonomics*” έχει τις ρίζες της στον τομέα της ψυχολογίας της εργασίας, της εμβιομηχανικής και του σχεδιασμού εργασιακών χώρων. Η έννοια “*Human Factors*”, από την άλλη μεριά, έχει ως βάση την εμπειρική ψυχολογία στην απόδοση της εργασίας του ανθρώπου και στο σχεδιασμό συστημάτων [Chapanis, 1971].

Ο ουσιαστικός ορισμός της εργονομίας επινοήθηκε από τον καθηγητή Hywell Murrell το 1949, στο πλαίσιο μιας συνεδρίασης, κατά την οποία αποφασίστηκε η δημιουργία μιας ένωσης μηχανικών “για την μελέτη των ανθρώπων και της συμπεριφοράς τους στο χώρο εργασίας”. Τα μέλη της ομάδας ήταν μηχανικοί, ιατροί και άτομα που είχαν ασχοληθεί με τις

ανθρώπινες επιστήμες [Pheasant, 1998]. Από τότε, αρκετά Ινστιτούτα και Οργανισμοί ιδρύθηκαν στο πλαίσιο αυτής της νέας επιστήμης, τα οποία το 1959 οργανώθηκαν κάτω από την ίδρυση του *International Ergonomic Association* [IEA, 2009]. Η Ελληνική Εταιρεία Εργονομίας [EEE, 2009] αποτελεί την επιστημονική ένωση των Ελλήνων εργονόμων. Ιδρύθηκε τον Ιούλιο του 1988 και έγινε ομόσπονδο μέλος του IEA τον Αύγουστο του 1994.

Η λέξη “Εργονομία” ή “*Ergonomics*”, προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις “έργο” και “νόμος” και έχει άμεση σχέση με την έννοια της εργασίας [Bringer, 1995]. Η Εργονομία είναι η επιστημονική περιοχή που ασχολείται με τη μελέτη της Διεπαφής Ανθρώπου-Μηχανής (*Man-Machine Interface – MMI*), της αλληλεπίδρασης δηλαδή μεταξύ των ανθρώπων και των υπολοίπων στοιχείων ενός συστήματος. Η επιστήμη αυτή εφαρμόζει θεωρητικές αρχές, δεδομένα και μεθόδους στον σχεδιασμό, με στόχο την προαγωγή του “καλώς έχειν” των εργαζομένων και την βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Οι επιστήμονες που ασχολούνται με τον κλάδο της εργονομίας συμβάλλουν στον προγραμματισμό, σχεδιασμό και αξιολόγηση των εργασιών, των προϊόντων, της οργάνωσης, των εργαλείων, του περιβάλλοντος και γενικότερα των συστημάτων, με στόχο να τα καταστήσουν συμβατά με τις ανάγκες, δυνατότητες και περιορισμούς των ανθρώπων [IEA Council, 2000]. Η έννοια της εργονομίας στο σχεδιασμό μπορεί να περιγραφεί ως εξής: *Αν ένα αντικείμενο, σύστημα ή περιβάλλον πρόκειται να χρησιμοποιηθεί από ανθρώπους, τότε ο σχεδιασμός του πρέπει να βασιστεί στα φυσικά και πνευματικά χαρακτηριστικά των ανθρώπων που θα το χρησιμοποιήσουν.* Με άλλα λόγια μια γενική έννοια της εργονομίας είναι ότι η εργονομία είναι η επιστήμη που προσαρμόζει την εργασία στον εργαζόμενο και το προϊόν στο χρήστη [Pheasant, 1998].

Η εργονομία διαχωρίζεται ανάλογα με το πεδίο στο οποίο επικεντρώνεται σε:

- ⇒ “μικρο-εργονομία”, η οποία ασχολείται με την ανάπτυξη κανόνων για την υποστήριξη του σχεδιασμού των χώρων εργασίας και του εξοπλισμού, και
- ⇒ “μακρο-εργονομία”, η οποία ασχολείται με την ανάπτυξη κανόνων για το σχεδιασμό παραγωγικών συστημάτων και ομάδων εργασίας.

Και στις δύο περιπτώσεις, η έρευνα και η ανάπτυξη εστιάζεται στον άνθρωπο και στο χώρο στον οποίο αυτός εργάζεται. Γενικότερα, η εργονομία είναι μια πολύπλευρη επιστήμη, που χρησιμοποιεί βασική γνώση από ανθρωπιστικές επιστήμες, μηχανολογία, οικονομολογία και κοινωνιολογία. Συνδυάζει την ιατρική, την βιομηχανική ψυχολογία, τις τεχνικές εργασίας και τη βιομηχανική νομοθεσία, επιστήμες οι οποίες από διαφορετικές οπτικές γωνίες ασχολούνται με την ανθρώπινη εργασία (Σχήμα 2-1).

Σχήμα 2-1. Εργονομία και οι σχετικοί επιστημονικοί κλάδοι

Δύο από τα σημαντικότερα πεδία της εργονομίας είναι

- ⇒ *Ο σχεδιασμός προϊόντων.* Ο βασικός σκοπός κατά τον εργονομικό σχεδιασμό προϊόντων είναι η ανάπτυξη ενός προϊόντος που θα είναι προσαρμοσμένο όσο το δυνατόν περισσότερο στον πελάτη / χρήστη και στις απαιτήσεις του. Σε αυτή τη διαδικασία είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπ' όψη, εκτός των άλλων, στοιχεία που έχουν να κάνουν με τα ανθρωπομετρικά δεδομένα των ανθρώπων στους οποίους απευθύνεται το προϊόν, καθώς επίσης και με τον τρόπο αντίληψής τους. Τα πεδία της έρευνας σήμερα ασχολούνται με ό,τι έχει σχέση με την αίσθηση της άνεσης, της ασφάλειας και της απλότητας που θα πρέπει να παρέχουν τα νέα προϊόντα.
- ⇒ *Ο σχεδιασμός σταθμών εργασίας.* Ο σκοπός του εργονομικού σχεδιασμού της παραγωγής είναι η ανάπτυξη χώρων παραγωγικών διαδικασιών και εργασιών, προσαρμοσμένα στον εργαζόμενο. Ο αντικειμενικός στόχος είναι η μείωση του φόρτου εργασίας στον εργαζόμενο με ταυτόχρονη βελτίωση της αποδοτικότητας του. Όπως και στο σχεδιασμό προϊόντων είναι απαραίτητο να ληφθούν υπ' όψη και τα χαρακτηριστικά των ανθρώπων που θα εργαστούν σε κάποιο σταθμό εργασίας.

Τα σημαντικότερα πεδία εφαρμογής του εργονομικού σχεδιασμού, αφορούν:

- ⇒ Στην αεροπορική βιομηχανία (π.χ. σχεδιασμός πιλοτηρίου ή καμπίνας αεροσκάφους).
- ⇒ Στην αυτοκινητοβιομηχανία (π.χ. σχεδιασμός θέσης οδηγού).
- ⇒ Στο σχεδιασμό σταθμών εργασίας γραμμής παραγωγής εργοστασίου (π.χ. σταθμός συναρμολόγησης).

2.2 Μέθοδοι και εργαλεία εργονομικού σχεδιασμού

Για την υποστήριξη του εργονομικού σχεδιασμού, έχουν πραγματοποιηθεί πολύχρονες μελέτες και οι λύσεις που χρησιμοποιούνται και προσφέρουν αξιόπιστα αποτελέσματα, μπορούν να επικεντρωθούν στις παρακάτω:

- ⇒ έλεγχος εργονομίας μέσα από πειράματα σε πραγματικούς χώρους και με πραγματικά πρωτότυπα προϊόντων,
- ⇒ έλεγχος εργονομίας με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και τεχνικών εικονικής πραγματικότητας με την εμπύθιση του ανθρώπου σε περιβάλλοντα αλληλεπίδρασης, και
- ⇒ έλεγχος εργονομίας με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και τεχνικών ψηφιακών ανθρωποειδών.

2.2.1 Εργονομικές μελέτες σε φυσικά πρωτότυπα και πραγματικούς χώρους εργασίας

Τα πειράματα σε πραγματικούς χώρους γίνονται για τον επανασχεδιασμό ή τη βελτίωση εργονομίας ήδη υπάρχοντων χώρων εργασίας ή για τον εργονομικό έλεγχο νέων προϊόντων με χρήση φυσικών πρωτοτύπων.

Στην πρώτη περίπτωση, που αφορά στην έννοια της «μετέχουσας εργονομίας» (*participatory ergonomic*) [OHSAN, 2009], ο εργαζόμενος συμμετέχει ενεργά στον έλεγχο του χώρου εργασίας του προτείνοντας λύσεις και επισημαίνοντας προβλήματα. Οι μηχανικοί που ασχολούνται με τον ανθρώπινο παράγοντα και κατ' επέκταση με την εργονομία (*human factors engineers*), αναλύουν και εκτιμούν το σχεδιασμό ενός νέου χώρου εργασίας κατασκευάζοντας ένα φυσικό πρωτότυπο (*mock-up*) του χώρου, χρησιμοποιώντας ανθρώπους για την εκτέλεση μιας σειράς εργασιών, και καταγράφοντας τις παρατηρήσεις τους σχετικά με το αν ο σχεδιασμός είναι ικανοποιητικός ή όχι. Η διαδικασία αυτή, έχει αρκετούς περιορισμούς. Όταν ο σχεδιασμός έχει φτάσει στο στάδιο που επιτρέπει στον κατασκευαστή του μοντέλου να δημιουργήσει το φυσικό πρωτότυπο, υπάρχει συνήθως αρκετή δυσκολία στο να τροποποιηθεί λόγω οικονομικών και χρονικών περιορισμών. Όταν ο τελικός σχεδιασμός εφαρμοστεί στην παραγωγή, οι ελλείψεις αντιμετωπίζονται μέσω ειδικής εκπαίδευσης, η οποία όμως περιορίζεται από τα φυσικά χαρακτηριστικά των ατόμων του προσωπικού.

Στη δεύτερη περίπτωση, δηλαδή για τον εργονομικό έλεγχο νέων προϊόντων, έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν πολλές εργονομικές μελέτες και πειράματα πάνω σε φυσικά πρωτότυπα, από πραγματικούς ανθρώπους. Τα φυσικά πρωτότυπα μπορούν μόνο να κατασκευαστούν μόνο όταν τα λεπτομερή σχέδια του προϊόντος είναι διαθέσιμα. Κατά συνέπεια, οι δοκιμές χρηστών πραγματοποιούνται συχνά σε ένα σχετικά προχωρημένο στάδιο στη διαδικασία σχεδίου. Επομένως σε αυτό το στάδιο της διαδικασίας ανάπτυξης, τα τυχόν σχεδιαστικά ή λειτουργικά προβλήματα που απαιτούν διόρθωση και κατασκευή του επανασχεδιασμένου προϊόντος θα οδηγήσουν σε σημαντικές χρονικές καθυστερήσεις και αυξημένες δαπάνες ανάπτυξης. Συχνά, είναι πολύ αργά για να αλλαχθεί ο σχεδιασμός του προϊόντος και κατά συνέπεια, πολλές φορές η εργονομία και γενικά η ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος περιορίζονται σε σχέση με τη βέλτιστη δυνατή, λόγω του περιορισμένου χρόνου σχεδιασμού και ανάπτυξης. Με την πραγματοποίηση εργονομικών μελετών και την ενσωμάτωση του ανθρώπινου παράγοντα στο αρχικό στάδιο του σχεδιασμού, ο αριθμός μελλοντικών σχεδιαστικών τροποποιήσεων μειώνεται δραστικά. Η κατασκευή όμως φυσικών προτύπων και η χρησιμοποίηση πραγματικών ανθρώπων για την πραγματοποίηση εργονομικών μελετών είναι μια διαδικασία εξαιρετικά δαπανηρή και χρονοβόρα.

Σχήμα 2-2. Εργονομική ανάλυση σχεδιασμού προϊόντων και χώρων εργασίας με χρήση φυσικών πρωτοτύπων

2.2.2 Εργονομικές μελέτες σε εικονικά περιβάλλοντα εμβύθισης

Εκμεταλλευόμενοι τις μεγάλες υπολογιστικές δυνατότητες που έγιναν διαθέσιμες μέσα από τις εξελίξεις στην τεχνολογία των Η/Υ, οι ερευνητές στράφηκαν στην διερεύνηση διαφόρων μεθόδων προσομοίωσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η προσομοίωση μπορεί να οριστεί ως η διαδικασία σχεδιασμού ενός μαθηματικού ή λογικού μοντέλου μιας πραγματικής διαδικασίας / λειτουργίας και η διεξαγωγή πειραμάτων με το μοντέλο, χρησιμοποιώντας Η/Υ, για την περιγραφή, εξήγηση και πρόβλεψη της “συμπεριφοράς” της πραγματικής διαδικασίας / λειτουργίας. Γενικά, τα δεδομένα εισόδου ενός προσομοιωτή είναι μεταβλητές απόφασης

που καθορίζουν το σχεδιασμό της διαδικασίας ενώ τα αποτελέσματα εξόδου είναι δείκτες απόδοσης, δηλαδή μεταβλητές της διαδικασίας.

Η δυνατότητα των υπολογιστών, τα τελευταία δέκα χρόνια, να παρέχουν στο χρήστη ρεαλιστική απεικόνιση τρισδιάστατης γεωμετρίας άνοιξε το δρόμο για εφαρμογές προσομοίωσης, όπου η ακριβής γεωμετρία του προϊόντος συμμετείχε ως σημαντικό δεδομένο εισόδου και εξόδου ενός συστήματος προσομοίωσης. Τα τελευταία χρόνια, με την αλματώδη εξέλιξη των συστημάτων γραφικών στους υπολογιστές, δόθηκε η δυνατότητα στο χρήστη να αλληλεπιδρά σε πραγματικό χρόνο με σύνθετες γεωμετρίες, πέρα από την απλή απεικόνισή τους στην οθόνη του υπολογιστή. Η δυνατότητα αυτή έκανε εφικτή και τη χρήση της τεχνολογίας της Εικονικής Πραγματικότητας σε συστήματα και μεθόδους προσομοίωσης διαδικασιών.

Η Εικονική Πραγματικότητα αποτελεί μια νέα σχετικά τεχνολογία, η οποία παρέχει έναν πρωτοποριακό τρόπο διασύνδεσης Ανθρώπου - Υπολογιστή. Ο όρος Εικονική Πραγματικότητα είναι δύσκολο να ερμηνευτεί με ένα συγκεκριμένο τρόπο αφού έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές και έχει δεχτεί πλήθος διαφορετικών ερμηνειών. Μια πολύ γενική ερμηνεία δόθηκε το 1992 από τους Aukstakalnis & Blatner:

“Η Εικονική Πραγματικότητα επιτρέπει στον άνθρωπο να οπτικοποιεί, να χειρίζεται και να αλληλεπιδρά με ιδιαίτερα περίπλοκα δεδομένα στον Η/Υ, με ρεαλιστικό τρόπο”.

Η Εικονική Πραγματικότητα επιτρέπει στο χρήστη να δρα μέσα σε ένα συνθετικό περιβάλλον δημιουργημένο από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα οπτικοποίησης δεδομένων, στην Εικονική Πραγματικότητα ο χρήστης μπορεί να γίνει ενεργό μέλος ενός περιβάλλοντος. Κοινό στοιχείο των εφαρμογών Εικονικής Πραγματικότητας είναι η ύπαρξη γραφικών “πραγματικού χρόνου” (*real-time rendering*), τα οποία απεικονίζουν στο χρήστη διανυσματικά παραγόμενα περιβάλλοντα τριών διαστάσεων. Γραφικά “πραγματικού χρόνου” ονομάζονται αυτά, τα οποία σχεδιάζει ο υπολογιστής σε χρονικό διάστημα τόσο μικρό που να μην γίνεται αντιληπτό από τα ανθρώπινα μάτια (μικρότερο του ενός δεκάτου του δευτερολέπτου). Με αυτό τον τρόπο, τα γραφικά “πραγματικού χρόνου” μπορούν να εμφανίζουν ένα περιβάλλον, το οποίο σε κάθε χρονική στιγμή βρίσκεται σύμφωνα με τις αλληλεπιδράσεις που κάνει σε αυτό ο χρήστης.

Στις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας, μία νέα έννοια εμφανίστηκε στα πεδία ερευνητικών εφαρμογών σχεδιασμού προϊόντων, παραγωγικών διαδικασιών και παραγωγικών συστημάτων. Η έννοια αυτή, που ονομάστηκε *Virtual Manufacturing*, ορίστηκε ως η ακριβής μοντελοποίηση σε Η/Υ των χαρακτηριστικών του προϊόντος και των

σχετιζόμενων με αυτό παραγωγικών διαδικασιών και η πρόβλεψη πιθανών προβλημάτων όσον αφορά στη λειτουργικότητα και στη κατασκευασιμότητα του προϊόντος πριν τη διεξαγωγή πραγματικών παραγωγικών διαδικασιών. Από μία άλλη οπτική γωνία, δεν είναι τίποτα άλλο από την ιδέα εκτέλεσης παραγωγικών διαδικασιών σε Η/Υ, υπό συνθήκες οι οποίες να προσεγγίζουν αυτές του πραγματικού κόσμου. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο το *Virtual Manufacturing* αποτελεί μία έννοια που περιλαμβάνει αναπαραστάσεις παραγωγικών δραστηριοτήτων, οι οποίες σχετίζονται με μοντέλα και προσομοιώσεις σε Η/Υ, αντί με φυσικά αντικείμενα και λειτουργίες στον πραγματικό κόσμο.

Οι ερευνητές που εισήγαγαν την έννοια του *Virtual Manufacturing* έκαναν σαφές ότι στην πράξη δεν θα είναι πάντα εφικτή η ικανοποιητική αναπαράσταση κάποιων παραγωγικών δραστηριοτήτων με χρήση μοντέλων. Το αποτέλεσμα είναι να υφίσταται, αν και σε μικρότερο βαθμό πλέον, η ανάγκη φυσικής πρωτοτυποποίησης ή πειραματισμού. Η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ εικονικού και πραγματικού κόσμου θεωρείται σε αυτές τις περιπτώσεις κρίσιμη για την αποτελεσματική υλοποίηση του *Virtual Manufacturing*.

Η ιδέα του *Virtual Manufacturing* έθεσε τις βάσεις πάνω στις οποίες αναπτύχθηκαν νέες προσεγγίσεις προσομοίωσης παραγωγικών διαδικασιών. Σε αυτό το πλαίσιο, η Εικονική Πραγματικότητα κρίθηκε σαν μία βασική τεχνολογία για την προσομοίωση των φυσικών χαρακτηριστικών, συμπεριφορών και αλληλεπιδράσεων ενός εικονικού παραγωγικού συστήματος.

Το κύριο πλήθος των εφαρμογών εργονομικής ανάλυσης σχεδιασμού που χρησιμοποιούν Εικονική Πραγματικότητα ανήκει στη κατηγορία “*desktop*”, όπου χρησιμοποιείται μια απλή οθόνη υπολογιστή για την απεικόνιση του τρισδιάστατου (εικονικού) περιβάλλοντος και όπου η αλληλεπίδραση του χρήστη γίνεται με τη χρήση συμβατικού πληκτρολογίου και ποντικιού. Τα τελευταία χρόνια συστήματα εμπύθισης του χρήστη έχουν κάνει την εμφάνισή τους σε προσομοιώσεις και εργονομικές μελέτες, όπου η συμμετοχή και η κίνηση των ανθρωπίνων μελών κρίνεται σημαντική παράμετρος της διαδικασίας (Σχήμα 2-3) [Karabatsou, 2004].

Σχήμα 2-3. Εργονομική ανάλυση σχεδιασμού με χρήση εικονικού περιβάλλοντος εμπύθισης

2.2.3 Εργονομικές μελέτες με χρήση ψηφιακών ανθρωποειδών

Είναι αρκετά δύσκολο να χαρακτηριστούν ακριβώς οι τύποι των προβλημάτων που μπορεί να αντιμετωπίσει ένας μηχανικός εργονομίας. Διαφορετικές καταστάσεις απαιτούν εμπειρικά δεδομένα που αφορούν στις ανθρώπινες δυνατότητες. Ορισμένα παραδείγματα είναι:

- ⇒ Μελέτες πληθυσμών μπορούν να καθορίσουν το μέγεθος του ανθρώπινου σώματος για ορισμένες ομάδες ανθρώπων, π.χ. εκπαιδευόμενοι αστροναύτες της NASA. Αυτή η πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστεί αν ο χώρος εργασίας μέσα σε ένα διαστημόπλοιο έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να ταιριάζει σε όλους όσους πρόκειται να εργαστούν εκεί. Οι ερωτήσεις που προκύπτουν όμως είναι: Μπορούν όλοι οι αστροναύτες να περάσουν μέσα από τις πόρτες ή τις καταπακτές; Που ακριβώς θα πρέπει να τοποθετηθούν οι χειρολαβές; Πως θα επηρεάσουν αυτή τη δυνατότητα τυχόν αλλαγές στο σχεδιασμό του χώρου εργασίας μέσα στο διαστημόπλοιο;
- ⇒ Ένας χειριστής μεγάλου οχήματος όπως ένα ρυμουλκό, χρειάζεται να βλέπει τον περιβάλλοντα χώρο για να πραγματοποιήσει μια εργασία, να αποφύγει τυχόν εμπόδια και να διασφαλίσει την ασφάλεια των ανθρώπων που κινούνται γύρω του. Ποιο ακριβώς όμως είναι το οπτικό πεδίο του χειριστή από μια συγκεκριμένη θέση; Μπορεί να χειριστεί το όχημα ενώ ταυτόχρονα κοιτάζει από το παράθυρο;
- ⇒ Συγκεκριμένες μελέτες χειρωνακτικής ανύψωσης βαρών μπορούν να πραγματοποιηθούν για να καθορίσουν τα όρια της καταπόνησης της μέσης, για έναν τυπικό σωματότυπο εργατών. Υπάρχει όμως κατάλληλος χώρος για να γίνει σωστά αυτή η διαδικασία; Ποιες αρθρώσεις καταπονούνται περισσότερο; Υπάρχει μια καλύτερη στάση του σώματος για να μειωθούν οι στρεπτικές ροπές; Πως επηρεάζουν την εκτέλεση της εργασίας η αρχική και η τελική θέση του βάρους που πρέπει να ανυψωθεί; Θα κουραστεί ο εργάτης μετά από ορισμένες επαναλαμβανόμενες εργασίες ανύψωσης;
- ⇒ Ακόμα πιο εξειδικευμένα πειράματα μπορούν να γίνουν για να εκτιμηθούν η άνεση και η αίσθηση μιας χειρολαβής εργαλείου. Είναι όμως η χειρολαβή κατάλληλη για κάθε ανθρώπινο χέρι;

Μια απάντηση σε όλες τις προηγούμενες ερωτήσεις είναι η χρήση ενός ψηφιακού ανθρώπινου μοντέλου, computer manikin ή virtual human, ως υποκειμένου σε μια σειρά

εργασιών μέσα σε ένα εικονικό περιβάλλον. Το μοντέλο θα λαμβάνει εργονομικά δεδομένα, τα οποία θα υπαγορεύουν την εκτέλεση των κινήσεων του.

Τα ανθρωπομετρικά στοιχεία των εικονικών ανθρώπινων μοντέλων δηλαδή οι διαστάσεις του σώματος τους, είναι δυνατόν να λαμβάνονται από βάσεις δεδομένων, τα στοιχεία των οποίων προέρχονται από στατιστικές μελέτες πληθυσμών. Ορισμένα λογισμικά πακέτα παρέχουν τη δυνατότητα απευθείας εισαγωγής των βασικών ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών όπως ύψος, βάρος, φύλο και στη συνέχεια το σύστημα υπολογίζει μόνο του τις υπόλοιπες διαστάσεις.

Η κίνηση των ψηφιακών ανθρωποειδών μέσα σε ένα εικονικό περιβάλλον, με σκοπό την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης εργασίας, μπορεί να γίνει :

- ⇒ με προγραμματισμό από το χρήστη δίνοντας εντολές όπως *move, walk, step, grasp* για κάθε βήμα της διαδικασίας. Όταν ολοκληρωθεί η εισαγωγή όλων των εντολών, ο χειριστής μπορεί να δει όλη τη διαδικασία από την αρχή σε μορφή *animation*.
- ⇒ με αιχμαλώτιση της κίνησης από έναν πραγματικό άνθρωπο, ο οποίος φορώντας περιφερειακά Εικονικής Πραγματικότητας εκτελεί την εικονική διαδικασία και οι κινήσεις του αντιστοιχίζονται σε ένα ψηφιακό ανθρωποειδές.

Μετά την εκτέλεση μιας διαδικασίας από ένα ψηφιακό ανθρωποειδές, απορρέουν αποτελέσματα που αφορούν κυρίως στα εργονομικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος όπως:

- ⇒ δυνατότητα εκτέλεσης της συγκεκριμένης εργασίας από ανθρώπους με διαφορετικά ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά
- ⇒ έλεγχο οπτικού πεδίου από διαφορετικές γωνίες
- ⇒ κούραση και καταπόνηση του ανθρώπινου σώματος κατά την εκτέλεση της διαδικασίας
- ⇒ δυνατότητα προσέγγισης όλων των απαραίτητων αντικειμένων για την εκτέλεση της εργασίας
- ⇒ δυνατότητα εισχώρησης του ανθρώπινου σώματος σε στενά σημεία

Μερικά από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα λογισμικά εργαλεία εργονομικού σχεδιασμού με χρήση ψηφιακών ανθρωποειδών περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο.

Στο πλαίσιο του προγράμματος John Deere [Deisinger *et al.*, 2000] αναπτύχθηκε το εργαλείο ERGONAUT με σκοπό την εργονομική ανάλυση προϊόντων (κυρίως αυτοκινήτων) και την χρήση εικονικής πραγματικότητας για την απόκτηση δεδομένων κίνησης από τον

εμβυθισμένο χρήστη. Επίσης, αναπτύχθηκε το ψηφιακό ανθρωποειδές VirtualANTHROPOS για την εκτέλεση των πειραμάτων και την απόκτηση εργονομικών αποτελεσμάτων. Η εκτέλεση των πειραμάτων έγινε με χρήση φυσικού πρωτότυπου αυτοκινήτου. Τα δεδομένα από την καταγραφή των κινήσεων του πραγματικού χρήστη οδηγήθηκαν στο σώμα ενός ανθρωποειδούς με σκοπό την εκτέλεση της κίνησης από αυτό. Το σύστημα παρείχε μια περιορισμένη δυνατότητα εφαρμογής των επιθυμητών ανθρωπομετρικών δεδομένων στο ψηφιακό ανθρωποειδές και εμφάνιζε μετά το τέλος της διαδικασίας αποτελέσματα που αφορούσαν κυρίως το οπτικό πεδίο του χρήστη, την δυνατότητα πιασίματος ενός συγκεκριμένου σημείου και τα όρια κίνησης των μελών του σώματος.

2.2.4 Λογισμικά εργαλεία εργονομικού σχεδιασμού με χρήση ψηφιακών ανθρωποειδών

Στις περισσότερες περιπτώσεις εργονομικού σχεδιασμού και ελέγχου με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, τα λογισμικά εργαλεία ψηφιακών ανθρωποειδών (*human modeling software tools*) προτιμούνται, έναντι άλλων τεχνολογιών προσομοίωσης, για τις δυνατότητες και την ευελιξία που παρέχουν. Σαν αποτέλεσμα οι εταιρείες ανάπτυξης τέτοιων λογισμικών προσφέρουν πια αξιόλογα εργαλεία για χρήση τόσο ερευνητική όσο και βιομηχανική. Τα διαθέσιμα εμπορικά λογισμικά υποστηρίζουν την εισαγωγή των ανθρώπινων παραγόντων και της εργονομικής ανάλυσης στο σχεδιασμό προϊόντων και σταθμών εργασίας [Feyen *et al.*, 2000]. Στη συνέχεια παρουσιάζονται εν συντομία τα σημαντικότερα από τα βασικότερα διαθέσιμα λογισμικά εργαλεία ψηφιακών ανθρωποειδών που χρησιμοποιούνται ευρέως από τη βιομηχανία για τον εργονομικό σχεδιασμό προϊόντων και χώρων εργασίας.

Το λογισμικό *Ramsis* [Human Solutions, 2009], απευθύνεται κυρίως σε αυτοκινητοβιομηχανίες και είναι σχεδιασμένο για τον εργονομικό έλεγχο οχημάτων. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας ενός ανθρωποειδούς χρησιμοποιώντας είτε συγκεκριμένες βάσεις δεδομένων πληθυσμού, είτε μέσω του λογισμικού *Body Builder* της ίδιας εταιρείας. Στη συνέχεια το δημιουργημένο ανθρωποειδές εισάγεται στο ψηφιακό περιβάλλον, στο οποίο βρίσκεται το εικονικό μοντέλο του οχήματος, προκειμένου να μελετηθούν εργονομικά στοιχεία. Το ανθρωποειδές μπορεί να δράσει ως οδηγός ή επιβάτης του οχήματος και να κινηθεί είτε χρησιμοποιώντας εντολές για εκτέλεση εργασιών, είτε με τη χρήση αρχείου κίνησης. Κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της εργασίας ή μετά το πέρας

αυτής, ο χρήστης μπορεί να εξάγει εργονομικά αποτελέσματα που σχετίζονται με το οπτικό πεδίο, το επίπεδο άνεσης και την προσεγγισιμότητα του ψηφιακού ανθρωποειδούς.

Σχήμα 2-4. Ramsis [Human Solutions, 2009]

Το λογισμικό *Delmia V5 Human* [Dassault Systemes, 2009], το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως για την εργονομική ανάλυση σταθμών εργασίας, παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας, αξιολόγησης και προσομοίωσης ψηφιακών ανθρωποειδών σε περιβάλλοντα εργασίας. Τα ανθρωποειδή που εισάγονται στο εικονικό περιβάλλον, σαν εργαζόμενοι στους χώρους εργασίας, μπορούν να εκτελέσουν βασικές κινήσεις όπως βάδισμα από ένα σημείο σε άλλο, κατεύθυνση προς ένα συγκεκριμένο στόχο μέσω σειράς στάσεων σώματος, ακολουθώντας την τροχιά ή την πορεία ενός αντικειμένου, πιάσιμο ή τοποθέτηση αντικειμένων σε καθορισμένες θέσεις. Σε συνδυασμό με άλλα υποσυστήματα του λογισμικού, στο τέλος κάθε προσομοίωσης κίνησης μπορούν να γίνουν εργονομικές αναλύσεις κόπωσης και άνεσης, οπτικού εύρους, στάσης σώματος, κ.ά.

Σχήμα 2-5. Delmia V5 Human [Dassault Systemes, 2009]

Το λογισμικό *Jack* [Unigraphics Solutions, 2009] είναι ένα προϊόν για εργονομική ανάλυση και υποστήριξη του σχεδιασμού προϊόντων και περιβαλλόντων εργασίας. Επιτρέπει την εισαγωγή ψηφιακών ανθρωποειδών διαφόρων ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών σε εικονικό περιβάλλον, την ανάθεση συγκεκριμένων εργασιών με απευθείας προγραμματισμό κινήσεων ή μέσω αιχμαλώτισης κίνησης και την ανάλυση της διεκπεραίωσης της εργασίας

από εργονομικής πλευράς. Τα ανθρωποειδή *Jack* και *Jill* μπορούν να δώσουν μεταξύ άλλων πληροφορίες για το οπτικό τους πεδίο, τα επίπεδα άνεσης κατά την εκτέλεση της εργασίας καθώς και για το πότε και γιατί μπορεί να τραυματιστούν ή να κουραστούν. Οι πληροφορίες αυτές βοηθούν στον καλύτερο σχεδιασμό των προϊόντων και για μικρότερο κόστος.

Σχήμα 2-6. Jack [Unigraphics Solutions, 2009]

Το λογισμικό *Safework Pro* [SafeWork Inc., 2009] αποτελεί ένα εξελιγμένο προϊόν ψηφιακών ανθρωποειδών για τον εργονομικό έλεγχο προϊόντων και σταθμών εργασίας υποστηρίζοντας τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροβιομηχανία, οι κατασκευές κ.ά. Επιτρέπει, την εισαγωγή ψηφιακών ανθρωποειδών διαφόρων ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών σε εικονικό περιβάλλον, την οδήγηση τους κυρίως από δεδομένα αιχμαλώτισης κίνησης και την ανάλυση εργονομικών αποτελεσμάτων σε διαδικασίες μεταφοράς αντικειμένων, ανάλογα με τη στάση σώματος και την ενέργεια που καταναλώνει το ανθρωποειδές κατά την εκτέλεση της εργασίας.

Σχήμα 2-7. Safework Pro [SafeWork Inc., 2009]

Το λογισμικό *AnyBody* [AnyBody Technology, 2009] είναι ένα προϊόν μελέτης ανθρώπινων κινήσεων σε εικονικά περιβάλλοντα. Μέλη σώματος ή ολόκληρο το σώμα μπορούν να προσομοιωθούν και να καταγραφούν πληροφορίες που αφορούν δυνάμεις μυών, αντιδράσεις αρθρώσεων, μεταβολισμός, αποδοτικότητα, κ.ά. για συγκεκριμένες κινήσεις. Χρησιμοποιείται κυρίως για ιατρικούς σκοπούς σε θέματα ανάλυσης του μυοσκελετικού συστήματος του ανθρώπου, προγραμματισμού φυσιοθεραπειών, άθλησης, κλπ.

Σχήμα 2-8. AnyBody [AnyBody Technology, 2009]

Το λογισμικό *Sammie* [Sammie Cad Ltd., 2009] αποτελεί ένα εργαλείο ψηφιακών ανθρωποειδών για εργονομικό έλεγχο περιβαλλόντων εργασίας και προϊόντων. Επιτρέπει την εισαγωγή ψηφιακών ανθρωποειδών από βάσεις δεδομένων και την οδήγηση τους με προγραμματισμό δίνοντας προκαθορισμένες στάσεις σώματος στο ανθρωποειδές, σε εικονικά περιβάλλοντα εργασίας. Ελέγχει εργονομικά αποτελέσματα που αφορούν στην ανάλυση στάσης σώματος, στον έλεγχο οπτικού πεδίου, στη δυνατότητα προσέγγισης σε συγκεκριμένα σημεία και στόχους και στον αξιολόγηση εργονομικού σχεδιασμού προϊόντων και χώρων εργασίας όπως για παράδειγμα αυτοκίνητα ή σταθμούς συναρμολόγησης.

Σχήμα 2-9. Sammie [Sammie Cad Ltd., 2009]

Το λογισμικό *ManneQuinPRO* [NexGen Ergonomics Inc., 2009] επιτρέπει τη δημιουργία και την εισαγωγή ψηφιακών ανθρωποειδών σε εικονικά περιβάλλοντα προσομοίωσης για την υποστήριξη εργονομικού ελέγχου προϊόντων. Τα ψηφιακά ανθρωποειδή μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιαδήποτε αποδεκτή στάση και να κινηθούν με προκαθορισμένο τρόπο (*animation*). Τα ψηφιακά ανθρωποειδή μετά τη δημιουργία τους μπορούν να εισαχθούν σε άλλα λογισμικά πακέτα γραφικών για περαιτέρω ανάλυση εργονομικών χαρακτηριστικών.

Σχήμα 2-10. MannequinPRO [NexGen Ergonomics Inc., 2009]

Το λογισμικό *Boeing Human Modeling System* [Boeing Co., 2009] είναι αποκλειστικά σχεδιασμένο για εργονομικό έλεγχο σε διαδικασίες που αφορούν αεροσκάφη, από το σχεδιασμό μέχρι τη συντήρηση. Επιτρέπει την εισαγωγή ψηφιακών ανθρωποειδών από βάσεις δεδομένων που αντιπροσωπεύουν συγκεκριμένο πληθυσμό, την οδήγησή τους σε συγκεκριμένες εργασίες και με δυνατότητες χρήσης εργαλείων συναρμολόγησης / συντήρησης και τον εργονομικό έλεγχο δύσκολων εργασιών μέσα σε αεροσκάφη ή διαστημόπλοια. Βασικά αποτελέσματα αποτελούν ο έλεγχος προσεγγισιμότητας (*reachability*) ενός σημείου στο χώρο, ο έλεγχος του οπτικού πεδίου (*field-of-view*) και ο έλεγχος της δυνατότητας εκτέλεσης / επιτευξιμότητας (*feasibility*) μια συγκεκριμένης εργασίας.

Σχήμα 2-11. Boeing Human Modeling System [Boeing Co., 2009]

Από την παραπάνω έρευνα αγοράς προκύπτει ότι τα περισσότερα λογισμικά εργαλεία εργονομικού σχεδιασμού χρησιμοποιούνται ευρέως για τον έλεγχο των ανθρώπινων αλληλεπιδράσεων μέσα σε εικονικά περιβάλλοντα αλλά πάσχουν από την έλλειψη ρεαλισμού και αξιοπιστίας μιας και δεν υποστηρίζουν ενσωματωμένες διαδικασίες δημιουργίας νέων κινήσεων για νέα ανθρωποειδή ή νέα περιβάλλοντα εργασίας [Chrysosolouris *et al.*, 2001]. Αυτό το πρόβλημα προσεγγίζεται μέσω του συστήματος υλοποίησης της παρούσας διατριβής, το οποίο είχε ως άνωτερο σκοπό την ενσωμάτωση και χρήση της υλοποιούμενης μεθοδολογίας μέσω κάποιου ευρείας χρήσης λογισμικό εργαλείο εργονομικού σχεδιασμού.

2.3 Μοντελοποίηση ανθρώπινης κίνησης

Ένα γενικό πρόβλημα του εργονομικού σχεδιασμού με χρήση ψηφιακών ανθρωποειδών είναι η προσομοίωση της κίνησης των ανθρώπων μέσα στον εικονικό εργασιακό χώρο [Chaffin *et al.*, 1999]. Οι κινήσεις των ανθρώπων δεν προσομοιώνονται ικανοποιητικά στα υπάρχοντα λογισμικά εργαλεία ψηφιακών ανθρωποειδών, που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Η χρησιμοποίηση αντίστροφης κινηματικής και άλλων σχετικών μεθόδων ρομποτικής μπορεί να βοηθήσει σε αυτόν τον στόχο, αλλά μπορεί να μην είναι ικανοποιητική, ιδιαίτερα εάν ο σχεδιαστής δεν έχει το κατάλληλο υπόβαθρο ή δεν έχει τον απαραίτητο χρόνο να πειραματιστεί με τις εναλλακτικές στάσεις και τα εναλλακτικά στυλ κινήσεων του ανθρώπου. Αυτό μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις στην αξιοπιστία του σχεδιασμού, δεδομένου ότι έχει αποδειχθεί ότι μικρά λάθη στην προσομοίωση της στάσης του ανθρώπινου σώματος μπορούν να οδηγήσουν σε πολύ μεγάλα λάθη στις εκτιμώμενες εργονομικές παραμέτρους του σχεδιασμού. Η ανικανότητα των υπάρχοντων λογισμικών εργαλείων να προσομοιώνουν ρεαλιστικές και έγκυρες ανθρώπινες στάσεις σώματος και κινήσεις ψηφιακών ανθρωποειδών έχει υποκινήσει πλήθος επιστημονικών ερευνών στον τομέα αυτό.

Η μοντελοποίηση και η προσομοίωση των ανθρώπινων κινήσεων έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς τα τελευταία χρόνια για να ερευνηθούν οι αλληλεπιδράσεις των ανθρώπων με το περιβάλλον εργασίας τους ή με σύνθετα προϊόντα [Badler *et al.*, 1992]. Μεγάλος αριθμός σημαντικών ερευνητικών εργασιών έχουν μελετήσει την προσομοίωση της ανθρώπινης κίνησης. Οι ερευνητές του προγράμματος ANNIE εκπαίδευσαν ένα νευρωνικό δίκτυο (Σχήμα 2-12) για να προσομοιώσει τη κίνηση του χεριού, όπου σαν δεδομένα εισόδου στο δίκτυο δίνονται οι συντεταγμένες της τροχιάς της κίνησης τόσο στο σημείο έναρξης όσο και στο τελείωμα της κίνησης. Το νευρωνικό δίκτυο παράγει τις συντεταγμένες της τροχιάς κίνησης για τα δέκα ενδιάμεσα στιγμιότυπα [Rigotti *et al.*, 2001]. Γεωμετρικοί αντίστροφοι κινηματικοί αλγόριθμοι (*geometric inverse kinematics*) έχουν προταθεί κατά καιρούς, οι οποίοι ενσωματώνουν στρατηγικές μετακίνησης του ανθρώπινου σώματος [Jung and Choe, 1996; Wang, 1999; Tolani *et al.*, 2000].

Άλλες πρόσφατες προσεγγίσεις, χρησιμοποιούν πραγματικές ανθρώπινες κινήσεις, αποθηκευμένες σε βάση δεδομένων, για τη μοντελοποίηση και την πρόβλεψη κινήσεων [Park *et al.*, 2002; Wang, 2002; Park *et al.*, 2004] ή συνδυάζουν υπάρχουσες κινήσεις προκειμένου να παράγουν νέες [Boulic *et al.*, 1997].

Σχήμα 2-12. Προσομοίωση κίνησης χεριού με χρήση νευρωνικών δικτύων [Rigotti *et al.*, 2001]

Ένα μεγάλος πλήθος ερευνητικών εργασιών έχει χρησιμοποιήσει τη στατιστική ανάλυση (π.χ. regression) σε καταγεγραμμένα δεδομένα κίνησης, διαμορφώνοντας μοντέλα πρόβλεψης για μια ακολουθία στάσεων σώματος ψηφιακού ανθρωποειδούς [Das and Sengupta, 1995; Zhang and Chaffin, 1996; Das and Behara, 1998; Faraway *et al.*, 1999; Chaffin *et al.*, 2000].

Σχήμα 2-13. Μοντελοποίηση ανθρώπινης κίνησης με χρήση στατιστικής ανάλυσης [Faraway *et al.*, 1999]

Σε άλλες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται τεχνικές προσομοίωσης και προσαρμογής κινήσεων επηρεασμένες από τις τεχνικές δημιουργίας γραφικών σε υπολογιστή (*computer graphics*). Έτσι, χρησιμοποιώντας πάλι υπάρχουσες καταγεγραμμένες κινήσεις, παράγονται νέες κινήσεις για διαφορετικούς χαρακτήρες [Bruderlin and Williams, 1995; Witkin and Poronic, 1995]. Αυτές οι προσεγγίσεις έχουν θεωρήσει την κίνηση ως σύνολο σημμάτων και έχουν εφαρμόσει σε αυτή τεχνικές επεξεργασίας σημμάτων.

Η τεχνική ορισμού νέου στόχου (*motion retargeting*) έχει χρησιμοποιηθεί από αρκετούς επιστήμονες [Gleicher, 1998; Lyard and Magnenat-Thalmann, 2008] για την προσαρμογή

μιας προσομοιωμένης κίνησης από ένα χαρακτήρα (ψηφιακό ανθρωποειδές) σε έναν άλλο, της ίδιας διάρθρωσης αλλά με διαφορετικά μήκη των μελών του σώματος. Η τεχνική αυτή αναγνωρίζει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της αρχικής κίνησης ως περιορισμούς που πρέπει να συντηρηθούν κατά την προσαρμογή, δημιουργώντας προσαρμοσμένες κινήσεις οι οποίες διατηρούν τις επιθυμητές ιδιότητες της αρχικής κίνησης. Ένας μηχανισμός επίλυσης των χωρικών και χρονικών περιορισμών (*space-time constraints solver*) υπολογίζει την προσαρμοσμένη κίνηση διατηρώντας τους αρχικούς περιορισμούς, ενώ παράλληλα διατηρεί τα χαρακτηριστικά συχνότητας της αρχικής κίνησης. Τεχνικές βελτιστοποίησης των περιορισμών χρησιμοποιούνται, για την διασφάλιση της εγκυρότητας των παραγόμενων στάσεων.

Τεχνικές αντίστροφης κινηματικής έχουν εφαρμοστεί επίσης, για την επίλυση προβλημάτων ορισμού νέου στόχου (*motion retargeting*) επιβάλλοντας καρτεσιανούς περιορισμούς σε χρονικά διαστήματα [Bindiganavale, 2000; Monzami *et al.*, 2000]. Μια συνδυασμένη προσέγγιση έχει παρουσιαστεί επίσης στο παρελθόν, η οποία εφαρμόζει αλγορίθμους αντίστροφης κινηματικής και τεχνικές ιεραρχικών προσαρμογών καμπυλών (*hierarchical curve fitting techniques*) [Lee and Shin, 1999], στην οποία χρησιμοποιούνται κινηματικές τεχνικές επίλυσης για τη ρύθμιση της στάσης του σώματος, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι εκάστοτε περιορισμοί.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι στο πλαίσιο ενός ερευνητικού προγράμματος του πανεπιστημίου της Iowa [VSR, 2009] αναπτύχθηκε μέθοδος για την πρόβλεψη της κίνησης του πάνω τμήματος του ανθρωπίνου σώματος, χρησιμοποιώντας καμπύλες *b-spline* για την αναπαράσταση της τροχιάς των αρθρώσεων, έχοντας ως στόχο τη βελτιστοποίηση του συντελεστή συσχέτισης των καμπυλών *b-spline* (Σχήμα 2-14). Η έρευνα αυτή εστιάζει σε εξελιγμένες μεθόδους βελτιστοποίησης με σκοπό την αύξηση του ρεαλισμού της παραγόμενης κίνησης με ταυτόχρονη μείωση του χρόνου υπολογισμού της.

Σχήμα 2-14. Μοντελοποίηση κίνησης ανθρωπίνου σώματος με χρήση καμπυλών *b-spline* [VSR, 2009]

2.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων έρευνας

Όπως διαπιστώθηκε από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, ο εργονομικός σχεδιασμός ενός βιομηχανικού προϊόντος ή ενός σταθμού εργασίας βασίζεται στην ανάλυση του σχεδιασμού του, κάνοντας χρήση των αρχών της εργονομίας. Πιο συγκεκριμένα απαιτείται η μελέτη και ο έλεγχος των κρίσιμων διαστάσεων, της άνεσης και της ευχρηστίας του προϊόντος ή του σταθμού εργασίας, βάσει των αναγκών ενός πληθυσμιακού στόχου (*target population*). Ο έλεγχος αυτός εΐθισται να πραγματοποιείται από ένα πλήθος συμμετεχόντων (αντιπροσωπευτικό δείγμα του πληθυσμιακού στόχου), μέσω της εκτέλεσης πειραμάτων με χρήση φυσικών πρωτοτύπων. Λόγω της αυξημένης απαίτησης αυτών των πειραμάτων σε χρόνο και κόστος, οι βιομηχανίες αναζητούν μια πιο συμφέρουσα και πρακτική λύση. Η αναζήτηση αυτή έφερε στο προσκήνιο τη χρήση της προσομοίωσης πειραμάτων μέσα σε ένα ελεγχόμενο, ψηφιακό περιβάλλον. Η προσομοίωση πειραμάτων είναι βασισμένη τόσο στην τεχνολογία ψηφιακών ανθρωποειδών, όσο και στη μοντελοποίηση ανθρώπινης κίνησης.

Βάσει της ανασκόπησης της βιβλιογραφίας, οι περισσότερες μεθοδολογίες μοντελοποίησης της ανθρώπινης κίνησης, δεν είναι γενικευμένες και συνήθως μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συγκεκριμένο τύπο κινήσεων [Park *et al.*, 2004]. Επίσης, σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι δυνατόν να καθοριστεί το στυλ της παραγόμενης κίνησης, με παράλληλη ικανοποίηση κάποιων περιορισμών. Σε σχέση με αυτές τις αναφορές, η προτεινόμενη προσέγγιση παρέχει μια μεθοδολογία που μπορεί να προσφέρει προσομοίωση διαφορετικών τύπων ανθρώπινης κίνησης, ενώ ταυτόχρονα δίνει τη δυνατότητα να καθοριστεί η μορφή της παραγόμενης κίνησης και να ικανοποιηθούν οι επιθυμητοί περιορισμοί της νέας κίνησης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται στην εύρεση της βέλτιστης λύσης (στιγμιότυπο κίνησης) για ένα πλήθος κριτηρίων και περιορισμών. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης (*optimization problem*) θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και άλλες διαδεδομένες μέθοδοι της βιβλιογραφίας, όπως για παράδειγμα ο Συλλογισμός Βασισμένος σε Περιπτώσεις (*Case Based Reasoning – CBR*) [Aamodt and Plaza, 1994] ή οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (*Genetic Algorithms – GA*) [Falkenauer, 1997], αλλά τελικά επιλέχθηκε η μέθοδος Λήψης Αποφάσεων με Πολλαπλά Κριτήρια (*Multi Criteria Decision Making – MCDM*) η οποία είναι ικανή να διαχειριστεί και να αντεπεξέλθει αξιόπιστα σε ένα πλήθος απαιτήσεων του χρήστη, σχετικά με τη νέα κίνηση, και ταυτόχρονα να διατηρήσει τη ρεαλιστικότητα της κίνησης αναφοράς (υπάρχουσα / καταγεγραμμένη) στην παραγόμενη κίνηση.

3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Πριν προσεγγιστεί το πρόβλημα της μοντελοποίησης της ανθρώπινης κίνησης και έχοντας ως στόχο τη βαθύτερη κατανόηση των παραμέτρων του προβλήματος που προσεγγίστηκε στο πλαίσιο της διατριβής, κρίθηκε αναγκαία η ανάλυση της ανθρώπινης κίνησης. Έτσι λοιπόν, το παρών κεφάλαιο έχει ως αντικείμενο την ανάλυση μιας συγκεκριμένης κίνησης, βασισμένη σε πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από καταγραφή ανθρωπίνων κινήσεων.

Τα πειραματικά δεδομένα προέκυψαν από ψηφιακή καταγραφή της κίνησης εισόδου στη θέση του οδηγού αυτοκινήτου, από 23 συμμετέχοντες διαφορετικών ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών [LAB, 2001]. Τα δεδομένα κίνησης των ατόμων που εκτέλεσαν τη συγκεκριμένη κίνηση χρησιμοποιήθηκαν για τη διαδικασία ανάλυσης της ανθρώπινης κίνησης. Η ψηφιακή καταγραφή των δεδομένων κίνησης πραγματοποιήθηκε με διαδικασία αιχμαλώτισης της κίνησης (*motion capture*), με οπτικό σύστημα αιχμαλώτισης κίνησης.

Αρχικά παρουσιάζονται τα βήματα της προ-επεξεργασίας των ψηφιακών δεδομένων κίνησης και στη συνέχεια περιγράφεται η λογική με την οποία επιλέχθηκαν οι προς μελέτη ανακλαστήρες (ανακλαστικοί αισθητήρες). Δίνεται ο ορισμός του κύριου άξονα της κίνησης και ο τρόπος απομόνωσης της κίνησης ενδιαφέροντος, από τη συνολική κίνηση που καταγράφηκε. Επίσης, παρουσιάζονται οι διαφορετικές στρατηγικές κίνησης που ακολουθήθηκαν από τους συμμετέχοντες στην πειραματική διαδικασία. Η προτεινόμενη μεθοδολογία ανάλυσης (Σχήμα 3-1) βασίστηκε στη θεωρία **Ανάλυσης της Διακύμανσης (*ANalysis Of VAriance – ANOVA*)** [Fisher, 1925] για τον καθορισμό της συσχέτισης των ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών και των διαφορών (διακυμάνσεων) που εντοπίζονται στις καταγεγραμμένες κινήσεις των συμμετεχόντων.

Η Ανάλυση της Διακύμανσης χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών που επηρεάζουν περισσότερο την κίνηση και για την ποσοτικοποίηση της επιρροής αυτής. Κάνοντας χρήση της **Στατιστικού Σχεδιασμού Πειραμάτων (*Statistical Design of Experiments – SDoE*)** [Fisher, 1934] προσδιορίζονται τα πειράματα, των οποίων τα δεδομένα κίνησης έπρεπε να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να προκύψουν έγκυρα αποτελέσματα σχετικά με την επιρροή των ανθρωπομετρικών δεδομένων στην διακύμανση της ανθρώπινης κίνησης. Τα πειράματα αυτά επιλέχθηκαν με βάση τις τιμές των ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών των συμμετεχόντων που εκτέλεσαν την πειραματική διαδικασία.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία συντελεί στη μείωση του κόστους και το χρόνου που απαιτείται να καταναλώσουν οι βιομηχανίες για να πραγματοποιήσουν εργονομικούς ελέγχους στα προϊόντα τους χρησιμοποιώντας πραγματικά πρωτότυπα προϊόντων, καθώς απαιτείται σχετικά μικρός αριθμός πειραμάτων, για την απόκτηση έγκυρων συμπερασμάτων για την ανθρώπινη κίνηση. Σε συνέχεια της ανάλυσης της διακύμανσης, μια πρώτη προσέγγιση μοντελοποίησης της ανθρώπινης κίνησης δοκιμάστηκε στο κεφάλαιο αυτό, η οποία βασίστηκε στην δημιουργία εξισώσεων τροχιών ανακλαστήρων κάνοντας χρήση του **Προσθετικού Μοντέλου (Additive Model)** [Hastie and Tibshirani, 1990].

Σχήμα 3-1. Διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθοδολογίας ανάλυσης της ανθρώπινης κίνησης

Η καινοτομία της προτεινόμενης μεθοδολογίας ανάλυσης της ανθρώπινης κίνησης, σε σύγκριση με υπάρχουσες προσεγγίσεις της βιβλιογραφίας, έγκειται κυρίως στη χρήση χωρικών συνταγμένων, εξαλείφοντας τη μεταβλητή του χρόνου, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα να συγκριθούν κινήσεις που πραγματοποιήθηκαν με διαφορετική ταχύτητα εκτέλεσης. Λόγω αυτού του χαρακτηριστικού γνωρίσματος της μεθοδολογίας, επιτρέπει την άμεση χρήση δεδομένων κίνησης που προήλθαν από χρήση οπτικού συστήματος καταγραφής (τροχιές ανακλαστήρων), εξαλείφοντας την ανάγκη για χρονοβόρες διαδικασίες μετασχηματισμού των δεδομένων αυτών σε γωνίες αρθρώσεων του ανθρώπινου σώματος (όπως συμβαίνει στις περισσότερες προσεγγίσεις της βιβλιογραφίας). Ένα ακόμα πολύ

βασικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης προσέγγισης αποτελεί η χρήση του Στατιστικού Σχεδιασμού Πειραμάτων (*SDoE*), για την δημιουργία έγκυρων μοντέλων κίνησης με χρήση όσο το δυνατόν λιγότερων πειραμάτων, μειώνοντας -κατά αυτόν τον τρόπο- δραστικά το κόστος και το χρόνο που αφιερώνουν οι βιομηχανίες για την υλοποίηση τέτοιας φύσεως πειραμάτων (έλεγχου της εργονομίας μέσα σε πραγματικούς χώρους και με πραγματικά πρωτότυπα των προϊόντων).

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό, ότι οι κανόνες και υποδείξεις σχεδιασμού στην αυτοκινητοβιομηχανία συνήθως στοχεύουν στην καλή εφαρμογή του προτεινόμενου σχεδιασμού, είτε στο 5ο εκατοστημόριο (*5th percentile*) του γυναικείου πληθυσμού, είτε στο 95ο εκατοστημόριο (*95th percentile*) του ανδρικού πληθυσμού. Αυτή η απλή προσέγγιση δεν καλύπτει, στις περισσότερες των περιπτώσεων, ούτε το 95% των ενήλικων κατόχων αυτοκινήτου.

Για το λόγο αυτό, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική ανάλυσης πολλαπλών μεταβλητών (*multivariate analysis*) των ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών προκειμένου να αναπτύξει τις προδιαγραφές για τις διαστάσεις του σχεδιασμού που να καλύπτει το 100% του πληθυσμιακού στόχου (*target population*).

3.1 Πειραματικά δεδομένα

Για την ψηφιακή καταγραφή δεδομένων ανθρώπινης κίνησης, εκτελέστηκαν πραγματικά πειράματα της κίνησης που μελετήθηκε (είσοδος στη θέση του οδηγού αυτοκινήτου) από ένα πλήθος (23) ανθρώπων (συμμετεχόντων) διαφορετικών ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών [LAB, 2001].

3.1.1 Ανθρωπομετρικά δεδομένα

Ο Πίνακας 3-1 παρουσιάζει τα βασικά μεγέθη για τη μέτρηση των ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών (*anthropometrics*), τα οποία καταγράφηκαν για κάθε συμμετέχοντα στην πειραματική διαδικασία καταγραφής ανθρωπίνων κινήσεων.

Ανάστημα	Μήκος ποδιού	Ύψος (θέση καθίσματος)	Μήκος γλουτού-γονάτου

Ύψος γονάτου	Μήκος άνω βραχίονα	Μήκος κάτω βραχίονα	Πλάτος ώμων

Πλάτος λεκάνης	Προφίλ στήθους	Περιφέρεια μέσης	Ευλυγισία

	Ύψος κεφαλιού	Πλάτος κεφαλιού	

Πίνακας 3-1. Ορισμός μεγεθών για τη μέτρηση των ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών [LAB, 2001]

Ο Πίνακας 3-2 παρουσιάζει τα ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά των ατόμων που επιλέχθηκαν για την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας καταγραφής ανθρώπινης κίνησης. Οι συμμετέχοντες επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος ανθρωπομετρικών τόσο ανδρών (Α), όσο και γυναικών (Θ) ηλικίας άνω των 18 ετών.

Α/Α Συμ/ντος	Φύλλο Ανάστημα	Πλάτος λεκάνης	Προφίλ στήθους	Ύψος κεφαλιού	Πλάτος κεφαλιού	Περιφέρεια μέσης	Ευλυγισία γλουτού	Μήκος ποδιού	Ύψος (θέση καθίσματος)	Μήκος γλουτού- γονάτου	Ύψος γονάτου	Μήκος άνω βραχίονα	Μήκος κάτω βραχίονα	Πλάτος ώμων	
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(°)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
1	A	1750	345	220	240	160	820	95	280	890	570	530	335	470	460
2	Θ	1570	430	340	200	145	980	97	245	830	640	500	320	425	490
3	A	1890	360	230	235	145	860	103	290	990	640	600	380	500	505
4	A	1640	340	300	200	160	1020	90	270	870	570	510	320	440	470
5	A	1780	335	250	220	160	940	80	285	930	645	560	350	470	500
6	A	1810	340	240	230	160	880	108	285	950	610	570	365	490	490
7	Θ	1620	380	250	210	145	860	90	245	830	580	520	320	420	460
8	A	1670	345	270	210	160	900	87	270	900	580	540	330	450	520
9	A	1850	340	220	215	140	860	87	300	900	630	590	355	490	500
10	A	1780	375	270	200	155	980	80	295	930	630	570	355	485	530
11	A	1710	350	230	220	155	890	94	275	920	580	570	345	455	470
12	A	1820	370	285	230	160	1100	87	285	990	630	570	375	475	515
13	A	1900	370	230	210	145	940	94	295	970	680	610	390	500	460
14	A	1770	330	230	230	150	810	80	275	930	600	550	350	455	466
15	Θ	1600	310	230	200	150	740	97	245	820	580	510	310	420	410
16	A	1710	320	220	225	150	830	93	270	890	590	540	330	420	465
17	Θ	1660	370	240	205	140	870	90	245	870	590	520	330	435	480
18	A	1760	360	230	230	155	870	100	270	920	600	560	355	485	475
19	A	1780	410	290	225	155	1060	93	275	940	620	560	370	490	565
20	Θ	1680	325	230	200	145	710	88	250	870	590	520	330	435	390
21	Θ	1640	350	230	210	150	720	110	255	880	570	520	335	450	430
22	A	1810	370	250	240	160	960	74	285	920	620	610	380	490	510
23	Θ	1580	320	220	200	145	710	87	235	850	540	500	300	395	390

Πίνακας 3-2. Ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά συμμετεχόντων στην πειραματική διαδικασία καταγραφής ανθρώπινης κίνησης [LAB, 2001]

3.1.2 Δεδομένα ανθρώπινης κίνησης

Κατά τη διαδικασία καταγραφής της κίνησης τοποθετείται ένα πλήθος (46) οπτικών αισθητήρων / ανακλαστήρων (*optical markers*), πάνω στο σώμα των ατόμων (Σχήμα 3-2), προκειμένου να καταγραφούν οι τροχιές τους στο χώρο (*3D trajectories*), κατά τη διάρκεια κίνησης των ανθρώπων, από ένα οπτικό σύστημα αιχμαλώτισης κίνησης. Στο Σχήμα 3-3 παρουσιάζονται οι ακριβείς θέσεις τοποθέτησης των ανακλαστήρων πάνω στο ανθρώπινο σώμα, καθώς επίσης αναφέρεται και η συνοπτική και πλήρη ονομασία τους.

Σχήμα 3-2. Τοποθέτηση ανακλαστήρων στο σώμα για την καταγραφή της κίνησης του ανθρώπου από οπτικό σύστημα καταγραφής κινήσεων [LAB, 2001]

Α/Α Ανακλαστήρα	Συνομογραφία Ονόματος	Πλήρες Όνομα Ανακλαστήρα
1	TESO	Head, Top
2	TEDR	Temple, Right
3	TEGA	Temple, Left
4	FRON	Glabella
5	EPGA	Acromion, Left
6	BRGH	Arm, Top, Left
7	BRGA	Arm, Left
8	BIGA	Biceps, Left
9	COGA	Humeral Epicondyle, Lateral; Left
10	ABGE	Forearm, Exterior, Left
11	ABGA	Forearm, Left
12	POGA	Styloid, Left
13	DOGA	Dactylion, Left
14	EPDR	Acromion, Right
15	BRDR	Arm, Right
16	BIDR	Biceps, Right
17	CODR	Humeral Epicondyle, Lateral; Right
18	ABDE	Forearm, Exterior, Right
19	ABDR	Forearm, Right
20	PODR	Styloid, Right
21	DODR	Dactylion, Right
22	HAPT	Suprasternale
23	PTGA	Thelion/Bustpoint, Left
24	PTDR	Thelion/Bustpoint, Right
25	STER	Substernale
26	TRGA	Trochanterion, Left
27	CUGH	Thigh, Top, Left
28	CUGA	Thigh, Left
29	CEGA	Thigh, Exterior, Left
30	GEGA	Femoral Epicondyle, Lateral; Left
31	TIGE	Shin, Exterior, Left
32	TIGA	Shin, Left
33	CHGA	Malleolus, Medial; Left
34	TAGA	Calcaneus, Posterior; Left
35	PEGA	Metatarsal-Phalangeal V, Left
36	ORGA	Digit II, Left
37	TRDR	Trochanterion, Right
38	CUDR	Thigh, Right
39	CEDR	Thigh, Exterior, Right
40	GEDR	Femoral Epicondyle, Lateral; Right
41	TIDE	Shin, Exterior, Right
42	TIDR	Shin, Exterior, Right
43	CHDR	Malleolus, Medial; Right
44	TADR	Calcaneus, Posterior; Right
45	PEDR	Metatarsal-Phalangeal V, Right
46	ORDR	Digit II, Right

Σχήμα 3-3. Σημεία τοποθέτησης πάνω στο ανθρώπινο σώμα και ονομασία των ανακλαστήρων που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της ανθρώπινης κίνησης [LAB, 2001]

Με σκοπό τη ρεαλιστικότερη εκτέλεση της κίνησης εισόδου ενός ανθρώπου στη θέση οδηγού ενός αυτοκινήτου, χρησιμοποιήθηκε τμήμα πραγματικού μοντέλου αυτοκινήτου ως πειραματική διάταξη στα πειράματα καταγραφής των ανθρωπίνων κινήσεων (Σχήμα 3-4).

Σχήμα 3-4. Τμήμα πραγματικού μοντέλου αυτοκινήτου που χρησιμοποιήθηκε ως πειραματική διάταξη για την καταγραφή των ανθρωπίνων κινήσεων [LAB, 2001]

Για την καταγραφή των κινήσεων που μελετήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, χρησιμοποιήθηκε το οπτικό σύστημα καταγραφής κίνησης (*motion capture system*) της εταιρείας *Vicon* [Vicon, 2009]. Στο σύστημα *Vicon* χρησιμοποιούνται 9 κάμερες και ο ρυθμός με τον οποίο έγινε η δειγματοληψία των δεδομένων κίνησης από το σύστημα ήταν 50 Hz. Δηλαδή το σύστημα κατέγραφε σε πραγματικό χρόνο 50 στιγμιότυπα κίνησης το δευτερόλεπτο. Έτσι λοιπόν για μία κίνηση διάρκειας 20 δευτερολέπτων καταγράφονται από το σύστημα 1000 στιγμιότυπα κίνησης.

Από την καταγραφή αυτή προκύπτει τελικά ένα αρχείο ψηφιακής μορφής, που περιγράφει τη συνολική κίνηση του ατόμου που εκτέλεσε την πειραματική διαδικασία. Το οπτικό σύστημα καταγραφής κίνησης έχει τη δυνατότητα να καταγράψει τις μεταφορικές κινήσεις των ανακλαστήρων στο χώρο και ως εκ τούτου η κίνησή τους περιγράφεται από διαδοχικά στιγμιότυπα κίνησης (*motion frames*), κάθε ένα εκ των οποίων περιγράφεται από τις απόλυτες συντεταγμένες (*global coordinates*) κάθε ενός ανακλαστήρα στο χώρο. Για την καλύτερη κατανόηση του αποτελέσματος αυτής της διαδικασίας, στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα παραμετρικό αρχείο καταγραφής κίνησης, που αποτελείται από m πλήθος ανακλαστήρων και n πλήθος στιγμιότυπων κίνησης.

$X_1(1), Y_1(1), Z_1(1)$	$X_1(2), Y_1(2), Z_1(2)$	...	$X_1(n), Y_1(n), Z_1(n)$
$X_2(1), Y_2(1), Z_2(1)$	$X_2(2), Y_2(2), Z_2(2)$	...	$X_2(n), Y_2(n), Z_2(n)$
...	...	...	...
$X_m(1), Y_m(1), Z_m(1)$	$X_m(2), Y_m(2), Z_m(2)$	...	$X_m(n), Y_m(n), Z_m(n)$
$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{1^\circ \text{ στιγμιότυπο}}$	$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{2^\circ \text{ στιγμιότυπο}}$		$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{n^\circ \text{ στιγμιότυπο}}$

3.2 Ανάλυση ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών

Η ανάλυση των ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών πραγματοποιήθηκε με σκοπό την επιλογή των **παραγόντων** (ανεξάρτητων μεταβλητών) που επηρεάζουν την ανθρώπινη κίνηση. Όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα (Πειραματικά δεδομένα) μόνο ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά και δεδομένα κίνησης καταγράφηκαν για κάθε συμμετέχοντα κατά την πειραματική διαδικασία. Επομένως, η επιλογή των ανεξάρτητων μεταβλητών (παραγόντων), που επηρεάζουν την ανθρώπινη κίνηση, έγινε με βάση τα 14 ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά που είχαν καταγραφεί για κάθε συμμετέχοντα. Καθοριστικοί παράγοντες για την επιλογή των μεταβλητών ήταν τόσο η εξασφάλιση της προφανής και ουσιαστικής συνεισφοράς (επιρροής) στην κίνηση ενδιαφέροντος (εισόδου στη θέση του οδηγού), όσο και η αποφυγή της επιλογής μεταβλητών που σχετίζονται μεταξύ τους.

Αρχικά, επιλέχθηκε ως πρώτος παράγοντας το **Ανάστημα (Body Height – BH)** του ανθρώπου, καθώς ήταν ξεκάθαρη, από την οπτική παρατήρηση των βίντεο της πειραματικής διαδικασίας, η καθοριστική επίδραση του, στη διαφοροποίηση της “κίνησης ενδιαφέροντος”. Το επόμενο βήμα ήταν ο προσδιορισμός και η απομάκρυνση των μεταβλητών που σχετίζονται με τον πρώτο παράγοντα (Ανάστημα). Από τα δεκατρία εναπομείναντα ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά, τα έξι (Μήκος ποδιού, Ύψος σε θέση καθίσματος, Μήκος γλουτού-γονάτου, Ύψος γονάτου, Μήκος άνω βραχίονα και Μήκος κάτω βραχίονα) σχετίζονται με το Ανάστημα του ανθρώπου [Pheasant, 1998] και για το λόγο αυτό εξαλείφονται από τη διαδικασία επιλογής παραγόντων. Για τα υπόλοιπα επτά ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά (Πλάτος ώμων, Πλάτος λεκάνης, Προφίλ στήθους, Περιφέρεια μέσης, Ευλυγισία, Ύψος κεφαλιού και Πλάτος κεφαλιού) δημιουργήθηκαν διαγράμματα συσχέτισης (*correlation diagrams*) για τον εντοπισμό των μεταβλητών που είναι ανεξάρτητες του Αναστήματος. Από τη διαδικασία αυτή προέκυψε ότι το **Πλάτος λεκάνης (Hip Width – HW)** και η **Ευλυγισία (Spinal Flexibility – SF)** οι μόνες μεταβλητές που είναι ανεξάρτητες του Αναστήματος. Με βάση τα παραπάνω, οι παράγοντες και το εύρος τιμών τους, όπως προκύπτει από τις ανθρωπομετρικές μετρήσεις (Πίνακας 3-2), συνοψίζονται παρακάτω (Πίνακας 3-3).

	Ανθρωπομετρικό χαρακτηριστικό	Εύρος τιμών (βάσει των 23 συμ/ντων)
Παράγοντας 1	Ανάστημα (<i>BH</i>)	1570 – 1900 mm
Παράγοντας 2	Πλάτος Λεκάνης (<i>HW</i>)	310 – 430 mm
Παράγοντας 3	Ευλυγισία (<i>SF</i>)	74° – 110°

Πίνακας 3-3. Παράγοντες που επιλέχθηκαν για την ανάλυση της ανθρώπινης κίνησης και εύροι τιμών

3.3 Προ-επεξεργασία δεδομένων κίνησης

Το πρώτο στάδιο της ανάλυσης της ανθρώπινης κίνησης περιλαμβάνει την προετοιμασία (προ-επεξεργασίας) των δεδομένων που έχουν καταγραφεί από την πειραματική διαδικασία. Τα επιμέρους στάδια προ-επεξεργασίας των δεδομένων είναι:

- ⇒ **Επιλογή των “κρίσιμων” ανακλαστήρων** που μελετήθηκαν.
- ⇒ **Απομόνωση / εξαγωγή της “κίνησης ενδιαφέροντος”** από τη συνολική κίνηση που έχει καταγραφεί από το σύστημα.
- ⇒ **Εντοπισμός του κύριου άξονα κίνησης** με χρήση διαγραμματικής αναπαράστασης των τροχιών των ανακλαστήρων στο χώρο.
- ⇒ Εφαρμογή γραμμικής παρεμβολής για την **κανονικοποίηση των κινήσεων στο χώρο** (βάσει του κύριου άξονα της κίνησης).

3.3.1 Επιλογή “κρίσιμων” ανακλαστήρων

Η κίνηση της εισόδου στο αυτοκίνητο περιλαμβάνει προφανείς κινήσεις από όλα τα μέλη του σώματος. Παρά το γεγονός όμως ότι ολόκληρο το σώμα συμμετέχει στην κίνηση αυτή, υπάρχουν κάποια συγκεκριμένα μέλη του σώματος των οποίων η συνεισφορά είναι πιο σημαντική. Τέτοια μέλη είναι οι βραχίονες, τα χέρια, τα γόνατα, η μέση και οι ώμοι. Λαμβάνοντας υπόψη τη συνεισφορά αυτών των μελών στην κίνηση της εισόδου στο αυτοκίνητο, έγινε κατάλληλη επιλογή των έξι (6) πιο **“κρίσιμων” ανακλαστήρων**, που αποτέλεσαν τη βάση της μελέτης και της ανάλυσης των δεδομένων κίνησης, η περιγραφή των οποίων παρουσιάζεται στη συνέχεια. Η επιλογή των ανακλαστήρων 5 και 14 (τοποθετημένοι στους ώμους) κρίνεται σημαντική, καθώς η κίνησή τους μας παρέχει πληροφορίες για τις περιστροφικές κινήσεις του κορμού, καθώς επίσης και για το λυγισμό της μέσης. Οι ανακλαστήρες 26 και 37 (τοποθετημένοι αντιδιαμετρικά της λεκάνης) καλύπτουν την περιοχή της μέσης παρέχοντας ένα σημείο αναφοράς για τον καθορισμό της μεταφορικής κίνησης του κορμού καθώς επίσης και του σκυψίματος του άνω σώματος ή του λυγισμού των γονάτων. Τέλος οι ανακλαστήρες 30 και 40 (τοποθετημένοι στα γόνατα) επιλέχθηκαν να μελετηθούν καθώς δίνουν μια γενική εικόνα για την κίνηση των ποδιών. Οι ακριβείς θέσεις των “κρίσιμων” ανακλαστήρων εμφανίζονται στο Σχήμα 3-3 (αριστερά), περικυκλωμένα με διακεκομμένη γραμμή και τα ονόματά τους εμφανίζονται στη λίστα ονομάτων με γκρι σκίαση (Σχήμα 3-3, δεξιά).

3.3.2 Απομόνωση της “κίνησης ενδιαφέροντος”

Η συνολική κίνηση που έχει καταγραφεί από το σύστημα κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μπορεί να διαιρεθεί σε επιμέρους μικρότερες κινήσεις. Η συνολική κίνηση του κάθε ατόμου ξεκινά σε όρθια στάση, από μια θέση που έχει οριστεί ως αρχική. Η αρχική θέση βρίσκεται λίγα εκατοστά μακριά από την πόρτα του αυτοκινήτου, με το συμμετέχοντα να στέκεται όρθιος με την πλάτη στο αυτοκίνητο (Σχήμα 3-5, α). Στη συνέχεια, το άτομο κάνοντας μερικά βήματα πλησιάζει εξωτερικά την πόρτα του αυτοκινήτου και την ανοίγει (Σχήμα 3-5, β-δ). Εν συνεχεία, έχοντας ανοιχτή την πόρτα, εισέρχεται (Σχήμα 3-5, ε), κάθεται (Σχήμα 3-5, στ) και τελικά βγαίνει κινούμενο προς την αρχική θέση (Σχήμα 3-5, ζ-θ).

Σχήμα 3-5. Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα από την πειραματική διαδικασία καταγραφής της κίνησης εισόδου-εξόδου στη θέση του οδηγού αυτοκινήτου από όρθια στάση [LAB, 2001]

Η κίνηση θεωρείται ολοκληρωμένη τη στιγμή που το άτομο έχει επιστρέψει στην αρχική του θέση. Στο πλαίσιο του κεφαλαίου αυτού επιλέχθηκε να μελετηθεί η κίνηση εισόδου στη θέση του οδηγού από όρθια στάση, που αποτελεί και το πιο πολύπλοκο μέρος της συνολικής

κίνησης, καθώς συμπεριλαμβάνει την κίνηση όλων σχεδόν των μελών του σώματος. Έτσι, μελετώντας την κίνηση εισόδου, παρέχεται η δυνατότητα της άντλησης συμπερασμάτων που αφορούν στον ειδικό τρόπο με τον οποίο κάθε μέλος του σώματος κινείται κατά την εκτέλεση της συνολικής κίνησης.

Για την **απομόνωση / εξαγωγή της κίνησης ενδιαφέροντος από τη συνολική κίνηση**, είναι απαραίτητος ο καθορισμός του αρχικού και του τελικού σημείου καθορισμού (στιγμιότυπο έναρξης και λήξης) της επιμέρους αυτής κίνησης. Η κίνηση της εισόδου ξεκινά τη στιγμή που ο συμμετέχοντας έχει ήδη ανοίξει την πόρτα και κινείται προς τη θέση του οδηγού (στιγμιότυπο έναρξης) και τελειώνει τη στιγμή που έχει καθίσει στο κάθισμα, έχοντας τοποθετήσει τα χέρια του στο τιμόνι και τα πόδια του στα πετάλια (στιγμιότυπο λήξης).

Ο προσδιορισμός του στιγμιότυπου έναρξης και λήξης της κίνησης εισόδου για κάθε άτομο πραγματοποιήθηκε οπτικά, με ταυτόχρονη μελέτη τόσο των διαθέσιμων βίντεο όσο και των αρχείων κίνησης που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Τα στιγμιότυπα έναρξης και λήξης της κίνησης εισόδου κάθε συμμετέχοντα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-4.

A/A Συμ/ντος	Στιγμιότυπο έναρξης	Στιγμιότυπο λήξης	A/A Συμ/ντος	Στιγμιότυπο έναρξης	Στιγμιότυπο λήξης
1	240	460	13	447	730
2	335	515	14	300	543
3	198	413	15	231	497
4	309	579	16	269	476
5	310	472	17	366	522
6	231	448	18	267	488
7	265	533	19	281	521
8	274	529	20	271	489
9	264	533	21	323	540
10	185	381	22	221	419
11	215	372	23	410	537
12	303	573			

Πίνακας 3-4. Στιγμιότυπο έναρξης και λήξης της επιμέρους κίνησης εισόδου για όλους τους συμμετέχοντες στην πειραματική διαδικασία καταγραφής κίνησης

3.3.3 Εντοπισμός του κύριου άξονα της κίνησης

Στη συνέχεια κάνοντας χρήση των αρχείων καταγραφής κίνησης δημιουργούμε τρισδιάστατα γραφήματα των τροχιών των “κρίσιμων” ανακλαστήρων για την επιμέρους κίνηση, εισόδου στη θέση του οδηγού (κίνηση ενδιαφέροντος). Στο Σχήμα 3-6 παρουσιάζονται ένα τυχαίο παράδειγμα **διαγραμματικής αναπαράστασης της κίνησης**

(τροχιάς) ενός από τους “κρίσιμους” ανακλαστήρες στο χώρο για την κίνηση εισόδου στη θέση του οδηγού και για όλους τους συμμετέχοντες.

Σχήμα 3-6. Διαγραμματική αναπαράσταση της τροχιάς ενός “κρίσιμου” ανακλαστήρα στο χώρο, κατά την κίνηση εισόδου στη θέση του οδηγού, για όλους τους συμμετέχοντες

Οι τροχιές αυτές με μια πρώτη ματιά δείχνουν παρόμοιες, όμως μια πιο λεπτομερής παρατήρηση δείχνει ότι αναμφισβήτητα εμπεριέχουν διαφορές. Η ανάλυσή που εφαρμόζεται στη συνέχεια του κεφαλαίου στοχεύει στην ποσοτικοποίηση αυτής της διαφοράς με σκοπό την κατανόηση της διαφορετικότητας / διακύμανσης της ανθρώπινης κίνησης. Σε πρώτη φάση, η παρατήρηση της διαγραμματικής απεικόνισης των τροχιών στο χώρο παρέχει μια έγκυρη ένδειξη για τον **εντοπισμό του κύριου άξονα στον οποίο εξελίσσεται η κίνηση**. Έτσι λοιπόν, παρατηρώντας τα διαγράμματα στο Σχήμα 3-6 και τον προσανατολισμό του απόλυτου συστήματος συντεταγμένων (σύστημα αναφοράς) που φαίνεται στο Σχήμα 3-7, γίνεται φανερό πως στην περίπτωση της κίνησης εισόδου στη θέση του οδηγού, ο κύριος άξονας της κίνησης είναι ο άξονας Y . Η μαθηματική απόδειξη της παρατήρησης αυτής προκύπτει από τον υπολογισμό της μονοτονίας της συνάρτησης $y(t)$, η οποία μακροσκοπικά χαρακτηρίζεται ως αύξουσα στο μεγαλύτερο μέρος της κίνησης. Επιπλέον ένδειξη που συντελεί στην ανάδειξη του άξονα Y ως κύριου άξονα της κίνησης είναι το γεγονός ότι η συνάρτηση $y(t)$ αυξάνει ταχύτερα από τις αντίστοιχες συναρτήσεις $x(t)$ και $z(t)$.

Σχήμα 3-7. Προσανατολισμός του απόλυτου συστήματος συντεταγμένων (σύστημα αναφοράς) της πειραματικής διάταξης καταγραφής ανθρωπίνων κινήσεων [LAB, 2001]

3.3.4 Κανονικοποίηση των κινήσεων στο χώρο με γραμμική παρεμβολή

Ο Πίνακας 3-4 κάνει εμφανές το γεγονός ότι η απομονωμένη / εξαγόμενη κίνηση ενδιαφέροντος (είσοδος στη θέση του οδηγού) απαρτίζεται από διαφορετικό συνολικό πλήθος στιγμιότυπων κίνησης (*frames*) για κάθε συμμετέχοντα. Έτσι λοιπόν, υπήρξε προφανής η ανάγκη μιας μεθόδου ή ενός εργαλείου που θα έκανε τη σύγκριση των κινήσεων εφικτή. Η τοποθέτηση των κινήσεων των συμμετεχόντων στον άξονα του χρόνου και η επιλογή ενός σημείου ως αρχικού δεν καθιστά δυνατή τη σύγκριση των κινήσεων, διότι τα άτομα

εκτέλεσαν τα πειράματα το καθένα με διαφορετική ταχύτητα και άρα το κάθε πείραμα είχε διαφορετική διάρκεια (πλήθος στιγμιότυπων). Η διαπίστωση αυτή επισφράγισε, από τη μία πλευρά, την απόρριψη της ιδέας της ανάλυσης στο χρόνο και ενίσχυσε, από την άλλη, την υιοθέτηση της εναλλακτικής λύσης για την ανάλυση της κίνησης στο χώρο. Στοχεύοντας στη σύγκριση των κινήσεων των ανθρώπων στο χώρο, κρίθηκε απαραίτητη η **εφαρμογή γραμμικής παρεμβολής για την κανονικοποίηση των κινήσεων στο χώρο (βάσει του κύριου άξονα της κίνησης)**. Έχοντας ήδη επιλεγεί ο άξονας Y ως κύριος άξονας της κίνησης εισόδου, αποφασίστηκε η υποδιαίρεση της κίνησης του κάθε συμμετέχοντα σε 50 ισομερή τμήματα. Οι 50 αυτές συντεταγμένες στον άξονα Y (κοινές για όλα τα άτομα) χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση των κινήσεων επί κοινής βάσης. Διαθέτοντας 50 συντεταγμένες στον άξονα Y , από τις οποίες όλα ανεξαιρέτως τα άτομα έχουν περάσει κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, ήταν πλέον εφικτή η σύγκριση των κινήσεων. Για την παραγωγή των 50 συντεταγμένων οι οποίες θα είναι κοινές για όλα τα άτομα, εφαρμόστηκε γραμμική παρεμβολή στην ακολουθία των συντεταγμένων του άξονα Y που τοποθετημένες στη σειρά σχηματίζουν την κίνηση σε αυτόν τον άξονα. Η αρχική και η τελική συντεταγμένη επιλέχθηκαν κατά τέτοιο τρόπο που να εξασφαλίζεται πως παράγουν ένα εύρος τιμών, εντός του οποίου, όλα τα άτομα έχουν κινηθεί κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Αυτό διασφαλίζεται ακολουθώντας την εξής διαδικασία: Αρχικά υπολογίζεται η ελάχιστη (*minimum*) και η μέγιστη (*maximum*) τιμή των συντεταγμένων στον άξονα Y για κάθε ένα από τους 23 συμμετέχοντες. Στη συνέχεια από αυτά τα σύνολα των 23 μεγίστων και ελαχίστων, υπολογίζεται το *supremum*, δηλαδή το μέγιστο του συνόλου που περιέχει τις ελάχιστες τιμές, και το *infimum* το οποίο αντίστοιχα είναι το ελάχιστο του συνόλου των μεγίστων τιμών. Κατά αυτόν τον τρόπο έχει πλέον σχηματιστεί ένα κατάλληλο εύρος εντός του οποίου κινήθηκαν όλοι οι συμμετέχοντες και αυτό που απομένει είναι η εφαρμογή της γραμμικής παρεμβολής με βάση τα όρια που έχουν τεθεί. Το αποτέλεσμα της γραμμικής παρεμβολής είναι ο σχηματισμός μιας ακολουθίας αποτελούμενης από 50 συντεταγμένες στον άξονα Y , οι οποίες αντιστοιχούν στα 50 κοινά για όλους τους συμμετέχοντες χαρακτηριστικά αποσπάσματα της κίνησης εισόδου. Η περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων κίνησης βασίζεται σε αυτά τα 50 χαρακτηριστικά αποσπάσματα.

3.4 Ανάλυση δεδομένων κίνησης

Η κίνηση της εισόδου στο αυτοκίνητο είναι μια σύνθετη κίνηση στην οποία εμπλέκονται σχεδόν όλα τα ανθρώπινα μέλη. Επιπροσθέτως, η ταχύτητα με την οποία εκτελείται η κίνηση αυτή, ποικίλει σημαντικά από πείραμα σε πείραμα. Για το λόγο αυτό, δεν είναι εφικτό να συγκριθούν οι καταγεγραμμένες κινήσεις στο χρόνο, ακόμη και αν ήταν δυνατή η κανονικοποίησή τους. Με σκοπό να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, μια νέα προσέγγιση ανάλυσης προτείνεται, η οποία εξαλείφει το χρόνο κάνοντας χρήση μόνο των χωρικών συντεταγμένων των ανακλαστήρων. Η προτεινόμενη προσέγγιση απαρτίζεται από τα ακόλουθα βήματα:

- ⇒ Προσδιορισμός των διαφορετικών στρατηγικών κίνησης και **κατηγοριοποίηση των καταγεγραμμένων κινήσεων** με βάση την στρατηγική που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε περίπτωση. Οι διαφορετικές στρατηγικές κίνησης καθορίζονται βάσει των ομοιοτήτων και διαφορών που προκύπτουν από την ανάλυση των καταγεγραμμένων κινήσεων.
- ⇒ Καθορισμός των ελαχίστων δυνατών πειραμάτων (βάσει του Στατιστικού Σχεδιασμού Πειραμάτων) που πρέπει να εκτελεστούν ώστε να προκύψει μια αποτελεσματική ανάλυση της ανθρώπινης κίνησης. Με χρήση της **Ανάλυσης της Διακύμανσης των κινήσεων**, ποσοτικοποιείται η επιρροή των παραγόντων (ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών) που επηρεάζουν την ανθρώπινη κίνηση και δημιουργείται μια ακολουθία συναρτήσεων που περιγράφουν τις κινήσεις των ανθρώπων στο χώρο.
- ⇒ Δημιουργία συναρτήσεων κίνησης (τροχιών ανακλαστήρων) κάνοντας χρήση του προσθετικού μοντέλου (additive model). Βάσει των αποτελεσμάτων της Ανάλυσης της Διακύμανσης, γίνεται **ανάπτυξη ημι-εμπειρικών μοντέλων κίνησης**, τα οποία συσχετίζουν την επίδραση των τριών παραγόντων (Ανάστημα, Πλάτος λεκάνης, Ευλυγισία) με τη θέση κάθε αισθητήρα στο χώρο για κάθε μία από τις 50 y συντεταγμένες (στιγμιότυπα κίνησης) που καθορίστηκαν στην ενότητα 3.3.4.
- ⇒ Τέλος πραγματοποιείται διαδικασία **επαλήθευσης των μοντέλων κίνησης**, κάνοντας σύγκριση των πραγματικών (καταγεγραμμένων) κινήσεων με εκείνες που προκύπτουν από τα ημι-εμπειρικά (προσθετικά) μοντέλα κίνησης.

3.4.1 Κατηγοριοποίηση κινήσεων

Οι άνθρωποι πολλές φορές είναι εφικτό να αναγνωριστούν από τον τρόπο που κινούνται (π.χ. από τον τρόπο / στυλ περπατήματος ή τρεξίματος), ακόμη και αν αυτός βρίσκεται πολύ μακριά για να θεωρηθεί αναγνωρίσιμος. Κατά τον ίδιο τρόπο, οι άνθρωποι έχουν αναπτύξει απολύτως προσωπικούς τρόπους / στυλ εκτέλεσης σύνθετων κινήσεων, όπως είναι αυτή της εισόδου στη θέση οδηγού ενός αυτοκινήτου. Οι τρόποι αυτοί, πέρα από τον τύπο του σώματος του κάθε ανθρώπου, συνδέονται άμεσα και με τον παράγοντα της συνήθειας ή ακόμα και με άλλους παράγοντες. Με τον όρο “**στρατηγική κίνησης**” (*motion strategy*) περιγράφουμε τον τρόπο με τον οποίο ένας άνθρωπος εκτελεί μια συγκεκριμένη κίνηση. Η προσεκτική παρατήρηση βίντεο, της εκτέλεσης των πειραμάτων από τους συμμετέχοντες, συντέλεσε στο πρώτο συμπέρασμα, σχετικό με την ανάλυση των δεδομένων κίνησης. Με βάση τα βίντεο αυτά και πιο συγκεκριμένα εστιάζοντας στην κίνηση εισόδου, τη στιγμή που αυτοί εισέρχονται στο όχημα, παρατηρήθηκε ότι οι συμμετέχοντες ακολούθησαν 5 διαφορετικούς τρόπους / στυλ (στρατηγικές κίνησης) εισόδου στη θέση του οδηγού. Οι 5 διαφορετικές στρατηγικές κίνησης που ακολουθήθηκαν αφορούσαν στο τρόπο που χρησιμοποιούσαν τα χέρια τους για την υποστήριξη του υπόλοιπου σώματος κατά τη διαδικασία εισόδου στη θέση του οδηγού. Οι 5 διαφορετικές στρατηγικές κίνησης είναι:

1. Δεξί χέρι στο τιμόνι, αριστερό χέρι στην πόρτα (Σχήμα 3-8, α)
2. Δεξί χέρι ελεύθερο, αριστερό χέρι στην πόρτα (Σχήμα 3-8, β)
3. Δεξί και αριστερό χέρι ελεύθερα (Σχήμα 3-8, γ)
4. Δεξί και αριστερό χέρι στο τιμόνι (Σχήμα 3-8, δ)
5. Δεξί χέρι στο τιμόνι, αριστερό χέρι ελεύθερο (Σχήμα 3-8, ε)

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε στατιστική ανάλυση στα διαθέσιμα δεδομένα κίνησης. Αρχικά, έχοντας διαθέσιμη μια διαμέριση της συνολικής κίνησης εισόδου σε 50 συντεταγμένες στον άξονα Y , οι οποίες παράχθηκαν κατά την εφαρμογή της γραμμικής παρεμβολής, έγινε προσέγγιση της πραγματικής κατανομής των ατόμων στους άξονες X ή Z για κάθε ένα από τα 50 αυτά στιγμιότυπα, βάσει της κανονικής κατανομής. Η στατιστική επεξεργασία έλαβε χώρα με αντικείμενο τη δομή και τα χαρακτηριστικά μεγέθη που αντιστοιχούν στην κανονική κατανομή που ήταν υπό μελέτη σε κάθε περίπτωση. Κατά αυτόν τον τρόπο αντλήθηκαν πληροφορίες για τη μέση, την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή που παρατηρήθηκε στις κινήσεις των είκοσι-τριών ατόμων για κάθε μια από τις 50 y συντεταγμένες. Επίσης υπολογίστηκε η τιμή της τυπικής απόκλισης σ που αντιστοιχεί στην

κάθε κατανομή, η οποία αποτέλεσε ένδειξη για την ομοιότητα των κινήσεων. Όσο μικρότερη η τιμή της τυπικής απόκλισης, τόσο πιο όμοιες θεωρήθηκαν οι κινήσεις. Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης που εφαρμόστηκε συντέλεσε στην κατηγοριοποίηση των καταγεγραμμένων κινήσεων στις 5 διαφορετικές στρατηγικές κίνησης, όπως αυτές ορίζονται παραπάνω (Σχήμα 3-8).

Σχήμα 3-8. Διαφορετικές στρατηγικές κίνησης εισόδου στη θέση του οδηγού που ακολουθήθηκαν από τους συμμετέχοντες [LAB, 2001]

3.4.2 Ανάλυση διακύμανσης κινήσεων

Η Ανάλυση της Διακύμανσης (*ANalysis Of VAriance – ANOVA*) είναι μια στατιστική μέθοδος με την οποία η μεταβλητότητα που υπάρχει σ' ένα σύνολο δεδομένων διασπάται στις επιμέρους συνιστώσες της με στόχο την κατανόηση της σημαντικότητας των διαφορετικών πηγών προέλευσής της. Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας οφείλεται στον θεμελιωτή της σύγχρονης στατιστικής επιστήμης, άγγλο στατιστικό *Sir Ronald Aylmer Fisher* (1890-1962) [Fisher, 1925]. Στην πραγματικότητα η *ANOVA* περιλαμβάνει μία ομάδα στατιστικών μεθόδων καταλλήλων για την ανάλυση δεδομένων που προκύπτουν από πειραματικούς σχεδιασμούς. Τα δεδομένα ενός δείγματος ανάλογα με την προέλευσή τους διακρίνονται σε παρατηρήσεις (*observational sampling*) ή σε πειραματικά (*designed sampling*). Στην πρώτη

κατηγορία ο στατιστικός ερευνητής απλά παρατηρεί τις τιμές που εμφανίζονται χωρίς να έχει δυνατότητα επέμβασης στις αντίστοιχες μεταβλητές. Αντίθετα στη δεύτερη κατηγορία ο στατιστικός ερευνητής προσπαθεί να ελέγξει τα επίπεδα μίας ή περισσότερων ανεξάρτητων (*independent*) μεταβλητών προκειμένου να προσδιορίσει την επίδραση που έχουν πάνω στην υπό μελέτη μεταβλητή που καλείται εξαρτημένη (*dependent*) ή απόκριση (*response*). Στόχος κάθε στατιστικού πειράματος είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών πάνω στην απόκριση. Οι μεταβλητές αυτές αναφέρονται συνήθως σαν παράγοντες (*factors*) και μπορεί να είναι είτε ποσοτικές είτε ποιοτικές. Οι τιμές του παράγοντα που προσδιορίζονται στο πείραμα λέγονται επίπεδα (*levels*). Σε ένα πείραμα με ένα παράγοντα οι μεταχειρίσεις (*treatments*) του πειράματος είναι τα επίπεδα του παράγοντα. Σε ένα πείραμα με δύο ή περισσότερους παράγοντες οι μεταχειρίσεις είναι οι συνδυασμοί παραγόντων-επιπέδων.

Βασιζόμενοι στη θεωρία του Στατιστικού Σχεδιασμού Πειραμάτων έλαβε χώρα Ανάλυση της Διακύμανσης που αποσκοπούσε στην ποσοτικοποίηση της επιρροής των παραγόντων στην ανθρώπινη κίνηση. Χρησιμοποιώντας τον **τυποποιημένο πίνακα των ορθογώνιων μητρώων** (*standard orthogonal array*), για την περίπτωση των τριών παραγόντων, υποδείχθηκε πως ο αριθμός των επιπέδων στα οποία θα χωριστεί το εύρος των παραγόντων θα είναι δυο. Επομένως, με βάση τη θεωρία, ο πίνακας που θα χρησιμοποιηθεί για την επιλογή των πειραμάτων για την Ανάλυση της Διακύμανσης, θα είναι της εξής μορφής (Πίνακας 3-5):

	Παράγοντας 1	Παράγοντας 2	Παράγοντας 3
Πείραμα 1	Επίπεδο 1	Επίπεδο 1	Επίπεδο 1
Πείραμα 2	Επίπεδο 1	Επίπεδο 2	Επίπεδο 2
Πείραμα 3	Επίπεδο 2	Επίπεδο 1	Επίπεδο 2
Πείραμα 4	Επίπεδο 2	Επίπεδο 2	Επίπεδο 1

Πίνακας 3-5. L4 τυποποιημένος πίνακας ορθογώνιων μητρώων για την Ανάλυση της Διακύμανσης

Επόμενο βήμα ήταν ο καθορισμός του εύρους τιμών των επιπέδων για κάθε παράγοντα. Καθώς ο πίνακας τυποποιημένων μητρώων υπέδειξε τον διαχωρισμό του εύρους σε δύο επίπεδα, έπρεπε να εξασφαλισθεί πως κάθε επίπεδο θα περιείχε, κατά προσέγγιση, το 50% του πληθυσμού των συμμετεχόντων. Αυτό διασφαλίζεται μόνο εάν προσεγγιστεί η κατανομή των ανθρωπομετρικών στοιχείων των 23 ατόμων από κανονική κατανομή και στη συνέχεια επιλεγεί η μέση τιμή της κατανομής αυτής ως όριο εύρους του επιπέδου του εν λόγω παράγοντα. Έτσι λοιπόν, προσεγγίζοντας με κανονική κατανομή τις 23 τιμές του κάθε ένα παράγοντα επιρροής, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές τους. Από την εφαρμογή της κανονικής

κατανομής προέκυψε ότι η μέση τιμή του πρώτου παράγοντα (Ανάστημα / *Body Height – BW*) είναι 1730mm, για το δεύτερο (Πλάτος λεκάνης / *Hip Width – HW*) είναι 354mm, και για τον τρίτο (Ευλυγισία / *Spinal Flexibility – SF*) είναι 91,5° αντίστοιχα. Με βάση τις τιμές αυτές σχηματίζεται ο Πίνακας 3-6 που αποτελεί τον πίνακα τυποποιημένων μητρώων L4, προσαρμοσμένο στους παράγοντες του προβλήματος που επιχειρούμε να προσεγγίσουμε.

Στη συνέχεια επιλέχθηκαν οι συμμετέχοντες, των οποίων τα πειράματα πληρούσαν τις προϋποθέσεις της θεωρίας (Πίνακας 3-5) και τελικά επιλέχθηκαν για τη διαδικασία της ανάλυσης. Έτσι για παράδειγμα, για το πείραμα 1, από τους συνολικά 23 συμμετέχοντες στην πειραματική διαδικασία, μόνο ο 4^{ος}, 8^{ος}, 17^{ος}, 20^{ος}, 21^{ος} και 23^{ος} πληρούν τις προϋποθέσεις του επιθυμητού συνδυασμού παραγόντων-επιπέδων, καθώς οι τιμές των τριών παραγόντων (ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών) ανήκουν στο αντίστοιχο εύρος των επιθυμητών επιπέδων, όπως ορίζει ο Πίνακας 3-6. Από τους παραπάνω συμμετέχοντες, τελικά επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για το 1^ο πείραμα, ο 20^{ος} συμμετέχοντας, καθώς τα ανθρωπομετρικά του χαρακτηριστικά είναι πιο αντιπροσωπευτικά του πειράματος 1 (βρίσκονται πιο κοντά στη μέση τιμή του εύρους, των επιπέδων, για κάθε παράγοντα). Ακολουθώντας την ίδια λογική επιλέχθηκαν και οι υπόλοιποι τρεις συμμετέχοντες, των οποίων τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν για την Ανάλυση της Διακύμανσης (Πίνακας 3-6).

	Ανάστημα (BH)	Πλάτος λεκάνης (HW)	Ευλυγισία (SF)	A/A Συμ/ντος
Πείραμα 1	Επίπεδο 1 (1570mm – 1730mm)	Επίπεδο 1 (310mm – 354mm)	Επίπεδο 1 (74,0° – 91,5°)	4, 8, 17, 20 , 21, 23
Πείραμα 2	Επίπεδο 1 (1570mm – 1730mm)	Επίπεδο 2 (355mm – 430mm)	Επίπεδο 2 (91,6° – 110,0°)	2
Πείραμα 3	Επίπεδο 2 (1740mm – 1900mm)	Επίπεδο 1 (310mm – 354mm)	Επίπεδο 2 (91,6° – 110,0°)	6
Πείραμα 4	Επίπεδο 2 (1740mm – 1900mm)	Επίπεδο 2 (355mm – 430mm)	Επίπεδο 1 (74,0° – 91,5°)	10 , 12, 22

Πίνακας 3-6. Πίνακας επιλογής πειραμάτων για την Ανάλυση της Διακύμανσης (L4 πίνακας)

Εφαρμόζοντας την Ανάλυση της Διαφορετικότητας για την κίνηση του ανακλαστήρα 14 (τοποθετημένος στο δεξί ώμο) στον άξονα X, δημιουργήθηκε το διάγραμμα διακύμανσης (Σχήμα 3-9α) του ποσοστού συμμετοχής (επιρροής) των τριών παραγόντων (Ανάστημα, Πλάτος λεκάνης, Ευλυγισία) σε κάθε μια από τις 50 γ συντεταγμένες (βλ. ενότητα 3.3.4).

Όπως ήταν αναμενόμενο, στο Σχήμα 3-9α παρατηρούμε πως ο παράγοντας της Ευλυγισίας (*Spinal Flexibility*) αυξάνει καθώς εξελίσσεται η κίνηση εισόδου στη θέση του οδηγού, καθώς απαιτείται μεγαλύτερη ευλυγισία του σώματος καθώς ο συμμετέχοντας σκύβει για να περάσει από το πλαίσιο της πόρτας και να καθίσει στη θέση του οδηγού.

Σχήμα 3-9. (α) Διακύμανση της επιρροής των τριών παραγόντων (Ανάστημα, Πλάτος λεκάνης, Ευλυγισία) στον άξονα X κατά τη διάρκεια της εξέλιξης της κίνησης του ανακλαστήρα 14 στον άξονα Y, (β) Κυκλικό διάγραμμα του ποσοστού συμμετοχής των τριών παραγόντων στην τροχιά του ανακλαστήρα 14 στον άξονα X

Εν συνεχεία, παράχθηκε το κυκλικό διάγραμμα (*pie chart*), βασισμένο στη μέση τιμή των 50 τιμών του ποσοστού συμμετοχής, στο οποίο φαίνεται η συνολική επίδραση των τριών παραγόντων στην κίνηση εισόδου για τους 23 συμμετέχοντες. Κάθε ένα από τα κομμάτια του κυκλικού διαγράμματος αντιστοιχεί σε έναν από τους τρεις παράγοντες και αναπαριστά το ποσοστό συμμετοχής του κάθε παράγοντα στο συνολικό αποτέλεσμα. Η μέση συνεισφορά (ποσοστό συμμετοχής) των τριών παραγόντων στην κίνηση του ανακλαστήρα 14 στον άξονα X, παρουσιάζεται στο κυκλικό διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 3-9β.

Από το παραπάνω διάγραμμα είναι προφανές πως η επίδραση (ποσοστό συμμετοχής) του παράγοντα Ανάστημα (*Body Height*) είναι καθοριστική για την κίνηση του ανακλαστήρα 14 στον άξονα X.

Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για τους 6 “κρίσιμους” ανακλαστήρες (βλ. ενότητα 3.3.1). Η διακύμανση της επιρροής των τριών παραγόντων (Ανάστημα, Πλάτος λεκάνης, Ευλυγισία) στον άξονα X και Y, κατά τη διάρκεια της εξέλιξης της κίνησης στον άξονα Y, παρουσιάζεται διαγραμματικά στο Σχήμα 3-10 και Σχήμα 3-11, αντίστοιχα. Τα κυκλικά διαγράμματα που προέκυψαν από την Ανάλυση της Διαφορετικότητας των τροχιών των 6 “κρίσιμων” ανακλαστήρων για τους άξονες X και Z παρουσιάζονται στη συνέχεια (Σχήμα 3-12 και Σχήμα 3-13).

Σχήμα 3-10. Διακύμανση της επιρροής των τριών παραγόντων (Ανάστημα, Πλάτος λεκάνης, Ευλυγισία) στον άξονα X κατά τη διάρκεια της εξέλιξης της κίνησης στον άξονα Y

Σχήμα 3-11. Διακόμηση της επιρροής των τριών παραγόντων (Ανάστημα, Πλάτος λεκάνης, Ευλυγισία) στον άξονα Z κατά τη διάρκεια της εξέλιξης της κίνησης στον άξονα Y

Ανάστημα: 6%
 Πλάτος λεκάνης: 63%
 Ευλυγισία: 31%

Ανάστημα: 86%
 Πλάτος λεκάνης: 3%
 Ευλυγισία: 11%

Ανάστημα: 83%
 Πλάτος λεκάνης: 9%
 Ευλυγισία: 8%

Ανάστημα: 27%
 Πλάτος λεκάνης: 64%
 Ευλυγισία: 9%

Ανάστημα: 27%
 Πλάτος λεκάνης: 24%
 Ευλυγισία: 49%

Ανάστημα: 14%
 Πλάτος λεκάνης: 38%
 Ευλυγισία: 48%

Σχήμα 3-12. Κυκλικά διαγράμματα των ποσοστών συμμετοχής των τριών παραγόντων (Ανάστημα, Πλάτος λεκάνης, Ευλυγισία) στην τροχιά των “κρίσιμων” ανακλαστήρων στον άξονα X

Ανάστημα: 45%
 Πλάτος λεκάνης: 43%
 Ευλυγισία: 12%

Ανάστημα: 43%
 Πλάτος λεκάνης: 47%
 Ευλυγισία: 10%

Ανάστημα: 53%
 Πλάτος λεκάνης: 28%
 Ευλυγισία: 19%

Ανάστημα: 66%
 Πλάτος λεκάνης: 15%
 Ευλυγισία: 19%

Ανάστημα: 67%
 Πλάτος λεκάνης: 22%
 Ευλυγισία: 11%

Ανάστημα: 24%
 Πλάτος λεκάνης: 16%
 Ευλυγισία: 60%

Σχήμα 3-13. Κυκλικά διαγράμματα των ποσοστών συμμετοχής των τριών παραγόντων (Ανάστημα, Πλάτος λεκάνης, Ευλυγισία) στην τροχιά των “κρίσιμων” ανακλαστήρων στον άξονα Z

3.4.3 Ανάπτυξη ημι-εμπειρικών μοντέλων κίνησης

Το επόμενο βήμα της προτεινόμενης προσέγγισης είναι η ανάπτυξη **ημι-εμπειρικών μοντέλων κίνησης**, βασισμένων στα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης. Η γενική συνάρτηση του προσθετικού μοντέλου είναι της μορφής:

$$PM(L_{1f}, L_{2g}, \dots, L_{vh}) = m + Ef_{1f} + Ef_{2g} + \dots + Ef_{vh} \quad \text{Εξ. 3-1}$$

όπου:

PM : το Μέτρο Απόδοσης (*Performance Measure*)

L_{vh} : το v -ιοστό επίπεδο (*Level*) που αντιστοιχεί του παράγοντα h

m : η μέση τιμή (*mean*) του μέτρου απόδοσης

Ef_{vh} : η επίδραση (*Effect*) του παράγοντα h για το v -ιοστό επίπεδο

Η Εξ. 3-1 παράγει μια συνάρτηση για τον υπολογισμό της τιμής της πειραματικής μέτρησης (Μέτρο Απόδοσης) για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς επιπέδων και παραμέτρων οι οποίοι δεν περιέχονται στον πίνακα τυποποιημένων μητρώων (Πίνακας 3-5).

Μετά από τον προσδιορισμό της επίδρασης των τριών παραγόντων στην ανθρώπινη κίνηση, είναι εφικτός ο σχηματισμός **προσθετικών μοντέλων (*additive models*)**, προσεγγίζοντας με αυτόν τον τρόπο τη σχέση των τριών ανεξάρτητων μεταβλητών (ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών) με την εξαρτημένη μεταβλητή (τροχιά ανακλαστήρα κατά την κίνηση εισόδου στη θέση του οδηγού). Δύο σεντ μοντέλων κίνησης παράγονται για κάθε έναν ανακλαστήρα που μελετάται, ένα σεντ για την τροχιά στον άξονα X και ένα για την τροχιά στον άξονα Z . Τα προσθετικά μοντέλα κίνησης είναι της μορφής:

$$x(BH_i, HW_j, SF_k) = m_x + bh_{xi} + hw_{xj} + sf_{xk} \quad \text{Εξ. 3-2}$$

$$z(BH_i, HW_j, SF_k) = m_z + bh_{zi} + hw_{zj} + sf_{zk} \quad \text{Εξ. 3-3}$$

Για κάθε μία από τις 50 y συντεταγμένες (στιγμιότυπα κίνησης) που καθορίστηκαν στην ενότητα 3.3.4, ένα σεντ εξισώσεων (μία για τη συντεταγμένη x και μία για τη z), όπως παρουσιάζεται στις παραπάνω εξισώσεις (Εξ. 3-2 και Εξ. 3-3), παράγεται για κάθε έναν από τους 8 ανακλαστήρες που μελετούνται στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης. Στις εξισώσεις αυτές, το m είναι ο γενικός μέσος όρος του μετρούμενου μεγέθους. Οι όροι bh_i , hw_j , sf_k αντιπροσωπεύουν τις αποκλίσεις του αντίστοιχου μετρούμενου μεγέθους (συντεταγμένη x ή z αντίστοιχα) από τη μέση τιμή m , που προκαλούνται από τον καθορισμό των παραγόντων (*factors*) BH , HW , SF στα επίπεδα BH_i , HW_j , SF_k (με i , j , k να παίρνουν την τιμή 1 ή 2,

εκφράζοντας το επίπεδο στο οποίο ανήκει η τιμή κάθε παράγοντα). Αυτές οι αποκλίσεις υπολογίζονται μέσω μιας ανάλυσης των μέσων και αποτελούν τις τιμές των συντελεστών των προσθετικών μοντέλων κίνησης. Ο Πίνακας 3-7 παρουσιάζει ένα παράδειγμα υπολογισμού της μέσης τιμής της συντεταγμένης και της επίδρασης των τριών παραγόντων στο άξονα Z, του ανακλαστήρα 14, για το 7^ο στιγμιότυπο κίνησης.

m_z:	1398,29	
Ef_z (Effect)		
Parameter	Level 1	Level 2
BH	50,85	-50,85
HW	-12,08	12,08
SF	34,64	-34,64

Πίνακας 3-7. Παράδειγμα αποτελεσμάτων υπολογισμού της μέσης τιμής και της επίδρασης των τριών παραγόντων (στιγμιότυπο κίνησης: 7, ανακλαστήρας: 14, άξονας Z)

3.4.4 Επαλήθευση μοντέλων κίνησης

Το τελικό βήμα της προτεινόμενης προσέγγισης είναι η επαλήθευση των προσθετικών μοντέλων κίνησης (συναρτήσεων τροχιάς ανακλαστήρων). Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει τη σύγκριση πραγματικών (καταγεγραμμένων) κινήσεων με εκείνες που προκύπτουν από τα προσθετικά μοντέλα κίνησης. Σύμφωνα με τη θεωρία του Στατιστικού Σχεδιασμού Πειραμάτων, για τη διαδικασία επαλήθευσης έπρεπε να χρησιμοποιηθούν δεδομένα κίνησης που προέκυψαν από πειράματα, των οποίων οι τιμές των παραγόντων επιρροής έπρεπε να ανήκουν στους 3 από τους 4 εναπομείναντες συνδυασμούς επιπέδων-παραγόντων, που δεν περιλαμβάνονται στον L4 πίνακα τυποποιημένων μητρώων (Πίνακας 3-6). Ο Πίνακας 3-8 παρουσιάζει τους 4 εναπομείναντες συνδυασμούς παραγόντων-επιπέδων από τους οποίους επιλέχθηκαν οι 3, προκειμένου να επιλεγούν πειράματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία επαλήθευσης. Αν η απόκλιση μεταξύ των υπολογισμένων (*estimated*) και πειραματικών (*experimental*) συντεταγμένων τροχιών των ανακλαστήρων είναι μικρότερη του $\pm 2\sigma_{estim}$ τότε τα προσθετικά μοντέλα μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα [Phadke, 1989].

Έτσι, για παράδειγμα, συγκρίνοντας τις συντεταγμένες της τροχιάς των “κρίσιμων” ανακλαστήρων, του συμμετέχοντα 11 (ανήκει στο συνδυασμό παραγόντων-επιπέδων του 2^{ου} πειράματος επαλήθευσης), που προέκυψαν από τη χρήση των προσθετικών μοντέλων (*estimated*), με τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές (*experimental*), προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 3-14 και Σχήμα 3-15). Από τα διαγράμματα αυτά προκύπτει ότι η

απόκλιση μεταξύ υπολογισμένων και πειραματικών συντεταγμένων ήταν μικρότερη από $\pm 2\sigma_{estim}$, το οποίο αποδεικνύει την αξιοπιστία των μοντέλων κίνησης.

	Ανάστημα (BH)	Πλάτος λεκάνης (HW)	Ευλυγισία (SF)	A/A Συμ/ντος
Πείραμα 1	Επίπεδο 1 (1570mm – 1730mm)	Επίπεδο 2 (355mm – 430mm)	Επίπεδο 1 (74,0° – 91,5°)	7
Πείραμα 2	Επίπεδο 1 (1570mm – 1730mm)	Επίπεδο 1 (310mm – 354mm)	Επίπεδο 2 (91,6° – 110,0°)	1, 11, 15, 16
Πείραμα 3	Επίπεδο 2 (1740mm – 1900mm)	Επίπεδο 2 (355mm – 430mm)	Επίπεδο 2 (91,6° – 110,0°)	3, 13, 18, 19
Πείραμα 4	Επίπεδο 2 (1740mm – 1900mm)	Επίπεδο 1 (310mm – 354mm)	Επίπεδο 1 (74,0° – 91,5°)	5, 9, 14

Πίνακας 3-8. Πίνακας επιλογής πειραμάτων επαλήθευσης

Σχήμα 3-14. Διαγράμματα επαλήθευσης των προσθετικών μοντέλων κίνησης των “κρίσιμων” ανακλαστήρων στον άξονα X, για τον συμμετέχοντα 11

Σχήμα 3-15. Διαγράμματα επαλήθευσης των προσθετικών μοντέλων κίνησης των “κρίσιμων” ανακλαστήρων στον άξονα Z, για τον συμμετέχοντα 11

3.5 Συμπεράσματα ανάλυσης - Σχολιασμός

Η ανάλυση της ανθρώπινης κίνησης, όπως αυτή παρουσιάστηκε στο παρόν κεφάλαιο, αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση του προβλήματος κάνοντας χρήση θεωρίας και μεθόδων Στατιστικής (στατιστικός σχεδιασμός πειραμάτων, ανάλυση της διακύμανσης και προσθετικό μοντέλο). Έχοντας ως στόχο την βαθύτερη κατανόηση της διαφορετικότητας / διακύμανσης της ανθρώπινης κίνησης, καθορίστηκε η συσχέτιση των ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών με τις διακυμάνσεις της ανθρώπινης κίνησης. Επίσης έχοντας ως γνώμονα τη μείωση των φυσικών πειραμάτων, που με τη σειρά του θα συντελέσει στη μείωση του χρόνου και κόστους παραγωγής ενός προϊόντος, εφαρμόστηκε η θεωρία του Στατιστικού Σχεδιασμού Πειραμάτων (Statistical Design of Experiments – SDoE) για τον προσδιορισμό του ελάχιστου αριθμού πειραμάτων που απαιτούνται για την έγκυρη εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επιρροή των ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών στη διακύμανση της ανθρώπινης κίνησης. Παρά το γεγονός ότι τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της μοντελοποίησης, με χρήση προσθετικών μοντέλων, καταδεικνύουν την εγκυρότητα των μοντέλων κίνησης, υπάρχουν κάποια βασικά μειονεκτήματα όσον αφορά στην παρούσα προσέγγιση μοντελοποίησης της κίνησης:

- ⇒ Οι εξισώσεις / μοντέλα κίνησης που αναπτύχθηκαν είναι συναρτήσει μόνο των ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών και δε συμπεριλαμβάνουν τις επιπτώσεις πιθανών γεωμετρικών διαφοροποιήσεων του προϊόντος ή περιβάλλοντος χώρου εργασίας, στην παραγόμενη κίνηση, και για το λόγο αυτό **υπάρχει δυσκολία μελέτης εναλλακτικών σεναρίων σχεδιασμού.**
- ⇒ Αποτελούν λύση στο πρόβλημα της μοντελοποίησης μιας συγκεκριμένης ανθρώπινης κίνησης. Για τη δημιουργία εξισώσεων / μοντέλων κίνησης μιας διαφορετικής εργασίας απαιτείται η εκτέλεση νέων πειραμάτων καταγραφής, τουλάχιστον τεσσάρων διαφορετικών πραγματικών κινήσεων, συγκεκριμένων προδιαγραφών (όπως αυτές προκύπτουν από το Στατιστικό Σχεδιασμό Πειραμάτων). Έτσι λοιπόν, με την προσέγγιση αυτή, **παραμένει η ανάγκη εκτέλεσης πειραμάτων από διαφορετικούς ανθρώπους.**

Η ύπαρξη των προαναφερόμενων μειονεκτημάτων καθιστούν αναγκαία την εξεύρεση μιας νέας προσέγγισης μοντελοποίησης της ανθρώπινης κίνησης που να ξεπερνάει τους φραγμούς αυτούς.

4 ΣΤΟΙΧΕΙΟΘΕΤΗΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

4.1 Φάσεις μιας γενικευμένης προσέγγισης

Με βάση τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής έρευνας και της έρευνας αγοράς, είναι προφανές ότι το θέμα της προσαρμογής μιας υπάρχουσας ανθρώπινης κίνησης με σκοπό την ικανοποίηση νέων δεδομένων (τόσο ανθρωπομετρικών όσο και χωροταξικών), αποτελεί σημαντικό πρόβλημα για τη ρεαλιστική και αξιόπιστη μοντελοποίηση ανθρώπινων κινήσεων. Για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος, μια γενικευμένη προσέγγιση είναι απαραίτητο να περιλαμβάνει τις παρακάτω φάσεις (Σχήμα 4-1):

4.1.1 Καθορισμός εργασίας εκτέλεσης

Το πρώτο βήμα είναι ο καθορισμός της εργασίας που πρέπει να μελετηθεί και να αξιολογηθεί εργονομικά (*task definition*). Συνήθως αφορά στην εκτέλεση μιας παραγωγικής διαδικασίας (π.χ. συναρμολόγηση) ή στον έλεγχο χρήσης κατασκευαστικών προϊόντων (π.χ. αυτοκινήτου, αεροπλάνου) από τον άνθρωπο.

4.1.2 Δημιουργία περιβάλλοντος εργασίας αναφοράς

Με βάση την εργασία που επιλέχθηκε στο προηγούμενο βήμα, σχεδιάζεται και στοιχειοθετείται το (πραγματικό ή εικονικό) περιβάλλον εργασίας, το οποίο αναπαριστά (με φυσικά ή εικονικά πρωτότυπα) τα απαραίτητα στοιχεία που απαιτούνται προκειμένου ένας άνθρωπος να εκτελέσει την εργασία και κατά τη διάρκεια της οποίας αλληλεπιδρά με αυτά. Το περιβάλλον αυτό θα ονομάζεται στο εξής **περιβάλλον εργασίας αναφοράς** (*reference workplace design / build-up*).

4.1.3 Εκτέλεση εργασίας από άνθρωπο και καταγραφή κίνησης αναφοράς

Στο στάδιο αυτό ένας πραγματικός άνθρωπος εκτελεί την επιλεγμένη εργασία (σε πραγματικό ή εικονικό περιβάλλον) και η κίνησή του καταγράφεται σε πραγματικό χρόνο από ένα σύστημα αιχμαλώτισης κίνησης (*motion capture system*). Η καταγεγραμμένη αυτή κίνηση θα ονομάζεται στο εξής **κίνηση αναφοράς** (*reference motion*).

4.1.4 Ανακατασκευή κίνησης σε ψηφιακή μορφή

Τα δεδομένα κίνησης που έχουν καταγραφεί από το σύστημα αιχμαλώτισης απαιτούν μια ειδική επεξεργασία που ονομάζεται **ανακατασκευή κίνησης** (*motion reconstruction*), προκειμένου τα δεδομένα αυτά να είναι συμβατά και χρησιμοποιήσιμα από συστήματα δημιουργίας και προσομοίωσης ανθρώπινης κίνησης σε υπολογιστή (*human modelling / simulation tool*). Η ανακατασκευή της κίνησης αναφοράς γίνεται σε αυτό το βήμα.

4.1.5 Δημιουργία ανθρωποειδούς αναφοράς και προσομοίωση κίνησης αναφοράς

Με τη βοήθεια λογισμικού ψηφιακών ανθρωποειδών δημιουργείται ένα ψηφιακό ανθρωποειδές με ίδια ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά με αυτά του πραγματικού ανθρώπου που εκτέλεσε την εργασία, το οποίο στη συνέχεια θα αναφέρεται ως το **ανθρωποειδές αναφοράς** (*reference manikin*). Η οδήγηση του ανθρωποειδούς αναφοράς μέσα σε εικονικό περιβάλλον πραγματοποιείται με τη χρήση της ανακατασκευασμένης κίνησης αναφοράς που προέκυψε στο προηγούμενο στάδιο.

4.1.6 Καθορισμός περιορισμών κίνησης αναφοράς

Οι **περιορισμοί κίνησης** (*constraints*) σχετίζονται, τόσο με την ανθρωπομετρία του ανθρωποειδούς (εύρος κίνησης γωνιών αρθρώσεων), όσο και με τα χαρακτηριστικά της κίνησης (πλήθος στιγμιότυπων κίνησης, προφίλ μετατόπισης μελών σώματος, προφίλ ταχύτητας μεταβολής γωνιών αρθρώσεων και χωρικοί / γεωμετρικοί περιορισμοί). Βάσει της προσομοίωσης της εργασίας από το ανθρωποειδές αναφοράς, καθορίζονται οι περιορισμοί της κίνησης αναφοράς.

4.1.7 Δημιουργία νέου ανθρωποειδούς

Με τη βοήθεια του λογισμικού ψηφιακών ανθρωποειδών δημιουργείται ένα ή και περισσότερα νέα ψηφιακά ανθρωποειδή διαφορετικών ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών, από εκείνα του ανθρωποειδούς αναφοράς. Τα ανθρωποειδή αυτά θα αναφέρονται στη συνέχεια ως **νέα ανθρωποειδή** (*new manikins*).

4.1.8 Δημιουργία νέου περιβάλλοντος εργασίας

Ένα ή και περισσότερα νέα περιβάλλοντα εργασίας διαφορετικών διαστάσεων, από εκείνων του περιβάλλοντος εργασίας αναφοράς, δημιουργούνται με τη χρήση λογισμικού

σχεδιασμού με υπολογιστή (*CAD tool*). Τα περιβάλλοντα αυτά θα αναφέρονται στη συνέχεια ως **νέα περιβάλλοντα εργασίας** (*new workplaces*).

4.1.9 Προσαρμογή κίνησης αναφοράς σε νέες συνθήκες και περιορισμούς

Σε αυτό το βήμα είναι απαραίτητο να ληφθούν υπ' όψη τα νέα δεδομένα που προαναφερθήκανε (νέο ανθρωποειδές και νέο περιβάλλον εργασίας) προκειμένου να προσαρμοστεί η κίνηση αναφοράς, τόσο στα νέα ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά, όσο και στις νέες διαστάσεις του περιβάλλοντος εργασίας. Η παράγωγή της νέας κίνησης (*adapted motion*), βασίζεται στην κίνηση αναφοράς, αλλά είναι προσαρμοσμένη στα νέα δεδομένα ανθρωπομετρίας και γεωμετρίας του περιβάλλοντος χώρου.

4.1.10 Προσομοίωση νέας κίνησης και έλεγχος αξιοπιστίας

Προκειμένου να ελεγχθεί η αξιοπιστία της νέας, προσαρμοσμένης κίνησης, το νέο ανθρωποειδές οδηγείται με τη χρήση της παραγόμενης κίνησης και υπολογίζονται, για κάθε στιγμιότυπο της κίνησης, οι αποκλίσεις από τα σημεία ενδιαφέροντος / ελέγχου αλλά και μελετάται οπτικά η ρεαλιστικότητα της παραγόμενης κίνησης.

Σχήμα 4-1. Αξιολόγηση εργονομικού σχεδιασμού με χρήση Η/Υ: Οι κυριότερες φάσεις

Από τις φάσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω, οι οχτώ πρώτες αποτελούν τετριμμένη διαδικασία, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με χρήση συστημάτων και λογισμικών εργαλείων που είναι διαθέσιμα στην αγορά ή έχουν επιτυχώς υλοποιηθεί σε προηγούμενες έρευνες. Για την επίλυση όμως του προβλήματος της προσαρμογής της κίνησης (*adaptation problem*) είναι απαραίτητο να σχεδιαστεί και να υλοποιηθεί σύστημα που να **ικανοποιεί** τις δύο τελευταίες φάσεις και να **συνεργάζεται** με όλες τις προηγούμενες. Μια τέτοια λύση θα είχε την διαγραμματική μορφή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-2, όπου τα στοιχεία του συστήματος μπορούν να διαχωριστούν στα **βοηθητικά** (αφορούν σε στοιχεία που είναι γενικώς διαθέσιμα, είναι δυνατόν να αντικατασταθούν από άλλα της ίδιας λειτουργίας και ικανοποιούν τις οχτώ πρώτες φάσεις της γενικευμένης προσέγγισης) και στα **δομικά** (αφορούν στα στοιχεία που είναι απαραίτητο να υλοποιηθούν, συνεργάζονται με τα βοηθητικά και ικανοποιούν τις δύο τελευταίες φάσεις της γενικευμένης προσέγγισης). Η πρόταση μιας νέας μεθοδολογίας και του συστήματος υλοποίησής της, που ικανοποιεί αυτή την απαίτηση και αποτελεί το αντικείμενο της διατριβής, παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Σχήμα 4-2. Αξιολόγηση εργονομικού σχεδιασμού με χρήση H/Y: Τα απαραίτητα στοιχεία

4.2 Βοηθητικά στοιχεία μεθοδολογίας

Τα βοηθητικά στοιχεία του συστήματος θεωρούνται απαραίτητα για τη λειτουργία της προτεινόμενης μεθοδολογίας αλλά δεν αποτελούν αντικείμενο έρευνας της παρούσας διατριβής, μιας και αφορούν κυρίως σε χρήση λογισμικών εργαλείων διαθέσιμων στην αγορά.

4.2.1 Σύστημα καταγραφής κινήσεων

Με σκοπό την προσαρμογή μιας ανθρώπινης κίνησης σε νέα δεδομένα, είναι προφανές ότι απαιτείται μια αρχική (κίνηση αναφοράς), η οποία θα υποστεί την προσαρμογή. Επιπλέον, για να διασφαλιστεί η ρεαλιστικότητα της νέας κίνησης είναι απαραίτητο η κίνηση αναφοράς να είναι κι αυτή ρεαλιστική και συνεπώς προερχόμενη από πραγματικό άνθρωπο. Για την αιχμαλώτιση και την καταγραφή κινήσεων πραγματικών ανθρώπων, που αλληλεπιδρούν με φυσικά ή εικονικά περιβάλλοντα, χρησιμοποιούνται συστήματα καταγραφής κινήσεων, τα οποία στις περισσότερες περιπτώσεις είναι οπτικά, ηλεκτρομαγνητικά ή γυροσκοπικά. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης μιας οποιασδήποτε διαδικασίας, από έναν πραγματικό άνθρωπο σε ένα περιβάλλον εργασίας, το σύστημα καταγράφει σε πραγματικό χρόνο τα δεδομένα κίνησης σε ψηφιακή μορφή. Για την καταγραφή αυτή χρησιμοποιούνται συνήθως αισθητήρες, οι οποίοι προσκολλούνται σε διάσπαρτα σημεία στο σώμα του ανθρώπου που εκτελεί τη διαδικασία. Το σύστημα έχει τη δυνατότητα να καταγράφει με μεγάλη συχνότητα (30-1000 Hz) την ακριβή θέση (και ενίοτε τον προσανατολισμό) όλων των αισθητήρων κίνησης και να στέλνει τα καταγεγραμμένα δεδομένα κίνησης στον υπολογιστή όπου συνδέεται το σύστημα. Μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας, ο υπολογιστής δημιουργεί ένα αρχείο κίνησης, το οποίο απαρτίζεται από μια αλληλουχία από σετ συντεταγμένων των αισθητήρων κίνησης. Κάθε σετ συντεταγμένων αντιπροσωπεύει τη στάση σώματος του ανθρώπου, που καταγράφηκε στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο της κίνησης του, κατά τη διαδικασία εκτέλεσης της εργασίας. Μερικά από τα πιο διαδεδομένα συστήματα καταγραφής κίνησης είναι το *Vicon MX* [Vicon, 2009], τα *Flock of Birds* και *MotionStar* [Ascension Technology Corporation, 2009], τα *IGS-190* και *Gypsy-6* [Animazoo UK Ltd., 2009], το *ProReflex MCU* [Qualisys, 2009], το *OptiTrack* [NaturalPoint Inc., 2009], το *FASTRAK* [Polhemus, 2009] και το *Stage* [Organic Motion Inc., 2009].

Στο Σχήμα 4-3 φαίνεται ένα παράδειγμα καταγραφής κίνησης με οπτικό σύστημα αιχμαλώτισης κίνησης.

Σχήμα 4-3. Καταγραφή ανθρώπινης κίνησης με οπτικό σύστημα αιχμαλώτισης κίνησης

4.2.2 Λογισμικό δημιουργίας ψηφιακών ανθρωποειδών

Οι προσαρμοσμένες κινήσεις παράγονται ουσιαστικά για να οδηγήσουν ψηφιακά ανθρωποειδή διαφορετικών ανθρωπομετρικών δεδομένων, με σκοπό τη μελέτη της εργονομίας περιβαλλόντων εργασίας ή προϊόντων. Όπως φαίνεται από την έρευνα στο προηγούμενο κεφάλαιο, υπάρχουν πολλά λογισμικά δημιουργίας και προσομοίωσης ψηφιακών ανθρωποειδών διαθέσιμα στην αγορά. Στο Σχήμα 4-4 παρουσιάζεται η διαδικασία της δημιουργίας ενός ψηφιακού ανθρωποειδούς με τη χρήση τέτοιων εργαλείων.

Σχήμα 4-4. Δημιουργία ψηφιακού ανθρωποειδούς από ανθρωπομετρικές μετρήσεις και φωτογραφίες

4.2.3 Σύστημα ανακατασκευής κινήσεων σε εικονικό περιβάλλον

Τα δεδομένα κίνησης που έχουν καταγραφεί από το σύστημα αιχμαλώτισης απαιτούν ανακατασκευή, όπως έχει προαναφερθεί (παρ. 4.1.4), προκειμένου να είναι συμβατά με τα συστήματα δημιουργίας και προσομοίωσης ψηφιακών ανθρωποειδών. Για το σκοπό αυτό ειδικές διαδικασίες και λογισμικά εργαλεία χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή των ακατέργαστων δεδομένων της καταγεγραμμένης κίνησης (σετ τροχιών κίνησης των μελών του ανθρωπίνου σώματος) σε μορφοποιημένα δεδομένα ψηφιακής τρισδιάστατης κίνησης (σετ γωνιών αρθρώσεων του ανθρωπίνου σώματος). Κάθε σετ γωνιών αρθρώσεων αντικατοπτρίζει μια στάση σώματος που παίρνει ο άνθρωπος σε ένα συγκεκριμένο

στιγμιότυπο της πραγματικής κίνησης. Η αλληλουχία της διαδικασίας ανακατασκευής κίνησης παρουσιάζεται από το Σχήμα 4-5 έως το Σχήμα 4-9.

Σχήμα 4-5. Απεικόνιση δεδομένων καταγραφής κίνησης (θέσεις αισθητήρων σε κάθε στιγμιότυπο)

Σχήμα 4-6. Αντιστοίχιση δεδομένων κίνησης (τροχιές ανακλαστήρων) σε ψηφιακό ανθρωποειδές

Σχήμα 4-7. Μετατροπή τροχιών αισθητήρων σε γωνίες αρθρώσεων του ψηφιακού ανθρωποειδούς

Σχήμα 4-8. Προσομοίωση κίνησης μετά από ανακατασκευή των δεδομένων καταγραφής κίνησης

Σχήμα 4-9. Ανακατασκευή ψηφιακής κίνησης από συστήματα αιχμαλώτισης ανθρώπινης κίνησης

4.2.4 Βάση δεδομένων κινήσεων και ανθρωποειδών

Σκοπός της βάσης δεδομένων είναι η δόμηση και η οργάνωση των κινήσεων και των παραμέτρων που σχετίζονται με αυτές (Σχήμα 4-10), έτσι ώστε να είναι εφικτή η αναζήτηση μιας κίνησης, βάσει κριτηρίων. Η βάση δεδομένων απαρτίζεται από ένα σύνολο ανακατασκευασμένων κινήσεων. Οι βασικές παράμετροι που σχετίζονται με μια κίνηση είναι:

- ⇒ το όνομα και η περιγραφή της εργασίας στην οποία αντιστοιχεί η κίνηση,
- ⇒ τα ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά του ανθρώπου που εκτέλεσε την κίνηση (ανάστημα, ηλικία, φύλο, κλπ.),
- ⇒ η στάση σώματος στο πρώτο στιγμιότυπο της κίνησης,
- ⇒ ο συνολικός αριθμός στιγμιότυπων κίνησης, και
- ⇒ οι περιορισμοί κίνησης (ανθρωπομετρίας, περιβάλλοντος εργασίας, ταχύτητας μεταβολής γωνιών αρθρώσεων).

Σχήμα 4-10. Παραδείγματα περιεχομένων της βάσης δεδομένων του συστήματος

4.2.5 Σύστημα επιλογής κινήσεων από βάση δεδομένων

Το σύστημα αυτό απαιτείται για την επιλογή της καταλληλότερης κίνησης αναφοράς προκειμένου η παραγόμενη νέα κίνηση να εμπεριέχει μικρότερα σφάλματα. Μηχανισμοί για αυτή την επιλογή μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία [Park *et al.*, 2002; Park *et al.*, 2004]. Όπως είναι λογικό, η προσαρμογή μιας κίνησης σε νέα δεδομένα θα πραγματοποιηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια όταν τα δεδομένα της κίνησης αναφοράς είναι παρόμοια με αυτά της νέας κίνησης. Αν για παράδειγμα απαιτείται να δημιουργηθεί μια νέα κίνηση για ένα ανθρωποειδές ύψους 1.80μ και το μόνο κριτήριο επιλογής της κίνησης αναφοράς είναι το ανάστημα του ανθρωποειδούς, τότε είναι προτιμότερο να επιλεγεί μια κίνηση από τη βάση δεδομένων που την έχει εκτελέσει ένας πραγματικός άνθρωπος με ανάστημα κοντά στο 1.80μ. Στην πραγματικότητα όμως, η διαδικασία αυτή είναι πιο πολύπλοκη καθώς υπάρχουν αρκετά κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των κινήσεων προκειμένου να επιλεγεί η πιο κατάλληλη κίνηση αναφοράς.

4.2.6 Λογισμικό δημιουργίας εικονικού περιβάλλοντος εργασίας

Προκειμένου να μπορεί να αξιολογηθεί η ποιότητα της παραγόμενης κίνησης (ρεαλισμός της κίνησης και ικανοποίηση των χωρικών περιορισμών της εργασίας), και κατ' επέκταση η αξιοπιστία της μεθοδολογίας μοντελοποίησης, είναι αναγκαία η δημιουργία του ψηφιακού (εικονικού) μοντέλου του περιβάλλοντος εργασίας, μέσα στο οποίο θα προσομοιωθεί η κίνηση (εργασία) του ψηφιακού ανθρωποειδούς. Για το λόγο αυτό απαιτείται η χρήση λογισμικού, με τη χρήση του οποίου θα σχεδιαστούν όλα τα απαραίτητα τρισδιάστατα αντικείμενα που συνθέτουν το χώρο (περιβάλλον) εργασίας, και μπορεί να είναι οποιοδήποτε εμπορικά διαθέσιμο εργαλείο σχεδιασμού με υπολογιστή (*CAD*), το οποίο μπορεί να εξάγει τα σχεδιαζόμενα αντικείμενα σε μορφή συμβατή με αυτή που υποστηρίζει το λογισμικό σύστημα δημιουργίας και προσομοίωσης κίνησης ψηφιακών ανθρωποειδών.

Σχήμα 4-11. Παράδειγμα ψηφιακού περιβάλλοντος εργασίας

4.3 Δομικά στοιχεία μεθοδολογίας

Τα δομικά στοιχεία του συστήματος συνδέονται με τα βοηθητικά στοιχεία και αποτελούν μια νέα λύση στο πρόβλημα της προσαρμογής της κίνησης.

4.3.1 Δεδομένα εισόδου

Προκειμένου το συνολικό σύστημα να τεθεί σε λειτουργία, ο χρήστης (σχεδιαστής) θα πρέπει να έχει στη διάθεση του ένα εργαλείο από το οποίο θα εισάγει τα δεδομένα εισόδου, στα οποία πρέπει τουλάχιστον να συγκαταλαμβάνονται:

- ⇒ το αρχείο περιγραφής της εργασίας,
- ⇒ το αρχείο περιγραφής του ανθρωποειδούς αναφοράς,
- ⇒ το αρχείο περιγραφής της κίνηση αναφοράς,
- ⇒ το αρχείο περιγραφής του νέου ανθρωποειδούς,
- ⇒ το αρχείο περιγραφής του νέου περιβάλλοντος εργασίας,
- ⇒ την επιθυμητή αρχική στάση σώματος του νέου ανθρωποειδούς για τη νέα κίνηση,
- ⇒ τον επιθυμητό αριθμός των στιγμιότυπων της παραγόμενης κίνησης, και
- ⇒ την επιθυμητή ποιότητα της παραγόμενης κίνησης.

4.3.2 Αλγόριθμος προσαρμογής κινήσεων

Ουσιαστικά πρόκειται για τον πυρήνα της υλοποίησης της μεθοδολογίας προσαρμογής κίνησης, ο οποίος είναι απαραίτητο να ενσωματώνει όλους τους μηχανισμούς που χρειάζονται για να επιτευχθεί αυτό. Αυτοί οι μηχανισμοί περιγράφονται στη συνέχεια.

4.3.2.1 Μηχανισμός παραγωγής εναλλακτικών στάσεων

Ο μηχανισμός αυτός απαιτείται για την παραγωγή ενός πλήθους εναλλακτικών στάσεων σώματος (σετ γωνιών αρθρώσεων). Το μέγιστο πλήθος των εναλλακτικών (*Maximum Number of Alternatives – MNA*) [Chryssolouris, 1987; Chryssolouris *et al.*, 1992; Triantaphyllou, 2000; Triantaphyllou *et al.*, 2001] καθορίζει το μέγεθος του **πεδίου λύσεων του προβλήματος** (*problem space*). Με την εφαρμογή των περιορισμών (*constraints*) του προβλήματος, προκύπτει το **πεδίο εφικτών λύσεων** (*solution space*) [Weise, 2008]. Από το πεδίο αυτό, αξιολογούνται (βάσει κριτηρίων) οι εναλλακτικές λύσεις προκειμένου τελικά να επιλεγεί η βέλτιστη στάση σώματος (= στιγμιότυπο κίνησης). Ο μηχανισμός αυτός εκτελείται επαναληπτικά για το πλήθος των στιγμιότυπων κίνησης που πρέπει να παραχθούν.

4.3.2.2 Μηχανισμός καθορισμού κριτηρίων αξιολόγησης

Ο μηχανισμός αυτός απαιτείται για τον καθορισμό των κριτηρίων βάσει των οποίων οι παραπάνω εναλλακτικές στάσεις πρόκειται να αξιολογηθούν, προκειμένου να επιλεγεί η βέλτιστη δυνατή. Τα κριτήρια συντελούν στον έλεγχο εκπλήρωσης των στόχων της μεθοδολογίας, που στην προτεινόμενη προσέγγιση σχετίζονται με τη ρεαλιστικότητα της παραγόμενης κίνησης και την ικανοποίηση των νέων περιορισμών. Ο αριθμός και η φύση των κριτηρίων σχετίζεται καθαρά με το σκοπό εφαρμογής της μεθοδολογίας και μπορεί να μεταβάλλονται ανάλογα με αυτόν.

4.3.2.3 Πίνακας αποφάσεων

Ο **πίνακας αποφάσεων** (*decision matrix*) είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό του **δείκτη αξιολόγησης** (*score*) της κάθε εναλλακτικής, για κάθε ένα από τα κριτήρια αξιολόγησης, καθώς επίσης και για την κανονικοποίηση των δεικτών αυτών προκειμένου να μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους. Ανάλογα με το φυσικό μέγεθος που εκφράζει κάθε κριτήριο (π.χ. απόσταση, γωνία) η τιμή του δείκτη αξιολόγησης είναι η απόκλιση της παραγόμενης εναλλακτικής από την αντίστοιχη της κίνησης αναφοράς.

4.3.2.4 Μηχανισμός καθορισμού βάρους κριτηρίων

Λόγω του γεγονότος ότι κατά τη διάρκεια μιας πολύπλοκης κίνησης (εργασίας) είναι πιθανό να μεταβάλλονται οι ανάγκες ικανοποίησης κάποιου στόχου, κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη μηχανισμού ελέγχου της επίδρασης (βαρύτητας) των καθοριζόμενων κριτηρίων. Κάθε κριτήριο μπορεί να χαρακτηριστεί από ένα **βάρος σημαντικότητας** (*weight*), που υποδηλώνει τη σημαντικότητα του κριτηρίου αυτού, τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, και μπορεί να παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1. Σε κάθε χρονική στιγμή της κίνησης το άθροισμα των βαρών των κριτηρίων πρέπει να ισούται με 1, και το κάθε βάρος μεταβάλλεται ανάλογα με τις ανάγκες της κίνησης προκειμένου να ικανοποιηθούν οι περιορισμοί.

4.3.2.5 Μηχανισμός συνάθροισης

Για να ληφθεί υπόψη και η επίδραση του κάθε κριτηρίου στην παραγόμενη κίνηση, ο μηχανισμός αυτός απαιτείται για τη συνάθροιση της τιμής του κάθε κριτηρίου για κάθε εναλλακτική και τον υπολογισμό ενός **τελικού δείκτη αξιολόγησης** (*utility score*), λαμβάνοντας υπόψη και το βάρος του κάθε κριτηρίου.

4.3.2.6 Μηχανισμός κατάταξης και επιλογής βέλτιστης λύσης

Προκειμένου τελικά να επιλεγεί η βέλτιστη, από το πλήθος των παραγόμενων εναλλακτικών στάσεων, χρησιμοποιείται αυτός ο μηχανισμός για την κατάταξη, αρχικά, των εναλλακτικών λύσεων βάσει του τελικού δείκτη αξιολόγησης και στη συνέχεια για την επιλογή και την εξαγωγή μίας στάσης σώματος (από το πλήθος εναλλακτικών που παράχθηκαν) η οποία έχει το μεγαλύτερο τελικό δείκτη αξιολόγησης.

5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή του σχεδιασμού των δομικών στοιχείων του συστήματος που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής.

5.1 Δεδομένα εισόδου του συστήματος

Σαν πρώτη πληροφορία στο σύστημα εισάγονται οι περιγραφές της **εργασίας** και του **περιβάλλοντος** μέσα στο οποίο θα εκτελεστεί. Επόμενα απαραίτητα δεδομένα εισόδου για την εξομοίωση μιας κίνησης στον αλγόριθμο είναι:

1. Η **κίνηση αναφοράς**. Είναι καταγεγραμμένη σε n στιγμιότυπα (*frames*) και αποτελείται από n διαδοχικές στάσεις σώματος του ψηφιακού ανθρωποειδούς. Μία στάση σώματος ψηφιακού ανθρωποειδούς, για ένα συγκεκριμένο στιγμιότυπο i , περιγράφεται από ένα διάνυσμα M της μορφής:

$$M(i) = [\theta_1(i), \theta_2(i), \dots, \theta_K(i)] \quad (\text{Εξ. 5-1})$$

όπου:

$M(i)$: το διάνυσμα που περιγράφει τη στάση σώματος ψηφιακού ανθρωποειδούς στο χρονικό στιγμιότυπο i , με $i \in [1, n]$

n : το πλήθος των στιγμιότυπων της κίνησης

$\theta_j(i)$: η τιμή της j γωνίας περιστροφής στο στιγμιότυπο i , με $j \in [1, K]$ και $i \in [1, n]$, ως προς το τοπικό σύστημα αναφοράς

K : το πλήθος των δυνατών περιστροφών (βαθμών ελευθερίας) των αρθρώσεων της κινηματικής αλυσίδας του ψηφιακού ανθρωποειδούς

2. Οι **διαστάσεις των μελών της κινηματικής αλυσίδας του ανθρωποειδούς αναφοράς** που περιγράφονται από ένα διάνυσμα της μορφής:

$$L_{ref} = [l_1, l_2, \dots, l_L] \quad (\text{Εξ. 5-2})$$

όπου:

L_{ref} : το διάνυσμα που περιγράφει τις διαστάσεις των μελών της κινηματικής αλυσίδας του ανθρωποειδούς αναφοράς

l_i : το μήκος του μέλους l της κινηματικής αλυσίδας, του ανθρωποειδούς αναφοράς, με $l \in [1, L]$

L : το πλήθος των μελών της κινηματικής αλυσίδας του ανθρωποειδούς

3. Οι **διαστάσεις των μελών της κινηματικής αλυσίδας του νέου ανθρωποειδούς** και οι **περιορισμοί κίνησης των αρθρώσεων** του (*Body Constraints - BC*), που δίνονται αντίστοιχα από τις Εξισώσεις 3 και 4.

$$L_{new} = [l'_1, l'_2, \dots, l'_L] \quad (\text{Εξ. 5-3})$$

$$BC_{new} = [(\theta_{1min}, \theta_{1max}), (\theta_{2min}, \theta_{2max}), \dots, (\theta_{Kmin}, \theta_{Kmax}),] \quad (\text{Εξ. 5-4})$$

όπου:

L_{new} : το διάνυσμα που περιγράφει τις διαστάσεις των μελών της κινηματικής αλυσίδας του νέου ανθρωποειδούς

l'_i : το μήκος του μέλους l της κινηματικής αλυσίδας του νέου ανθρωποειδούς, με $l \in [1, L]$

L : το πλήθος των μελών της κινηματικής αλυσίδας του ανθρωποειδούς

BC_{new} : το διάνυσμα που περιγράφει τους περιορισμούς κίνησης (*Body Constraints*) των αρθρώσεων του νέου ανθρωποειδούς

$\theta_{jmin}, \theta_{jmax}$: τα φυσικά (επιτρεπτά) όρια περιστροφής της γωνίας περιστροφής j , με $j \in [1, K]$

K : το πλήθος των δυνατών περιστροφών (βαθμών ελευθερίας) των αρθρώσεων της κινηματικής αλυσίδας του ψηφιακού ανθρωποειδούς

4. Η **αρχική στάση σώματος του νέου ανθρωποειδούς** στη νέα κίνηση που περιγράφεται από το διάνυσμα:

$$M'(I) = [\theta'_1(I), \theta'_2(I), \dots, \theta'_K(I)] \quad (\text{Εξ. 5-5})$$

όπου:

$M'(I)$: το διάνυσμα που περιγράφει την αρχική στάση σώματος του νέου ανθρωποειδούς στη νέα (παραγόμενη) κίνηση

$\theta'_j(I)$: η τιμή της j γωνίας περιστροφής στο 1^ο στιγμιότυπο της νέας κίνησης, με $j \in [1, K]$, ως προς το τοπικό σύστημα αναφοράς

K : το πλήθος των δυνατών περιστροφών (βαθμών ελευθερίας) των αρθρώσεων της κινηματικής αλυσίδας του ψηφιακού ανθρωποειδούς

5. Οι **χωρικοί περιορισμοί** (*Spatial Constraints - SC*), που δίνονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$SC = [(X'(i), Y'(i), Z'(i)), (X'(k), Y'(k), Z'(k)), \dots] \quad (\text{Εξ. 5-6})$$

όπου:

SC : το διάνυσμα που περιγράφει τους χωρικούς περιορισμούς (*Spatial Constraints*) της κίνησης

$X'(i), Y'(i), Z'(i)$: οι συντεταγμένες του άκρου εργασίας του νέου ανθρωποειδούς στο στιγμιότυπο κίνησης i , με $i \in [1, n]$

$X'(k), Y'(k), Z'(k)$: οι συντεταγμένες του άκρου εργασίας του νέου ανθρωποειδούς στο στιγμιότυπο κίνησης k , με $k \in [1, n]$

n : το πλήθος των στιγμιότυπων της κίνησης

6. Οι **περιορισμοί ταχύτητας** (*Speed constraints - S*), που δίνονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$S = [(d\theta_{1-}, d\theta_{1+}), (d\theta_{2-}, d\theta_{2+}), \dots, (d\theta_{K-}, d\theta_{K+})] \quad (\text{Εξ. 5-7})$$

όπου:

S : το διάνυσμα που περιγράφει τους περιορισμούς ταχύτητας (*Speed*) της κίνησης

$d\theta_{j-}$: η μέγιστη μείωση για δύο διαδοχικές τιμές της j γωνίας περιστροφής, κατά τη διάρκεια ολόκληρης της κίνησης αναφοράς, με $j \in [1, K]$

$d\theta_{j+}$: η μέγιστη αύξηση για δύο διαδοχικές τιμές της j γωνίας περιστροφής, κατά τη διάρκεια ολόκληρης της κίνησης αναφοράς, με $j \in [1, K]$

K : το πλήθος των δυνατών περιστροφών (βαθμών ελευθερίας) των αρθρώσεων της κινηματικής αλυσίδας του ψηφιακού ανθρωποειδούς

Οι περιορισμοί ταχύτητας καθορίζουν τη μέγιστη διακύμανση της περιστροφής των αρθρώσεων μεταξύ δύο διαδοχικών στάσεων και μειώνουν το διάστημα λύσεων σημαντικά χωρίς να μειώνεται η ποιότητα (ρεαλισμός της κίνησης και ικανοποίηση των χωρικών περιορισμών της εργασίας) της κίνησης που παράγεται.

Το Σχήμα 5-1 παρουσιάζει μια γενική επισκόπηση της ροής δεδομένων της προτεινόμενης μεθοδολογίας, σε διαγραμματική μορφή.

Σχήμα 5-1. Διάγραμμα ροής των δεδομένων εισόδου-εξόδου της προτεινόμενης μεθοδολογίας

5.2 Αλγόριθμος προσαρμογής κινήσεων

Ο αλγόριθμος, που αποτελεί το βασικό στοιχείο της προτεινόμενης μεθοδολογίας, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-2. Καθένα από τα συστατικά του περιγράφεται λεπτομερώς στις επόμενες παραγράφους.

Σχήμα 5-2. Διάγραμμα ροής των δεδομένων του αλγορίθμου της προτεινόμενης μεθοδολογίας

5.2.1 Μηχανισμός παραγωγής εναλλακτικών στάσεων

Ένας αριθμός εναλλακτικών στάσεων (σετ γωνιών αρθρώσεων) παράγονται για κάθε ένα στιγμιότυπο της κίνησης. Αυτός ο αριθμός εναλλακτικών λύσεων (*Maximum Number of Alternatives – MNA*) επηρεάζει την ποιότητα (ρεαλισμός της κίνησης και ικανοποίηση των χωρικών περιορισμών της εργασίας) της παραγόμενης κίνησης και τον απαιτούμενο χρόνο υπολογισμού της. Το **πεδίο λύσεων του προβλήματος** (*problem space*) για τις γωνίες συνδέσμων $\theta_j(i)$, με $j \in [1, K]$ των παραγόμενων *MNA* διανυσμάτων $M(i)$, για κάθε στιγμιότυπο i , με $i \in [1, n]$, μειώνεται από την εφαρμογή των περιορισμών σώματος (*BC*) και ταχύτητας (*S*). Η εφαρμογή αυτών των δύο περιορισμών κατά τη διάρκεια της παραγωγής των $M(i)$ διανυσμάτων μειώνει το αρχικό πεδίο λύσεων σε ένα, κατά πολύ μικρότερο, **πεδίο εφικτών λύσεων** (*solution space*) [Weise, 2008], εξοικονομώντας με αυτόν τον τρόπο σημαντική ποσότητα υπολογιστικού χρόνου, χωρίς να παρατηρείται απώλεια στην ποιότητα της παραγόμενης κίνησης.

5.2.2 Μηχανισμός καθορισμού κριτηρίων αξιολόγησης

Όλες οι εναλλακτικές στάσεις που έχουν παραχθεί στο προηγούμενο βήμα, αξιολογούνται κατάλληλα προκειμένου να επιλεγεί η μία θα που ικανοποιεί καλύτερα τις απαιτήσεις του νέου σεναρίου κίνησης, όπου **σενάριο κίνησης** ορίζεται κάθε δυνατός συνδυασμός “εργασίας–ανθρωποειδούς–περιβάλλοντος”. Η αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί από πλήθος επιθυμητών κριτηρίων. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν δύο κριτήρια, τα οποία περιγράφονται παρακάτω. Ο αριθμός τους βέβαια μπορεί να αυξηθεί στο πλαίσιο επέκτασης της έρευνας.

5.2.2.1 Κριτήριο ομοιότητας των γωνιών των αρθρώσεων του σώματος

Αυτό το κριτήριο (*Joint Angles similarity criterion - JA*) εφαρμόζεται προκειμένου το στυλ της παραγόμενης κίνησης να είναι παρόμοιο με αυτό της κίνησης αναφοράς. Ο όρος “στυλ κίνησης”, σχετίζεται με το προφίλ της μεταβολής των γωνιών των αρθρώσεων του ψηφιακού ανθρωποειδούς κατά τη διάρκεια της κίνησης. Ο δείκτης αξιολόγησης αυτού του κριτηρίου, που αντιπροσωπεύει την ομοιότητα στο επίπεδο των γωνιών, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$c_1 = \sum_{j=1}^K [u_j \cdot (\theta'_j(i) - \theta_j(i))] \quad (\text{Εξ. 5-8})$$

όπου:

c_1 : ο δείκτης αξιολόγησης του *JA* κριτηρίου

j : ο αύξων αριθμός της γωνίας περιστροφής, με $j \in [1, K]$

K : το πλήθος των επιλεγμένων γωνιών περιστροφής

i : το στιγμιότυπο κίνησης, με $i \in [1, n]$

$\theta'_j(i)$: η παραγόμενη τιμή της γωνίας j του νέου ανθρωποειδούς στο στιγμιότυπο i

$\theta_j(i)$: η τιμή της γωνίας j του ανθρωποειδούς αναφοράς στο στιγμιότυπο i

u_j : ο συντελεστής βαρύτητας της γωνίας j στον τελικό δείκτη αξιολόγησης, με

$$\sum_{j=1}^K u_j = 1, \text{ με } u_j \in [0, 1]$$

Ο συντελεστής βαρύτητας u_j χρησιμοποιείται επειδή η διακύμανση της γωνίας στροφής μιας άρθρωσης που βρίσκεται στην αρχή της κινηματικής αλυσίδας του ανθρώπινου

σώματος, έχει μεγαλύτερη επιρροή στη στάση του σώματος από ότι η ίδια διακύμανση στη γωνία κάποιας άρθρωσης που βρίσκεται στο τέλος της αλυσίδας.

Ο καθορισμός αυτού του κριτηρίου δείχνει ότι όσο πιο κοντά βρίσκονται οι τιμές των γωνιών των αρθρώσεων της παραγόμενης στάσης στις αντίστοιχες τιμές της κίνησης αναφοράς, τόσο καλύτερος είναι ο δείκτης αξιολόγησης του κριτηρίου.

5.2.2.2 Κριτήριο ομοιότητας της θέσης του άκρου εργασίας

Αυτό το κριτήριο (*End-Effector similarity criterion - EE*) εφαρμόζεται προκειμένου το άκρο εργασίας (*end-effector*) του νέου ανθρωποειδούς να μπορεί να ακολουθήσει στενά την τροχιά του αντίστοιχου άκρου εργασίας του ανθρωποειδούς αναφοράς. Ο δείκτης αξιολόγησης αυτού του κριτηρίου, που αντιπροσωπεύει την Ευκλείδεια απόσταση της θέσης του άκρου εργασίας των δύο ανθρωποειδών σε ένα συγκεκριμένο στιγμιότυπο της κίνησης, υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$c_2 = \sqrt{(X'(i) - X(i))^2 + (Y'(i) - Y(i))^2 + (Z'(i) - Z(i))^2} \quad (\text{Εξ. 5-9})$$

όπου:

c_2 : ο δείκτης αξιολόγησης του *EE* κριτηρίου

i : το στιγμιότυπο κίνησης, με $i \in [1, n]$

$X(i), Y(i), Z(i)$: οι συντεταγμένες του άκρου εργασίας του ανθρωποειδούς αναφοράς στο στιγμιότυπο i

$X'(i), Y'(i), Z'(i)$: οι συντεταγμένες του άκρου εργασίας του νέου ανθρωποειδούς στο στιγμιότυπο i

Ανάλογα με τον αριθμό των άκρων εργασίας που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, καθορίζεται ένας αντίστοιχος αριθμός από *EE* κριτήρια. Στην παρούσα φάση εξετάζεται μόνο ένα άκρο εργασίας (η άρθρωση του καρπού του αριστερού χεριού).

5.2.3 Πίνακας αποφάσεων

Οι *MNA* αξιολογούνται για κάθε ένα από τα κριτήρια και κατασκευάζεται ένας πίνακας διαστάσεων $2 * MNA$. Η τιμή σε κάθε κελί του πίνακα είναι ο δείκτης αξιολόγησης της εναλλακτικής στάσης για το κριτήριο, το οποίο αντιστοιχεί στο κελί. Μετά την αρχική κατασκευή του πίνακα αποφάσεων, ο δείκτης αξιολόγησης για κάθε κριτήριο κανονικοποιούνται. Δεδομένου ότι όσο μικρότερη τιμή έχει η απόκλιση των γωνιών αρθρώσεων (για το *JA* κριτήριο αξιολόγησης) και της θέσης του άκρου εργασίας (για το *EE*

κριτήριο), μεταξύ ανθρωποειδούς αναφοράς και νέου ανθρωποειδούς, εφαρμόζεται ο ακόλουθος τύπος κανονικοποίησης:

$$C_{mq}^* = \left[1 - \frac{C_{mq} - C_{minq}}{C_{maxq} - C_{minq}} \right] \quad (\text{Εξ. 5-10})$$

όπου:

C_{mq}^* : ο κανονικοποιημένος δείκτης αξιολόγησης των m εναλλακτικών του κριτηρίου q

q : ο αύξων αριθμός του κριτηρίου αξιολόγησης, με $q=1$ για το JA και $q=2$ για το EE κριτήριο αξιολόγησης

C_{mq} : ο δείκτης αξιολόγησης των m εναλλακτικών για το κριτήριο q

C_{maxq} : η μέγιστη τιμή του κριτηρίου q για όλες τις εναλλακτικές στάσεις

C_{minq} : η ελάχιστη τιμή του κριτηρίου q για όλες τις εναλλακτικές στάσεις

5.2.4 Μηχανισμός καθορισμού βάρους κριτηρίων

Τα βάρη των δύο κριτηρίων μεταβάλλονται δυναμικά ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε στιγμιότυπου της κίνησης. Όσο αφορά στον καθορισμό του κριτηρίου JA , αυτό τίθεται κοντά στο 1 για τα στιγμιότυπα της κίνησης που είναι απαραίτητο να διατηρείται το στυλ της νέας κίνησης ίδιο με αυτό της κίνησης αναφοράς. Για την ικανοποίηση των χωρικών περιορισμών του νέου περιβάλλοντος εργασίας, το κριτήριο EE τίθεται κοντά στο 1 στα στιγμιότυπα της κίνησης που το άκρο εργασίας αλληλεπιδρά με κάποιο τρόπο με το περιβάλλον. Τα στιγμιότυπα στα οποία υπάρχουν χωρικοί περιορισμοί (*Spatial Constrains - SC*) μπορούν να ονομαστούν **SC στιγμιότυπα**. Οι περίοδοι πριν και μετά από ένα SC στιγμιότυπο, καλούνται **adaptation in** και **adaptation out** περίοδοι, αντίστοιχα. Τα βάρη των κριτηρίων αυξάνονται γραμμικά μέχρι να πάρουν την τιμή 1, δίνοντας μια ομαλότητα στην παραγόμενη κίνηση, σε αντίθεση με άλλες σχετικές εργασίες στις οποίες η θέση του άκρου εργασίας τροποποιείται άμεσα [Monzami *et al.*, 2000].

Το Σχήμα 5-3 παρουσιάζει ένα παράδειγμα δυναμικής αλλαγής των τιμών των βαρών κατά τη διάρκεια του χρόνου. Λεπτομερώς, η κίνηση σε αυτό το παράδειγμα, διαιρείται στα ακόλουθα τμήματα:

⇒ Στιγμιότυπο 1-5: Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου η κίνηση είναι ελεύθερη από οποιουδήποτε χωρικούς περιορισμούς. Το JA κριτήριο λαμβάνει την υψηλότερη

τιμή βάρους, προκειμένου να ληφθούν οι στάσεις που είναι παρόμοιες (από άποψης περιστροφών των αρθρώσεων) με τις αντίστοιχες στάσεις της κίνησης αναφοράς.

- ⇒ Στιγμιότυπο 6-15: Αυτή είναι η *adaptation in* περίοδος. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου το βάρος του *EE* κριτηρίου αυξάνεται γραμμικά (από 0 σε 0.9) ενώ το βάρος του κριτηρίου *JA* μειώνεται.
- ⇒ Στιγμιότυπο 16: Αυτό είναι ένα *SC* στιγμιότυπο. Το *EE* κριτήριο λαμβάνει την υψηλότερη τιμή του σε αυτό το στιγμιότυπο.
- ⇒ Στιγμιότυπο 17-27: Αυτή είναι η *adaptation out* περίοδος. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου το βάρος του κριτηρίου *JA* αυξάνεται γραμμικά ενώ το βάρος του κριτηρίου *EE* μειώνεται.
- ⇒ Στιγμιότυπο 28-τέλος: Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου η κίνηση είναι ελεύθερη από οποιουδήποτε χωρικούς περιορισμούς. Το κριτήριο *JA* λαμβάνει την υψηλότερη τιμή βάρους.

Σχήμα 5-3. Η δυναμική μεταβολή των βαρών για την ικανοποίηση των χωρικών περιορισμών

Στην περίπτωση που το νέο σενάριο κίνησης δεν περιλαμβάνει αλλαγές στην περιγραφή του περιβάλλοντος, οι χωρικοί περιορισμοί της παραγόμενης κίνησης είναι οι ίδιοι με αυτούς της κίνησης αναφοράς. Κατά συνέπεια, με την τροποποίηση των βαρών όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-3, η παραγόμενη κίνηση μπορεί να ικανοποιήσει τους χωρικούς περιορισμούς δεδομένου ότι οι εναλλακτικές στάσεις, με το μεγαλύτερο τελικό δείκτη αξιολόγησης στο *SC* στιγμιότυπο, είναι εκείνες που οδηγούν το άκρο εργασίας του νέου ανθρωποειδούς στην ίδια θέση με το άκρο εργασίας του ανθρωποειδούς αναφοράς. Στο Σχήμα 5-5 παρουσιάζεται η τροποποίηση της θέσης του άκρου εργασίας κατά τον άξονα *X*, προκειμένου να ικανοποιηθεί ο χωρικός περιορισμός στο 16ο στιγμιότυπο. Η τροποποίηση στην τροχιά επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της μεθόδου που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-3. Στο Σχήμα 5-5 η

διακεκομμένη καμπύλη αντιπροσωπεύει τη θέση του άκρου εργασίας του νέου ανθρωποειδούς χωρίς την εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου.

Εντούτοις, η εφαρμογή του ίδιου μηχανισμού στις περιπτώσεις που είτε έχει αλλάξει το περιβάλλον (δηλ. υπάρχουν διαφορετικοί χωρικοί περιορισμοί) είτε έχουν αλλάξει ταυτόχρονα και το περιβάλλον και το ανθρωποειδές, θα μπορούσε να έχει ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι χωρικοί περιορισμοί σε αυτές τις περιπτώσεις ακολουθείται μια ελαφρώς διαφορετική προσέγγιση. Κατά τη διάρκεια των περιόδων *adaptation in* και *adaptation out*, η θέση του άκρου εργασίας του ανθρωποειδούς αναφοράς που χρησιμοποιείται στο *EE* κριτήριο μετατοπίζεται κατά μία τιμή (*offset*) σε όλες τις διαστάσεις (x, y, z). Η τιμή αυτής της μετατόπισης είναι η διαφορά σε κάθε διάσταση του τρισδιάστατου χώρου, του νέου χωρικού περιορισμού και της θέσης του άκρου εργασίας του ανθρωποειδούς αναφοράς στο *SC* στιγμιότυπο (Σχήμα 5-4 (α), (β)). Αυτή η υπολογισμένη τροχιά του άκρου εργασίας του ανθρωποειδούς αναφοράς χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς του *EE* κριτηρίου και εφαρμόζεται η μέθοδος που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-5. Τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-4 (γ), (δ).

Σχήμα 5-4. (α) Αρχική τροχιά του άκρου εργασίας του ανθρωποειδούς αναφοράς (β) Η τροχιά μετατοπίζεται κατά τη διάρκεια των *adaptation in/out* περιόδων (γ) Η προσαρμοσμένη τροχιά όταν το νέο ανθρωποειδές είναι το ίδιο με το ανθρωποειδές αναφοράς (δ) Η προσαρμοσμένη τροχιά όταν το νέο ανθρωποειδές είναι διαφορετικό από το ανθρωποειδές αναφοράς

Σχήμα 5-5. Παράδειγμα εφαρμογής της προσαρμογής της κίνησης σε νέο ανθρωποειδές με ικανοποίηση του χωρικού περιορισμού (SC)

5.2.5 Μηχανισμός συνάθροισης

Για να προκύψει ένας μοναδικός αριθμός που να περιγράφει ολόκληρη την απόδοση μιας παραγόμενης στάσης, πραγματοποιείται μια φάση συνάθροισης. Στη φάση αυτή λαμβάνεται υπόψη η σχετική επιρροή κάθε κριτηρίου στον υπολογισμό του τελικού δείκτη αξιολόγησης, αναθέτοντας το βάρος σε κάθε κριτήριο. Μεγάλη τιμή βάρους σημαίνει αυξημένη επιρροή του κριτηρίου και αντίστροφα. Το άθροισμα όλων των βαρών των κριτηρίων είναι ίσο με 1:

$$\sum_{q=1}^2 w_q = 1 \quad (\text{Εξ. 5-11})$$

όπου:

q : ο αύξων αριθμός του κριτηρίου αξιολόγησης, με $q=1$ για το JA και $q=2$ για το EE κριτήριο αξιολόγησης

w_q : το βάρος του κριτηρίου q

Για τη συνάθροιση χρησιμοποιείται η Εξ. 12:

$$utility_m = \sum_{q=1}^2 (w_q \times c_{mq}^*) \quad (\text{Εξ. 5-12})$$

όπου:

$utility_m$: ο τελικός δείκτης αξιολόγησης για την εναλλακτική στάση m , με $m \in [1, MNA]$

q : ο αύξων αριθμός του κριτηρίου αξιολόγησης, με $q=1$ για το JA και $q=2$ για το EE κριτήριο αξιολόγησης

w_q : το βάρος του κριτηρίου q

C_{mq}^* : ο κανονικοποιημένος δείκτης αξιολόγησης των m εναλλακτικών στάσεων για το κριτήριο q

5.2.6 Μηχανισμός κατάταξης και επιλογής βέλτιστης λύσης

Η τιμή του τελικού δείκτη αξιολόγησης ($utility_m$) χρησιμοποιείται για την κατάταξη και σύγκριση των παραγόμενων εναλλακτικών στάσεων. Με βάση την τιμή του τελικού δείκτη αξιολόγησης επιλέγεται και εξάγεται από το σύστημα η βέλτιστη λύση (στάση σώματος) για το συγκεκριμένο στιγμιότυπο της νέας κίνησης.

5.2.7 Μηχανισμός βελτίωσης ρεαλισμού της παραγόμενης κίνησης

Η μέθοδος προσαρμογής κινήσεων που περιγράφεται σε αυτή την εργασία βασίζεται στην αξιολόγηση των εναλλακτικών στάσεων με βάση δύο συγκεκριμένα κριτήρια σε κάθε στιγμιότυπο της κίνησης. Αφού η αξιολόγηση γίνεται σε κάθε μεμονωμένο στιγμιότυπο, δεν λαμβάνονται υπόψη οι συσχετίσεις των διαδοχικών στιγμιότυπων. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει ασυνέχεια στην παραγόμενη κίνηση. Η ασυνέχεια αυτή αποτελείται από απότομες αλλαγές στη μονοτονία των καμπυλών των γωνιών των αρθρώσεων με αποτέλεσμα να διαστρεβλώνεται η κίνηση. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε μηχανισμός βελτίωσης του ρεαλισμού της παραγόμενης κίνησης, ο οποίος εφαρμόζει γραμμική παρεμβολή στην καμπύλη μεταβολής κάθε γωνίας άρθρωσης, προκειμένου να εξαλείψει την ανεπιθύμητη ασυνέχεια της παραγόμενης κίνησης.

5.2.8 Μηχανισμός βελτίωσης αξιοπιστίας της παραγόμενης κίνησης

Η αξιοπιστία της παραγόμενης κίνησης εξετάζεται με τη χρήση λογισμικών εργαλείων ψηφιακών ανθρωποειδών. Σε περίπτωση που η ποιότητα της παραγόμενης κίνησης δεν είναι αποδεκτή, πράγμα το οποίο σχετίζεται με τον ρεαλισμό και την ικανοποίηση των χωρικών περιορισμών της εργασίας, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αυξήσει τον αριθμό των παραγόμενων εναλλακτικών στάσεων σώματος, προκειμένου να παραχθεί τελικά μια νέα κίνηση καλύτερης ποιότητας και αξιοπιστίας. Ο αριθμός των εναλλακτικών στάσεων σώματος ανθρωποειδούς που αξιολογούνται σε κάθε κύκλο του αλγορίθμου (για την παραγωγή ενός στιγμιότυπου της παραγόμενης κίνησης) καθορίζεται από την παράμετρο MNA .

5.3 Παραδοχές του συστήματος

Κατά το σχεδιασμό του συστήματος έγιναν οι παρακάτω παραδοχές:

- ⇒ Τόσο τα μέλη της κινηματικής αλυσίδας του ψηφιακού ανθρωποειδούς όσο και τα αντικείμενα που απαρτίζουν το περιβάλλον εργασίας θεωρήθηκαν ως αντικείμενα που δεν υπόκεινται σε παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της κίνησης.
- ⇒ Η μοντελοποίηση της ανθρώπινης κίνησης αποκλειστικά και μόνο σε παραμέτρους κινηματικής (π.χ. μετατόπιση, ταχύτητα, περιστροφή) και όχι δυναμικής ανάλυσης της κίνησης (π.χ. αδράνεια, ροπή αρθρώσεων, βαρύτητα, μυϊκή δύναμη).
- ⇒ Ο ρεαλισμός της παραγόμενης κίνησης σχετίζεται αποκλειστικά και μόνο με την ομοιότητα των τιμών των γωνιών των αρθρώσεων μεταξύ νέας κίνησης και κίνησης αναφοράς (που εκ των πραγμάτων θεωρείται ρεαλιστική αφού είναι αποτέλεσμα καταγραφής κίνησης από άνθρωπο).
- ⇒ Η αξιοπιστία της παραγόμενης κίνησης σχετίζεται αποκλειστικά και μόνο με την Ευκλείδεια απόσταση του άκρου εργασίας από τους χωρικούς περιορισμούς που ορίζονται από την εκάστοτε εργασία.

6 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

6.1 Σχεδιασμός συστήματος

Το σύστημα υλοποίησης της προτεινόμενης μεθοδολογίας αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη:

- ⇒ Τη Βάση Δεδομένων, μέσα στην οποία αποθηκεύονται αρχεία κινήσεων αναφοράς, ψηφιακών ανθρωποειδών, περιβαλλόντων εργασίας και περιγραφών εργασιών.
- ⇒ Το Μηχανισμό που παράγει τις εναλλακτικές στάσεις σώματος λαμβάνοντας υπ' όψη τους περιορισμούς των νέων συνθηκών.
- ⇒ Τα Κριτήρια Αξιολόγησης των εναλλακτικών κινήσεων που στην παρούσα φάση είναι τα *JA* και *EE*.
- ⇒ Τον Πίνακα Αποφάσεων (*decision matrix*), ο οποίος υπολογίζει για κάθε εναλλακτική κίνηση και με βάση τα κριτήρια αξιολόγησης το δείκτη αξιολόγησης.
- ⇒ Το Μηχανισμό συνολικής αξιολόγησης εναλλακτικών (*aggregation*), ο οποίος με βάση τους δείκτες αξιολόγησης του Πίνακα Αποφάσεων και τα βάρη των κριτηρίων, υπολογίζει τον τελικό δείκτη αξιολόγησης για κάθε εναλλακτική κίνηση.
- ⇒ Το Μηχανισμό Επιλογής της βέλτιστης κίνησης, ο οποίος κατατάσσει (*rank*) τις εναλλακτικές κινήσεις με βάση τον τελικό δείκτη αξιολόγησης.

Σχήμα 6-1. Διάγραμμα σύνδεσης μηχανισμών του αλγορίθμου προσαρμογής κίνησης

6.2 Περιβάλλον ανάπτυξης

Στο Σχήμα 6-2 φαίνεται το διάγραμμα χρήσης του συστήματος (*Use Case Diagram*). Αριστερά φαίνεται η επικοινωνία του τελικού χρήστη με το σύστημα, μέσω του γραφικού περιβάλλοντος χρήστη, ενώ δεξιά η διασύνδεση του υπεύθυνου υλοποίησης με το σύστημα για τον καθορισμό των δεδομένων που απαιτούνται για να γίνει η διασύνδεση με τον τελικό χρήστη.

Σχήμα 6-2. Διάγραμμα χρήσης του συστήματος (*Use Case diagram*)

Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε είναι η C++. Τα δεδομένα εισόδου, όπως οι διαστάσεις του σώματος του ανθρωποειδούς και η περιγραφή των χωρικών περιορισμών, είναι τυποποιημένα με χρήση *XML* (*eXtensible Markup Language*). Το σύστημα μπορεί να εισάγει και να εξάγει δεδομένα κινήσεων, σε κατάλληλο τύπο αρχείου, συμβατό με το εργαλείο μοντελοποίησης ανθρώπινης κίνησης που χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση των κινήσεων των ανθρωποειδών και τον έλεγχο της ρεαλιστικότητας της κίνησης. Το λογισμικό που επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε είναι το *Ramsis* της *Human Solutions* (βλ. παρ. 2.2.4).

6.3 Γραφικό περιβάλλον χρήστη

Στο Σχήμα 6-3 φαίνεται το γραφικό περιβάλλον χρήστη (Graphical User Interface – GUI) του συστήματος. Τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσει ο χρήστης προκειμένου να παράγει μία νέα κίνηση παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

6.3.1 Επιλογή εργασίας

Για την επιλογή της εργασίας, ο χρήστης επιλέγει το κουμπί ‘Load Task’ (Σχήμα 6-3).

Reference Motion

Reference Manikin

Manikin: 01YM

Frames: 50

Quality: Low High

Manikin File: 01YM_man.xml
Group: SF
Gender: female
Age: 33
Weight: 49
Stature: 1440
Sitting Height: 700

	From Frame	To Frame	X	Y	Z	Constrained Trajectory	End Effector	Enable
1								
2								
3								
4								
5								

Load Task Calculate Cancel

Σχήμα 6-3. Γραφικό περιβάλλον χρήστη: Επιλογή εργασίας εκτέλεσης

Έπειτα, εμφανίζεται το παράθυρο επιλογής της εργασίας προς φόρτωση (Σχήμα 6-4), όπου ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το XML αρχείο της εργασίας που επιθυμεί να ελέγξει.

Αφού επιλεγεί και φορτωθεί η εργασία, εμφανίζονται πληροφορίες σχετικά με τα αρχεία που περιγράφουν το ψηφιακό ανθρωποειδές και την κίνηση αναφοράς, καθώς επίσης και τους χωρικούς περιορισμούς (Σχήμα 6-5).

Σχήμα 6-4. Επιλογή xml αρχείου περιγραφής εργασίας

Σχήμα 6-5. Εμφάνιση των πληροφοριών της εργασίας που έχει φορτωθεί

6.3.2 Επιλογή του νέου ψηφιακού ανθρωποειδούς

Είναι διαθέσιμα 15 ψηφιακά ανθρωποειδή με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Τα ψηφιακά ανθρωποειδή έχουν επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν σε μεγάλο βαθμό τους διαφορετικούς σωματότυπους που χαρακτηρίζουν το μεγαλύτερο ποσοστό του πληθυσμού. Καθώς επιλέγεται το ψηφιακό ανθρωποειδές μέσω ενός drop-down μενού, εμφανίζονται δεξιά και τα ανθρωπομετρικά του στοιχεία (Σχήμα 6-6).

Σχήμα 6-6. Επιλογή νέου ψηφιακού ανθρωποειδούς

6.3.3 Καθορισμός του επιθυμητού αριθμού στιγμιότυπων της παραγόμενης κίνησης

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αλλάξει, εάν επιθυμεί, το πλήθος των στιγμιότυπων κίνησης της παραγόμενης κίνησης, επιλέγοντας και αλλάζοντας τον αριθμό που εμφανίζεται στο πεδίο 'Frames'. Οι επιτρεπτές τιμές του πλήθους στιγμιότυπων κίνησης είναι από 2 έως 1000 (Σχήμα 6-7). Εάν ο χρήστης δεν επιθυμεί να αλλάξει τη μεταβλητή αυτή τότε η παραγόμενη κίνηση θα έχει τον ίδιο αριθμό στιγμιότυπων με αυτόν της κίνησης αναφοράς. Η παραγωγή κίνησης με πλήθος στιγμιότυπων διαφορετικό από εκείνο της κίνησης αναφοράς πραγματοποιείται από το σύστημα κάνοντας χρήση γραμμικής παρεμβολής.

Σχήμα 6-7. Καθορισμός του συνολικού αριθμού των στιγμιότυπων της νέας κίνησης

6.3.4 Καθορισμός της ποιότητας της παραγόμενης κίνησης

Με τη χρήση της οριζόντιας μπάρας κύλισης ‘Quality’ ο χρήστης μπορεί να καθορίσει την ποιότητα της παραγόμενης κίνησης. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιθυμητή ποιότητα της παραγόμενης κίνησης, τόσο αυξάνεται ο αριθμός εναλλακτικών στάσεων που παράγονται και αξιολογούνται (Σχήμα 6-8). Η αριστερή θέση της μπάρας κύλισης (ένδειξη: *Low*) αντιστοιχεί σε 1000 *MNA*, ενώ η δεξιά (ένδειξη: *High*) αντιστοιχεί σε 10000 *MNA*.

Σχήμα 6-8. Καθορισμός της ποιότητας της παραγόμενης κίνησης

6.3.5 Αλλαγή του περιβάλλοντος εργασίας

Στο κάτω μέρος του γραφικού περιβάλλοντος χρήστη εμφανίζονται οι χωρικοί περιορισμοί της κίνησης αναφοράς. Το σύστημα επιτρέπει στο χρήστη να αλλάξει, εάν επιθυμεί, τη θέση της λαβής της πόρτας, δίνοντας τις επιθυμητές συντεταγμένες (X, Y, Z). Οι συντεταγμένες της νέας θέσης της λαβής της πόρτας θα πρέπει να βρίσκονται μέσα στα επιτρεπτά πλαίσια, που ορίζονται από το σύστημα (Πίνακας 7-1). Όπως είναι εύκολα αντιληπτό, αλλάζοντας τη γεωμετρία του περιβάλλοντος εργασίας (λαβή της πόρτας), η τροχιά του άκρου εργασίας του νέου ψηφιακού ανθρωποειδούς κατά την παραγόμενη κίνηση θα είναι διαφορετική, προκειμένου να ακολουθεί τη νέα τροχιά της λαβής (Σχήμα 6-9).

Σχήμα 6-9. Καθορισμός νέας θέσης (συντεταγμένες) της λαβής της πόρτας

6.3.6 Υπολογισμός της νέας κίνησης

Για την εκκίνηση της διαδικασίας παραγωγής της νέας κίνησης, βάσει των νέων συνθηκών και παραμέτρων που έθεσε ο χρήστης στο σύστημα (βλ. παρ. 6.3.2 έως 6.3.5), επιλέγει το κουμπί 'Calculate' (Σχήμα 6-10). Όσο αυξάνεται η επιθυμητή ποιότητα της παραγόμενης κίνησης (βλ. παρ. 6.3.4), τόσο αυξάνεται (γεωμετρικά) και η απαίτηση του συστήματος σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο για τον υπολογισμό της παραγόμενης κίνησης.

Σχήμα 6-10. Εκκίνηση των υπολογισμών για την παραγωγή της κίνησης

Με την εκκίνηση των υπολογισμών εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο που περιέχει μία μπάρα εξέλιξης των υπολογισμών. Όταν η μπάρα γεμίσει, οι υπολογισμοί ολοκληρώθηκαν και η νέα κίνηση έχει παραχθεί (Σχήμα 6-11).

Σχήμα 6-11. Η μπάρα εξέλιξης των υπολογισμών

Μετά το πέρας των υπολογισμών, ο χρήστης καλείται να αποθηκεύσει τη κίνηση που παράχθηκε. Η κίνηση σώζεται σε αρχείο της μορφής RMR (Ramsis Motion Recorder) file (Σχήμα 6-12), το οποίο τροφοδοτεί το ψηφιακό ανθρωποειδές του Ramsis για την προσομοίωση και αξιολόγηση της παραγόμενης κίνησης.

Σχήμα 6-12. Αποθήκευση της παραγόμενης κίνησης

7 ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Προκειμένου να αξιολογηθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία, η λειτουργία του πιο πάνω συστήματος εξετάστηκε στο πλαίσιο πιλοτικής εφαρμογής ελέγχου εργονομίας θέσης οδηγού επιβατηγού αυτοκινήτου. Η πιλοτική εφαρμογή και τα αποτελέσματα που προέκυψαν περιγράφονται στη συνέχεια.

7.1 Επισκόπηση πιλοτικής εφαρμογής

Η ακρίβεια της αναπτυγμένης μεθόδου έχει εξεταστεί στη περίπτωση του ανοίγματος της πόρτας ενός αυτοκινήτου από άνθρωπο καθισμένο στη θέση του οδηγού. Πραγματοποιήθηκαν και καταγράφηκαν κινήσεις 15 διαφορετικών ανθρώπων που εκτέλεσαν την εργασία “άνοιγμα / κλείσιμο πόρτας αυτοκινήτου” σε ένα ρυθμιζόμενο πειραματικό μοντέλο αυτοκινήτου (Σχήμα 7-1), που παρείχε τη δυνατότητα αλλαγής της θέσης της λαβής της πόρτας του αυτοκινήτου και στις τρεις διαστάσεις του χώρου [LAB-INRETS, 2003]. Τόσο οι άνθρωποι που εκτέλεσαν τα πειράματα, όσο και οι κινήσεις τους ανακατασκευάστηκαν σε ψηφιακή, τρισδιάστατη μορφή και χρησιμοποιήθηκαν σαν δεδομένα του συστήματος. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων βασίζονται στην ομοιότητα μεταξύ της παραγόμενης κίνησης και της κίνησης αναφοράς, καθώς επίσης και στη μέτρηση του σφάλματος ως προς την ικανοποίηση των περιορισμών που επιβάλλουν οι στόχοι της εργασίας, από το νέο ανθρωποειδές.

Σχήμα 7-1. Ρυθμιζόμενο πειραματικό μοντέλο αυτοκινήτου [LAB-INRETS, 2003]

7.2 Περιγραφή εργασίας εκτέλεσης

Το ζήτημα του ανοίγματος της πόρτας του αυτοκινήτου, μπορεί να χωριστεί σε δύο φάσεις σύμφωνα με την αλληλεπίδραση του ανθρωποειδούς με τα αντικείμενα του περιβάλλοντος (λαβή πόρτας και τιμόνι). Αρχικά, η πόρτα είναι κλειστή, το ανθρωποειδές είναι καθισμένο στη θέση του οδηγού με τα χέρια του επάνω στο τιμόνι. Στη πρώτη φάση το αριστερό χέρι κινείται προς τη λαβή της πόρτας και τελικά την πιάνει. Στη δεύτερη φάση, το ανθρωποειδές ανοίγει την πόρτα σπρώχνοντάς την από τη λαβή με το αριστερό χέρι. Στο τελευταίο στιγμιότυπο της κίνησης, το ανθρωποειδές είναι καθισμένο στη θέση του οδηγού με το αριστερό χέρι επάνω στη λαβή της ανοιγμένης πόρτας.

Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης, το χέρι (άκρο εργασίας) κινείται χωρίς να υπάρχει οποιαδήποτε επαφή του με άλλο αντικείμενο, από το τιμόνι προς τη λαβή της πόρτας, ενώ κατά τη διάρκεια της δεύτερης φάσης το άκρο εργασίας οδηγείται από τη λαβή της πόρτας. Τρία στιγμιότυπα καθορίζουν τα όρια των παραπάνω δύο φάσεων, τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 7-2.

Σχήμα 7-2. Τρία στιγμιότυπα-κλειδιά (key-frames) της εργασίας “Άνοιγμα πόρτας αυτοκινήτου”: (α) στιγμιότυπο κρατήματος του τιμονιού (β) στιγμιότυπο πιασίματος της λαβής της πόρτας (γ) στιγμιότυπο που το χέρι αφήνει τη λαβή

7.3 Περιγραφή περιβάλλοντος εργασίας

Το ρυθμιζόμενο πειραματικό μοντέλο αυτοκινήτου που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα έδινε τη δυνατότητα αλλαγής της θέσης της λαβής της πόρτας του αυτοκινήτου. Στο Σχήμα 7-3 παρουσιάζεται η θέση της λαβής της πόρτας ως προς το απόλυτο σύστημα συντεταγμένων (*global coordinate system*). Το κέντρο του συστήματος συντεταγμένων βρίσκεται στο σημείο H (*H-point*) της θέσης του οδηγού. Το σημείο H ορίζεται ως το κέντρο της ευθείας που ενώνει τις αρθρώσεις των γοφών του οδηγού [SAE J826].

Σχήμα 7-3. Ορισμός των παραμέτρων περιβάλλοντος του πειράματος

Ο σχεδιαστής πρέπει να καθορίσει τις συντεταγμένες X_{DH} , Y_{DH} και Z_{DH} της λαβής της πόρτας (*door handle - DH*) σε σχέση με το σημείο H. Τα επιτρεπτά όρια των παραμέτρων αυτών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

X_{DH} (mm)		Y_{DH} (mm)		Z_{DH} (mm)	
min	max	min	max	min	max
-500	-150	-450	-150	0	500

Πίνακας 7-1. Επιτρεπτά όρια τιμών της θέσης της λαβής της πόρτας σε σχέση με το σημείο H

7.4 Περιγραφή ψηφιακού ανθρωποειδούς

Πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση των πληροφοριών που σχετίζονται με την περιγραφή του ψηφιακού ανθρωποειδούς πρέπει να αναφερθεί ότι στο πλαίσιο της πιλοτικής εφαρμογής, για λόγους απλοποίηση της πολύπλοκης δομής του ανθρωπίνου σώματος, συμπεριλήφθηκε μόνο το σκελετικό και όχι το μυϊκό σύστημα. Επίσης η σπονδυλική στήλη θεωρήθηκε άκαμπτη και το πάνω-αριστερού τμήματος του ανθρώπινου σώματος αντιστοιχήθηκε με κινηματική αλυσίδα 4 αρθρώσεων, 10 βαθμών ελευθερίας (Σχήμα 7-5).

Μόλις ο χρήστης επιλέξει το νέο ανθρωποειδές, οι κατάλληλοι πίνακες μετασχηματισμού των αρθρώσεων του που αποτελούν την κινηματική του αλυσίδα (Σχήμα 7-5), ανακτώνται και φορτώνονται ως είσοδοι στο σύστημα. Επιπλέον, φορτώνονται και οι αντίστοιχοι πίνακες μετασχηματισμού του ανθρωποειδούς αναφοράς.

Η κινηματική αλυσίδα που χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της πιλοτικής εφαρμογής είναι συμβατή με αυτή του ψηφιακού ανθρωποειδούς *Ramsis* [Human Solutions, 2009]. Η τοπολογία της πλήρους κινηματικής αλυσίδας του *Ramsis* παρουσιάζεται στο Σχήμα 7-4.

Σχήμα 7-4. Τοπολογία της κινηματικής αλυσίδας του ψηφιακού ανθρωποειδούς *Ramsis* – “στάση μηδέν” [Human Solutions, 2009]

Οι αρθρώσεις που ενδιαφέρουν, για την κίνηση της πιλοτικής εφαρμογής, καθώς και οι αντίστοιχοι βαθμοί ελευθερίας τους (*Degrees of Freedom - DoF*), είναι:

- ⇒ το οσφυϊκό-ιερό οστό (*GLK*) με 2 *DoF*,
- ⇒ η αριστερή κλείδωση (*GSBL*) με 3 *DoF*,
- ⇒ ο αριστερός ώμος (*GSL*) με 3 *DoF*, και
- ⇒ ο αριστερός αγκώνας (*GELL*) με 2 *DoF*.

Ως άκρο εργασίας (*end-effector*) ορίζεται η άρθρωση του αριστερού καρπού (*GHAL*).

Στο Σχήμα 7-5, παρουσιάζονται οι παραπάνω αρθρώσεις και τα τοπικά συστήματα συντεταγμένων τους. Οι συντεταγμένες της θέσης του άκρου εργασίας υπολογίζονται χρησιμοποιώντας μέθοδο ευθείας κινηματικής (*direct kinematics*).

Σχήμα 7-5. Βαθμοί ελευθερίας και τοπικά συστήματα συντεταγμένων απλοποιημένης κινηματικής αλυσίδας (4 αρθρώσεων, 10 βαθμών ελευθερίας)

Με βάση την παραπάνω δομή της κινηματικής αλυσίδας του σώματος του ψηφιακού ανθρωποειδούς, ο τύπος για τον υπολογισμό του *EE κριτηρίου* δίνεται παρακάτω:

$$score_{cr.2} = \sqrt{(X'_{GHAL} - X_{GHAL})^2 + (Y'_{GHAL} - Y_{GHAL})^2 + (Z'_{GHAL} - Z_{GHAL})^2} \quad (\text{Εξ. 7-1})$$

Για να υπολογιστούν οι συντεταγμένες της θέσης του άκρου εργασίας με ευθεία κινηματική πρέπει να είναι εκ των προτέρων γνωστές οι συντεταγμένες του σημείου *H* (*H-point*) του ψηφιακού ανθρωποειδούς (άρθρωση *GHZ*, Σχήμα 7-5) καθώς επίσης και οι πίνακες μετασχηματισμού των τοπικών συστημάτων συντεταγμένων των τεσσάρων αρθρώσεων που μελετούνται. Παρακάτω φαίνεται η λειτουργία της ευθείας κινηματικής για την κινηματική αλυσίδα που μελετάται:

$${}^{GLOBAL}_{p_{GHAL}} = T_{GHZ} * {}^{GLOBAL}M_{GHZ} * {}^{GHZ}M_{GLK} * R_{GLK} * {}^{GLK}M_{GSBL} * R_{GSBL} * {}^{GSBL}M_{GSL} * R_{GSL} * {}^{GSL}M_{GELL} * R_{GELL} * {}^{GELL}p_{GHAL} \quad (\text{Εξ. 7-2})$$

όπου:

- ${}^{GLOBAL}\underline{p}_{GHZ}$: το διάνυσμα μεγέθους 4x1 που καθορίζει τη θέση του άκρου εργασίας (*GHAL*) σε σχέση με το απόλυτο σύστημα συντεταγμένων (*GLOBAL*)
- T_{GHZ} : ο 4x4 πίνακας μετατόπισης του τοπικού συστήματος συντεταγμένων της άρθρωσης *GHZ* (*H-point*) σε σχέση με το απόλυτο σύστημα συντεταγμένων (*GLOBAL*) σε ένα συγκεκριμένο στιγμιότυπο
- ${}^{GLOBAL}M_{GHZ}$: ο “στατικός”¹ 4x4 πίνακας στροφής-μετατόπισης του τοπικού συστήματος συντεταγμένων της άρθρωσης *GHZ* σε σχέση με το απόλυτο σύστημα συντεταγμένων (*GLOBAL*)
- ${}^{GHZ}M_{GLK}$: ο “στατικός” 4x4 πίνακας στροφής-μετατόπισης του τοπικού συστήματος συντεταγμένων της άρθρωσης *GLK* σε σχέση με το τοπικό σύστημα συντεταγμένων της άρθρωσης *GHZ*
- R_{GLK} : ο 4x4 πίνακας στροφής του τοπικού συστήματος συντεταγμένων της άρθρωσης *GLK* σε σχέση με το αντίστοιχο “στατικό” του, σε συγκεκριμένο στιγμιότυπο
- ${}^{GLK}M_{GSBL}$: ο “στατικός” 4x4 πίνακας στροφής-μετατόπισης του τοπικού συστήματος συντεταγμένων της άρθρωσης *GSBL* σε σχέση με το τοπικό σύστημα συντεταγμένων της άρθρωσης *GLK*
- R_{GSBL} : ο 4x4 πίνακας στροφής του τοπικού συστήματος συντεταγμένων της άρθρωσης *GSBL* σε σχέση με το αντίστοιχο “στατικό” του, σε συγκεκριμένο στιγμιότυπο
- ${}^{GSBL}M_{GSL}$: ο “στατικός” 4x4 πίνακας στροφής-μετατόπισης του τοπικού συστήματος συντεταγμένων της άρθρωσης *GSL* σε σχέση με το τοπικό σύστημα συντεταγμένων της άρθρωσης *GSBL*
- R_{GSL} : ο 4x4 πίνακας στροφής του τοπικού συστήματος συντεταγμένων της άρθρωσης *GSL* σε σχέση με το αντίστοιχο “στατικό” του, σε συγκεκριμένο στιγμιότυπο

¹ Ο “στατικός” πίνακας στροφής-μετατόπισης μιας άρθρωσης περιέχει όλη την πληροφορία σχετικά με τη θέση και τον προσανατολισμό του τοπικού συστήματος συντεταγμένων της άρθρωσης αυτής, σε σχέση με το τοπικό σύστημα συντεταγμένων της αμέσως προηγούμενης άρθρωσης στην κινηματική αλυσίδα. Απαραίτητη προϋπόθεση για τον προσδιορισμό του, είναι το ψηφιακό ανθρωποειδές να είναι τοποθετημένο στη “στάση μηδέν” (Σχήμα 7-4), δηλαδή όλες οι γωνίες των αρθρώσεων να έχουν την τιμή μηδέν.

$^{GSL}M_{GELL}$: ο “στατικός” 4x4 πίνακας στροφής-μετατόπισης του τοπικού συστήματος συντεταγμένων της άρθρωσης $GELL$ σε σχέση με το τοπικό σύστημα συντεταγμένων της άρθρωσης GSL

R_{GELL} : ο 4x4 πίνακας στροφής του τοπικού συστήματος συντεταγμένων της άρθρωσης $GELL$ σε σχέση με το αντίστοιχο “στατικό” του, σε συγκεκριμένο στιγμιότυπο

$^{GELL}\underline{p}_{GHAL}$: το διάνυσμα μεγέθους 4x1 που καθορίζει τη θέση της άρθρωσης $GHAL$ σε σχέση το τοπικό σύστημα συντεταγμένων της άρθρωσης $GELL$

Πέρα από τις αρθρώσεις που μελετούνται στην πιλοτική, η κινηματική αλυσίδα του σώματος των ανθρωποειδών στο *Ramsis* περιέχει και άλλες αρθρώσεις, όπως τις αρθρώσεις των ποδιών, του δεξιού χεριού και του κορμού. Στο παραγόμενο *RMR* αρχείο κίνησης, οι γωνίες των αρθρώσεων αυτών και οι συντεταγμένες της GHZ είναι ίδιες με τις αντίστοιχες του *RMR* αρχείου κίνησης του ανθρωποειδούς αναφοράς. Επιπλέον, οι γωνίες των αρθρώσεων του κορμού του σώματος που βρίσκονται ανάμεσα στις αρθρώσεις $GSBL$ και GLK επηρεάζουν τη θέση και τον προσανατολισμό του συστήματος συντεταγμένων της $GSBL$ και επομένως, και τη θέση και τον προσανατολισμό ολόκληρου του αριστερού χεριού. Άρα, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον υπολογισμό του $^{GLK}M_{GSBL}$ όπως φαίνεται παρακάτω:

$$^{GLK}M_{GSBL} = ^{GLK}M_{GLL} * R_{GLL} * ^{GLL}M_{GBL} * R_{GBL} * ^{GBL}M_{GBB} * R_{GBB} * ^{GBB}M_{GHB} * R_{GHB} * ^{GHB}M_{GBRK} * R_{GBRK} * ^{GBRK}M_{GSBL} \quad (\text{Εξ. 7-3})$$

όπου:

$^J M_I$: ο “στατικός” 4x4 πίνακας στροφής-μετατόπισης του τοπικού συστήματος συντεταγμένων της άρθρωσης I σε σχέση με το τοπικό σύστημα συντεταγμένων της άρθρωσης J

R_K : ο 4x4 πίνακας στροφής του τοπικού συστήματος συντεταγμένων της άρθρωσης K σε σχέση με το αντίστοιχο “στατικό” του, σε συγκεκριμένο στιγμιότυπο, και GLL , GBL , GBB , GHB , $GBRK$ είναι οι αρθρώσεις ανάμεσα στις αρθρώσεις GLK και $GSBL$ του κορμού του σώματος του χρησιμοποιούμενου ανθρωποειδούς

Οι πινάκες μετασχηματισμού των ψηφιακών ανθρωποειδών (αναφοράς και νέων) που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της πιλοτικής εφαρμογής παρατίθεται στο Παράρτημα Ι.

7.5 Περιγραφή περιορισμών

7.5.1 Περιορισμοί κίνησης του ανθρώπινου σώματος (*Body Constraints – BC*)

Τα φυσικά όρια κίνησης (*Range of Motion - RoM*) κάθε άρθρωσης που μελετάται παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7-2). Οι τιμές των ορίων αυτών για κάθε άξονα X , Y , Z (RoM_x , RoM_y , RoM_z) που έχουν οριστεί στο *Ramsis*, χρησιμοποιούνται και στον αλγόριθμο του συστήματος.

Άρθρωση	Συντόμευση	DoF	RoM_x	RoM_y	RoM_z
Οσφυϊκό-ιερό οστό	GLK	2	-	[-11°, 11°]	[-25°, 10°]
Αριστερή κλείδωση	GSBL	3	[-15°, 5°]	[-25°, 15°]	[-15°, 35°]
Αριστερός ώμος	GSL	3	[-85°, 85°]	[-80°, 80°]	[-80°, 135°]
Αριστερός αγκώνας	GELL	2	[-80°, 100°]	[-145°, 0°]	-

Πίνακας 7-2. Εύρος επιτρεπτών τιμών γωνιών των επιλεγμένων αρθρώσεων

7.5.2 Περιορισμοί ταχύτητας μεταβολής γωνιών αρθρώσεων (*Speed – S*)

Αναλύοντας την κίνηση αναφοράς, εξάγονται οι περιορισμοί ταχύτητας μεταβολής για τις τέσσερις επιλεγμένες αρθρώσεις (Πίνακας 7-3).

Άρθρωση	Συντόμευση	X	Y	Z
Οσφυϊκό-ιερό οστό	GLK	-	[-0.01°, 0.05°]	[-0.01°, 0.01°]
Αριστερή κλείδωση	GSBL	[-1.38°, 2.41°]	[-0.53°, 0.97°]	[-1.06°, 0.40°]
Αριστερός ώμος	GSL	[-2.41°, 4.81°]	[-2.02°, 1.65°]	[-2.07°, 0.51°]
Αριστερός αγκώνας	GELL	[-7.76°, 5.55°]	[-1.22°, 1.52°]	-

Πίνακας 7-3. Εύρος επιτρεπτών τιμών μεταβολής γωνιών των επιλεγμένων αρθρώσεων

7.5.3 Χωρικοί περιορισμοί (*Spatial Constraints – SC*)

Η κίνηση αναφοράς για το άνοιγμα της πόρτας αυτοκινήτου που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της μεθόδου αποτελείται από 78 στιγμιότυπα. 32 από τα 78 στιγμιότυπα είναι στιγμιότυπα περιορισμού (*constraint frames*). Τα στιγμιότυπα περιορισμού και η αντίστοιχη θέση του άκρου εργασίας (άρθρωση *GHAL*) παρουσιάζονται λεπτομερώς στον παρακάτω πίνακα.

Στιγμιότυπο	Θέση άκρου εργασίας (mm)			Περιγραφή χωρικού περιορισμού
	X	Y	Z	
1°	-146.8	-419.5	257.4	Εφαρμογή του άκρου εργασίας στο τιμόνι του αυτοκινήτου
46°	-264.6	-315.7	207.8	Εφαρμογή του άκρου εργασίας στη λαβή της πόρτας του αυτοκινήτου
47° – 78°	-	-	-	Οδήγηση άκρου εργασίας από την τροχιά της λαβής της πόρτας κατά το άνοιγμα της πόρτας

Πίνακας 7-4. Χωρικοί περιορισμοί της εργασίας “Άνοιγμα πόρτας αυτοκινήτου”

Η ακρίβεια της κίνησης ελέγχεται μετρώντας το σφάλμα όσον αφορά στην ικανοποίηση του χωρικού περιορισμού στο στιγμιότυπο 46.

7.6 Αποτελέσματα – Αξιολόγηση του συστήματος

Προκειμένου να ελεγχθεί η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου προσαρμογής κινήσεων, εκτελέστηκαν αρκετές δοκιμές. Σε όλες μετρήθηκε η απόσταση (σε mm) του άκρου εργασίας του νέου ανθρωποειδούς από τη λαβή της πόρτας στο στιγμιότυπο 46. Τα πειράματα αξιολόγησης του συστήματος σχεδιάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε η μέθοδος να μπορεί να αξιολογηθεί σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις:

- ⇒ Στο πρώτο σενάριο αξιολόγησης του συστήματος, το νέο ανθρωποειδές έχει διαφορετικά ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά αλλά το περιβάλλον εργασίας παραμένει το ίδιο, όπως στην κίνηση αναφοράς: Εκτελέστηκαν 25 δοκιμές. Οι παράμετροι που μεταβάλλονται σε αυτές τις δοκιμές είναι το νέο ανθρωποειδές (χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικά ανθρωποειδή) και οι τιμές της παραμέτρου *MNA* (πέντε διαφορετικές τιμές *MNA*). Ο Πίνακας 7-5 παρουσιάζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανθρωποειδούς αναφοράς και των νέων ανθρωποειδών. Η μεταβολή της τιμής της παραμέτρου *MNA* στις δοκιμές, καταδεικνύει το γεγονός ότι όσο υψηλότερη η είναι η τιμή του, τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια της κίνησης. Ο Πίνακας 7-6 και το διάγραμμα του Σχήμα 7-6 συγκεντρώνει τα αποτελέσματα των δοκιμών του πρώτου σεναρίου αξιολόγησης. Το Σχήμα 7-9 παρουσιάζει πέντε στιγμιότυπα της κίνησης αναφοράς και της παραγόμενης κίνησης για δύο διαφορετικές τιμές *MNA*.
- ⇒ Στο δεύτερο σενάριο αξιολόγησης, το νέο ανθρωποειδές και το ανθρωποειδές αναφοράς έχουν ακριβώς τα ίδια ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά, αλλά το περιβάλλον εργασίας (θέση λαβής πόρτας αυτοκινήτου) διαφοροποιείται: Μια τέτοια αλλαγή επιβάλλει διαφορετικούς χωρικούς περιορισμούς στην παραγόμενη κίνηση. Εκτελέστηκαν 35 διαφορετικές δοκιμές. Χρησιμοποιήθηκαν επτά διαφορετικές θέσεις της λαβής της πόρτας για πέντε διαφορετικές τιμές *MNA*. Ο Πίνακας 7-7 και το διάγραμμα του Σχήμα 7-7 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των δοκιμών του δεύτερου σεναρίου αξιολόγησης.
- ⇒ Στο τρίτο σενάριο αξιολόγησης του συστήματος, τόσο το ανθρωποειδές όσο και το περιβάλλον εργασίας του νέου σεναρίου είναι διαφορετικά από αυτά της κίνησης αναφοράς: 45 δοκιμές εκτελέστηκαν στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά νέα ανθρωποειδή, τρεις διαφορετικές θέσεις της λαβής της πόρτας και πέντε

διαφορετικές τιμές *MNA*. Ο Πίνακας 7-8 και το διάγραμμα του Σχήμα 7-8 παρουσιάζει τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν και την ακρίβεια που επιτεύχθηκε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων αξιολόγησης του τρίτου σεναρίου.

	Ανθρωποειδής αναφοράς	Νέα Ανθρωποειδή				
		1ο	2ο	3ο	4ο	5ο
Ανάστημα	1680	1440	1590	1700	1790	1870
Ύψος (θέση καθίσματος)	850	700	810	890	920	950
Πλάτος ώμων	480	420	480	430	450	500
Μήκος άνω βραχίονα	355	340	360	350	400	430
Μήκος κάτω βραχίονα	440	370	440	430	450	480

Πίνακας 7-5. Ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά του ανθρωποειδούς αναφοράς και των νέων ανθρωποειδών (όλες οι μετρήσεις του πίνακα είναι σε mm)

Νέο Ανθρωποειδής	Μέγιστος Αριθμός Εναλλακτικών Στάσεων (<i>MNA</i>)				
	10	100	1.000	10.000	100.000
1ο	8.6	3.2	2.3	1.8	1.6
2ο	10.7	2.9	1.7	1.6	1.6
3ο	7.3	3.4	2.3	1.9	1.6
4ο	6.1	3.0	2.3	1.8	1.6
5ο	11.2	3.6	2.0	1.7	1.3
Μέσος όρος	8.8	3.2	2.1	1.8	1.5

Πίνακας 7-6. Αποτελέσματα αξιολόγησης της πρώτης περίπτωσης. Η απόκλιση του άκρου εργασίας του νέου ανθρωποειδούς από τη θέση της λαβής της πόρτας στο στιγμιότυπο 46, για διαφορετικά ανθρωποειδή και διαφορετικές τιμές του *MNA*

Σχήμα 7-6. Διάγραμμα αποτελεσμάτων αξιολόγησης της πρώτης περίπτωσης. Η απόκλιση του άκρου εργασίας του νέου ανθρωποειδούς από τη θέση της λαβής της πόρτας στο στιγμιότυπο 46, για διαφορετικά ανθρωποειδή και διαφορετικές τιμές του MNA

Θέση λαβής πόρτας (mm)			Μέγιστος Αριθμός Εναλλακτικών Στάσεων (MNA)				
X	Y	Z	10	100	1.000	10.000	100.000
-318	-224	68	75.3	43.2	24.8	12.0	6.1
-237	-409	371	79.3	47.6	27.2	14.9	9.3
-203	-393	268	8.2	3.2	2.1	1.7	1.8
-229	-266	112	57.2	29.6	12.9	4.8	2.7
-266	-344	96	74.0	52.1	35.5	25.3	18
-258	-380	226	5.9	2.9	2.0	1.7	1.8
-263	-191	209	10.2	3.0	1.8	1.3	1.3
Μέσος όρος			44.3	25.9	15.1	8.8	5.8

Πίνακας 7-7. Αποτελέσματα αξιολόγησης της δεύτερης περίπτωσης. Η απόκλιση του άκρου εργασίας του ανθρωποειδούς αναφοράς από τη λαβή της πόρτας στο στιγμιότυπο 46, για διαφορετικές συντεταγμένες της λαβής και για διαφορετικές τιμές του MNA

Σχήμα 7-7. Διάγραμμα αποτελεσμάτων αξιολόγησης της δεύτερης περίπτωσης. Η απόκλιση του άκρου εργασίας του ανθρωποειδούς αναφοράς από τη λαβή της πόρτας στο στιγμιότυπο 46, για διαφορετικές θέσεις της λαβής πόρτας και για διαφορετικές τιμές του MNA

Τα αποτελέσματα, σε όλες τις περιπτώσεις, δείχνουν ότι η αύξηση της παραμέτρου *MNA* μειώνει το λάθος σημαντικά. Στην πρώτη περίπτωση (Πίνακας 7-6), όταν $MNA > 10$, το λάθος είναι μικρό για το δεύτερο νέο ανθρωποειδές, δεδομένου ότι αυτό το ανθρωποειδές μοιάζει περισσότερο με αυτό της αναφοράς. Το σφάλμα αυξάνεται καθώς οι ανθρωπομετρικές διαφορές μεγαλώνουν. Αν και ο χωρικός περιορισμός ικανοποιείται επαρκώς (η απόσταση είναι μικρότερη των 12mm σε όλες τις δοκιμές του πρώτου σεναρίου αξιολόγησης), ακόμη και για μικρό *MNA*, συνιστάται η παράμετρος *MNA* να είναι μεγαλύτερη από 1000, προκειμένου η παραγόμενη κίνηση να μην είναι κακής ποιότητας όπως δείχνει το Σχήμα 7-9(β). Επιπλέον, το Σχήμα 7-9 δείχνει ότι ο αλγόριθμος παράγει μια κίνηση (στήλη (γ)) που είναι παρόμοια με αυτή της αναφοράς (στήλη (α)).

Νέο Ανθρωποειδές	Θέση λαβής πόρτας (mm)			Μέγιστος Αριθμός Εναλλακτικών Στάσεων (MNA)				
	X	Y	Z	10	100	1.000	10.000	100.000
1ο	-213	-270	202	5.3	2.5	1.7	1.5	1.2
1ο	-278	-291	429	114.1	49.7	16.2	5	2.8
1ο	-256	-253	395	79.6	19.8	3.9	2.5	2
3ο	-332	-298	230	35.3	15.2	7.1	3.8	3
3ο	-376	-383	382	86.4	19.9	8	2.5	2.3
3ο	-346	-297	375	63.6	9.4	3.2	2.3	2.1
4ο	-299	-235	195	6.6	2.9	1.7	1.3	1.3
4ο	-344	-438	350	38.8	4.6	2.7	2.4	2.3
4ο	-262	-285	343	12.9	3.5	2.4	1.6	1.7
Μέσος όρος				49.2	14.2	5.2	2.5	2.1

Πίνακας 7-8. Αποτελέσματα αξιολόγησης της τρίτης περίπτωσης. Η απόκλιση του άκρου εργασίας των νέων ανθρωποειδών από τη λαβή της πόρτας στο στιγμιότυπο 46, για διαφορετικές συντεταγμένες της λαβής και για διαφορετικές τιμές του MNA

Όταν το περιβάλλον αλλάζει (Πίνακας 7-7, Πίνακας 7-8) το λάθος παραμένει σε χαμηλά επίπεδα στις περισσότερες από τις δοκιμές. Σε μερικές καταστάσεις εν τούτοις, το λάθος αυξάνεται σημαντικά, ειδικά όταν η θέση της λαβής της πόρτας μετατοπίζεται αρκετά στον άξονα Z και ταυτόχρονα χρησιμοποιούνται χαμηλές τιμές MNA. Αυτό το λάθος συμβαίνει επειδή η σημαντική μετατόπιση στο άξονα Z (π.χ. δεύτερη δοκιμή, Πίνακας 7-7) αναγκάζει τα νέα ανθρωποειδή να σκύψουν μπροστά. Σε κάθε περίπτωση, τα λάθη που εισήχθησαν λόγω των σημαντικών αλλαγών του περιβάλλοντος και των ανθρωπομετρικών θα μπορούσαν να μειωθούν περαιτέρω με τη χρησιμοποίηση μιας μεγαλύτερης βάσης δεδομένων από κινήσεις και την υλοποίηση ενός πιο βελτιωμένου μηχανισμού επιλογής κινήσεων αναφοράς.

Σχήμα 7-8. Διάγραμμα αποτελεσμάτων αξιολόγησης της τρίτης περίπτωσης. Η απόκλιση του άκρου εργασίας των νέων ανθρωποειδών από τη λαβή της πόρτας στο στιγμιότυπο 46, για διαφορετικές συντεταγμένες της λαβής και για διαφορετικές τιμές του MNA

Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός *MNA*, τόσο αυξάνεται (γεωμετρικά) και η απαίτηση του αλγορίθμου σε υπολογιστική ισχύ. Ενδεικτικά, ο μέσος υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση μιας δοκιμής με *MNA*=10 είναι 0.17sec, με *MNA*=100 είναι 1.35sec, με *MNA*=1.000 είναι 13sec, με *MNA*=10.000 είναι 145sec και με *MNA*=100.000 είναι 1700sec. Όλες οι δοκιμές εκτελέστηκαν σε ένα υπολογιστικό σύστημα στηριζόμενο σε επεξεργαστή Pentium IV/1.6 GHz, 512MB μνήμης και με λειτουργικό σύστημα Microsoft Windows 2000.

Σχήμα 7-9. Παράδειγμα προσαρμογής κίνησης όταν αλλάζουν μόνο τα ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά:
(a) Πέντε στιγμιότυπα της κίνησης αναφοράς, (b) και (c) τα αντίστοιχα παραγόμενα στιγμιότυπο, για το
νέο ανθρωποειδές με $MNA=10$ και $MNA=10000$ αντίστοιχα

Στιγμιότυπο Κίνησης	Κίνηση Αναφοράς <i>Ανθρωποειδές Αναφοράς</i> Θέση λαβής πόρτας (X: -265, Y: -316, Z: 208)	Προσαρμοσμένη Κίνηση <i>Νέο Ανθρωποειδές (4°)</i> Θέση λαβής πόρτας (X: -299, Y: -235, Z: 195)
1°
20°
46°
60°
78°

Σχήμα 7-10. Προσομοίωση της κίνησης αναφοράς και της προσαρμοσμένης κίνησης σε εικονικό περιβάλλον, με τη χρήση του λογισμικού *Ramsis*, για την ποιοτική αξιολόγηση του συστήματος

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 Ερευνητική συμβολή / Καινοτομία

Η παρούσα διατριβή αναφέρεται στο σχεδιασμό και στην πιλοτική υλοποίηση μιας μεθοδολογίας μοντελοποίησης κίνησης ανθρωπίνου σώματος. Η μεθοδολογία βασίζεται στην προσαρμογή μιας υπάρχουσας κίνησης σε νέα δεδομένα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη ρεαλιστική και αξιόπιστη προσομοίωση κίνησης ψηφιακών ανθρωποειδών σε εικονικό περιβάλλον εργασίας. Σκοπός της εφαρμογής της μεθοδολογίας είναι η λήψη αποδεκτών εργονομικών αποτελεσμάτων κατά την αξιολόγηση του σχεδιασμού προϊόντων και σταθμών εργασίας.

Για την υλοποίηση και αξιολόγηση της μεθοδολογίας σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε σύστημα, βασισμένο στη λήψη αποφάσεων με χρήση πολλαπλών κριτηρίων (*Multi-Criteria Decision Making*). Το σύστημα επιτρέπει την προσαρμογή μιας κίνησης αναφοράς (*reference motion*), η οποία πραγματοποιήθηκε από ένα ψηφιακό ανθρωποειδές αναφοράς (*reference manikin*), σε ένα περιβάλλον εργασίας αναφοράς (*reference workspace*):

- ⇒ σε ένα νέο ψηφιακό ανθρωποειδές (*new manikin*) διαφορετικών ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών, χωρίς να αλλαχθεί το περιβάλλον εργασίας,
- ⇒ σε ένα νέο περιβάλλον εργασίας (*new workspace*), χωρίς να αλλαχθούν τα αρχικά ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά,
- ⇒ σε ένα νέο ψηφιακό ανθρωποειδές διαφορετικών ανθρωπομετρικών χαρακτηριστικών και σε ένα νέο περιβάλλον εργασίας.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία και το σύστημα που αναπτύχθηκε και αξιολογήθηκε στο πλαίσιο της πιλοτικής εφαρμογής:

- ⇒ αποτελεί ένα εργαλείο για την αποτελεσματικότερη χρήση των ψηφιακών ανθρωποειδών στον εργονομικό σχεδιασμό του εσωτερικού χώρου αυτοκινήτων,
- ⇒ συνεργάστηκε επιτυχώς με το ευρέως χρησιμοποιούμενο λογισμικό εργαλείο εργονομικού σχεδιασμού *Ramsis* [Human Solutions, 2009], το οποίο και χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων (προσαρμοσμένων κινήσεων), προσφέροντας την επιπρόσθετη δυνατότητα παραγωγής πλήθους κινήσεων για μεγάλο εύρος διαστάσεων ψηφιακών ανθρωποειδών και γεωμετρικών αλλαγών στο περιβάλλον εργασίας,

⇒ αποτελεί μια διαφορετική προσέγγιση για την επίλυση του προβλήματος προσαρμογής ανθρώπινης κίνησης (*human motion adaptation*) σε ψηφιακά ανθρωποειδή διαφορετικών διαστάσεων και σε περιβάλλον εργασίας τροποποιημένων διαστάσεων, κάνοντας χρήση πολλαπλών κριτηρίων αξιολόγησης και λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη διατήρηση της ρεαλιστικότητας της κίνησης όσο και την ορθότητα (ακρίβεια) εκτέλεσης της εργασίας υπό νέους περιορισμούς και συνθήκες εργασίας.

Σχήμα 8-1. Η προτεινόμενη μεθοδολογία προσαρμογής ανθρώπινης κίνησης καλύπτει ένα ευρύ φάσμα πληθυσμιακού στόχου και γεωμετρικών αλλαγών του εσωτερικού χώρου αυτοκινήτων

Συνοπτικά, τα αποτελέσματα της αξιολόγησης μέσω της πιλοτικής εφαρμογής έδειξαν ότι:

- ⇒ Η ακρίβεια του αλγορίθμου εξαρτάται (αντιστρόφως ανάλογα) από τη διαφορετικότητα των ανθρωπομετρικών δεδομένων μεταξύ ανθρωποειδούς αναφοράς και νέου ανθρωποειδούς.
- ⇒ Η ακρίβεια του αλγορίθμου εξαρτάται (αντιστρόφως ανάλογα) από την απόσταση της θέσης αναφοράς της λαβής της πόρτας από τη νέα (επιθυμητή) θέση.
- ⇒ Η απόκλιση του άκρου εργασίας από το στόχο (λαβή πόρτας) μειώνεται εκθετικά (το οποίο συνεπάγεται αύξηση της ποιότητας της νέας κίνησης) καθώς αυξάνεται το πλήθος των παραγόμενων εναλλακτικών στάσεων σώματος (MNA).

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

- ⇒ για την προσομοίωση οποιασδήποτε κίνησης (εργασίας), ασχέτως πολυπλοκότητας και περιβάλλοντος εργασίας (προϋποθέτοντας την ύπαρξη τουλάχιστον μίας κίνησης αναφοράς),
- ⇒ σε οποιοδήποτε λογισμικό εργαλείο εργονομικού σχεδιασμού με χρήση ψηφιακών ανθρωποειδών (με ανάπτυξη κατάλληλων *interfaces*), ως μηχανισμός παραγωγής νέων κινήσεων,

- ⇒ για ευκολότερη μελέτη και αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων σχεδιασμού (διαφορετικά προϊόντα ή χώροι εργασίας) με χρήση προγραμμάτων σχεδιασμού με H/Y και ψηφιακών ανθρωποειδών, και
- ⇒ για τη δημιουργία «εικονικών» πειραμάτων εργονομικής αξιολόγησης σχεδιασμού, αντικαθιστώντας την ανάγκη εκτέλεσης χρονοβόρων και υψηλού κόστους πειραμάτων από ανθρώπους.

Αλληλεπίδραση ανθρώπου – περιβάλλοντος εργασίας	+	(+)	–
Ευκολία μελέτης εναλλακτικών σεναρίων σχεδιασμού	–	+	✓
Βιομηχανικό ενδιαφέρον χρήσης μεθόδου	–	–	+
Αυτόματη παροχή εργονομικών αποτελεσμάτων	–	(+)	+
Ανάγκη εκτέλεσης πειραμάτων από διαφορετικούς ανθρώπους	–	–	✓
Ανάγκη χρήσης παραγωγικών χώρων και εξοπλισμού	–	+	+
Κίνδυνος ατυχήματος των εμπλεκομένων	–	+	+

Πίνακας 8-1. Ερευνητική συμβολή της διατριβής

Η καινοτομία της παρούσης έρευνας έγκειται στα παρακάτω χαρακτηριστικά της προτεινόμενης μεθοδολογίας και συστήματος υλοποίησης:

- ⇒ Υποστηρίζει την παραγωγή νέας κίνησης με βάση τόσο ένα ευρύ φάσμα πληθυσμιακού στόχου, όσο και γεωμετρικών αλλαγών του αξιολογούμενου προϊόντος / σταθμού εργασίας.
- ⇒ Μπορεί να ικανοποιεί τόσο στατικούς (π.χ. πιάσιμο ενός αντικειμένου) όσο και δυναμικούς χωρικούς περιορισμούς (π.χ. μετακίνηση αντικειμένου με περιορισμένους βαθμούς ελευθερίας).
- ⇒ Υποστηρίζει διαφορετικές στρατηγικές κίνησης για την ίδια εργασία.
- ⇒ Η εκτέλεση του αλγορίθμου μπορεί να πραγματοποιηθεί και με μία μόνο υπάρχουσα κίνηση (χωρίς την ύπαρξη βάσης δεδομένων).
- ⇒ Υποστηρίζει τη δυνατότητα εισαγωγής νέων κριτηρίων αξιολόγησης της παραγόμενης κίνησης (π.χ. εργονομία, κατανάλωση έργου, ...).

8.2 Γενίκευση / Επέκταση έρευνας

Το σύστημα προσομοίωσης ανθρώπινης κίνησης, σαν αποτέλεσμα της πιλοτικής υλοποίησης της προτεινόμενης μεθοδολογίας, που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, αποτελεί ένα εργαλείο που βοηθά σημαντικά στη μείωση του χρόνου εργονομικής αξιολόγησης σχεδιασμού προϊόντων και παραγωγικών διαδικασιών, καθώς επίσης και στην απόκτηση πιο έγκυρων εργονομικών αποτελεσμάτων κατά τη φάση της αξιολόγησης.

Η χρήση του συστήματος που αναπτύχθηκε μπορεί να γενικευτεί στις παρακάτω πέντε κατευθύνσεις:

1. Για την επιλογή της κίνησης που υλοποιεί με τον βέλτιστο εργονομικό τρόπο μια συγκεκριμένη εργασία. Για τη γενίκευση αυτή απαιτείται η εισαγωγή νέου κριτηρίου αξιολόγησης, το οποίο θα αξιολογεί εργονομικά την κάθε εναλλακτική στάση σώματος και θα επιλέγει εκείνη που αποδεικνύεται ως η πιο άνετη για το ανθρώπινο σώμα. Το κριτήριο ελέγχου εργονομίας θα πρέπει να υπολογίζει ένα συνολικό δείκτη αξιολόγησης που θα απεικονίζει την καταπόνηση του ανθρώπινου σώματος στη συγκεκριμένη στάση, λαμβάνοντας υπόψη του τις τρέχουσες τιμές των γωνιών αρθρώσεων και τα χαρακτηριστικά του ψηφιακού ανθρωποειδούς. Ήδη στο πλαίσιο της διατριβής έχει γίνει μελέτη προς την κατεύθυνση αυτή [Chryssolouris *et al.*, 2004], με σκοπό τη μοντελοποίηση του ανθρώπινου αισθήματος δυσφορίας (*discomfort modeling*) με τη χρήση Νευρωνικών Δικτύων (*Neural Networks*). Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν, μέσω του λογισμικού *Ramsis* [Human Solutions, 2009] για την εργονομική αξιολόγηση των παραγόμενων κινήσεων του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα για κάθε στάση σώματος υπολογίζεται ο βαθμός δυσφορίας (*discomfort score*) για κάθε μία από τις 10 πιο σημαντικές αρθρώσεις του ανθρωπίνου σώματος (Αριστερός / Δεξιός Καρπός, Αριστερός / Δεξιός Αγκώνας, Αριστερός / Δεξιός Ώμος, Αριστερός / Δεξιός Γοφός και Αριστερό / Δεξί Γόνατο). Ο υπολογισμός του βαθμού δυσφορίας ανά άρθρωση εξαρτάται από τις τρέχουσες τιμές των γωνιών των αρθρώσεων στη συγκεκριμένη στάση σώματος και από κάποια βασικά ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά του ανθρωποειδούς (Ηλικία, Ύψος και Βάρος). Η εργονομική αξιολόγηση της συνολικής κίνησης πραγματοποιήθηκε υπολογίζοντας ένα συνολικό βαθμό δυσφορίας για ολόκληρο το σώμα του ανθρωποειδούς (*Whole Body*), ανά στιγμιότυπο κίνησης (Σχήμα 8-2).

Σχήμα 8-2. Εργονομική ανάλυση της προσαρμοσμένης κίνησης στο Ramsis, κάνοντας χρήση των μοντέλων Νευρωνικών Δικτύων [Chrysosolouris *et al.*, 2004] για τον υπολογισμό του βαθμού δυσφορίας (*discomfort score*) βασιζόμενα στη στάση του ανθρώπινου σώματος, για κάθε στιγμιότυπο κίνησης

2. Για την παραγωγή κίνησης μιας οποιασδήποτε εργασίας αξιολόγησης σχεδιασμού του εσωτερικού ενός αυτοκινήτου, που μπορεί να εκτελεστεί με τη χρήση ενός εκ των δύο άνω (χέρια) ή κάτω (πόδια) άκρων εργασίας της ανθρώπινης κινηματικής αλυσίδας όπως για παράδειγμα:

- ο το πιάσιμο και χειρισμό με το χέρι του τιμονιού, του συστήματος επιλογής ταχυτήτων ή του εσωτερικού καθρέπτη του αυτοκινήτου,
- ο την εφαρμογή της ζώνης ασφαλείας στο σώμα του οδηγού, και
- ο το πάτημα με το πόδι ενός από τα πεντάλ του αυτοκινήτου.

Η υλοποίηση της γενίκευσης αυτής προϋποθέτει:

- ο την καταγραφή μιας τουλάχιστον πραγματικής κίνησης της εργασίας που πρόκειται να προσομοιωθεί, η οποία θα χρησιμοποιηθεί από το σύστημα ως κίνηση αναφοράς, και

- ο την αντικατάσταση των πινάκων μετασχηματισμού που παρουσιάζονται στην παράγραφο 7.4 με τους αντίστοιχους πίνακες που αφορούν στο συγκεκριμένο τμήμα της ανθρώπινης κινηματικής αλυσίδας.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά δύο παραδείγματα προσαρμογής κινήσεων για την εργονομική αξιολόγηση διαφορετικών θέσεων του τιμονιού και του συστήματος επιλογής (λεβιέ) ταχυτήτων ενός αυτοκινήτου (Σχήμα 8-3 και Σχήμα 8-4).

Σχήμα 8-3. Παράδειγμα προσαρμογής κίνησης για διαφορετικές θέσεις του τιμονιού αυτοκινήτου

Σχήμα 8-4. Παράδειγμα προσαρμογής κίνησης για διαφορετικές θέσεις του συστήματος επιλογής ταχυτήτων

3. Για τη παραγωγή κίνησης για προσομοίωση διαδικασίας εργονομικής αξιολόγησης του σχεδιασμού προϊόντων ή σταθμών εργασίας, όπως για παράδειγμα:
 - ο την εργονομική αξιολόγηση του σχεδιασμού πιλοτηρίου ή καμπίνας επιβατών αεροσκάφους (Σχήμα 8-5), και
 - ο την εργονομική αξιολόγηση του σχεδιασμού σταθμών συναρμολόγησης (Σχήμα 8-7 και Σχήμα 8-7)

Σχήμα 8-5. Παραδείγματα προσαρμογής κίνησης για την αξιολόγηση σχεδιασμού θέσης καμπίνας επιβατών και πιλοτηρίου αεροσκάφους

Σχήμα 8-6. Παράδειγμα προσομοίωσης για την αξιολόγηση σχεδιασμού σταθμών συναρμολόγησης για την τοποθέτηση των εσωτερικών ραγών για την συγκράτηση των ραφιών [Mavrikios *et al.*, 2007]

Σχήμα 8-7. Παράδειγμα προσομοίωσης για την αξιολόγηση σχεδιασμού σταθμών συναρμολόγησης για την τοποθέτηση του πλαϊνού τζαμιού σε ψυγείο επαγγελματικής χρήσης [Pappas *et al.*, 2007]

4. Για τη διασύνδεσή του με οποιοδήποτε λογισμικό εργαλείο μοντελοποίησης ανθρώπινης κίνησης ή εργονομικού σχεδιασμού (π.χ. Jack, Delmia, Safework)
 - ο με ανάπτυξη κατάλληλων επαφών διασύνδεσης, για την επικοινωνία μεταξύ συστήματος και λογισμικού εργαλείου μέσω συμβατών αρχείων, και
 - ο με την τροποποίηση του κριτηρίου ομοιότητας θέσης εργασίας το οποίο εμπεριέχει πληροφορίες που σχετίζονται με το κινηματικό μοντέλο του ψηφιακού ανθρωποειδούς του λογισμικού που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της παραγόμενης κίνησης.

Σχήμα 8-8. Παράδειγμα προσομοίωσης της κίνησης “Άνοιγμα πόρτας αυτοκινήτου” στο εικονικό περιβάλλον του λογισμικού Jack [HUMOSIM, 2009]

5. Για την ποσοτική αξιολόγηση εναλλακτικών σχεδιαστικών λύσεων γενικού ενδιαφέροντος, όπως του χωροταξικού σχεδιασμού εργοστασίου ή γραμμής παραγωγής, με τη χρήση της μεθόδου λήψης αποφάσεων με πολλαπλά κριτήρια. Με αυτό τον τρόπο θα υποστηριχθεί η διαδικασία λήψης της βέλτιστης σχεδιαστικής λύσης, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα που μπορούν να προκύψουν από την αξιολόγηση των εναλλακτικών σχεδιαστικών λύσεων χωροταξίας (διαρρύθμιση μηχανών και ανθρώπων), την εργονομική ανάλυση τόσο της συνολικής εγκατάστασης όσο και των επιμέρους σταθμών εργασίας και την προσομοίωση της ροής υλικών.

Σχήμα 8-9. Παραδείγματα αξιολόγησης χωροταξίας και λειτουργικότητας εγκατάστασης εργοστάσιου

9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aamodt, A., and Plaza, E., 1994, Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches, *Artificial Intelligence Communications* 7 (1), pp.39-52.
- Alexopoulos, K., Pappas, M., Karabatsou, V., Mavrikios, D., and Chryssolouris, G., 2006, Human Motion Adaptation: A Multi-Criteria Approach. Proceedings of the SAE Digital Human Modeling for Design and Engineering Conference, Lyon, France, Paper ID: 2006-01-2351 (Edited in CD-ROM).
- Alexopoulos, K., Mavrikios, D., Pappas, M., Ntelis, E., and Chryssolouris, G., 2007, Multi-Criteria upper-body human motion adaptation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 20(1), pp.57-70.
- Animazoo UK Ltd., official web-site, 2009, <http://animazoo.brightstarrdemo.co.uk>.
- AnyBody Technology, AnyBody official web-site, 2009, <http://www.anybodytech.com/>.
- Ascension Technology Corporation, Flock of Birds official web-site, 2009, <http://www.ascension-tech.com/products/flockofbirds.php>
- Ascension Technology Corporation, MotionStar official web-site, 2009, <http://www.ascension-tech.com/products/motionstar.php>.
- Badler, N.I., Phillips, C.B., Webber, B.L., 1992, *Simulating Humans-computer Graphics Animation and Control* (New York: Oxford University Press).
- Bindiganavale, R., 2000. Building Parameterized Action Presentations From Observation. PhD thesis, University Of Pennsylvania.
- Boeing Co., Boeing Human Modeling System official web-site, 2009, <http://www.boeing.com/assocproducts/hms/>.
- Boulic, R., Becheiraz, P., Emeric, L., and Thalmann, D., 1997, Integration of Motion Control Techniques for Virtual Human and Avatar Real-Time Animation. *ACM International Symposium VRST '97*, pp. 111-118.
- Bridger, R.S., 2003, *Introduction to Ergonomics*, 2nd Edition (ISBN 978-0-415-27377-0), McGraw-Hill Inc.
- Bruderlin, A. and Williams, L., 1995, Motion signal processing. *Proceedings of SIGGRAPH*, Los Angeles, California, pp. 97-104.

- Chaffin, D.B., Faraway, J.J., Zhang, X., and Woolley, C., 2000, Stature, age and gender effects on reach motion postures. *Human Factors*, 42(3), pp. 408-420.
- Chapanis, A.R., 1971, The search for relevance in applied research, Singleton, W.T., Fox, J.G. and Whitfield, D.C. (Eds), *Measurement of man at work*, Taylor & Francis, pp. 1-14.
- Chryssolouris, G., 2005, *Manufacturing Systems-Theory and Practice*, 2nd Edition (ISBN 978-0-387-25683-2), New York: Springer-Verlag.
- Chryssolouris G., Pappas, M., and Karabatsou, V., 2004, Posture Based Discomfort Modeling using Neural Networks. *Proceedings of the IFAC Conference on Manufacturing, Modelling, Management and Control (IFAC MIM'04)*, Athens, Greece, pp.19-23.
- Chryssolouris, G., Karabatsou, V., and Kapetanaki, G., 2001, Virtual Reality and human simulation for manufacturing. *Proceedings of the 34th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, Athens, Greece, pp. 393-397.
- Chryssolouris, G., Pierce, J., and Dicke, K., 1992, A Decision-Making Approach to the Operation of Flexible Manufacturing Systems, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 4(3/4), pp. 309-330.
- Chryssolouris, G., 1987, MADEMA: An Approach to Intelligent Manufacturing Systems, *CIM Review*, 3(3), pp.11-17.
- Dai F., 1997, *Virtual Reality for Industrial Applications* (ISBN 978-3-540-63348-8), Springer-Vergal, Berlin Heidelberg.
- Das, B., and Sengupta, A.K., 1995, Computer-aided human modelling programs for workstation design. *Ergonomics*, 38, pp. 1958-1972.
- Das, B., and Behara, D.N., 1998, Three-dimensional workspace for industrial workstations. *Human Factors*, 40(4), pp. 633-646.
- Dassault Systemes, Delmia V5 Human official web-site, 2009, <http://www.delmia.com/>.
- Deisinger, J., Breining R, and Rößler, A., 2000, ERGONAUT: A Tool for Ergonomic Analyses in Virtual Environments, *Proceedings of the 6th Eurographics Workshop on Virtual Environments*, Amsterdam, The Netherlands.
- EEE (Ελληνική Εταιρεία Εργονομίας) επίσημη ιστοσελίδα, 2009, <http://www.ergonomics.gr/>.
- Falkenauer, E., 1997, *Genetic Algorithms and Grouping Problems* (ISBN 978-0-471-97150-4), Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd.
- Faraway, J., Zhang, X., and Chaffin, D.B., 1999, Rectifying postures reconstructed from joint angles to meet constraints. *Journal of Biomechanics*, 32(7), pp. 733-736.

- Feyen, R., Liu, Y., Chaffin, D., Jimmerson, G., and Joseph B., 2000, Computer-aided ergonomics: a case study of incorporating ergonomics analyses into workplace design. *Applied Ergonomics*, 31(3), pp. 291-300.
- Fisher, R.A., 1925, *Statistical Methods for Research Workers*. Oliver and Boyd, Edinburgh.
- Fisher, R.A., 1934, *The Design of Experiments*, First Edition, Oliver and Boyd, Edinburgh.
- Gleicher, M., 1998, Retargeting motion to new characters. *Proceeding of ACM SIGGRAPH Conference*, pp. 33-42.
- Green, W.S. and Jordan, P.W., 1999, *Human Factors in Product Design: Current practice and Future Trends*, Taylor & Francis, London.
- Hastie, T.J. and Tibshirani, R.J., 1990, *Generalized Additive Models*, Chapman & Hall/CRC.
- Helander, M., 1995, *A Guide to the Ergonomics of Manufacturing* (ISBN 0-748-40122-9), Taylor & Francis.
- Human Solutions, Ramsis official web-site, 2009, <http://www.ramsis.de/>.
- Humosim, Human Motion Simulation Laboratory at the Center for Ergonomics, University of Michigan, official web-site, 2009, <http://www.engin.umich.edu/dept/ioe/HUMOSIM/>.
- IEA (International Ergonomics Association), official web-site, 2009, <http://www.iea.cc/>.
- INRETS (LBMC), The French National Institute for Transport and Safety Research (Biomechanics and Human Modelling Laboratory), Door Handling Experiments, 2003, Bron cedex, France, <http://www.inrets.fr/ur/lbmc/english/Ergo/IndexTheme.html>.
- Jung, E.S., and Choe, J., 1996, Human reach posture prediction based on psychophysical discomfort. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 18(2), pp. 173–179.
- Karabatsou, V., 2004, Development of a Virtual Reality environment for the design and verification of human related factors in manufacturing processes, PhD dissertation, University of Patras, Dept. of Mechanical Engineering and Aeronautics.
- LAB, Laboratory of Accidentology and Biomechanics (common laboratory of PSA Peugeot Citroen and RENAULT), Car Accessibility Experiments, 2001, Nanterre, France.
- Lee, J., and Shin, S.Y., 1999, A Hierarchical Approach to Interactive Motion Editing for Human-like Figures. *Proceedings of SIGGRAPH*, Los Angeles, California, pp. 39-48.
- Lyard, E., Magnenat-Thalmann, N., 2008, Motion Adaptation Based on Character Shape. *Computer Animation and Virtual Worlds*, John Wiley and Sons Ltd, 19(3-4), pp.189-198.

- Mavrikios, D., Karabatsou, V., Alexopoulos, K., Pappas, M., Gogos, P., and Chryssolouris, G., 2006, An approach to human motion analysis and modelling. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(11), pp.979-989.
- Mavrikios, D., Karabatsou, V., Pappas, M., and Chryssolouris, G., 2007, An efficient approach to human motion modeling for the verification of human-centric product design and manufacturing in virtual environments. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(5), pp.533-543.
- Mavrikios, D., Pappas, M., Kotsonis, M., Karabatsou, V., and Chryssolouris, G., 2007, Digital Humans for Virtual Assembly Evaluation. *Digital Human Modeling* (ISBN 978-3-540-73318-8), Duffy V.D. (Ed.), Springer-Verlag, pp.939-948.
- Monzami, J.S., Baerlocher, P., Boulic, R., and Thalmann, D., 2000, Using an Intermediate Skeleton and Inverse Kinematics for Motion Retargeting. *Proceedings of EUROGRAPHICS*, 19(3), pp. 11-19.
- Monnier, G., 2004, Simulation of task oriented complex human motions and prediction of the associated discomfort: Application to the ergonomic assessment of automobile seat belt buckling. PhD dissertation, INRETS-LBMC.
- NaturalPoint Inc., OptiTrack official web-site, 2009, <http://www.naturalpoint.com/optitrack/>.
- NexGen Ergonomics Inc., ManneQuinPRO official web-site, 2009, <http://www.nexgenergo.com/ergonomics/mqpro.html>.
- OHSAH, Occupational Health & Safety Agency for Healthcare in British Columbia, official web-site, 2009, <http://www.ohsah.bc.ca/>.
- Organic Motion Inc., Stage official web-site, 2009, <http://www.organicmotion.com/>.
- Pappas, M., Karabatsou, V., Mavrikios, D., and Chryssolouris, G., 2007, Ergonomic evaluation of virtual assembly tasks. *Digital Enterprise Technology: Perspectives and Future Challenges* (ISBN 978-0-387-49863-8), Cunha P.F. and Maropoulos P.G. (Eds.), Springer-Verlag, New York, pp. 511-518.
- Park, W., Chaffin, D., and Martin, B., 2002, Memory-based motion simulation. *Proceeding of the 5th Digital Human Modeling Conference*, Munich, Germany, pp. 255-270.
- Park, W., Chaffin, D.B., and Martin, B.J., 2004, Toward Memory-Based Human Motion Simulation: Development and Validation of a Motion Modification Algorithm. *IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics (Part A)*, 34(3), pp. 376-386.
- Phadke, M.S., 1989, *Quality engineering using robust design*, Prentice Hall, New Jersey.

- Pheasant, S., 1998, Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work (ISBN 978-0-415-28520-9), Taylor & Francis.
- Polhemus, FASTRAK official web-site, 2009, <http://www.polhemus.com/>.
- Qualisys, ProReflex MCU official web-site, 2009, <http://www.qualisys.com/>.
- Rigotti, C., Cerveti, P., Andreoni, G., Pedotti, A., and Ferrigno, G., 2001, Modeling and Driving a Reduced Human Mannequin through Motion Captured Data: A Neutral Network Approach. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 31(3), pp. 187-193.
- SAE J826, H-Point Manikin, 2009, <http://www.sae-j826.com/>.
- Safework Inc., SafeWork Pro official web-site, 2009, <http://www.safework.com/>.
- Sammie Cad Ltd., Sammie official web-site, 2009, <http://www.sammiecad.com/>.
- Tolani, D., Goswami, A., and Badler, N.I., 2000, Real-Time Inverse Kinematics Techniques for Anthropomorphic Limbs. Graphical Models, 62(6), pp. 353–388.
- Triantaphyllou, E., and Shu, B., 2001, On the maximum number of feasible ranking sequences in multi-criteria decision making problems, European Journal of Operational Research, 130(3), pp. 665-678.
- Triantaphyllou, E., 2000, Multi-Criteria Decision Making Methods: A comparative Study (ISBN 978-0-792-36607-2), Applied Optimization, Vol. 44, Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands.
- UMTRI, University of Michigan - Transportation Research Institute, Biosciences Research Division, 2009, <http://www.umtri.umich.edu/>
- Unigraphics Solutions, Jack official web-site, 2009, <http://www.ugs.com/>.
- Vicon, Vicon MX official web-site, 2009, <http://www.vicon.com/products/viconmx.html>.
- VSR, The Virtual Soldier Research Program, Center for Computer Aided Design, The University of Iowa, official web-site, 2009, www.digital-humans.org.
- Wang, X., 1999, A behaviour-based inverse kinematics algorithm to predict arm prehension postures for computer aided ergonomic evaluation. Journal of Biomechanics, 32(5), pp. 453-460.
- Wang, X., 2002, Prediction of lower-limb movements of clutch pedal operation from an existing motion database. Proceeding of the 5th Digital Human Modeling Conference, Munich, Germany, pp. 271-283.

- Weise, T., 2008, Global Optimization Algorithms - Theory and Application (2nd edition), University of Kassel, www.it-weise.de/projects/book.pdf.
- Witkin, A. and Popovic, Z., 1995, Motion warping. Proceedings of SIGGRAPH, Los Angeles, California, pp. 105-108.
- Zhang, X., and Chaffin, D.B., 1996, Task effects on three-dimensional dynamic postures during seated reaching movements: an analysis method and illustration. Proceedings of the 40th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society. Philadelphia, PA, 1(1), pp. 594-598.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι – ΠΙΝΑΚΕΣ

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι “στατικοί” 4x4 πίνακες μετασχηματισμού (στροφής-μετατόπισης) των τοπικών συστημάτων συντεταγμένων των αρθρώσεων της απλοποιημένης κινηματικής αλυσίδας (Σχήμα 7-5) των ψηφιακών ανθρωποειδών που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της πιλοτικής εφαρμογής (Εξ. 7-2, Εξ. 7-3) για τον υπολογισμό της θέσης του άκρου εργασίας (συντεταγμένες της άρθρωσης του αριστερού καρπού – *GHAL*). Οι “στατικοί” πίνακες στροφής-μετατόπισης περιέχουν όλη την πληροφορία σχετικά με τη θέση και τον προσανατολισμό του τοπικού συστήματος συντεταγμένων των αρθρώσεων, σε σχέση με το τοπικό σύστημα συντεταγμένων της αμέσως προηγούμενης άρθρωσης στην κινηματική αλυσίδα. Για τον προσδιορισμό τους, το ψηφιακό ανθρωποειδές είναι τοποθετημένο στη “στάση μηδέν” (Σχήμα 7 4), δηλαδή όλες οι γωνίες των αρθρώσεων έχουν την τιμή μηδέν.

Πίνακες μετασχηματισμού του ανθρωποειδούς αναφοράς

$$\begin{aligned}
 {}^{GLOBAL}M_{GHZ} &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^{GHZ}M_{GLK} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 47.1 \\ 0 & 1 & 0 & -65.1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^{GLK}M_{GLL} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 107.9 \\ 0 & 1 & 0 & 40.3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^{GLL}M_{GBL} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 100 \\ 0 & 1 & 0 & -17 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^{GBL}M_{GBB} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 123 \\ 0 & 1 & 0 & -36.9 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^{GBB}M_{GHB} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 31.6 \\ 0 & 1 & 0 & -5.6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^{GHB}M_{GBRK} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 73.2 \\ 1 & 0 & 0 & 16.5 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^{GBRK}M_{GSBL} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 86.2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^{GSBL}M_{GSL} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 159 \\ 0 & 1 & 0 & -62 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^{GSL}M_{GELL} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 283 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^{GELL}M_{GHALL} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 248 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Πίνακες μετασχηματισμού του 1^{ου} νέου ανθρωποειδούς:

$$^{GLOBAL}M_{GHZ} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GHZ}M_{GLK} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 37 \\ 0 & 1 & 0 & -51.1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GLK}M_{GLL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 55.7 \\ 0 & 1 & 0 & 20.8 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GLL}M_{GBL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 67.1 \\ 0 & 1 & 0 & -11.4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GBL}M_{GBB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 82.5 \\ 0 & 1 & 0 & -24.8 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GBB}M_{GHB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 72.4 \\ 0 & 1 & 0 & -12.8 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GHB}M_{GBRK} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 53.8 \\ 1 & 0 & 0 & 12.2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GBRK}M_{GSBL} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 57.8 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -22.1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GSBL}M_{GSL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 140.2 \\ 0 & 1 & 0 & -54.7 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GSL}M_{GELL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 276.6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GELL}M_{GHALL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 194.4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Πίνακες μετασχηματισμού του 2^{ου} νέου ανθρωποειδούς:

$$^{GLOBAL}M_{GHZ} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GHZ}M_{GLK} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 42 \\ 0 & 1 & 0 & -58 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GLK}M_{GLL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 63 \\ 0 & 1 & 0 & 23.5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GLL}M_{GBL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 76 \\ 0 & 1 & 0 & -12.9 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GBL}M_{GBB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 93.4 \\ 0 & 1 & 0 & -28 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GBB}M_{GHB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 82 \\ 0 & 1 & 0 & -14.4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GHB}M_{GBRK} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 61 \\ 1 & 0 & 0 & 13.8 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GBRK}M_{GSBL} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 65.5 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GSBL}M_{GSL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 159 \\ 0 & 1 & 0 & -32 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GSL}M_{GELL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 292.5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GELL}M_{GHALL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 242.6 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Πίνακες μετασχηματισμού του 3^{ου} νέου ανθρωποειδούς:

$$^{GLOBAL}M_{GHZ} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GHZ}M_{GLK} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 43.4 \\ 0 & 1 & 0 & -60 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GLK}M_{GLL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 79.2 \\ 0 & 1 & 0 & 29.6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GLL}M_{GBL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 95.4 \\ 0 & 1 & 0 & -16.2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GBL}M_{GBB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 117.3 \\ 0 & 1 & 0 & -35.2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GBB}M_{GHB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 69.1 \\ 0 & 1 & 0 & -12.2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GHB}M_{GBRK} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 71.6 \\ 1 & 0 & 0 & 16.2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GBRK}M_{GSBL} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 82.2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -25.8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GSBL}M_{GSL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 131 \\ 0 & 1 & 0 & -51.1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GSL}M_{GELL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 275 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GELL}M_{GHALL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 219.4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Πίνακες μετασχηματισμού του 4^{ου} νέου ανθρωποειδούς:

$$^{GLOBAL}M_{GHZ} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GHZ}M_{GLK} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 47.3 \\ 0 & 1 & 0 & -65.3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GLK}M_{GLL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 76 \\ 0 & 1 & 0 & 28.4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GLL}M_{GBL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 91.6 \\ 0 & 1 & 0 & -15.6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GBL}M_{GBB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 112.7 \\ 0 & 1 & 0 & -33.8 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GBB}M_{GHB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 98.9 \\ 0 & 1 & 0 & -17.4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GHB}M_{GBRK} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 76.7 \\ 1 & 0 & 0 & 17.3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GBRK}M_{GSBL} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 78.9 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -28.1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GSBL}M_{GSL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 131.6 \\ 0 & 1 & 0 & -51.3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GSL}M_{GELL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 316 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GELL}M_{GHALL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 232.6 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Πίνακες μετασχηματισμού του 5^{ου} νέου ανθρωποειδούς:

$$^{GLOBAL}M_{GHZ} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GHZ}M_{GLK} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 43.2 \\ 0 & 1 & 0 & -59.7 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GLK}M_{GLL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 87.1 \\ 0 & 1 & 0 & 32.5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GLL}M_{GBL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 104.9 \\ 0 & 1 & 0 & -17.8 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GBL}M_{GBB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 129.1 \\ 0 & 1 & 0 & -38.7 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GBB}M_{GHB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 113.3 \\ 0 & 1 & 0 & -19.9 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GHB}M_{GBRK} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 18.3 \\ 1 & 0 & 0 & 4.1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GBRK}M_{GSBL} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 90.4 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -25.7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GSBL}M_{GSL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 163 \\ 0 & 1 & 0 & -63.6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GSL}M_{GELL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 357.2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{GELL}M_{GHALL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 253.2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ – ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.3.1, για τη σωστή λειτουργία της προτεινόμενης μεθοδολογίας προσαρμογής κίνησης με τη χρήση πολλαπλών κριτηρίων, είναι απαραίτητος ο καθορισμός συγκεκριμένων δεδομένων εισόδου. Στη παράγραφο 6.3 αναφέρθηκαν οι παράμετροι που μπορεί να καθορίσει ο χρήστης χρησιμοποιώντας το γραφικό περιβάλλον του συστήματος. Μεταξύ άλλων, μέσω αυτής της διεπαφής, παρέχεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει μέσα από ένα σύνολο ψηφιακών ανθρωποειδών εκείνο το ανθρωποειδές για το οποίο θέλει να παράγει μία νέα κίνηση. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του είδους της εργασίας που θα πρέπει να εκτελέσει το παραπάνω ανθρωποειδές. Για τη σωστή λειτουργία των δύο τελευταίων επιλογών είναι απαραίτητο να έχουν προκαθοριστεί συγκεκριμένες πληροφορίες σχετικά με τα ψηφιακά ανθρωποειδή και τις εργασίες που μπορούν να εκτελέσουν. Η πληροφορία αυτή καταγράφεται από τον χρήστη σε συγκεκριμένα αρχεία δεδομένων. Τα αρχεία αυτά είναι ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) και περιγράφουν τα δεδομένα με χρήση της γλώσσας περιγραφής δεδομένων XML (*Extensible Markup Language*).

Η επιλογή της γλώσσας περιγραφής δεδομένων XML έγινε διότι μπορεί να περιγράψει πολύπλοκα δεδομένα παρέχοντας μια πολύ καθαρή δομή, ενώ ταυτόχρονα το συντακτικό της να είναι πολύ απλό. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά την κάνουν εύκολα χρησιμοποιήσιμη ακόμα και από κάποιον ανειδίκευτο χρήστη. Επιπλέον, η γλώσσα περιγραφής δεδομένων XML χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο από κάθε είδους λογισμικά πακέτα και τείνει να επικρατήσει στο χώρο της περιγραφής δεδομένων. Επομένως, με τη χρήση XML αρχείων, παρέχεται η δυνατότητα εύκολης διασύνδεσης του συστήματος που αναπτύχθηκε με εμπορικά διαθέσιμα λογισμικά εργαλεία ψηφιακών ανθρωποειδών.

Στο σύστημα που αναπτύχθηκε ενσωματώθηκαν 15 XML αρχεία περιγραφής ψηφιακών ανθρωποειδών και 2 XML αρχεία περιγραφής εργασίας (άνοιγμα και κλείσιμο πόρτας αυτοκινήτου). Τα ανθρωποειδή που ενσωματώθηκαν καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος σωματοτύπων διαφορετικής ηλικίας και φύλου και ανθρωπομετρικών διαστάσεων, ενώ οι εργασίες που περιγράφουν τα άλλα δύο αρχεία αναφέρονται στο άνοιγμα και στο κλείσιμο πόρτας αυτοκινήτου από άνθρωπο καθισμένο στη θέση του οδηγού.

Αρχείο XML για την περιγραφή ψηφιακού ανθρωποειδούς

Στο αρχείο αυτό περιέχονται πληροφορίες που αφορούν:

1. στα γενικά χαρακτηριστικά του ανθρωποειδούς (όνομα, κατηγορία, φύλο, ηλικία και βάρος)
2. στα ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά του ανθρωποειδούς (ύψος σε όρθια στάση σώματος, ύψος σε καθιστή στάση σώματος, πλάτος ωμοπλάτης, μήκος πάνω τμήματος χεριού και μήκος κάτω τμήματος χεριού)
3. στους πίνακες μετασχηματισμού των αρθρώσεων που αποτελούν την απλοποιημένη κινηματική αλυσίδα της πιλοτικής εφαρμογής (βλ. Παράγραφος 7.4)

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?><!DOCTYPE manikin>

<manikin_body>
  <name>07WB</name>
  <group>AHM</group>
  <gender>male</gender>
  <age>26</age>
  <weight>74</weight>
  <stature>1680</stature>
  <sitting_height>850</sitting_height>
  <shoulder_width>480</shoulder_width>
  <upper_arm_length>350</upper_arm_length>
  <lower_arm_length>440</lower_arm_length>
  <transformation_matrices>
    <matrix type="M_global_ghz">
      <a11>0</a11> <a12>-1</a12> <a13>0</a13> <a14>0</a14>
      <a21>0</a21> <a22>0</a22> <a23>-1</a23> <a24>0</a24>
      <a31>1</a31> <a32>0</a32> <a33>0</a33> <a34>0</a34>
      <a41>0</a41> <a42>0</a42> <a43>0</a43> <a44>1</a44>
    </matrix>
    <matrix type="M_ghz_glk">
      <a11>1</a11> <a12>0</a12> <a13>0</a13> <a14>47.1</a14>
      <a21>0</a21> <a22>1</a22> <a23>0</a23> <a24>-65.1</a24>
```



```

<a31>0</a31> <a32>0</a32> <a33>1</a33> <a34>0</a34>
<a41>0</a41> <a42>0</a42> <a43>0</a43> <a44>1</a44>
</matrix>
<matrix type="M_glk_gll">
  <a11>1</a11> <a12>0</a12> <a13>0</a13> <a14>107.9</a14>
  <a21>0</a21> <a22>1</a22> <a23>0</a23> <a24>43.3</a24>
  <a31>0</a31> <a32>0</a32> <a33>1</a33> <a34>0</a34>
  <a41>0</a41> <a42>0</a42> <a43>0</a43> <a44>1</a44>
</matrix>
<matrix type="M_gll_gbl">
  <a11>1</a11> <a12>0</a12> <a13>0</a13> <a14>100</a14>
  <a21>0</a21> <a22>1</a22> <a23>0</a23> <a24>-17</a24>
  <a31>0</a31> <a32>0</a32> <a33>1</a33> <a34>0</a34>
  <a41>0</a41> <a42>0</a42> <a43>0</a43> <a44>1</a44>
</matrix>
<matrix type="M_gbl_gbb">
  <a11>1</a11> <a12>0</a12> <a13>0</a13> <a14>123</a14>
  <a21>0</a21> <a22>1</a22> <a23>0</a23> <a24>-36.9</a24>
  <a31>0</a31> <a32>0</a32> <a33>1</a33> <a34>0</a34>
  <a41>0</a41> <a42>0</a42> <a43>0</a43> <a44>1</a44>
</matrix>
<matrix type="M_gbb_ghb">
  <a11>1</a11> <a12>0</a12> <a13>0</a13> <a14>31.6</a14>
  <a21>0</a21> <a22>1</a22> <a23>0</a23> <a24>-5.6</a24>
  <a31>0</a31> <a32>0</a32> <a33>1</a33> <a34>0</a34>
  <a41>0</a41> <a42>0</a42> <a43>0</a43> <a44>1</a44>
</matrix>
<matrix type="M_ghb_gbrk">
  <a11>0</a11> <a12>1</a12> <a13>0</a13> <a14>73.2</a14>
  <a21>1</a21> <a22>0</a22> <a23>0</a23> <a24>16.5</a24>
  <a31>0</a31> <a32>0</a32> <a33>-1</a33> <a34>0</a34>
  <a41>0</a41> <a42>0</a42> <a43>0</a43> <a44>1</a44>
</matrix>
<matrix type="M_gbrk_gsb1">
  <a11>0</a11> <a12>1</a12> <a13>0</a13> <a14>86.2</a14>

```

```

    <a21>0</a21> <a22>0</a22> <a23>-1</a23> <a24>0</a24>
    <a31>-1</a31> <a32>0</a32> <a33>0</a33> <a34>-25</a34>
    <a41>0</a41> <a42>0</a42> <a43>0</a43> <a44>1</a44>
  </matrix>
  <matrix type="M_gsbl_gsl">
    <a11>1</a11> <a12>0</a12> <a13>0</a13> <a14>159</a14>
    <a21>0</a21> <a22>1</a22> <a23>0</a23> <a24>-62</a24>
    <a31>0</a31> <a32>0</a32> <a33>1</a33> <a34>0</a34>
    <a41>0</a41> <a42>0</a42> <a43>0</a43> <a44>1</a44>
  </matrix>
  <matrix type="M_gsl_gell">
    <a11>1</a11> <a12>0</a12> <a13>0</a13> <a14>283</a14>
    <a21>0</a21> <a22>0</a22> <a23>1</a23> <a24>0</a24>
    <a31>0</a31> <a32>-1</a32> <a33>0</a33> <a34>0</a34>
    <a41>0</a41> <a42>0</a42> <a43>0</a43> <a44>1</a44>
  </matrix>
  <matrix type="M_gell_ghal">
    <a11>1</a11> <a12>0</a12> <a13>0</a13> <a14>248</a14>
    <a21>0</a21> <a22>1</a22> <a23>0</a23> <a24>0</a24>
    <a31>0</a31> <a32>0</a32> <a33>1</a33> <a34>0</a34>
    <a41>0</a41> <a42>0</a42> <a43>0</a43> <a44>1</a44>
  </matrix>
</transformation_matrices>
</manikin_body>

```

Αρχείο XML για την περιγραφή εργασίας

Στο αρχείο αυτό περιέχονται πληροφορίες που αφορούν:

1. Στο όνομα της εργασίας
2. Στο όνομα του αρχείου κίνησης αναφοράς (μορφής RMR)
3. Στο όνομα του αρχείου ψηφιακού ανθρωποειδούς αναφοράς (μορφής XML)
4. Στους χωρικούς περιορισμούς της εργασίας

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?><!DOCTYPE task>

<task_body>

<name> door opening </name>

<description>door opening</description>

<reference_motion> 07WB_001_motion.rmr </reference_motion>

<reference_manikin> 07WB_man.xml </reference_manikin>

<constraints_body>

  <constraint id="1">

    <from> 1 </from>

    <to> 1 </to>

    <coord_x> -146.8 </coord_x>

    <coord_y> -419.5 </coord_y>

    <coord_z> 257.4 </coord_z>

    <follow_trajectory> n </follow_trajectory>

    <EF_name> left hand </EF_name>

    <enabled> y </enabled>

  </constraint>

  <constraint id="2">

    <from> 46 </from>

    <to> 46 </to>

    <coord_x> -264.6 </coord_x>

    <coord_y> -315.8 </coord_y>

    <coord_z> 207.8 </coord_z>

    <follow_trajectory> n </follow_trajectory>

    <EF_name> left hand </EF_name>
```

```

        <enabled> yes </enabled>
    </constraint>
    <constraint id="3">
        <from> 47 </from>
        <to> 78 </to>
        <coord_x> </coord_x>
        <coord_y> </coord_y>
        <coord_z> </coord_z>
        <follow_trajectory> y </follow_trajectory>
        <EF_name> left hand </EF_name>
        <enabled> yes </enabled>
    </constraint>
</constraints_body>
</task_body>

```

Αρχείο RMR για την περιγραφή κίνησης ψηφιακού ανθρωποειδούς

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αρχείου κίνησης, μορφής RMR, που περιγράφει ενδεικτικά 2 από τα συνολικά 50 στιγμιότυπα της κίνησης ενός ψηφιακού ανθρωποειδούς. Η μορφή του αρχείου κίνησης είναι η ίδια τόσο για την περιγραφή της κίνησης αναφοράς (δεδομένο εισόδου), όσο και για την παραγόμενη κίνηση του συστήματος (δεδομένο εξόδου).

```

ANIMATION_V1.3
20582 20601 20561 21283
50
-8.253 1.847 -5.777
56
GHZ -88.73230 -4.10421 -84.09970
GHUR 8.38169 -13.02420 112.31800
GLK 0.00000 -0.13348 -14.80980
GHUL -10.94600 8.74214 110.04400
GLL 1.10006 -0.95654 -5.14207
GBL 1.03463 0.40335 -2.73440
GBB 1.05524 -0.12313 0.20912
GHB 1.01835 -0.52701 9.66168
GHH 1.24008 -0.10031 0.03388
GBRK 0.00000 0.00000 0.00000
GKH 1.21099 -0.00048 -0.02950
GSBR 10.90820 19.05840 -8.23106
GSBL -3.79309 -17.44720 -7.13585
GSR 27.30820 28.10330 74.73840
GELR -11.03700 -66.30100 0.00000
GHAR 0.00000 3.47039 -2.05734
GSL -39.86940 -23.14480 47.73880
GELL 41.06410 -20.32630 0.00000
GHAL 0.00000 19.34650 -36.92220
GAUM 0.00000 -0.00000 -0.00000

```

GKNR 0.03628 70.39140 0.00000
 GSPR 0.00000 0.00000 90.00000
 GFBR 0.00000 0.00000 0.00000
 GKNL -0.02071 67.99930 0.00000
 GSPL 0.00000 0.00000 90.00000
 GFBL 0.00000 0.00000 0.00000
 GD1R 30.00000 45.00000 30.00000
 GZ1R 0.00000 10.00000 -5.00000
 GM1R 0.00000 10.00000 -5.00000
 GR1R 0.00000 10.00000 -5.00000
 GK1R 0.00000 10.00000 -5.00000
 GD2R 0.00000 10.00000 0.00000
 GD3R 0.00000 0.00000 0.00000
 GZ2R 0.00000 10.00000 0.00000
 GZ3R 0.00000 0.00000 0.00000
 GM2R 0.00000 10.00000 0.00000
 GM3R 0.00000 0.00000 0.00000
 GR2R 0.00000 10.00000 0.00000
 GR3R 0.00000 0.00000 0.00000
 GK2R 0.00000 10.00000 0.00000
 GK3R 0.00000 0.00000 0.00000
 GD1L -30.00000 45.00000 -30.00000
 GZ1L 0.00000 -10.00000 -5.00000
 GM1L 0.00000 -10.00000 -5.00000
 GR1L 0.00000 -10.00000 -5.00000
 GK1L 0.00000 -10.00000 -5.00000
 GD2L 0.00000 10.00000 0.00000
 GD3L 0.00000 0.00000 0.00000
 GZ2L 0.00000 -10.00000 0.00000
 GZ3L 0.00000 0.00000 0.00000
 GM2L 0.00000 -10.00000 0.00000
 GM3L 0.00000 0.00000 0.00000
 GR2L 0.00000 -10.00000 0.00000
 GR3L 0.00000 0.00000 0.00000
 GK2L 0.00000 -10.00000 0.00000

GK3L 0.00000 0.00000 0.00000
 1000.0
 0
 -8.164 3.011 -5.395
 56
 GHZ -88.50981 -4.06473 -84.05630
 GHUR 8.17590 -13.02968 112.41466
 GLK 0.00000 0.04547 -14.93920
 GHUL -11.15326 8.74109 109.97882
 GLL 1.08152 -0.94124 -5.14523
 GBL 1.01546 0.41954 -2.74020
 GBB 1.03674 -0.10470 0.20050
 GHB 1.00331 -0.50520 9.65239
 GHH 1.21891 -0.08607 0.02286
 GBRK 0.00000 0.00000 0.00000
 GKH 1.19119 0.00947 -0.03971
 GSBK 11.06695 19.11520 -8.20582
 GSBL -3.16761 -16.32732 -9.63085
 GSR 27.17066 28.28908 74.86952
 GELR -11.44064 -66.26922 0.00000
 GHAR 0.00000 3.41091 -2.10838
 GSL -39.54972 -24.09919 48.12215
 GELL 40.31031 -21.73273 0.00000
 GHAL 0.00000 19.20815 -37.15381
 GAUM 0.00000 0.00000 0.00000
 GKNR 0.03628 70.39140 0.00000
 GSPR -0.00000 0.00000 90.00000
 GFBR 0.00000 0.00000 0.00000
 GKNL -0.02071 67.99930 0.00000
 GSPL 0.00000 0.00000 90.00000
 GFBL 0.00000 0.00000 0.00000
 GD1R 30.00000 45.00000 30.00000
 GZ1R 0.00000 10.00000 -5.00000
 GM1R 0.00000 10.00000 -5.00000
 GR1R 0.00000 10.00000 -5.00000

GK1R	0.00000	10.00000	-5.00000
GD2R	0.00000	10.00000	0.00000
GD3R	0.00000	0.00000	0.00000
GZ2R	0.00000	10.00000	0.00000
GZ3R	0.00000	0.00000	0.00000
GM2R	0.00000	10.00000	0.00000
GM3R	0.00000	0.00000	0.00000
GR2R	0.00000	10.00000	0.00000
GR3R	0.00000	0.00000	0.00000
GK2R	0.00000	10.00000	0.00000
GK3R	0.00000	0.00000	0.00000
GD1L	-30.00000	45.00000	-30.00000
GZ1L	0.00000	-10.00000	-5.00000
GM1L	0.00000	-10.00000	-5.00000
GR1L	0.00000	-10.00000	-5.00000
GK1L	0.00000	-10.00000	-5.00000
GD2L	0.00000	10.00000	0.00000
GD3L	0.00000	0.00000	0.00000
GZ2L	0.00000	-10.00000	0.00000
GZ3L	0.00000	0.00000	0.00000
GM2L	0.00000	-10.00000	0.00000
GM3L	0.00000	0.00000	0.00000
GR2L	0.00000	-10.00000	0.00000
GR3L	0.00000	0.00000	0.00000
GK2L	0.00000	-10.00000	0.00000
GK3L	0.00000	0.00000	0.00000
1000.0			
0			

ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Ο Μενέλαος Κ. Παππάς (E-mail: pappas@lms.mech.upatras.gr) εισήχθη στο Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών το 1997 και απέκτησε το Δίπλωμα Μηχανολόγου Μηχανικού το 2002.

Το Νοέμβριο του 2002 εγγράφηκε στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Π.Μ.Σ.) του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών για την απόκτηση Διδακτορικού Διπλώματος.

Παράλληλα, από το Σεπτέμβριο του 2002 έως σήμερα, εργάζεται στο Εργαστήριο Συστημάτων Παραγωγής και Αυτοματισμού, του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Γεωργίου Χρυσολούρη, συμμετέχοντας στις εκπαιδευτικές και ερευνητικές δραστηριότητές του.

Στο πλαίσιο της εκπαιδευτικής του δραστηριότητας διεξήγαγε εργαστήρια του μαθήματος της Μηχανουργικής Τεχνολογίας Ι και ΙΙ, καθώς επίσης και εκπαιδευτικά σεμινάρια σε υποψήφιους μηχανικούς φοιτητές στα πλαίσια της οργάνωσης προώθησης της επικοινωνίας, της συνεργασίας και της ανταλλαγής ιδεών μεταξύ των φοιτητών (κυρίως μηχανικών) στην Ευρώπη (Board of European Students of Technology - B.E.S.T.).

Στο πλαίσιο της ερευνητικής του δραστηριότητας συμμετείχε σε σημαντικό αριθμό ερευνητικών προγραμμάτων χρηματοδοτούμενων από την Ευρωπαϊκή Ένωση και τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας, ως ερευνητής μηχανικός (*research engineer*) και συνεργάστηκε με επιστήμονες από ερευνητικούς και βιομηχανικούς φορείς της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Επιπροσθέτως, συμμετείχε ενεργά σε τρία (3) διεθνή επιστημονικά συνέδρια με την παρουσίαση ισάριθμων επιστημονικών εργασιών (δημοσιεύσεων).

Τα ερευνητικά του ενδιαφέροντα επικεντρώνονται στα παρακάτω πεδία έρευνας:

- Μοντελοποίηση Ψηφιακών Ανθρωποειδών σε Εικονικό Περιβάλλον Εργασίας
- Εργονομικός Σχεδιασμός Προϊόντων και Διαδικασιών Παραγωγής με χρήση Η/Υ
- Εφαρμογές Εικονικής Πραγματικότητας στο Σχεδιασμό Προϊόντων και Διαδικασιών Παραγωγής
- Συνεργατικός Σχεδιασμός μέσω Δια-δικτυακού Εικονικού Περιβάλλοντος Εργασίας

- Αξιολόγηση της Αποτελεσματικότητας Συστημάτων Ενεργητικής και Παθητικής Ασφάλειας των Αυτοκινήτων

Πιο συγκεκριμένα οι ερευνητικές του δραστηριότητες εστιάζονται στα παρακάτω θέματα που σχετίζονται με τα προαναφερόμενα πεδία έρευνας:

- Digital Human Modeling (DHM)
 - Digital Human Motion Reconstruction from Motion Captured Data
 - Analysis of Human Motion based on Motion Captured Data
 - Human Motion Modeling and Simulation using Computer Manikins
 - Adaptation of Human Motion to New Characters and Product Dimensions
- Computer-Aided Ergonomic Design & Production
 - Assessment of Comfort / Discomfort Feeling Using Neural Networks
 - Human-Centered Product Design Using Computer Manikins
 - Digital Human Motion Modeling for Vehicle Interior Ergonomic Design
 - Ergonomic Evaluation of Manual Assembly Production Process / Workstation
- Virtual Reality (VR) Applications in Product and Process Design
 - Virtual Prototype Design and Functional Simulation
 - On-line Virtual Product Catalogues (VRML / X3D based)
 - Virtual Assembly Process Design and Simulation
 - Interaction Metaphors for Realistic Objects Manipulation with Data Glove
 - Immersive Assembly Environments
- Collaborative Virtual Environments (CVEs)
 - Shared Virtual Environments for Multi-user Navigation and Interaction
 - Virtual Showrooms for On-line Product Demonstration and Customization
 - Web-based Collaborative Product Design
- Vehicle Safety Systems Effectiveness
 - A-priori evaluation of safety functions effectiveness using Neural Networks

Έχει καλό επίπεδο γνώσης της Αγγλικής γλώσσας (*Cambridge First Certificate in English* - FCE) και είναι μέλος του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας (Τ.Ε.Ε.) από το Φεβρουάριο του 2003.

ΛΙΣΤΑ ΠΡΟΣΩΠΙΚΩΝ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ

Σε Διεθνή Επιστημονικά Περιοδικά

1. Mavrikios D., V. Karabatsou, **M. Pappas** and G. Chryssolouris, "An efficient approach to human motion modeling for the verification of human-centric product design and manufacturing in virtual environments", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, (Vol. 23, Issue 5, Oct. 2007), pp.533-543.
2. Alexopoulos K., D. Mavrikios, **M. Pappas**, E. Ntelis, and G. Chryssolouris, "Multi-Criteria upper-body human motion adaptation", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, (Vol. 20, No. 1, Jan.-Feb. 2007), pp.57-70.
3. **Pappas M.**, V. Karabatsou, D. Mavrikios and G. Chryssolouris, "Development of a web-based collaboration platform for manufacturing product and process design evaluation using virtual reality techniques", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, (Vol. 19, No. 8, Dec. 2006), pp.805-814.
4. Mavrikios D., V. Karabatsou, K. Alexopoulos, **M. Pappas**, P. Gogos and G. Chryssolouris, "An approach to human motion analysis and modelling", *International Journal of Industrial Ergonomics*, (Vol. 36, Issue 11, Nov. 2006), pp.979-989.

Σε Κεφάλαια Διεθνών Επιστημονικών Βιβλίων

5. Chryssolouris G., D. Mavrikios, **M. Pappas**, E. Xanthakis and K. Smparounis, "A Web and Virtual Reality-based Platform for Collaborative Product Review and Customisation", *Collaborative Design and Planning for Digital Manufacturing* (ISBN 978-1-84882-286-3), Wang L. and Nee A.Y.C. (Eds.), Springer London (April 2009), pp.137-152.
6. Chryssolouris G., D. Mavrikios and **M. Pappas**, "A Web and Virtual Reality Based Paradigm for Collaborative Management and Verification of Design Knowledge", *Methods and Tools for Effective Knowledge Life-Cycle-Management* (ISBN 978-3-540-78430-2), Bernard A. and Tichkiewitch S. (Eds.), Springer Berlin Heidelberg (April 2008), pp.91-105.

7. Sacco M., C. Redaelli, C. Constantinescu, G. Lawson, M. D'Cruz and **M. Pappas**, "DiFac: Digital Factory for Human Oriented Production System", *Human-Computer Interaction: HCI Applications and Services* (ISBN 978-3-540-73109-2), Jacko J.A. (Ed.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (July 2007), pp.1140-1149.
8. Mavrikios D., **M. Pappas**, M. Kotsonis, V. Karabatsou and G. Chryssolouris, "Digital Humans for Virtual Assembly Evaluation", *Digital Human Modeling* (ISBN 978-3-540-73318-8), Duffy V.G. (Ed.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (July 2007), pp.939-948.
9. **Pappas M.**, V. Karabatsou, D. Mavrikios and G. Chryssolouris, "Ergonomic evaluation of virtual assembly tasks", *Digital Enterprise Technology: Perspectives and Future Challenges* (ISBN 978-0-387-49863-8), Cunha P.F. and Maropoulos P.G. (Eds.), Springer-Verlag, New York (July 2007), pp.511-518.
10. Chryssolouris G., **M. Pappas**, V. Karabatsou, D. Mavrikios and K. Alexopoulos, "A Shared VE for Collaborative Product Development in Manufacturing Enterprises", *Collaborative Product Design and Manufacturing Methodologies and Applications* (ISBN 978-1-84628-801-2), Li W.D., Ong S.K., Nee A.Y.C. and McMahon C. (Eds.), Springer London (June 2007), pp.59-70.
11. Mavrikios D., **M. Pappas**, V. Karabatsou and G. Chryssolouris, "A new concept for collaborative product & process design within a human-oriented Collaborative Manufacturing Environment", *The Future of Product Development* (ISBN 978-3-540-69819-7), Krause F.L. (Ed), Springer Berlin Heidelberg (April 2007), pp.301-310.

Σε Διεθνή Επιστημονικά Συνέδρια

12. Smparounis K., D. Mavrikios, **M. Pappas**, V. Xanthakis, G.P. Vigano and K. Pentenrieder, "A virtual and augmented reality approach to collaborative product design and demonstration", *Proceedings of the 14th International Conference on Concurrent Enterprising* (ICE 2008), Lisbon, Portugal, (June 2008), SS1-IP1.
13. **Pappas M.**, V. Karabatsou, D. Mavrikios, K. Smparounis and G. Chryssolouris, "A Collaboration Platform for Product Design Evaluation, Demonstration and Customization", *Proceedings of the IFAC Workshop on Manufacturing Modelling*,

Management and Control (IFAC MIM'07), Budapest, Hungary, (November 2007), pp.145-150.

14. Pedrazzoli P., D. Rovere, C. Constantinescu, J. Bathelt, **M. Pappas**, P. Depince, G. Chryssolouris, C. Boer and E. Westkaemper, "High Value Adding Virtual Reality Tools for Networked Customer-Driven Factory", *Proceedings of the 4th International Conference on Digital Enterprise Technology* (DET2007), Bath, U.K., (September 2007), pp.347-352.
15. Pavlopoulos C., C. Lalas, **M. Pappas**, V. Karabatsou, and G. Chryssolouris, "Virtual Representation and Design Collaboration in Textile Industry", *Proceedings of the 40th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, Liverpool, U.K., (May-June 2007).
16. Mavrikios D., V. Karabatsou, **M. Pappas**, K. Alexopoulos and G. Chryssolouris, "An integrated VR-based simulation environment for the assessment of process and human factors in assembly", *Proceedings of the 1st CIRP International Seminar on Assembly Systems*, Stuttgart, Germany, (November 2006), pp.301-305.
17. **Pappas M.**, D. Mavrikios, V. Karabatsou and G. Chryssolouris, "VR-based methods and developments for assembly verification", *Proceedings of the 1st CIRP International Seminar on Assembly Systems*, Stuttgart, Germany, (November 2006), pp.295-300.
18. Alexopoulos K., **M. Pappas**, V. Karabatsou, D. Mavrikios and G. Chryssolouris "Human Motion Adaptation: A Multi-Criteria Approach", *Proceedings of the SAE Digital Human Modeling for Design and Engineering Conference*, Lyon, France, (July 2006), Paper ID: 2006-01-2351 - (Edited in CD-ROM).
19. Chryssolouris G., **M. Pappas** and V. Karabatsou "Posture based discomfort modeling using neural networks", *Proceedings of the IFAC Conference on Manufacturing, Modelling, Management and Control*, Athens, Greece, (October 2004), pp.19-23.
20. **Pappas M.**, D. Fragos, K. Alexopoulos and V. Karabatsou, "Development of a three-finger grasping technique on a VR glove", *Proceedings of the 2nd Virtual Concept Conference*, Biarritz, France, (November 2003), pp.279-283.

Σε Εθνικά Επιστημονικά Συνέδρια

21. **Παππός Μ.**, Β. Καραμπάτσου, Δ. Μαυρίκιος, Γ. Χρυσολούρης, "Ανάπτυξη πλατφόρμας συνεργατικού σχεδιασμού προϊόντων με χρήση τεχνικών Διαδικτύου και Εικονικής Πραγματικότητας", *Εισηγήσεις του 2ου Πανελληνίου Συνεδρίου Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων*, Αθήνα, Ελλάδα (Μάιος 2007).
22. **Παππός Μ.**, Β. Καραμπάτσου, Δ. Μαυρίκιος, Γ. Χρυσολούρης, "Εργονομική ανάλυση διαδικασιών συναρμολόγησης με χρήση Εικονικής Πραγματικότητας και Ψηφιακών Ανθρωποειδών", *Εισηγήσεις του 2ου Πανελληνίου Συνεδρίου Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων*, Αθήνα, Ελλάδα (Μάιος 2007).