



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ

Έλεγχος Δυναμικής Εμπέδησης Επιδέξιας Ρομποτικής Λαβής στο
Πλαισιο του Χειριζόμενου Αντικειμένου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Κωνσταντίνου Π. Βάσιου

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Σ.Τζαφέστας
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιανουάριος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ & ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ

Έλεγχος Δυναμικής Εμπέδησης Επιδέξιας Ρομποτικής Λαβής στο
Πλαίσιο του Χειριζόμενου Αντικειμένου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Κωνσταντίνου Π. Βάσιου

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Σ. Τζαφέστας
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 31η Ιανουαρίου 2013

.....
-Κωνσταντίνος Τζαφέστας-
-Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ-

.....
-Τρύφων Κουσιουρής-
-Καθηγητής ΕΜΠ-

.....
-Νικόλαος Μαράτος-
-Καθηγητής ΕΜΠ-

Αθήνα, Ιανουάριος 2013.

.....

(Κωνσταντίνος Π. Βάσιος)

(Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών)

Copyright © Βάσιος Κωνσταντίνος, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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 και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

Περίληφη

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετούμε το θέμα της επιδέξιας ρομποτικής λαβής (dextrous robotic grasping) και συγκεκριμένα το θέμα του επιδέξιου ρομποτικού χειρισμού (dextrous robotic manipulation) μέσω ανθρωπομορφικής διάταξης παράλληλων κινηματικών αλυσίδων. Ο επιδέξιος ρομποτικός χειρισμός έχει ως βασικό στόχο την επίτευξη οποιασδήποτε θέσης και προσανατολισμού του χειριζόμενου αντικειμένου μέσα στο χώρο εργασίας του ρομποτικού χειριστή με ταυτόχρονο έλεγχο των εσωτερικών δυνάμεων.

Αρχικά παρουσιάζουμε μία βιβλιογραφική επισκόπηση πάνω στα βασικά θέματα του επιδέξιου ρομποτικού χειρισμού, σκιαγραφώντας τις κυρίαρχες τάσεις και τεχνικές, δίνοντας κυρίως έμφαση στα θέματα ελέγχου. Στη συνέχεια προχωρούμε στη δόμηση περιβάλλοντος προσομοίωσης φυσικής πολλών σωμάτων (Multibody Dynamics) και διαχείρισης φαινομένων συγκρούσεων (Collision Dynamics), το οποίο βασίζεται στη βιβλιοθήκη ανοικτού κώδικα Open Dynamics Engine (ODE) η οποία καλείται μέσω ειδικά προσαρμοσμένου MEX C++ S-Function Block του Simulink. Μέσα σε αυτό το περιβάλλον προσομοίωσης μοντελοποιούμε ρομποτικό χέρι κατά τα κινηματικά-δυναμικά πρότυπα του DLR Hand 2. Το συγκεκριμένο περιβάλλον αποτελεί την πλατφόρμα πάνω στην οποία εν συνεχεία: (α) υλοποιήθηκε το σύνολο των δυναμικών ελεγκτών που αναπτύχθηκαν και μελετώνται, στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας, και (β) εκτελέστηκαν όλες οι πειραματικές δοκιμές που παρουσιάζονται και αναλύονται στην παρούσα εργασία.

Σε θεωρητικό επίπεδο, στην παρούσα εργασία εφαρμόζουμε ένα ολοκληρωμένο σχήμα μηχανικής εμπέδισης (impedance) βασιζόμενο στη παθητική ιδιότητα της ρομποτικής λαβής, το οποίο ορίζει πλήρως τη στατική-δυναμική συμπεριφορά καθώς και τις εσωτερικές δυνάμεις του αντικειμένου με ταυτόχρονη διαχείριση των πλεοναζόντων βαθμών ελευθερίας μέσω ορισμού υποεργασίας στο χώρο των δακτύλων. Η ανάλυση επίδοσης της τεχνικής αυτής οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το συγκεκριμένο σχήμα ελέγχου ρομποτικής λαβής παρουσιάζει ορισμένες αδυναμίες, όπως: εμφάνιση μόνιμων σφαλμάτων θέσης, ασυνέπειες ως προς την οριζόμενη μηχανικής ακαμψία, καθώς και πιθανότητα ολισθήσεων για ορισμένες γεωμετρίες αντικειμένων. Τέλος, ο συγκεκριμένος ελεγκτής μηχανικής εμπέδησης ρομποτικής λαβής επεκτείνεται με τον ορισμό και όρου βαρυτικής αντιστάθμησης, με στόχο το μηδενισμό των σφαλμάτων τοποθέτησης που οφείλονται στη βαρυτική επίδραση του χειριζόμενου αντικειμένου. Τα αποτελέσματα των δοκιμών που εκτελέσθηκαν, επί της πλατφόρμας προσομοίωσης που αναφέρθηκε ανωτέρω, δείχνουν την αποτελεσματικότητα των συγκεκριμένων τεχνικών ελέγχου ρομποτικής λαβής.

Λέξεις Κλειδιά

Επιδέξιος ρομποτικός χειρισμός, ρομποτικής λαβή, δυναμικός έλεγχος βάση παθητικότητας, ρομποτικός έλεγχος μηχανικής εμπέδησης, βελτιστοποίηση εσωτερικών δυνάμεων, δυναμικής μοντελοποίηση και προσομοίωση, βαρυτική αντιστάθμιση

Abstract

This diploma thesis deals with the subject of dexterous robotic manipulation with anthropomorphic robotic hand (comprising opposing kinematic chains). The goal of any dexterous robotic manipulation task is to achieve a desired pose (position/orientation) for the manipulated object by means of the internal coordinated motion of the robotic fingers within the workspace of the hand, along with achieving absolute control of the internal grasping forces.

This diploma thesis starts by presenting a literature survey covering the major issues in the field of dexterous robotic manipulation, outlining the state-of-the-art with particular focus on the control design for robot grasping. This work is based on a custom-adapted dynamic simulation platform, using features from the Open Dynamics Engine (ODE) open source API, in particular: physics-based simulation, multi-body dynamics and collision detection and handling. These features are integrated within a Simulink environment using a custom-modified MEX C++ Function Block. Within this simulation platform, a robot hand has been modeled and dynamically simulated based on the kinematic and dynamic characteristics of the DLR Hand II.

From a theoretical point of view, in this work we apply an integrated passivity-based impedance control scheme to achieve stable robot grasping by properly defining the static and dynamic properties along with the internal forces on the manipulated object. In addition, we deal with the redundant degrees of freedom of the hand, by exploiting the null-space of the fingers task-space.

Analyzing the performance of this robot-grasping control scheme leads to the conclusion that it presents certain drawbacks, namely: steady-state positioning errors, inconsistencies regarding the definition of a decoupled stiffness matrix, as well as increased risk of potential contact slippage for specific object geometries. In this diploma thesis, we propose an extension of this passivity-based object-level impedance control scheme, aiming to control more efficiently the internal grasping forces, using information based on the local object surface geometry properties. The goal is to reduce steady-state errors, as well as to mitigate the effect of coupling between independent degrees of freedom, in order to produce a more consistent object-level grasping stiffness matrix and to achieve better control of the contact forces inside the friction cones constraints, thus reducing slippage possibility. Finally, this impedance control scheme is further extended by introducing an active gravity-compensation term, aiming to minimize any static errors that may be due to the effect of the manipulated object's weight. Simulation results, obtained by conducting extensive trials within the dynamic simulation platform described above, demonstrate the efficacy of the proposed robot grasping control scheme and the improved object-level impedance characteristics achieved.

Key Words

Dexterous Robotic Grasping, passivity-based dynamic control, Grasp Force Optimization, robot impedance control, Dynamic Modeling and Simulation, internal force optimization, gravity compensation

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή μου, κ. Κωνσταντίνο Τζαφέστα, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε σε αυτό το δύσκολο και συνάμα εντυπωσιακό θέμα της ρομποτικής επιστήμης. Η υποστήριξη και η καθοδήγησή του, εν μέσω πολλές φορές δύσκολων συνθηκών και πιεσμένου χρόνου, υπήρξαν καθοριστικής σημασίας για την επιτυχή ολοκλήρωση του έργου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους γονείς μου, Πάνο και Ζωή, οι οποίοι μέσω της υποστήριξης που μου παρείχαν καθ'όλο το διάστημα των φοιτητικών μου χρόνων, ηθικής και πρακτικής, μου επέτρεψαν να συγχεντρωθώ απερίσπαστος στη μαθησιακή διαδικασία.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων	vi
Κατάλογος Πινάκων	vii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Ρομποτική Επιστήμη	1
1.2 Επιδέξιος Ρομποτικός Χειρισμός	7
1.3 Οργάνωση Κειμένου	11
2 Έλεγχος Επιδέξιας Ρομποτικής Λαβής: Επισκόπιση	13
2.1 Κλασικοί Αναγκαίοι Ορισμοί	14
2.2 Περιγραφή Συστήματος	18
2.2.1 Μοντελοποίηση	18
2.2.2 Αισθητηριακή Σύνθεση	20
2.3 Μεθοδολογίες Ελέγχου Ρομποτικής Λαβής	23
2.3.1 Έλεγχος Δύναμης	23
2.3.2 Έλεγχος Ακαμψίας σε επίπεδο Αντικειμένου – Object Stiffness Control	24
2.3.3 Έλεγχος Ακαμψίας σε επίπεδο Αντικειμένου με Πλεονασματικές Κινηματικές Διατάξεις	26
2.3.4 Έλεγχος Σύνθετης Μηχανικής Αγωγιμότητας – Admittance Control .	27
2.3.5 Υβριδικός Δυναμικός Έλεγχος Συστήματος Ρομποτικής Λαβής .	28
2.3.6 Βελτιστοποίηση Δυνάμων Λαβής (Grasping Force Optimization – GFO)	30
2.3.7 Προσχηματισμός Ρομποτικής Λαβής – Preshaping Robot Hand .	31
2.3.8 Άλλες Τεχνικές	32
2.3.9 Θέματα Ευστάθειας	33
3 Μοντελοποίηση & Έλεγχος Ρομποτικής Λαβής: Θεωρητικό Υπόβαθρο	35
3.1 Μοντελοποίηση Ρομποτικού Χεριού	35
3.1.1 Κινηματικό Μοντέλο Ρομποτικού Χεριού	36
3.1.2 Δυναμικό Μοντέλο Ρομποτικού Χεριού	38
3.1.3 Βασικές Ιδιότητες Δυναμικού Μοντέλου Ρομποτικού Χεριού .	39

3.1.4 Ρομποτικός Έλεγχος Βασιζόμενος στη Παθητικότητα	40
3.2 Στατική Ανάλυση Λαβής	41
3.2.1 Στατική Ισορροπία & Μήτρα Μετασχηματισμού Δυνάμεων Ρομποτικής Λαβής	42
3.3 Έλεγχος Μηχανικής Εμπέδισης σε Επίπεδο Αντικειμένου Βάσει Παθητικότητας	43
3.3.1 Εικονικό Πλαίσιο Αντικειμένου – Virtual Object Frame	44
3.3.2 Νόμος ελέγχου στο επίπεδο του αντικειμένου	45
3.3.3 Περιστροφική Ακαμψία	47
3.3.4 Ακαμψία Γραμμικής Μετατόπισης	48
3.3.5 Συνδετική Ακαμψία	49
3.3.6 Έλεγχος Πλεοναζόντων Βαθμών Ελευθερίας	50
3.3.7 Σχεδιασμός Όρου Απόσβεσης	52
3.4 Επεκτάσεις–Τροποποιήσεις του Ελεγκτή Εμπέδησης στο επίπεδο του αντικειμένου	54
3.4.1 Έλεγχος Εσωτερικών Δυνάμεων βάση Χαρακτηριστικών Επιφανείας (IPC–IF)	55
3.4.2 Βαρυτική Αντιστάθμιση	56
4 Γλοποίηση & Αποτελέσματα Προσομοίωσης	58
4.1 Δόμηση Περιβάλλοντος Προσομοίωσης	58
4.1.1 DLR Hand 2	59
4.1.2 Open Dynamics Engine (ODE)	61
4.1.3 Open Dynamics Engine S-Function Block – Προσομοίωση Ρομποτικού Χεριού	62
4.1.4 Συγκεντρωτική Δομή Γλοποίησης Συστήματος	64
4.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Ελεγκτή IPC	66
4.2.1 Βηματική Απόκριση – Μεταφορική και Στροφική κίνηση	66
4.2.2 Μέτρηση Ακαμψίας	72
4.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης ελεγκτή ρομποτικής λαβής IPC–IF με αντιστάθμιση εσωτερικών δυνάμεων	76
4.3.1 Βηματική Απόκριση – Μεταφορική και Στροφική κίνηση	76
4.3.2 Μέτρηση Ακαμψίας	81
4.4 Σύγκριση ελεγκτών IPC, IPC – IF	84
4.5 Βαρυτική Αντιστάθμιση	85
5 Συμπεράσματα – Επεκτάσεις	88
5.1 Σύνοψη–Συμπεράσματα	88
5.2 Επεκτάσεις–Μελλοντικές κατευθύνσεις	90
Βιβλιογραφία	91

Κατάλογος σχημάτων

1.1	Ευφυή Ρομποτικά Συστήματα: Ξεκινώντας από αριστερά προς τα δεξιά και ανά γραμμή, AlphaDog (DARPA), Atlas (DARPA), Tdedy–One (WASEDA University Sugano Laboratory TWENDY team), Seagle (FESTO), Asimo (Honda), Oportunity (NASA), PR2 (Willow Garage), Robonaut (NASA), Industrial Arm (KUKA), UAV Drone, DaVinci, Google Autonomous Car	5
1.2	Τάξη μεγέθους για τον αριθμό εισόδων–εξόδων στο σύστημα άνθρωπος	7
1.3	Επιδέξια Ανθρωπομορφικά Ρομποτικά Χέρια: Ξεκινώντας από αριστερά προς τα δεξιά και ανά γραμμή: DLR Hand (German Aerospace Center), DLR Hand 2 (German Aerospace Center), Twedy–one Hand (WASEDA University Sugano Laboratory TWENDY team), Robonaut Hand Schematic (NASA), Shadow Robot Hand, FESTO ExoHand . . .	9
2.1	Τύποι κλειστότητας για κίνηση στο επίπεδο. (α) Παθητική Κλειστότητα ως προς τη μορφή. (β) Παθητική Κλειστότητα ως προς τη Δύναμη. (γ) Ενεργητική Κλειστότητα. (δ) Υβριδική Ενεργητική/Παθητική Κλειστότητα [4]	17
2.2	Hybrid System HDS [16]	20
2.3	Bank of Impedance Controllers [16]	29
3.1	Denavit–Hartenbeg Parameters [31]	36
3.2	Κινηματική Δομή Ανθρωπομορφικού Δακτύλου 4 Βαθμών Ελευθερίας	37
3.3	Σχηματικό Διάγραμα Αντικειμένου υπό Λαβή N-Δακτύλων Σημειακών Επαφών με Τριβή [16]	42
3.4	Κατασκευή Εικονικού Πλαισίου [27]	45
3.5	Εγγενώς Παθητικό Σχήμα Ελέγχου [29]	46
3.6	Τα ακροδάκτυλα $x = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T$ συγκρατούν σφαιρικό–κυλινδρικό αντικείμενο με τα εικονικά ελατήρια που διαμορφώνουν τον έλεγχο όπως περιγράφεται στη σχέση (3.48)	47
3.7	Μεγάλη εφαπτομενική δύναμη ως προς την επιφάνεια του αντικειμένου στα ακροδάκτυλα x_2, x_3 από τις σφαιρικά συμμετρικές αντίστοιχες ακαμψίες K_{Conn2}, K_{Conn4}	55
3.8	Εγγενώς Παθητικός Έλεγχος με Έλεγχο Εσωτερικών Δυνάμεων ασκώντας κάθετη πίεση στις επιφάνειες που ορίζουν οι επαφές (IPC–IF). .	56

3.9	Έλεγχος Εσωτερικών Δυνάμεων με κάθετη πίεση στις επιφάνειες του αντικειμένου σε συνδυασμό με τους όρους βαρυτικής αντιστάθμισης .	57
4.1	Ανώτερο επίπεδο υλοποίησης Simulink με το μοντέλο του συστήματος τον ελεγκτή και τα επιμέρους εργαλεία.	64
4.2	Γενική άποψη δομής ελεγκτή Simulink	65
4.3	Όψη των όρων στροφικής, μεταφορικής εσωτερικής ακαμψίας Simulink	65
4.4	Γενική όψη αρχικής διάταξης λαβής με αντικείμενο υπό χειρισμό σφαίρα	67
4.5	Κάτοψη – Τελική Θέση μετά τη στροφική μετατόπιση κατά τον z άξονα (στροφή 0.6 rad)	67
4.6	Κάτοψη – Μετατόπιση κατά τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm)	67
4.7	Ροπή Εμπέδησης m_O κατά τη στροφή ως προς τον z άξονα (στροφή 0.6 rad)	68
4.8	Δύναμη Εμπέδησης f_O κατά τη στροφή ως προς τον z άξονα (στροφή 0.6 rad)	68
4.9	Σύνδεση δακτύλων με το εικονικό πλαίσιο f_{Conn} κατά τη στροφή ως προς τον z άξονα (στροφή 0.6 rad)	68
4.10	Ασκούμενες ροπές στις αρθώσεις των δακτύλων 2,3,4,1-thumb, κατά τη στροφική κίνηση ως προς τον z άξονα (στροφή 0.6 rad).	69
4.11	Θέση x_O αντικειμένου κατά τη μετατόπιση ως προς τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm)	69
4.12	Ροπή Εμπέδησης m_O κατά τη μετατόπιση ως προς τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm)	70
4.13	Δύναμη Εμπέδησης f_O κατά τη μετατόπιση ως προς τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm)	70
4.14	Σύνδεση δακτύλων με το εικονικό πλαίσιο f_{Conn} κατά τη μετατόπιση ως προς τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm)	70
4.15	Ασκούμενες ροπές στις αρθώσεις των δακτύλων 2,3,4,1-thumb, κατά τη μεταφορική κίνηση x , 0.40m όπως προκύπτουν από το νόμο ελέγχου.	71
4.16	Θέση x_o εικονικού πλαισίου κατά την άσκηση δυνάμεων κατά τον x , y , z άξονα αντίστοιχα.	73
4.17	Quaternion e_b εικονικού πλαισίου κατά την άσκηση δυνάμεων κατά τον x , y , z άξονα αντίστοιχα.	73
4.18	Θέση x_o αντικειμένου μετά την άσκηση των δυνάμεων κατά τους άξονες x , y , z του πλαισίου H_o αντίστοιχα.	74
4.19	Θέση x_o εικονικού πλαισίου κατά την άσκηση ροπών κατά τον x , y , z άξονα αντίστοιχα.	74
4.20	Quaternion e_b εικονικού πλαισίου κατά την άσκηση ροπών κατά τον x , y , z άξονα αντίστοιχα.	75
4.21	Quaternion αντικειμένου μετά την άσκηση των ροπών κατά τους άξονες x , y , z του πλαισίου H_o αντίστοιχα.	75

4.22 Ροπή Εμπέδησης m_O κατά τη στροφή ως προς τον z άξονα (στροφή 0.6 rad), με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF	76
4.23 Δύναμη Εμπέδησης f_O κατά τη στροφή ως προς τον z άξονα (στροφή 0.6 rad), με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF	77
4.24 Μέτρο Εσωτερικών Δυνάμεων f_{sn} κατά τη στροφή ως προς τον z άξονα (στροφή 0.6 rad), με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF	77
4.25 Ασκούμενες ροπές στις αρθώσεις των δακτύλων 2,3,4,1–thumb, κατά τη στροφική κίνηση ως προς τον z άξονα (στροφή 0.6 rad), με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF	78
4.26 Θέση x_O αντικειμένου κατά τη μετατόπιση κατά τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm) με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF	78
4.27 Δύναμη εμπέδησης f_O αντικειμένου κατά τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm) με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF	79
4.28 Ροπή εμπέδησης m_O κατά τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm) με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF	79
4.29 Μέτρο Εσωτερικών Δυνάμεων f_{sn} κατά την μετατόπιση ως προς τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm) με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF	79
4.30 Ασκούμενες ροπές στις αρθώσεις των δακτύλων 2,3,4,1–thumb, κατά την μετατόπιση ως προς τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm) με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF.	80
4.31 Θέση x_o εικονικού πλαισίου κατά την άσκηση δυνάμεων κατά τον x, y, z άξονα αντίστοιχα, με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF.	81
4.32 Quaternion e_b εικονικού πλαισίου κατά την άσκηση δυνάμεων κατά τον x, y, z άξονα αντίστοιχα, με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF.	82
4.33 Θέση x_o αντικειμένου μετά την άσκηση των δυνάμεων κατά τους άξονες x, y, z του πλαισίου H_o αντίστοιχα, με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF.	82
4.34 Θέση x_o εικονικού πλαισίου κατά την άσκηση ροπών κατά τον x, y, z άξονα αντίστοιχα, με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF	83
4.35 Quaternion e_b εικονικού πλαισίου κατά την άσκηση ροπών κατά τον x, y, z άξονα αντίστοιχα, με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF	83
4.36 Quaternion αντικειμένου μετά την άσκηση των ροπών κατά τους άξονες x, y, z του πλαισίου H_o αντίστοιχα, με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF	84
4.37 Κλίση – μόνιμο σφάλμα θέσης υπό τη παρουσία βαρυτικού πεδίου. Εισαγωγή του όρου βαρυτικής αντιστάθμισης με ανάκτηση θέσης – προσανατολισμού	85
4.38 Θέση x_O αντικειμένου κατά την εφαρμογή του βαρυτικού όρου στο 0.3sec και του αντισταθμιστικού όρου στο 1.3sec	86
4.39 Μεταφορική Δύναμη Εμπέδησης f_O κατά την εφαρμογή του βαρυτικού όρου στο 0.3sec και του αντισταθμιστικού όρου στο 1.3sec	86
4.40 Στροφική Εμπέδηση m_O κατά την εφαρμογή του βαρυτικού όρου στο 0.3sec και του αντισταθμιστικού όρου στο 1.3sec	86

4.41 Quaternion διάνυσμα e_b κατά την εφαρμογή του βαρυτικού όρου στο $0.3sec$ και του αντισταθμιστικού όρου στο $1.3sec$ 87

Κατάλογος πινάκων

3.1 Πίνακας παραμέτρων Denavit–Hartenberg ανθρωπομορφικού δακτύ-λου 4 Βαθμών Ελευθερίας	36
4.1 Πίνακας βασικών γεωμετρικών – αδρανειακών χαρακτηριστικών DLR Hand 2	61
4.2 Τιμές παραμέτρων ODE	62
4.3 Πίνακας βασικών γεωμετρικών – αδρανειακών χαρακτηριστικών του προσομοιωθέντος ρομποτικού χεριού	63
4.4 Μέσα τετραγωνικά σφάλματα ($\sum_{i=1}^N e^2/N$) ως προς την φαινόμενη μεταφορική ακαμψία της ρομποτικής λαβής	84
4.5 Μέσα τετραγωνικά σφάλματα ($\sum_{i=1}^N e^2/N$) ως προς την φαινόμενη στροφική ακαμψία της ρομποτικής λαβής	84

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Στο παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο επιχειρούμε αρχικά μία προσέγγιση διατύπωσης του ορισμού της ρομποτικής επιστήμης και των ρομποτικών συστημάτων αντίστοιχα. Στη συνέχεια αναφέρουμε κάποια στοιχεία προχωρώντας σε μία βασική ανάλυση για τη σημερινή προσφορά αλλά και τους στόχους εξέλιξης της ρομποτικής. Φυσική σύνδεση στη μελέτη σχεδόν κάθε ρομποτικού συστήματος, ιδιαίτερα αυτών με στόχο την αυτόνομη, προσαρμοστική–ευφυή δράση, αποτελούν τα βιολογικά συστήματα και ιδιαίτερα ο ίδιος ο άνθρωπος. Αμέσως μετά εστιάζουμε την προσοχή μας στο κομμάτι εκείνο της ρομποτικής το οποίο ασχολείται με τον επιδέξιο χειρισμό, που είναι και το αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας, αναφέροντας κάποια βασικά χαρακτηριστικά των μέχρι τώρα προσπαθειών για τη κατασκευή τετοιων διατάξεων. Τέλος, παρουσιάζουμε τη δομή της εργασίας ανά κεφάλαιο με τις αντίστοιχες περιλήψεις αυτών.

1.1 Ρομποτική Επιστήμη

Ένας κομψός, γενικός και αφαιρετικός ορισμός της ρομποτικής επιστήμης είναι ο ακόλουθος.

”Ρομποτική ορίζεται ως η επιστήμη που μελετά την ευφυή σχέση μεταξύ αντίληψης και δράσης [1]”

Η λέξη ρομπότ προέρχεται από τη τσέχικη λέξη *robot* η οποία χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη βαρετή ή και κοπιαστική, πιθανά εξαναγκαστική, δουλειά.

Για τα ρομποτικά συστήματα έχουν προταθεί διάφοροι ορισμοί. Παρουσιάζουμε κάποιους από τους πιο χαρακτηριστικούς.

”Ρομπότ ορίζεται ως μηχανικός ή εικονικός πράκτορας, συνήθως σύνθετη ηλεκτρομηχανική συσκευή, η οποία οδηγείται από προγραμματιζόμενα στοιχεία”

Wikipedia

“Μηχανή ικανή να πραγματοποιήσει μία πολύπλοκη σειρά δράσεων αυτόματα, προγραμματιζόμενη από υπολογιστικά στοιχεία”

“Μηχανή ανθρωπόμορφη, ικανή να αντιγράψει κάποιες συγκεκριμένες ανθρώπινες κινήσεις και ικανότητες πραγματοποιώντας αυτές με αυτόματο τρόπο”

“Αναφέρεται σε πρόσωπο το οποίο συμπεριφέρεται μηχανικά με μη συναισθηματικό τρόπο”

Google Dictionary

“Μηχανή, ορισμένες φορές ανθρωπόμορφη, ικανή να πραγματοποιήσει μία γκάμα από συχνά πολύπλοκες ανθρώπινες εργασίες βάσει εντολών ή πρότερου προγραμματισμού αυτής”

“Μηχανή ή συσκευή η οποία δρα αυτόματα ή μέσω απομακρυσμένου χειρισμού”

American Heritage Dictionary

“Αυτοματοποιημένη μηχανή προγραμματισμένη για την εκτέλεση ειδικών μηχανικών εργασιών αυτόματα ή υπό τη καθοδήγηση φυσικού προσώπου”

Collins English Dictionary

Στην περίπτωση του εικονικού πράκτορα (virtual agent) ο συνηθέστερος όρος που χρησιμοποιείται είναι αυτός του *bot*.

Επιχειρούμε μία αφαιρετική σύνθεση των ανωτέρω ορισμών με σκοπό τη συστηματική προσέγγιση.

Η επιστήμη της ρομποτικής ασχολείται με τη μελέτη συστημάτων τα οποία συνδυάζοντάς αισθητηριακά στοιχεία, υπολογιστική ικανότητα – νοημοσύνη και επενεργητές – κινηματικές διατάξεις είναι σε θέση να προσλάβουν πληροφορία από το περιβάλλον, να την επεξεργαστούν και τελικά να επενεργήσουν σε αυτό με τρόπο που εξυπηρετεί το σκοπό για τον οποίο σχεδιάστηκαν.

Το πεδίο της ρομποτικής επιστήμης εμπεριέχει ένα εξαιρετικά ευρύ φάσμα επιμέρους επιστημονικών πεδίων με πιο χαρακτηριστικά αυτά της επιστήμης της ηλεκτρονικής, της επιστήμης υπολογιστών, της γνωσιακής επιστήμης (κυρίως με το κομμάτι της τεχνητής νοημοσύνης), της μηχατρονικής, νανοτεχνολογίας, εμβιομηχανικής κ.α. Η επιτυχής ολοκλήρωση αυτών για την σύνθεση μίας επιτυχημένης ρομποτικής εφαρμογής αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση.

Η ευρύτητα του πεδίου των εφαρμογών, τα πολλαπλά επιστημονικά πεδία αλλά και το νεαρό ίσως της ρομποτικής επιστήμης αποτελούν πιθανότατα κάποιους από

τους λόγους που δικαιολογούν την απουσία ενός αυστηρού ορισμού, οικουμενικά αποδεκτού.

Μέχρι σήμερα οι περισσότερο εκτεταμένες, και πιο επιτυχημένες, εφαρμογές ρομποτικής περιορίζονται στις βιομηχανικές γραμμές παραγωγής επιτελώντας επαναλαμβανόμενες εργασίες σε αυστηρά δομημένο και προβλέψιμο περιβάλλον. Θεωρείται μάλιστα ότι οι σχετικές τεχνολογίες των βιομηχανικών ρομπότ έχουν φτάσει σε ένα ώριμο σημείο [2]. Στις περισσότερες από αυτές τις εφαρμογές γίνεται χρήση αποκλειστικά τεχνικών ελέγχου θέσης, δίνοντας με αυτό το τρόπο ένα σαφές στίγμα για την τάση της βιομηχανίας να προτιμά παραδοσιακές, κλασσικές τεχνικές ελέγχου.

Το στοίχημα όμως για τη ρομποτική ήταν και είναι η επιτυχής διείσδυση στον πραγματικό κόσμο με συστήματα ικανά για ευφυή αυτόνομη δράση όπου το περιβάλλον είναι μη δομημένο και κυριαρχεί η εμφάνιση απρόβλεπτων γεγονότων. Μια τέτοια εξέλιξη θα είχε και πολύ σημαντικά οφέλη και στον τομέα της βιομηχανίας όπου δρουν ρομποτικά συστήματα, καθώς υπολογίζεται ότι το κόστος διαμόρφωσης του χώρου εργασίας του ρομποτικού συστήματος είναι τέσσερις φορές μεγαλύτερο από αυτό της εγκατάστασης του ρομπότ αυτού καθ' εαυτού.

Μία τέτοια εξέλιξη προϋποθέτει αυξημένες ικανότητες αντίληψης, γνωσιακές ικανότητες καθώς και ικανότητες κινηματικής και δυναμικής επενέργησης στον περιβάλλοντα χώρο. Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων από κυβερνητικούς αλλά και ιδιωτικούς φορείς παγκοσμίως, κυρίως από τις προηγμένες χώρες, παρ' όλα αυτά σε καμία περίπτωση δεν αποτελούν κομμάτι της καθημερινότητας των κοινωνιών στο βαθμό που θα αναμενόταν. Πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι αυτό του πυρηνικού αυτοχήματος στη Fukushima της Ιαπωνίας, όπου ενώ αναμενόταν μία ιδιαίτερα εξελιγμένη χώρα στο τομέα της ρομποτικής να διαθέτει ρομποτικά συστήματα για αντιμετώπιση καταστροφών, τελικά ήταν εργάτες αυτοί που εκτέθηκαν στο επικίνδυνο αυτό περιβάλλον για τον έλεγχο της κρίσης. Αυτή η υστέρηση δημιουργεί έντονα ερωτήματα σχετικά με το ποιους δρόμους και κατευθύνσεις πρέπει να ακολουθήσει η ρομποτική στα επόμενα χρόνια.

Εξαιρετικά μεγάλο ενδιαφέρον πάνω σε αυτά τα θέματα παρουσιάζει ο καινούριος Διαγωνισμός Ρομποτικής της Υπηρεσίας Προηγμένων Ερευνών Συστημάτων Άμυνας των Ηνωμένων Πολιτειών (DARPA Robotics Challenge), ο οποίος θέτει σαν πρόκληση τη κατασκευή ανδροειδών ρομποτικών συστημάτων ικανά για δράση σε σενάρια διάσωσης σε επικίνδυνα, υποβαθμισμένα ανθρωπογενή περιβάλλοντα. Αν λάβουμε υπ' όψη την επιτυχία του προηγούμενου αντίστοιχου διαγωνισμού της DARPA για τη κατασκευή αυτό-οδηγούμενων οχημάτων (στη πολιτεία της Nevada ήδη εκδόθηκε η πρώτη άδεια κυκλοφορίας για το αυτο-οδηγούμενο όχημα της Google), τότε οι εξελίξεις για τα αυτόνομα ρομποτικά συστήματα αναμένεται να είναι ραγδαίες.

Τα τελευταία χρόνια διαμορφώνονται κάποιες τάσεις οι οποίες ενισχύουν τη τάση ως προς την εξέλιξη προηγμένων συστημάτων ρομποτικής ικανά για αυτόνομη δράση στο πραγματικό κόσμο. Τα ευφυή κινητά τηλέφωνα (smartphones), με τη τρομακτική ανάπτυξη που σημείωσαν τα τελευταία χρόνια έριξαν δραματικά το κόστος των επιμέρους μικροσυστημάτων που ενσωματώνουν, παρέχοντας φθηνές και αξιόπιστες

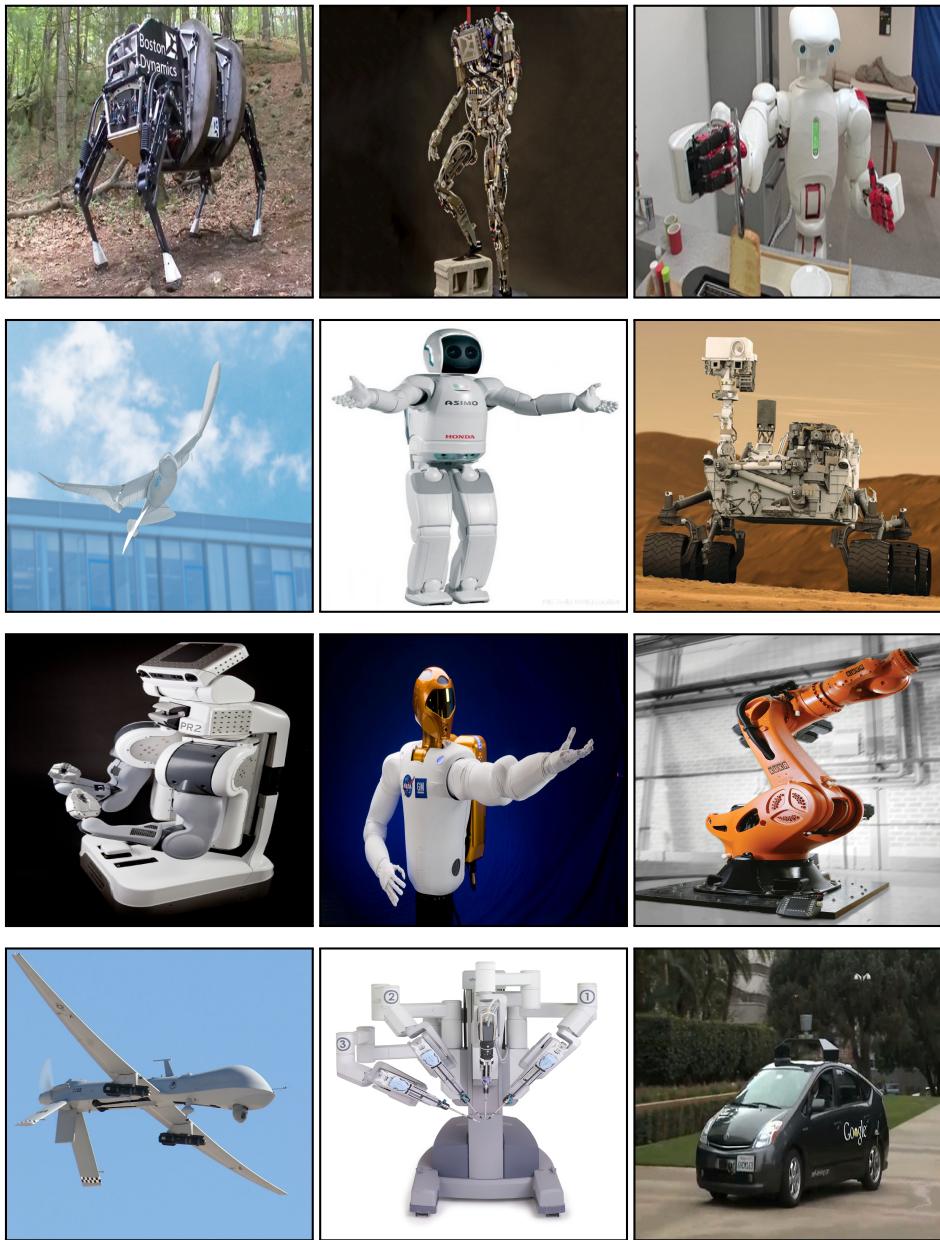
λύσεις σε ολοκληρωμένα κυκλώματα για την παροχή άπλετης υπολογιστικής ισχύος αλλά και μεγάλου όγκου δεδομένων από μεγάλη γκάμα από αισθητήρες όπως, γυροσκόπια, επιταχυνσιόμετρα, αισθητήρες εγγύτητας, αφής, ορατού ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, ανίχνευσης γήινου μαγνητικού πεδίου κ.α δίνοντας έτσι δυνατότητες σε νέα κλίμακα για την ανάπτυξη ρομποτικών συστημάτων[3].

Ταυτόχρονα, η γνωσιακή επιστήμη (cognitive science) έχει αρχίσει να επιδεικνύει τα τελευταία χρόνια σημαντική απτή πρόοδο με ιδιαίτερη ανάπτυξη στο κομμάτι της τεχνητής νοημοσύνης με την ανάπτυξη εντυπωσιακών εφαρμογών (βλ. IBM Blue Gene, Watson, Google Car–Stanford SUV, MS Kinect κ.α.). Παρ’ όλη αυτή την εντυπωσιακή ανάπτυξη του τομέα της τεχνητής νοημοσύνης πρέπει να σημειώσουμε ότι ακόμα αυτά τα συστήματα απέχουν πολύ από να χαρακτηριστούν πραγματικά ευφυή βάσει των αντίστοιχων βιολογικών προτύπων. Σήμερα είναι κοινά αποδεκτό στην επιστημονική κοινότητα ότι το κομμάτι της τεχνητής νοημοσύνης αποτελεί ουσιαστικά τη τροχοπέδη στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων αυτόνομων ρομποτικών συστημάτων [4].

Σημαντική πρόοδο συναντά κανείς και στο τομέα των υλικών με τη κατασκευή αποδοτικών συνδέσμων, επενεργητών καθώς και ικανών μαλακών–εύκαμπτων στοιχείων (soft robotics).

Συνδιάζοντας αυτά τα στοιχεία πολλοί ήταν εκείνοι που ανέμεναν μία έκρηξη καινοτόμου δραστηριότητας στο τομέα αυτό κατά τη δεκαετία που διανύουμε, παρόμοια με αυτή της πληροφορικής τη δεκαετία του ’90, επενδύοντας σε σχετικές start-up εταιρείες με στόχο τη πλατιά διεύρυνση της αγοράς των ρομποτικών συστημάτων με αποτέλεσμα στη Silicon Valley αυτή τη στιγμή να δρουν πάνω από 80 σχετικές εταιρίες με προβλέψεις για ακόμα μεγαλύτερη ανάπτυξη στο προσεχές μέλλον [5, 6].

Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια από τα πιο εντυπωσιακά παραδείγματα πρόσφατων ρομποτικών συστημάτων τα οποία και σκιαγραφούν τις τάσεις που είναι και πολύ πιθανό να οδηγήσουν τις μελλοντικές εξελίξεις.



Σχήμα 1.1: Ευφυή Ρομποτικά Συστήματα: Ξεκινώντας από αριστερά προς τα δεξιά και ανά γραμμή, AlphaDog (DARPA), Atlas (DARPA), Tdedy-One (WASEDA University Sugano Laboratory TWENDY team), Seagle (FESTO), Asimo (Honda), Opportunity (NASA), PR2 (Willow Garage), Robonaut (NASA), Industrial Arm (KUKA), UAV Drone, DaVinci, Google Autonomous Car

Συνεισφορά Ρομποτικών Συστημάτων

Οι γενικοί τομείς δραστηριότητας των ρομποτικών συστημάτων είναι κυρίως,

- Βιομηχανικές εφαρμογές, κυρίως σε διαδικασίες παραγωγής στη βαριά βιομηχανία.
- Αεροδιαστηματική
- Ιατρική, με ιδιαίτερη έμφαση στο κομμάτι της ρομποτικής χειρουργικής.
- Προσθετική, με κατασκευή τεχνητών μελών καθώς και διαδικασίες αποκατάστασης ασθενών.
- Βοήθεια ηλικιωμένων.
- Δράση σε επικίνδυνα-υποβαθμισμένα περιβάλλοντα.
- Αυτοματοποίηση καθημερινών εργασιών σε χώρους εργασίας και κατοικίας.
- Μη επανδρωμένος πόλεμος.
- Εφαρμογές ψυχαγωγίας και διασκέδασης.

Βιολογικό Πρότυπο

Τα βιολογικά συστήματα αποτελούν τα πιο επιτυχημένα παραδείγματα τέτοιων συστημάτων, από τους πιο ταπεινούς μικροοργανισμούς μέχρι τα εξελιγμένα θηλαστικά. Η κλασματική (fractal) δομή-μορφολογία και η προκύπτουσα δυναμική αντίστοιχα αυτών των συστημάτων δεδομένης μίας διαδικασίας βιολογικής εξέλιξης εκατοντάδων εκατομμυρίων ετών η οποία οδηγεί σε βελτιστοποίηση της ενεργειακής διαχείρισης μέσω των μεταβολικών διαδικασιών μας δίνει αντίστοιχα και μία εικόνα της πολυπλοκότητας του μη δομημένου φυσικού περιβάλλοντος καθώς και των προκλήσεων της ρομποτικής επιστήμης ως προς τη κατασκευή ευφυών αυτόνομων, ημιαυτόνομων, συστημάτων. Βασικό μοντέλο και πηγή έμπνευσης στο όλο εγχείρημα αποτελεί φυσικά ο ίδιος ο άνθρωπος.

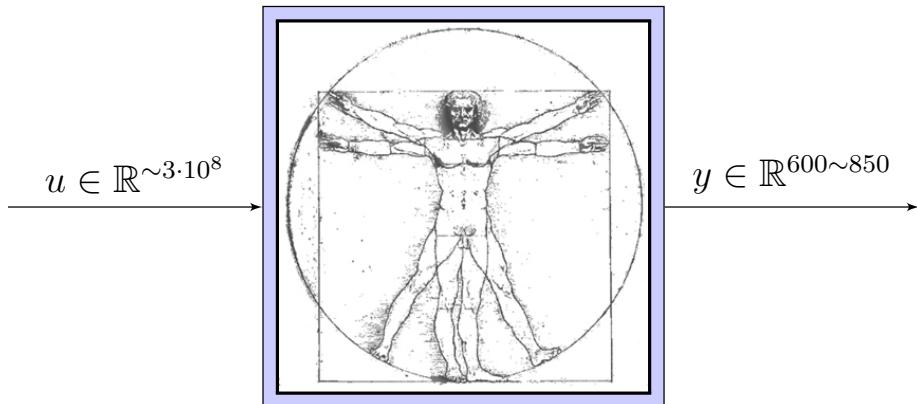
Κάνοντας μία απλουστευτική συστηματική προσέγγιση σχέσεως εισόδου - εξόδου στο “σύστημα άνθρωπος” προκύπτουν τα ακόλουθα ενδιαφέροντα στοιχεία που αποκαλύπτουν σε ένα μικρό μόνο βαθμό τη πολυπλοκότητα αυτού.

Προσεγγιστικά για τις ανθρώπινες νευρικές αισθητηριακές απολήξεις έχουμε συνολικά 300.000.000 αισθητηριακές εισόδους – νευρικές απολήξεις εκ των οποίων 120.000.000 Ράβδοι και 6.000.000 Κώνοι στον αμφιβληστροειδή χιτώνα κάθε ματιού. 40.000.000 νευρικές απολήξεις για την όσφρηση. 3.500.000 νευρικές απολήξεις για την αφή. 15.000-20.000 Ακουστικοί νευρικοί υποδοχείς σε κάθε ωτό, και 10.000 υποδοχείς γεύσης.

Η έξοδος του συστήματος ουσιαστικά εκφράζεται μέσω του μυοσκελετικού συστήματος το οποίο και επενεργεί στο περιβάλλον. 270 οστά και 650 μυικά στελέχη (μέχρι 850 ανάλογα με τον τρόπο που γίνεται η καταμέτρηση) αναλαμβάνουν να φέρουν εις πέρας το ιδιαίτερα πολύπλοκο παιχνίδι νευτώνειας δυναμικής στο πλαίσιο της αλληλεπιδράσεως με το περιβάλλον.

Μπορούμε να πούμε για το σύστημα συνολικά ότι λαμβάνει 300.000.000 εισόδους και έχει μόνο 800 εξόδους με κυρίαρχο αισθητηριακό σύνολο αυτό της όρασης [7].

Ανάλογα συνοφίζεται και το πρόβλημα του σχεδιασμού κατάλληλου ευφυούς ρομποτικού ελεγκτή βάσει της υπάρχουσας τεχνολογίας με την έκφραση “pixels to torques”.



Σχήμα 1.2: Τάξη μεγέθους για τον αριθμό εισόδων–εξόδων στο σύστημα άνθρωπος

1.2 Επιδέξιος Ρομποτικός Χειρισμός

Η κατασκευή ρομποτικών χεριών αποτέλεσε από τις σημαντικότερες περιοχές έρευνας από την αρχή της ρομποτικής επιστήμης. Αυτό είναι λογικό, καθώς ο χειρισμός των στοιχείων του περιβάλλοντος μέσω της απ' ευθείας ανταλλαγής δυνάμεων αποτελεί από τις θεμελιωδώς επιδιωκόμενες ρομποτικές λειτουργίες αποτελώντας και μία από τις βασικότερες, αναπόσπαστες προϋποθέσεις για τη δράση, ανδροειδών κυρίων, ρομποτικών συστημάτων σε μη δομημένα περιβάλλοντα.

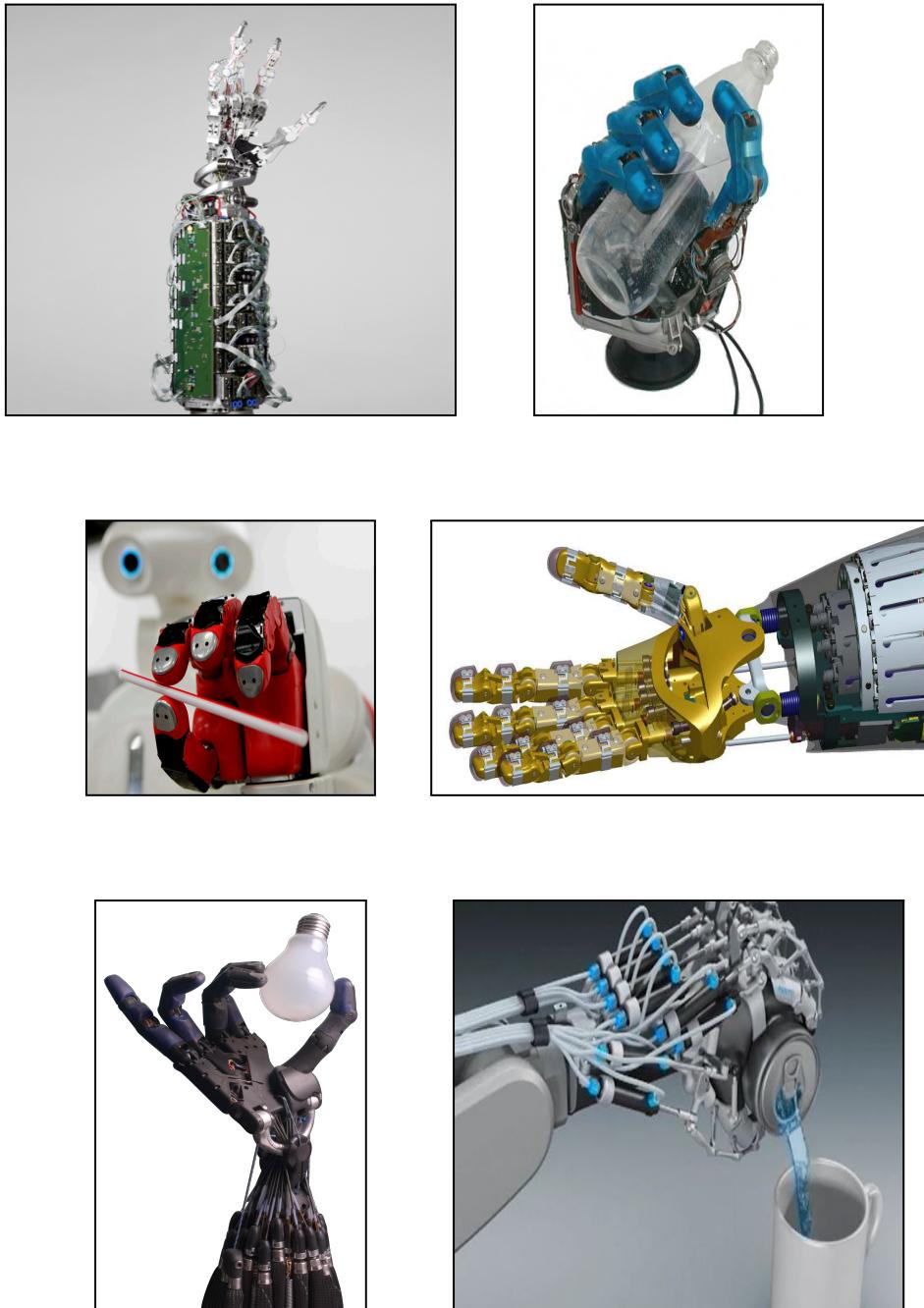
Στη προσπάθεια αυτή είναι αδύνατο να παραβλέψουμε το αντίστοιχο βιολογικό πρότυπο το οποίο δεν είναι άλλο από το ίδιο το ανθρώπινο χέρι. Η αποτελεσματικότητα του βιολογικού προτύπου γίνεται άμεσα αντιληπτή μέσα από την, προφανή, παρατήρηση ότι το απόλυτο σύνολο της ανθρωπογενούς δραστηριότητας αποτελεί αποτέλεσμα της δράσεως χεριού – νου. Από ανθρωπολογικής πλευράς αποδεικνύεται ότι είναι η μηχανική επιδεξιότητα, αυτή καθ' αυτή, μία από τις βασικές αιτίες που πυροδότησαν την ανάπτυξη του ανθρώπινου νου [8]. Η επιδεξιότητα του ανθρώπινου χεριού βρίσκεται ακόμα και σήμερα αρκετά πιο μπροστά από οποιαδήποτε αντίστοιχη μηχανική κατασκευή και πιθανότατα θα κρατήσει αυτή τη πρωτοκαθεδρία για πολύ ακόμα. Ενώ σε επιμέρους ικανότητες και τεχνικά χαρακτηριστικά, όπως

ταχύτητα και ανθεκτικότητα, κάποια ρομποτικά χέρια φαίνεται να υπερτερούν, είναι το εύρος των ικανοτήτων του ανθρώπινου χεριού να αντιμετωπίζει με απόλυτη επιτυχία μία εντυπωσιακά μεγάλη γκάμα εφαρμογών που το καθιστούν ουσιαστικά σχεδιαστικό πρότυπο. Η απάντηση πάντως στο κατά πόσο πρέπει ο σχεδιαστής να επιδιώκει είτε τον ανθρωπομορφισμό είτε κάποιο βέλτιστο σχεδιασμό ως προς συγκεκριμένες παραμέτρους εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή και τις απαιτήσεις αυτής [8].

Ιδιαίτερα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού είναι η τεχνολογία αρπάγης του ρομποτικού συστήματος στη πλάτη του διαστημικού λεωφορείου της NASA στο οποίο ενώ αρχικά είχε προταθεί ένα κλασσικό σχήμα αντικριστών κινηματικών αλυσίδων, κατά τα ανθρωπομορφικά πρότυπα, τελικά προτιμήθηκε μία λύση η οποία αρπάζει τα αντικείμενα στο διαστημικό χώρο μέσω ενός ανοιγοκλειόμενου διαφράγματος [9]. Μία ακόμα ενδιαφέρουσα περίπτωση εναλλακτικής πρότασης χειρισμού κάνει χρήση ενός σφαιρικού ελαστικού γρυμώδη σάκου γεμάτου με οργανικό υλικό. Ο σάκος αυτός εφόσον έρθει σε επαφή με κάποιο αντικείμενο λαμβάνει συμμορφωτικά το σχήμα του αντικειμένου και στη συνέχεια με διαδικασία αναρρόφησης ο σάκος συμπιέζεται με αποτέλεσμα να αγκαλιάζει τελικά σε απόλυτο βαθμό το αντικείμενο εξασφαλίζοντας πολύ καλή μηχανική σύνδεση [10].

Ένα βασικό στοιχείο ανθρωπομορφισμού στο σχεδιασμό που εφαρμόζεται όλο και περισσότερο στα επιδέξια ρομποτικά χέρια είναι η χρήση μαλακών υλικών στα άκρα με στόχο την ενίσχυση μίας ήπιας συμπεριφοράς μηχανικής συμμόρφωσης (compliant behavior), υψηλού εύρους ζώνης, η οποία καθιστά τη διάταξη πιο ικανή για εύρωστη λαβή και χειρισμό [11] συγκριτικά με τα απολύτως άκαμπτα στοιχεία. Τροχοπέδη στο πεδίο αυτό αποτελεί η έλλειψη αυστηρού μαθηματικού φορμαλισμού περιγραφής της δυναμικής συμπεριφοράς των εύκαμπτων ρομποτικών συστημάτων [12], πράγμα που αποτελεί και το βασικότερο λόγο για τον οποίο οι όποιες τεχνικές ελέγχου προς αυτό το πεδίο αποτελούν προέκταση των κλασσικών για τα άκαμπτα ρομποτικά χέρια [13].

Ένα βασικό στοιχείο που παίζει καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό είναι το κατά πόσο το ρομποτικό χέρι προορίζεται να προσαρμοστεί σε μία ήδη υπάρχουσα ρομποτική κινηματική διάταξη βραχίωνα, στη θέση του τελικού στοιχείου δράσης ή αν αποτελεί κοιμάτι ενός πλήρως προσαρμοσμένου μηχανικού σχεδίου χεριού–μπράτσου. Στη πρώτη περίπτωση το σύνολο της μηχανικής διάταξης (επενεργητές, στοιχεία μετάδοσης της κίνησης) τοποθετείται είτε εντός του χεριού είτε σε ειδικό κλωβό τοποθετημένο πάνω εξωτερικά και πάνω από τη παλάμη, χώρος ο οποίος δεν αποτελεί χώρο εργασίας του συστήματος. Στη περίπτωση πλήρως προσαρμοσμένου σχεδίου δίνεται σαφώς μεγαλύτερη ελευθερία ως προς τη μηχανολογική διάταξη. Σε συστήματα υψηλών επιδόσεων προτιμάται το ανθρωπομορφικό πρότυπο με τοποθέτηση των επενεργητών στο σύνδεσμο ανάμεσα από καρπό και αγκώνα και μετάδοση της κίνησης μέσω τενόντων. Αυτή η διάταξη τοποθετεί το μεγαλύτερο μέρος των μηχανικών στοιχείων–άρα και το μεγαλύτερο μέρος της μάζας της διάταξης–κοντά στο μπράτσο και στον κύριο κορμό με θετικές επιπτώσεις στα συνολικά δυναμικά χαρα-



Σχήμα 1.3: Επιδέξια Ανθρωπομορφικά Ρομποτικά Χέρια: Εεκινώντας από αριστερά προς τα δεξιά και ανά γραμμή: DLR Hand (German Aerospace Center), DLR Hand 2 (German Aerospace Center), Twedy-one Hand (WASEDA University Sugano Laboratory TWENDY team), Robonaut Hand Schematic (NASA), Shadow Robot Hand, FESTO ExoHand

κτηριστικά όλου του συστήματος αλλά και του χεριού αυτού καθ' αυτού διαθέτοντας τελικά ελαφρύτερους συνδέσμους-αρθρώσεις.

1.3 Οργάνωση Κειμένου

- Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μία βιβλιογραφική επισκόπηση των τεχνικών ελέγχου επιδέξιων ρομποτικών λαβών. Αρχικά το συνολικό πρόβλημα του χειρισμού αποδομείται στα επιμέρους υποπροβλήματα που το απαρτίζουν. Στη συνέχεια δίνονται βασικοί ορισμοί εισάγοντας ένα πρώτο στάδιο φορμαλισμού έτσι όπως έχει αναπτυχθεί για το θέμα της ρομποτικής λαβής στη σχετική βιβλιογραφία. Αμέσως μετά ακολουθούν οι τρόποι περιγραφής του συστήματος της ρομποτικής λαβής μέσω της μαθηματικής μοντελοποίησης και των αντίστοιχων τεχνικών αυτής καθώς και η περιγραφή της αισθητηριακής σύνθεσης που εφαρμόζεται σε τέτοιες διατάξεις. Εφόσον λοιπόν έχει δοθεί περιγραφή για τη μοντελοποίηση αλλά και τα αισθητηριακά στοιχεία, παρουσιάζονται κάποια κυρίαρχα σχήματα τεχνικών ελέγχου για συστήματα ρομποτικής λαβής.
- Στο κεφάλαιο 3 αναλύουμε το θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο στηρίζεται και η υλοποίησή στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας. Επιχειρείται μία ιεραρχικά δομημένη προσέγγιση η οποία ξεκινάει από την αναλυτική περιγραφή του κινηματικού – δυναμικού μοντέλου του ρομποτικού δακτύλου και κατ' επέκταση χεριού, κατά τα κινηματικά – δυναμικά πρότυπα του ρομποτικού χεριού DLR Hand 2. Αναλύονται κάποιες θεμελιώδεις ιδιότητες του δυναμικού μοντέλου βάσει της θεωρίας παθητικών συστημάτων, στις οποίες στηρίζεται και ο νόμος ελέγχου. Δομείται η στατική ανάλυση της λαβής και ο ορισμός της μήτρας λαβής καθώς και η αντίστοιχη λύση του προβλήματος των ελαχίστων τετραγώνων. Εισάγεται ο ορισμός του εικονικού πλαισίου του ρομποτικού χεριού και στη συνέχεια βάσει αυτού δομούνται οι αντίστοιχες συναρτήσεις δυναμικού οι οποίες ορίζουν την ακαμψία σε επίπεδο αντικειμένου και στα 6 καρτεσιανά επίπεδα κίνησης καθώς και στον εσωτερικό χώρο δυνάμεων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η δυναμική τεχνική αντιμετώπισης των πλεονασματικών βαθμών ελευθερίας του ρομποτικού καθώς και ο σχεδιασμός του όρου απόσβεσης. Εντοπίζονται τα βασικά προβλήματα – μειονεκτήματα του ελέγχου στο χώρο των εσωτερικών δυνάμεων μέσω του ορισμού ακαμψίας ως προς το εικονικό πλαίσιο, και προτείνεται τεχνική βασιζόμενη στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου. Τέλος προτείνεται και αναλύεται κατάλληλη προέκταση των όρων γραμμικής και περιστροφικής ακαμψίας με στόχο την βαρυτική αντιστάθμιση.
- Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία που εφαρμόσθηκε για την υλοποίηση, σε δομημένη πλατφόρμα προσομοίωσης, των τεχνικών ελέγχου που μελετώνται στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας, και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που εκπονήθηκαν. Δίνονται κάποια βασικά στοιχεία για τα επιμέρους δομικά στοιχεία της υλοποίησης τα οποία είναι, το μοντέλο-πρότυπο ρομποτικό χέρι DLR Hand 2, το λογισμικό – API δυναμικών προσομοιώσεων ODE το οποίο ενσωματώνεται σε περιβάλλον Simulink MEX C++ S-Function Block. Ακολουθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης τα

οποία περιλαμβάνουν τη βηματική απόκριση του συστήματος για στροφική και μεταφορική κίνηση καθώς και τη μέτρηση της ακαμψίας μέσω της άσκησης δυνάμεων-ροπών στο αντικείμενο υπό χειρισμό. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνται αρχικά, για τον απλό αλγόριθμο εγγενούς παθητικού ελέγχου (IPC) και στη συνέχεια επαναλαμβάνονται για το σχήμα ελέγχου των εσωτερικών δυνάμεων βάσει γεωμετρίας αντικειμένου (IPC – IF), προκειμένου να εξαχθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα για τις συγκριτικές επιδόσεις αυτών. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης τεχνικής.

- Το κεφάλαιο 5 αποτελεί τον επίλογο της εργασίας, όπου γίνεται μία σύνοψη, γενική εξαγωγή συμπερασμάτων και μία διερεύνηση πιθανών μελλοντικών προεκτάσεων.

Κεφάλαιο 2

Έλεγχος Επιδέξιας Ρομποτικής Λαβής: Επισκόπιση

Στο παρόν κεφάλαιο επιχειρούμε μία γενική βιβλιογραφική επισκόπηση κυρίως επί των τεχνικών ελέγχου της επιδέξιας ρομποτικής λαβής αλλά και ορισμένων επιμέρους θεμάτων.

Αποδόμηση Προβλήματος

Προκειμένου να αναλυθεί το σύνθετο θέμα του επιδέξιου χειρισμού δύναται να αποδομηθεί και να εξεταστεί ξεχωριστά βάσει των επιμέρους ημι-αυτόνομων ακόλουθων διαδοχικών εργασιών.

1. Προσέγγιση του αντικειμένου-επιφάνειας στόχου, φάση κατά την οποία δεν υπάρχει περιορισμός στη κίνηση και γίνεται κατάλληλος σχεδιασμός τροχιάς προσέγγισης των σημείων επαφής.
2. Πραγματοποίηση επαφής και άρα συγκεκριμένος περιορισμός στη κίνηση μέσω ανταλλαγής δυνάμεων. Σε αυτή τη φάση επιθυμούμε τον έλεγχο ως προς τις δυνάμεις-ροπές αλληλεπίδρασης αλλά και ως προς τη θέση του τελικού στοιχείου δράσης.
3. Διαδικασία χειρισμού. Η διαδικασία χειρισμού επιτυγχάνεται ελέγχοντας ταυτόχρονα τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης καθώς και την αντίστοιχη θέση των σημείων επαφής στο χώρο.

Αυτά τα επιμέρους προβλήματα συνδέονται μεταξύ τους καθώς για παράδειγμα η επιλογή των σημείων επαφής επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη μετέπειτα ικανότητα χειρισμού. Παρ' όλα αυτά μπορούν να εξεταστούν και ανεξάρτητα αναπτύσσοντας τεχνικές ελέγχου για κάθε ένα από αυτά τα υποπροβλήματα ξεχωριστά.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία ασχολούμαστε κυρίως με το τελευταίο κομμάτι αυτό του επιδέξιου χειρισμού του αντικειμένου εφ' όσον έχει πραγματοποιηθεί

επιτυχής προσέγγιση των σημείων επαφής.

Για την εξέλιξη της ανάλυσής αλλά τη πραγματοποίηση οποιασδήποτε άλλης περιγραφής δίνουμε αρχικά κάποιους θεμελιώδεις κλασικούς ορισμούς σχετικά με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του συστήματος της λαβής.

2.1 Κλασικοί Αναγκαίοι Ορισμοί

Επιδεξιότητα

Αναφέρεται στην ικανότητα αλλαγής θέσης και προσανατολισμού του αντικειμένου υπό χειρισμό από μία αρχική διάταξη αναφοράς στο χώρο σε μία άλλη τυχαία ορισμένη μέσα στο χώρο εργασίας των δακτύλων [13, 8].

Αποτελεί μία αρκετά ευρεία έννοια η οποία αφορά την ταυτόχρονη ικανότητα αλλά και σταθερότητα στην πραγματοποίηση κινήσεων του χειριζόμενου αντικειμένου από τη παλάμη και τα δάκτυλα.

Ευρωστία Λαβής

Η ικανότητα να διατηρείται σταθερό το αντικείμενο ανεξάρτητα διαταραχών οποιασδήποτε μορφής (όπως για παράδειγμα μη αναμενόμενες δυνάμεις, λάθος εκτιμήσεις των χαρακτηριστικών του αντικειμένου) ενώ ταυτόχρονα οι εσωτερικές δυνάμεις λαβής (internal/grip forces) περιορίζονται έτσι ώστε να μη προκληθούν φθορές στο γενικό σύστημα.

Χειρισμός υπό Ανθρώπινη Παρουσία (Human Operability)

Η δυνατότητα για εύκολη και ασφαλή αλληλεπίδραση σε περιβάλλον με ανθρώπινη φυσική παρουσία.

Σε πρακτικές εφαρμογές αυτά τα βασικά κριτήρια μπορεί να είναι δύσκολο να συνυπάρξουν απαιτώντας από το σχεδιαστή τη λήψη αποφάσεων συμβιβασμού [8].

Κλειστότητα Λαβής (Grasp Closure) – Μοντελοποίηση Επαφής

Μία λαβή καλείται κλειστή, αν και μόνο αν, βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας για οποιοδήποτε τυχαίο διάνυσμα γενικευμένων εξωτερικών δυνάμεων το οποίο δρα πάνω στο αντικείμενο [14].

Οι δυνάμεις εξισορρόπησης που αντιστέκονται στη μετακίνηση του αντικειμένου παράγονται διά μέσου της άμεσης επαφής της ρομποτικής διάταξης με το αντικείμενο. Η κρισιμότητα της επιλογής των κατάλληλων σημείων επαφής αλλά και η δυναμική αυτών, είναι καθοριστική για τη συμπεριφορά του όλου συστήματος. Η

μοντελοποίηση της επαφής είναι εξαιρετικά σημαντική στην ανάλυση του συστήματος της ρομποτικής λαβής-αντικειμένου. Γενικά στη βιβλιογραφία συνήθως γίνονται απλουστευτικές παραδοχές στη μοντελοποίηση των επαφών θεωρώντας τες σημειακές με τριβή βάσει του μοντέλου Coulomb. Μία βασική κλασική κατηγοριοποίηση ως προς τα μοντέλα των επαφών είναι η ακόλουθη.

- **Σημειακή Επαφή με ή χωρίς τριβή – Hard Finger.** Ασκεί δύναμη ως προς την κατεύθυνση του αντικειμένου (τοπικά κάθετα στην επιφάνεια του αντικειμένου στα σημεία επαφής) και στην περίπτωση ύπαρξης τριβής και εφαπτομενικά.
- **Εύκαμπτη επαφή – Soft Finger.** Μπορεί να ασκήσει επιπλέον και ροπή εξ' επαφής ως προς τον κάθετο άξονα στο σημείο επαφής.

Πολύ σημαντικές ιδιότητες που λαμβάνονται υπ' όψη στο μοντέλο της επαφής είναι η ιξώδης-ελαστική (visco-elastic behaviour, rigid, isotropically elastic) συμπεριφορά της, οι συνθήκες κύλισης και ολίσθησης, δλδ οι στατικοί και δυναμικοί όροι του μοντέλου, καθώς και το κατά πόσο τα σώματα που βίσκονται σε επαφή παρουσιάζουν κύλιση (*rolling contact*) ή ολίσθηση (*sliding contact*). Πάνω σε αυτά τα θέματα κινούνται οι κλασσικές εργασίες του Salisbury και Mason, καθηγητών ερευνητών του MIT, οι οποίοι με τις κλασσικές πλέον εργασίες τους τη δεκαετία του 80' έθεσαν τα θεμέλια στην ανάλυση και το σχεδιασμό των επιδέξιων ρομποτικών λαβών. Ο Salisbury έδειξε πρώτος ότι ο μικρότερος θεωρητικά αριθμός βαθμών ελευθερίας αναγκαίος για την επίτευξη επιδεξιότητας σε χέρι με άκαμπτα δάκτυλα, χωρίς φαινόμενα κύλισης και ολίσθησης είναι 9, με το κάθε δάκτυλο να διαθέτει τουλάχιστον 3 DOFs. Αντίστοιχα προέβη και στο σχεδιασμό-κατασκευή ρομποτικού χεριού με αυτά τα χαρακτηριστικά.

Για την αύξηση της ευελιξίας ως προς τη λειτουργία του χειρισμού αρκετοί ερευνητές εισήγαγαν πλεονάζοντες βαθμούς ελευθερίας στα σχέδιά τους με πιο κλασσική προσθήκη αυτή του ενός επιπλέον μεν, συζευγμένου δε, βαθμού ελευθερίας στο κάθε δάκτυλο στην άπω διαφαλαγγική άρθρωση (distal interphalangeal joint). Αυτή η προσέγγιση μιμείται το ανθρώπινο πρότυπο και ουσιαστικά οι βαθμοί ελευθερίας παραμένουν 3.

Μία βασική προϋπόθεση για τη διείσδυση συστημάτων επιδέξιου χειρισμού στο πραγματικό κόσμο αποτελεί η μείωση της πολυπλοκότητας σε κάθε επίπεδο της υλοποίησης [8]. Η ιδιαίτερα πολύπλοκη φύση των επιμέρους μηχανικών μερών έρχεται σε απ' ευθείας σύγκρουση με σχεδιαστικά κριτήρια τα οποία επιβάλουν υψηλό βαθμό αξιοπιστίας, μικρό κόστος, μικρό βάρος. Η μηχανική πολυπλοκότητα της κατασκευής του ρομποτικού χεριού αποτυπώνεται χαρακτηριστικά στον αριθμό των χρησιμοποιούμενων επενεργητών ο οποίος ξεκινά από 9 και μπορεί να φτάσει τους 32 ή και παραπάνω.

Πάνω στο θέμα της βελτιστοποιημένης σχεδίασης είναι πολύ σημαντικό να σημειώσουμε ότι ο απαιτούμενος αριθμός βαθμών ελευθερίας για την επίτευξη επιδεξιότητας είναι απόλυτα συνδεδεμένος από τις αρχικές παραδοχές που κάνουμε

πάνω στο μοντέλο των επαφών. Για παράδειγμα υπό τη παραδοχή ότι οι επαφές είναι ”εύκαμπτες” soft-finger οι ελάχιστοι βαθμοί ελευθερίας για κάθε δάκτυλο για την επίτευξη επιδεξιότητας προκύπτουν 4 [8].

Έτσι λοιπόν μπορούν να οριστούν πιο απλές διατάξεις από το μηχανολογικό επίπεδο μέχρι το επίπεδο του ελέγχου οι οποίες θα μπορούν να είναι εξίσου επιδέξιες στο χειρισμό εκμεταλλευόμενες εναλλακτικές τεχνικές όπως αυτές των, *Regrasping & Finger Gaiting* ή και των τεχνικών που εκμεταλλεύονται φαινόμενα κύλισης και ολίσθησης των επαφών, *Rolling & Sliding* [8]. Για αυτές τις τεχνικές μεγάλη τροχοπέδη αποτελεί η δυσκολία καθορισμού κλειστής μαθηματικής περιγραφής για αυτά τα φαινόμενα σε βαθμό που θα μπορούσε να είναι πραγματοποιήσιμη η εφαρμογή κατάλληλης τεχνικής ελέγχου. Ιδιαίτερα για τα φαινόμενο της κύλισης μεταξύ εύκαμπτων μικροδάκτυλου και άκαμπτου αντικειμένου έχει ορισθεί το Lagrangian δυναμικό μοντέλο του συστήματος μόνο για δύο δάκτυλα 2 DOFs στις 2 διαστάσεις [12]. Για τις τεχνικές αυτές θα αναφερθούμε πιο αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

Βάσει αυτής της μοντελοποίησης των επαφών όπως την αναλύσαμε παραπάνω ορίζονται τα αντίστοιχα είδη της κλειστότητας της λαβής που μπορούν να προκύψουν.

Κλειστότητα ως προς τη μορφή – Form Closure

Αναφέρεται στην ικανότητα της λαβής να αποτρέψει κινήσεις του αντικειμένου βασιζόμενη σε περιορισμούς που δημιουργούνται από επαφές μονομερείς, χωρίς τριβή [8, 14, 13].

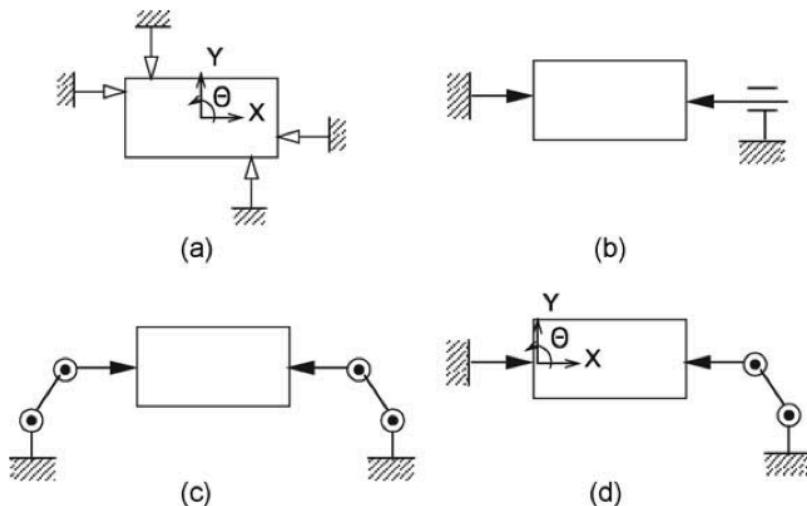
Το πρόβλημα αυτό, άμεσα συσχετίζόμενο και με το σχεδιασμό μηχανικών συσκευών ακινητοποίησης αντικειμένων στο χώρο για διαδικασίες συναρμολόγησης και κατασκευής, μελετάται από τον 19ο αιώνα με τα πρώτα σημαντικά θεωρητικά αποτελέσματα από τον πατέρα της κινηματικής των μηχανικών συστημάτων, όπως χαρακτηριστικά αποκαλείται ο Franz Reuleaux. Η θεωρητική μελέτη δείχνει ότι χρειάζονται τουλάχιστον 4 επαφές χωρίς τριβή για την ακινητοποίηση ενός αντικειμένου στο επίπεδο και 7 για τον 3Δ χώρο. Το πρόβλημα της κλειστότητας ως προς τη μορφή παρουσιάζεται και με την ανάστροφη μορφή, αυτή της ανάλυσης, όπου δεδομένης της λαβής εξετάζεται αν υπάρχουν διαθέσιμοι βαθμοί ελευθερίας για το αντικείμενο, και αν ναι προς ποια κατεύθυνση. Μία επέκταση του κλασσικού ορισμού περί κλειστότητας ως προς τη μορφή, υπό τον όρο “immobilization problem”, λαμβάνει υπόψη φαινόμενα 2ης τάξης, τα οποία αναπτύσσονται λόγω της σχετικής μορφολογίας της επιφάνειας των δύο σωμάτων, παρέχοντας τελικά μεγαλύτερη ακρίβεια στην ανάλυση [8].

Κλειστότητα ως προς τη δύναμη – Force Closure

Η κλειστότητα ως προς δύναμη προσδιορίζει την ικανότητα της λαβής να αντιστέκεται σε οποιεσδήποτε εξωτερικές δυνάμεις και συνήθως αναφέρεται σε σημειακές

επαφές με τριβή. Στη τελευταία περίπτωση μάλιστα η λαβή μπορεί να ανταπεξέλθει οποιασδήποτε δύναμης ή ασκούμενης ροπής δεδομένης της ύπαρξης αρκετά μεγάλης κάθετης δύναμης στο σημείο της επαφής [8, 14, 13].

Επίσης οι λαβές οι οποίες είναι κλειστές ως προς δύναμη, ανάλογα με το κατά πόσο τα σημεία περιορισμού της κίνησης του αντικειμένου είναι ενεργά στοιχεία (δλδ με αν έχουν δυνατότητα ελεγχόμενης κίνησης ή όχι), μπορούν να χαρακτηρίστούν *Ενεργές* (*Active Force Closure*) ή *Παθητικές* (*Passive Form Closure*) αντίστοιχα. Σε περίπτωση που υπάρχουν ενεργά και παθητικά στοιχεία (όπως για παράδειγμα ένας περιορισμός από κινητικά αδρανές στοιχείο του περιβάλλοντος) που δρουν ως προς διαφορετικές κατευθύνσεις, τότε η κλειστή λαβή ως προς δύναμη χαρακτηρίζεται *υβριδική* (*Hybrid Force Closure*) [4]. Εξ' ορισμού η κλειστότητα ως προς τη μορφή προκύπτει μόνο υπό παθητικά περιοριστικά στοιχεία.



Σχήμα 2.1: Τύποι κλειστότητας για κίνηση στο επίπεδο. (α) Παθητική Κλειστότητα ως προς τη μορφή. (β) Παθητική Κλειστότητα ως προς τη Δύναμη. (γ) Ενεργητική Κλειστότητα. (δ) Υβριδική Ενεργητική/Παθητική Κλειστότητα [4]

Στατική Ισορροπία Λαβής

Μία λαβή μπορεί να ισορροπήσει όταν ο κυρτός φλοιός (Convex Hull) των οποίων συνθέτουν τα διανύσματα γενικευμένων δυνάμεων που ασκούν τα δάκτυλα στο αντικείμενο περιλαμβάνει το σημείο μηδέν της διανυσματικής βάσης.

Λαβή Ακροδακτύλων (Fingertip Grasp)

Η λαβή να είναι σε θέση να αντισταθεί σε οποιαδήποτε τυχαία εξωτερική δύναμη έχοντας μοναδικά σημεία επαφής αυτά μεταξύ ακροδακτύλων αντικειμένου.

Λαβή Ισχύος (power grasp ή enveloping grasp)

Αναφέρεται στο είδος εκείνο της λαβής το οποίο χρησιμοποιείται για την σταθεροποίηση–πάκτωση αντικειμένων με χρήση πολλών σημείων–επιφανειών επαφής για μεγιστοποίηση της ικανότητας ως προς μεγάλα φορτία και τη σταθερή προσάρτησή τους.

Πρόβλημα Κατανομής Δυνάμεων (Force Distribution Problem)

Ένα πολύ βασικό πρόβλημα στον επιδέξιο ρομποτικό χειρισμό είναι η επιλογή κατάλληλων δυνάμεων λαβής έτσι ώστε να αποφευχθεί, ή να ελαχιστοποιηθεί, ο κίνδυνος, ολίσθησης του αντικειμένου. Οι δυνάμεις λαβής (grasping) ή αλλιώς ονομαζόμενες εσωτερικές δυνάμεις, βρίσκονται στο μηδενικό χώρο του μητρώου λαβής (null space του grasp matrix). Οι δυνάμεις των επαφών οι οποίες δεν είναι άμεσα εσωτερικές, επηρεάζουν την ισορροπία του αντικειμένου, και αναφέρονται ως δυνάμεις χειρισμού. Το πρόβλημα της επιλογής ροπών στις αρθρώσεις έτσι ώστε να δημιουργηθούν οι κατάλληλες δυνάμεις χειρισμού για την εργασία, και παράλληλα να υπάρχουν οι εσωτερικές δυνάμεις οι οποίες εγγυώνται την αποφυγή απώλειας στήριξης μέσω ικανοποίησης των συνθηκών του μοντέλου τριβής, αναφέρεται ως πρόβλημα κατανομής δυνάμεων (force distribution problem). Αυτό είναι κοινό πρόβλημα και σε άλλες περιοχές της ρομποτικής επιστήμης όπως η ρομποτική βάδιση, ο συνεργατικός ή υπό περιορισμούς χειρισμός. Μία σημαντική ιδιότητα πάνω στην οποία βασίζεται το πρόβλημα της μη γραμμικής βελτιστοποίησης των περιορισμών, και στο οποίο εδράζεται το πρόβλημα της κατανομής δυνάμεων, είναι η κυρτότητα. Δεδομένης της ικανοποίησης αυτής της ιδιότητας καθίσταται δυνατή η αποδοτική εύρεση λύσεων στο πολύπλοκο αυτό πρόβλημα. Για το ίδιο πρόβλημα έχουν προταθεί και αριθμητικές λύσεις επαναληπτικής μορφής μέσω της ολοκλήρωσης ομαλών διαφορικών εξισώσεων (ODE). Σημαντικό για τη διατύπωση του προβλήματος της βελτιστοποίησης είναι η διαπίστωση ότι οι μη γραμμικοί περιορισμοί για τη τριβή μπορούν να διατυπωθούν και ως κατάλληλα θετικά ορισμένοι πίνακες. Αυτή η διατύπωση των περιορισμών σε μορφή πίνακα οδήγησε και σε επέκταση μετασχηματίζοντας το πρόβλημα σε τυπικό πρόβλημα ανισοτήτων πινάκων (LMI) όπου υπάρχουν έτοιμες ώριμες λύσεις υλοποιημένες και διαθέσιμες σε ευρέως διαθέσιμο λογισμικό.

2.2 Περιγραφή Συστήματος

2.2.1 Μοντελοποίηση

Το σύστημα ρομποτικού χειρισμού αποτελεί ένα πολύπλοκο σύστημα μη γραμμικής δυναμικής. Επιπρόσθετα, τα υποσυστήματά, σύνδεσμοι - αρθρώσεις, μπορεί να είναι συζευγμένα. Αυτό οδηγεί αναπόφευκτα σε ιδιαίτερα εξελιγμένη μοντελοποίηση και κατ' επέκταση τεχνικές ελέγχου. Επίσης κατά την επαφή με το περιβάλλον στο σύστημα εισάγεται κινηματικός περιορισμός μέσω μίας διαδικασίας μηχανικών παραμορφώσεων. Αυτή η παραμόρφωση εξαρτάται από τη σκληρότητα – ακαμψία

του αντικειμένου καθώς και από τη σκληρότητα–ακαμψία και το σχήμα του τελικού στοιχείου δράσης κάθε ρομποτικής διάταξης. Δεδομένης αυτής της αλληλεπίδρασης, αναμένεται να δημιουργηθεί μία δύναμη αντίδρασης στο τελικό στοιχείο δράσης η οποία διοχετεύεται σε κάθε σύνδεσμο της ρομποτικής διάταξης.

Υβριδική Μοντελοποίηση Δυναμικού Συστήματος Λαβής

Ο επιδέξιος έλεγχος και χειρισμός αντικειμένων από ρομποτική λαβή πολλών δακτύλων συνδυάζει χαρακτηριστικά από δύο τύπους αλληλεπιδρώντων δυναμικών συστημάτων. Από τη μία έχουμε τη πολύπλοκη δυναμική πολλών σωμάτων (multibody dynamics), η οποία μοντελοποιείται από ένα σύνολο από μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις, υποκείμενες σε ολονομικούς κινηματικούς και δυναμικούς περιορισμούς. Αυτό το κομμάτι επάγεται στη θεωρία των συνεχών μεταβαλλόμενων δυναμικών συστημάτων, *Continuous Variable Dynamic Systems – CVDS*.

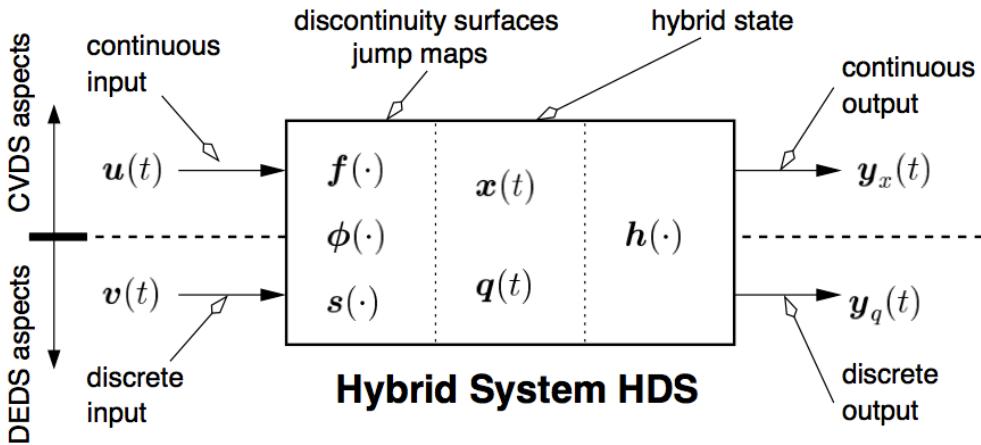
Από την άλλη έχουμε ένα σύνολο διακριτών φαινόμενων που περιγράφουν την κατάσταση των επαφών (*discrete grasp states of fingers*) τα οποία περιγράφονται από τη θεωρία των δυναμικών συστημάτων διακριτών – γεγονότων (*discrete event dynamic systems - DEDS*).

Για τη μοντελοποίηση συστημάτων που συνδιάζουν διακριτή και συνεχή δυναμική μπορεί να γίνει χρήση της θεωρίας υβριδικών δυναμικών συστημάτων (*Hybrid Dynamical Systems*) [15], εισάγοντας την αντίστοιχη μοντελοποίηση–ανάλυση αλλά και τις σχετικές τεχνικές ελέγχου.

Για τα ρομποτικά συστήματα δύναται να εισαχθεί ένας πρόσθετος φορμαλισμός στη περιγραφή αυτών με σκοπό να ειδικεύσει τις γενικές θεωρίες και περιγραφές της θεωρίας των υβριδικών δυναμικών συστημάτων για συστήματα μηχατρονικής πολλαπλών επαφών (*Mechatronic Multicontact Systems*) [16].

Κεντρικό στοιχείο της περιγραφής των υβριδικών δυναμικών συστημάτων αποτελεί το υβριδικό μοντέλο κατάστασης (*Hybrid State Model–HSM*), στο οποίο η εξέλιξη του συστήματος στο χρόνο δίνεται κάθε φορά είτε από τη διαφορική εξίσωση συνεχούς χρόνου, στη περίπτωση που η κατάλληλη συνάρτηση επιλογής δίνει τιμή διάφορη του μηδενός, είτε από τη συνάρτηση διακριτών καταστάσεων για μηδενική τιμή της συναρτήσεως επιλογής. Αυτή η προσέγγιση περιγραφής – ανάλυσης – ελέγχου δια μέσου της θεωρίας των υβριδικών δυναμικών συστημάτων αποτελεί και το υψηλότερο επίπεδο φορμαλισμού που μπορεί κανείς να επιτύχει για την ολιστική περιγραφή του συστήματος της ρομποτικής λαβής [16].

Η Υβριδική περιγραφή του δυναμικού συστήματος, αν και πλήρης, εισάγει ένα σημαντικό βαθμό πολυπλοκότητας και δυσκολίας στην ανάλυση και ανάπτυξη τεχνικών ελέγχου. Έτσι συνήθως οι περισσότερες εργασίες που έχουν να κάνουν με το κομμάτι του επιδέξιου χειρισμού εστιάζουν στο κομμάτι της συνεχούς δυναμικής που περιγράφει είτε το ρομποτικό σύστημα στον ελεύθερο χώρο είτε το σύστημα λαβής–αντικειμένου υπό σταθερή και κλειστή λαβή.



Σχήμα 2.2: Hybrid System HDS [16]

2.2.2 Αισθητηριακή Σύνθεση

Για τη πραγματοποίηση οποιασδήποτε ευφυούς δράσης, μέσω κάποιου σχήματος ελέγχου, είναι απαραίτητη η πληροφόρηση για τη κατάσταση του περιβάλλοντος.

Για τα συστήματα ρομποτικού χειρισμού δύο είναι οι κυρίαρχες αισθητηριακές οδοί από το περιβάλλον και προκύπτουν από τα συστήματα όρασης και από τους αισθητήρες δύναμης/αφής.

Συστήματα Όρασης

Μία από τις πρώτες μεθόδους ελέγχου η οποία χρησιμοποιήθηκε στους ρομποτικούς χειριστές είναι η ανατροφοδότηση οπτικής πληροφορίας. Ο έλεγχος αυτού του τύπου έχει αποδειχτεί ένας αποτελεσματικός τρόπος για την ακριβή καθοδήγηση στον ελεύθερο χώρο, πάντα στο πλαίσιο του ρομποτικού χώρου εργασίας, χωρίς την εκ των προτέρων ακριβή μοντελοποίηση του συστήματος. Βασικές πρακτικές χρήσεις τέτοιων συστημάτων συναντώνται στις εργασίες σχεδιασμού τροχιάς και στον προσδιορισμό της γεωμετρίας άγνωστων αντικειμένων. Δύο διατάξεις είναι πιο συνήθεις, αυτή της τοποθέτησης του οπτικού στοιχείου σε σταθερό σημείο στο χώρο και αυτή της τοποθέτησης στο τελικό στοιχείο δράσης.

Πρακτικά η αποκόμιση επαρκούς πληροφορίας για το βάθος με μία μόνο μέτρηση είναι δύσκολη. Έτσι για την μέτρηση σε 3Δ χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως, σύνθεση πολλαπλών λήψεων και η στερεοσκοπική όραση (stereovision). Γενικά οι προσεγγίσεις για τον έλεγχο μέσω όρασης μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες [13].

- Τεχνικές βασιζόμενες στη θέση, όπου ένα σύνολο εικόνων αρχικοποιούνται μαζί με ένα γνωστό μοντέλο κάμερας για την εξαγωγή πληροφορίας ως προς την θέση/προσανατολισμό στο 3Δ χώρο. Οι μεταβλητές υπό έλεγχο είναι η καρτεσιανή θέση και προσανατολισμός του αντικειμένου. Στη περίπτωση όπου η κάμερα είναι σε σταθερό σημείο και η θέση/προσανατολισμός του αντικειμένου είναι υπό έλεγχο, οι μεταβλητές που περιγράφουν την θέση και το προσανατολι-

συμό ανακατασκευάζονται από τις διαθέσιμες εικόνες. Συμπερασματικά, η ανίχνευση του αντικειμένου μπορεί να πραγματοποιηθεί υπολογίζοντας το σφάλμα στο 3D χώρο, και η θέση του αντικειμένου μπορεί να εξαχθεί χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες της εικόνας και ένα βαθμονομημένο μοντέλο κάμερας.

- Τεχνικές βασιζόμενες στην εικόνα. Στη προσέγγιση αυτή οι μεταβλητές υπό έλεγχο ορίζονται κατευθείαν ως χαρακτηριστικά στο χώρο της εικόνας και έτσι δεν είναι απαραίτητη η πλήρης 3D ανακατασκευή της σκηνής. Η ανίχνευση των αντικειμένων με τη συγκεκριμένη τεχνική πραγματοποιείται υπολογίζοντας το σφάλμα στο χώρο της εικόνας και εφαρμόζοντας έλεγχο ο οποίος εγγυάται ότι το σφάλμα αυτό θα μειώνεται ασυμπτωτικά στο μηδέν. Για μία σταθερή κάμερα η Ιακωβιανή μήτρα της εικόνας μπορεί να υπολογισθεί με τη χρήση μοντέλου της κάμερας. Εξαιτίας των παραμορφώσεων που εισάγονται στην εικόνα η ταυτοποίηση χαρακτηριστικών δεν είναι ακριβής. Ακόμα χειρότερα αποτελέσματα εισάγονται στη διάταξη κάμερας πάνω στο ρομποτικό τελικό στοιχείο δράσης.

Τελικά και οι δύο τεχνικές δεδομένης της ανακρίβειας τους στον προσδιορισμό της θέσης και του προσανατολισμού, κρίνονται γενικά μη ενδεδειγμένες για την χρησιμοποίηση τους στη επίτευξη και διατήρηση επαφής με την επιφάνεια του αντικειμένου [13].

Γενικά όμως δε θα πρέπει να απορρίψουμε κατηγορηματικά και τεχνικές οι οποίες στοχεύουν στην πραγματοποίηση ευσταθούς λαβής για άγνωστο αντικείμενο βασιζόμενες αποκλειστικά σε οπτική πληροφορία. Για παράδειγμα στην [17] πραγματοποιείται ανακατασκευή του μοντέλου του άγνωστου αντικειμένου διά μέσου ειδικά προσαρμοσμένου laser 3D scanner στο καρπό του ρομποτικού βραχίονα με ταυτόχρονη υιοθέτηση τεχνικής βέλτιστης επιλογής λαβής βάσει κριτηρίων κλειστότητας καθώς και κίνησης εντός κώνου τριβής αυτοματοποιώντας τη διαδικασία αρπαγής αντικειμένου. Στη περίπτωση δύο εύκαμπτων δακτύλων ένα κριτήριο ποιότητας για την αρπαγή του αντικειμένου βάσει οπτικής πληροφορίας συνίσταται από ένα όρο ο οποίος ελαχιστοποιεί την απόσταση των άκρων των δακτύλων παράλληλα με ελαχιστοποίηση της απόστασης του γεωμετρικού κέντρου του αντικειμένου από τον άξονα που συνδέει τα ακροδάκτυλα και από ένα δεύτερο όρο που στοχεύει στην εφαρμογή δύναμης από τα δάκτυλα όσο το δυνατόν πιο κάθετα στην επιφάνεια αυτού [4].

Το σύστημα όρασης γενικά πάντως φαίνεται να βρίσκει συμπληρωματική εφαρμογή στο πρώτο στάδιο, αυτό της προσέγγισης του αντικειμένου και ίσως και του πρώιμου σχηματισμού λαβής [13]. Εφόσον το ρομποτικό στοιχείο δράσης φτάσει σε μία κατάλληλη απόσταση, η διαδικασία της επίτευξης και της βελτιστοποίησης ευσταθούς επαφής, πραγματοποιείται με χρήση πληροφοριών που παρέχονται σε πραγματικό χρόνο από τους αισθητήρες αφής και δύναμης. Οι στρατηγικές ελέγχου που υιοθετούνται και κάνουν χρήση των αισθητήρων δύναμης, αφής, στοχεύουν συνήθως στην ελαχιστοποίηση των εσωτερικών δυνάμεων (δυνάμεις λαβής) ή στην

βελτιστοποίηση της θέσης/προσανατολισμού του αντικειμένου και τελικά στην επί-τευξη επιδέξιου χειρισμού. Στόχος του óλου συστήματος αποτελεί η αυτονόμηση του συστήματος χειρισμού και ο éλεγχος αυτού μόνο στο υψηλό επίπεδο απ'ευθείας ελέγχου του αντικειμένου.

Αισθητήρες Γενικευμένων Δυνάμεων – Αφής

Οι αισθητήρες δύναμης οι οποίοι είναι εμπορικά διαθέσιμοι εγκαθίστανται συνήθως στον αντίστοιχο ρομποτικό καρπό, ή στους τένοντες του ρομποτικού χεριού. Συνήθως μετρούν τις δυνάμεις και τις ροπές οι οποίες αναπτύσσονται στο ρομποτικό χέρι κατά την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον. Το μεγαλύτερο μέρος της διάταξης αισθητήρων τέτοιου τύπου αποτελείται από μετατροπείς οι οποίοι ανιχνεύουν κάποια γεωμετρική μεταβολή - παραμόρφωση κάποιου κατάλληλα σχεδιασμένου - τοποθετημένου στοιχείου, ως συνάρτηση κάποιας ασκούμενης δύναμης-ροπής.

Οι αισθητήρες αφής τοποθετούνται συνήθως στην επιφάνεια η οποία προορίζεται για την απ' ευθείας επαφή, κυρίως δηλαδή τα ακροδάκτυλα αλλά και άλλα εσωτερικά σημεία των δακτύλων και της παλάμης. Η μέτρηση αφορά την ασκούμενη πίεση η οποία παρατηρείται κατά την αλληλεπίδραση. Αυτή πραγματοποιείται μέσω μίας ηλεκτρονικής διάταξης η οποία περιλαμβάνει ένα επίπεδο συμμετρικό σύμπλεγμα μικρότερων αισθητηριακών στοιχείων ανίχνευσης της πίεσης τα οποία συνολικά μας δίνουν μία χαρτογράφηση των ασκούμενων πιέσεων. Οι πιο εξελιγμένοι από τους αισθητήρες αυτούς είναι σε θέση να μας δώσουν πλήρη εικόνα για το 6D διάνυσμα δυνάμεων της επαφής.

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναφέρουμε σε αυτό το σημείο ότι οι παραδοσιακοί αισθητήρες δύναμης αποδίδουν θορυβώδη σήματα, δύσκολα στην επεξεργασία [18]. Αυτό το γεγονός αποτελεί και έναυσμα για τη πραγματοποίηση εναλλακτικών τεχνικών επιδέξιου χειρισμού που δε κάνουν αποκλειστική ή και καθόλου χρήση αισθητήρων δύναμης στα σημεία επαφής.

Η τεχνολογία αισθητήρων δύναμης-αφής φαίνεται πάντως να εξελίσσεται, με την ερευνητική προσπάθεια να δίνει καινούριες λύσεις, προσφέροντας τη δυνατότητα για ακριβή γνώση των δυναμικών χαρακτηριστικών της επαφής σε πραγματικό χρόνο με άμεσο αποτέλεσμα την εφαρμογή ελέγχου άμεσης δύναμης. Μία ενδιαφέρουσα προσέγγιση είναι η ανάπτυξη οπτικών αισθητήρων αφής υψηλής ακρίβειας ικανών για μέτρηση των κάθετων αλλά και ταυτόχρονα των εφαπτόμενων δυνάμεων οι οποίοι είναι σε θέση υπό κατάλληλο σχήμα ελέγχου να αποκτήσουν κατά τη πρώτη προσέγγιση του αντικειμένου πληροφορία για την ακαμψία αυτού προσαρμόζοντας τις παραμέτρους δυναμικού ελέγχου του χειρισμού στη συνέχεια, προσφέροντας εύρωστο επιδέξιο χειρισμό για μία μεγάλη γκάμα αντικειμένων διάφορων μηχανικών ιδιοτήτων [19].

Μία ακόμα πολλά υποσχόμενη τεχνολογία αισθητήρων αφής είναι σε θέση να αποκομίσει πληροφορία για την υφή των αντικειμένων, με τρόπο παρόμοιο με τον

άνθρωπο, τρίβοντας τον αισθητήρα ο οποίος είναι προσαρμοσμένος στο κάθε ακροδάκτυλο πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου [20].

Τέλος να σημειώσουμε ότι η τεχνική της κατάλληλης ενσωμάτωσης αισθητήρων δύναμης-αφής σε ρομποτικά χέρια με εύκαμπτες επιφάνειες αποτελεί μία ιδιαίτερη πρόκληση δεδομένου ότι η λήψη αισθητηριακής πληροφορίας δεν πρέπει να επηρεάζει άμεσα τη διαδικασία χειρισμού [11].

2.3 Μεθοδολογίες Ελέγχου Ρομποτικής Λαβής

2.3.1 Έλεγχος Δύναμης

Δύο βασικές κατηγορίες ελέγχου που προκύπτουν για μία ρομποτική κινηματική αλυσίδα είναι ο “άμεσος έλεγχος δύναμης” και ο “έμμεσος έλεγχος δύναμης” ο οποίος επιτυγχάνει έλεγχο δύναμης μέσω κινηματικού ελέγχου. Οι βασικές πρακτικές υλοποιήσεις των δύο αυτών κατηγοριών επιτυγχάνονται με τον υβριδικό έλεγχο θέσης/δύναμης και με τον έλεγχο εμπέδησης αντίστοιχα.

Υβριδικός Έλεγχος Θέσης/δύναμης

Ο υβριδικός έλεγχος θέσης/δύναμης, προσπαθεί να αποσυζεύξει τις κατευθύνσεις κατά τις οποίες πραγματοποιείται έλεγχος δύναμης και θέσης. Η κατεύθυνση κατά την οποία δεν υπάρχει περιορισμός αντιμετωπίζεται με έλεγχο θέσης και η κατεύθυνση κατά την οποία υπάρχει περιορισμός-επαφή με έλεγχο δύναμης. Έτσι στο τελικό σχέδιο ελέγχου υπάρχουν δύο παράλληλοι βρόχοι ελέγχου. Πρακτικά η εναλλαγή μεταξύ αυτών των δύο βρόχων μπορεί να μη γίνεται αρκετά γρήγορα για την αντιμετώπιση των αλλαγών του περιβάλλοντος [4].

Έλεγχος Εμπέδησης – Impedance Control

Σε αντίθεση με τον υβριδικό έλεγχο θέσης/δύναμης, ο έλεγχος εμπέδησης συνδυάζει τον έλεγχο θέσης/δύναμης. Αυτή η προσέγγιση στοχεύει στην ομαλοποίηση της ακαμψίας του ρομποτικού χειριστή με τον ορισμό της επιθυμητής εμπέδησης στο τελικό στοιχείο δράσης. Με διαφορετική ματιά η μέθοδος αυτή στοχεύει στον έλεγχο της θέσης και της δύναμης στον ίδιο χρόνο εκφράζοντας την επιθυμητή εργασία ως την επίτευξη κατάλληλα ορισμένης επιθυμητής εμπέδησης. Η τελική σύνθετη μηχανική αγωγιμότητα (admittance) του περιβάλλοντος, καθώς και η τελική θέση και ασκούμενη δύναμη θα είναι συνάρτηση της ρομποτικής εμπέδησης. Ο έλεγχος εμπέδησης θεωρείται η πιο κατάλληλη λύση για την αντιμετώπισης αλληλεπιδράσεων σε μη δομημένα περιβάλλοντα [13]. Προβλήματα εντοπίζονται λόγω ύπαρξης λαθών στη μοντελοποίηση ή εξαιτίας της μη μοντελοποιημένης δυναμικής ο ελεγκτής προκαλεί αναίτια δράση.

Το σχήμα ελέγχου της εμπέδησης έχει δύο εκφράσεις.

- Έλεγχος Σύνθετης Μηχανικής (Impedance Control). Η ρομποτική διάταξη αντιδρά στην απόκλιση από την δεδομένη τροχιά παράγοντας δυνάμεις.
- Έλεγχος Σύνθετης Μηχανικής Αγωγιμότητας (Admittance Control). Η ρομποτική διάταξη αντιδρά σε εξωτερικές δυνάμεις με απόκλιση από την επιθυμητή τροχιά διατηρώντας τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης σε επιθυμητές τιμές.

Ειδικές περιπτώσεις Impedance και Admittance control αποτελούν οι τεχνικές ελέγχου μηχανικής ακαμψίας (stiffness control) και ελέγχου μηχανικής συμμόρφωσης (ή ευκαμψίας, compliance control), αντίστοιχα, όπου μας ενδιαφέρει μόνο η στατική σχέση μεταξύ της θέσης – προσανατολισμού του στοιχείου δράσης και επιθυμητής κίνησης και η δύναμη – ροπή της επαφής οι οποίες και λαμβάνονται υπόψη Αν η σχέση μεταξύ της δύναμης–ροπής της επαφής και των γραμμικών και γωνιακών ταχυτήτων του στοιχείου δράσης είναι τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν το σχήμα ελέγχου ονομάζεται έλεγχος απόσβεσης (damping control).

Υβριδικός Έλεγχος Εμπέδησης

Ο υβριδικός έλεγχος εμπέδησης συνδυάζει τον υβριδικό έλεγχο και τον έλεγχο εμπέδησης, με έναν εσωτερικό βρόχο ελέγχου αντίστροφης δυναμικής και ένα εξωτερικό βρόχο με στόχο την επίτευξη κατάλληλων επιθυμητών χαρακτηριστικών, όπως παρακολούθηση σημείου-στόχου, απόρριψη διαταραχών καθώς και θέματα ευρωστίας. Ανάλογα με το τι χρειάζεται να ελεγχθεί κάθε φορά το σχήμα αυτό μετονομάζεται πιο εξειδικευμένα, υβριδικός έλεγχος εμπέδησης/θέσης ή υβριδικός έλεγχος εμπέδησης/δύναμης. Για παράδειγμα, έλεγχος εμπέδησης ως προς τη δύναμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή των εσωτερικών δυνάμεων εκείνων οι οποίες θα εγγυηθούν ότι δε θα χαθεί η επαφή με το αντικείμενο, ενώ ο έλεγχος εμπέδησης ως προς θέση μπορεί να τοποθετήσει τα δάκτυλα και άρα αντικείμενα στο επιθυμητό σημείο.

Στο επίπεδο του ελεγκτή αυτού καθεαυτού, έχουν προταθεί διάφοροι κλασσικοί καθώς και μοντέρνοι ελεγκτές από τη βιβλιογραφία της ρομποτικής επιστήμης για τον έλεγχο της κίνησης του χειριστή. Αυτοί ποικίλουν από τον κλασσικό PID μέχρι και μη γραμμικές σύγχρονες προσεγγίσεις όπως αυτές των, “μεταβλητής δομής”, προσαρμοστικών και εύρωστων. Τελευταία η τάση στη ρομποτική κοινότητα μεταποίζεται σε θέματα Τεχνητής Νοημοσύνης, όπως τα έμπειρα συστήματα, ασαφής λογική, νευρωνικά δίκτυα. Η βιομηχανία πάντως δείχνει να παραμένει πιστή σε αναλυτικές λύσεις, αν και απλοί αλγόριθμοι μάθησης αποτελούν πάντα μία πιθανή λύση για βιομηχανικές εφαρμογές, ιδιαίτερα στο επίπεδο της εργασίας.

2.3.2 Έλεγχος Ακαμψίας σε επίπεδο Αντικειμένου – Object Stiffness Control

Ένα επιδέξιο χέρι έχει τη δυνατότητα να κρατάει οποιοδήποτε τυχαίο αντικείμενο καθώς και να αντιδρά σε τυχαίες κινήσεις και δυνάμεις οι οποίες μπορεί να δρουν

πάνω στο αντικείμενο. Αυτές οι κινήσεις και δυνάμεις όντας συζευγμένες και βάσει κατάλληλου σχήματος ελέγχου μπορούν να καθορίσουν τη γενικευμένη ακαμψία (stiffness) ενός χειριζόμενου αντικειμένου καθώς και το αντίστοιχο κέντρο συμμόρφωσης αυτού.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή αυτού του σχήματος ελέγχου της ακαμψίας του αντικειμένου έτσι ώστε η δύναμη αντίδρασης κατά την αλληλεπίδραση να καθοδηγήσει κάποια διαδικασία συναρμολόγησης υπομέρος κάποιας ευρύτερης εργασίας του ρομποτικού χειριστή. Πρακτικά ένα ρομποτικό χέρι μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία παραγωγής σε σημεία συναρμολόγησης όπου μπορούν να παρέχουν δυνατότητες ενεργούς κίνησης μηχανικής συμμόρφωσης, η οποία παραδοσιακά γίνεται από έναν εγγενώς παθητικό χειριστή ή από ένα παθητικό στοιχείο κεντρικής συμμόρφωσης. Ένα ρομποτικό χέρι εξαιτίας των ιδιαίτερα χαμηλών αδρανειακών χαρακτηρηστικών του μπορεί να προσφέρει δυνητικά υψηλότερο εύρος ζώνης συγκριτικά με ένα τυπικό χειριστή σειριακών συνδέσμων [21].

Για την επιτυχή διαδικασία συναρμολόγησης, η συνιστάμενη δύναμη πάνω στο αντικείμενο πρέπει να είναι σωστά συζευγμένη με την κίνηση του αντικειμένου. Αυτό μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, ένας εκ των οποίων είναι η εισαγωγή κατάλληλου σχήματος ελέγχου για το καθορισμό της μηχανικής εμπέδησης των αντικειμένων. Αυτή η τεχνική δεν έχει στόχο την επιδεξιότητα όπως την ορίσαμε υπό την έννοια της ικανότητας προσανατολισμού του αντικειμένου στο χώρο.

Αρκετές προσεγγίσεις ορίζουν έλεγχο μόνο ως προς το στατικό όρο του μοντέλου της εμπέδησης του αντικειμένου, αυτό της ακαμψίας (object stiffness control). Ο έλεγχος κινείται γύρω από το σημείο στατικής ισορροπίας παράγοντας δύναμη στο αντικείμενο μέσω των ακροδακτύλων αναλογικά ως προς τη μετατόπιση από το σημείο ισορροπίας, ταυτόχρονα με μία λογική ελέγχου των εσωτερικών δυνάμεων (Grasp Force Optimization) προς αποφυγή απώλειας στήριξης.

Μία τεχνική ελέγχου των εσωτερικών δυνάμεων που δρα στο πλαίσιο του ελέγχου της ακαμψίας της θέσης του αντικειμένου, θεωρεί τις δυνάμεις αυτές παράλληλες ως προς τους αντίστοιχους άξονες που ενώνουν τα σημεία επαφής των δακτύλων και τις ενσωματώνει στο γενικευμένο διάνυσμα δυνάμεων του αντικειμένου. Στη συνέχεια η μήτρα λαβής επεκτείνεται ως προς τις γραμμές για την απεικόνιση από το χώρο των δυνάμεων των ακροδακτύλων στο χώρο των εσωτερικών δυνάμεων στο αντικείμενο. Ο έλεγχος ακαμψίας του αντικειμένου μέσω προσδιορισμού κατάλληλων ροπών στις αρθρώσεις γίνεται αντιστρέφοντας την τετραγωνική πλέον μήτρα λαβής και στη συνέχεια με τη χρήση της Ιακωβιανής μήτρας. Αυτή η προσέγγιση βασιζόμενη σε μία πειραματική διάταξη μετάδοσης κίνησης μέσω τενόντων έχει ήδη δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα [21].

2.3.3 Έλεγχος Ακαμψίας σε επίπεδο Αντικειμένου με Πλεονασματικές Κινηματικές Διατάξεις

Στη περίπτωση του ελέγχου της ακαμψίας ως προς το αντικείμενο με τη χρήση δακτύλων πλεοναζόντων βαθμών ελευθερίας απαιτείται η διερεύνηση κατάλληλων τεχνικών για την ικανοποίηση επιθυμητών επιμέρους κριτηρίων. Μία ενδιαφέρουσα τεχνική ελέγχου της ακαμψίας του αντικειμένου αποδομεί το πρόβλημα, προσδιορίζοντας αρχικά, ένα στατικό μοντέλο με το οποίο συνδέεται η ακαμψία του χώρου του αντικειμένου με τις επιμέρους παραμέτρους ακαμψίας των ακροδακτύλων. Δεδομένης της επιθυμητής ακαμψίας του αντικειμένου, το πρόβλημα ανάγεται στον προσδιορισμό των παραμέτρων ακαμψίας των ακροδακτύλων. Προς αυτή τη κατεύθυνση το αρχικό μοντέλο μπορεί να έρθει σε γραμμική μορφή υποθέτοντας ότι η μήτρα ακαμψίας έχει αποκλειστικά διαγώνια στοιχεία μη μηδενικά και σχηματίζοντας με αυτά ένα διάνυσμα συντελεστών ακαμψίας.

Ο υπολογισμός των στοιχείων ακαμψίας των ακροδακτύλων γίνεται βάσει αλγόριθμου βελτιστοποίησης όπου απαιτείται ελαχιστοποίηση της νόρμας της διαφοράς των στοιχείων της ακαμψίας με την ελάχιστη τιμή που αυτά μπορούν να έχουν ικανοποιώντας, ως ισοτικό περιορισμό, τη γραμμική εξίσωση του συστήματος. Ο αλγόριθμος αυτός ονομάζεται, αλγόριθμος σύνθεσης ακαμψίας ακροδακτύλων (Fingertip stiffness synthesis algorithm, FSS) και αποτελείται από δύο στάδια.

Αλγόριθμος FSS

- Εξασφαλίζει αρχικά την καταλληλότητα της επιλογής των παραμέτρων ακαμψίας του αντικειμένου έτσι ώστε να προκύψει ευστάθεια για το σύστημα.
- Υπολογίζει τα στοιχεία της μήτρας ακαμψίας βάσει της κλασσικής λύσης για προβλήματα ελαχίστων τετραγώνων με ισοτικό περιορισμό.

Στη συνέχεια ο πρόβλημα ανάγεται στον προσδιορισμό της ακαμψίας των αρθώσεων βάσει της υπολογισθείσας μήτρας ακαμψίας στο χώρο των ακροδακτύλων. Για το σκοπό αυτό, έχει αναπτυχθεί τεχνική ελέγχου αποκαλούμενη: Ορθογώνιος Έλεγχος Αποδόμησης της Ακαμψίας (Orthogonal Stiffness Decomposition Control – OSDC).

Αλγόριθμος OSDC

Βάσει της στατικής εξίσωσης που συνδέει τις ροπές στις αρθώσεις με την ασκούμενη δύναμη από τα ακροδάκτυλα, μέσω της Ιακωβιανής κινηματικής μήτρας, προκύπτει η σχέση μεταξύ της ακαμψίας των αρθρώσεων και της ακαμψίας στο άκρο του δακτύλου. Δεδομένου ότι τα δάκτυλα έχουν πλεονασματικούς βαθμούς ελευθερίας ακολουθείται τεχνική ορισμού του μηδενικού χώρου της απεικόνισης μέσω κατάλληλου μετασχηματισμού ομοιότητας.

Τελικά ο έλεγχος στο επίπεδο των αρθρώσεων περιλαμβάνει τον όρο της ακαμψίας με κέρδος την τιμή που υπολογίζεται βάσει του OSDC, ένα δυναμικό όρο από-

σβεσης ο οποίος έχει κέρδος προσδιοριζόμενο από την αντίστροφη μήτρα του όρου της μήτρας ακαμψίας που απεικονίζει στο μη μηδενικό χώρο και ένα δυναμικό όρο βαρυτικής αντιστάθμισης.

Ολόκληρο το σχήμα ελέγχου το οποίο συνδυάζει τις επιμέρους τεχνικές FSS και OSDC Αποκεντρωμένος Έλεγχος Ακαμψίας σε επίπεδο Αντικειμένου (Decentralized..., DOSC) και είναι αποτελεσματικό ως προς τον αξιόπιστο καθορισμό της ακαμψίας στο επίπεδο του αντικειμένου με ρομποτικά δάκτυλα πλεονάζοντων βαθμών ελεύθερίας [22].

Μία άλλη τεχνική προσδιορισμού της ακαμψίας των αρθρώσεων για δεδομένη διαγώνια μήτρα ακαμψίας των ακροδακτύλων σε πλεονασματικές κινηματικές διατάξεις στηρίζεται στη τεχνική των επαυξημένων χώρων [23]. Ουσιαστικά ορίζεται μία υποεργασία στο μηδενικό χώρο δράσης της Ιακωβιανής μήτρας της κινηματικής διάταξης αποσύζευγμένη από τη κύρια εργασία. Με αυτό το τρόπο μπορεί να απεικονιστεί ξεχωριστά η ακαμψία της κύριας εργασίας, που είναι η ακαμψία στο χώρο των ακροδακτύλων, από την ακαμψία της υποεργασίας δίνοντας με αυτό το τρόπο μήτρα ακαμψίας των αρθρώσεων πλήρους τάξης.

2.3.4 Έλεγχος Σύνθετης Μηχανικής Αγωγιμότητας – Admittance Control

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει ο ρομποτικός έλεγχος σύνθετης μηχανικής αγωγιμότητας (admittance control) έχει ως στόχο τη παραγωγή κατάλληλων μετατοπίσεων της ρομποτικής διάταξης αντιδρώντας έτσι σε εξωτερικώς ασκούμενες δυνάμεις διατηρώντας τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης σε επιθυμητές τιμές. Για το σύστημα της ρομποτικής λαβής αυτή η συμπεριφορά δυναμικής συμμόρφωσης είναι επιθυμητό να υιοθετηθεί σε σχέση με το αντικείμενο υπό χειρισμό.

Στη περίπτωση που ο έλεγχος επίτρεψης περιοριστεί μόνο στο προσδιορισμό των στατικών παραμέτρων του δυναμικού μοντέλου του κλειστού συστήματος τότε το σχήμα ελέγχου ονομάζεται έλεγχος συμμόρφωσης (compliance control). Αυτού του τύπου η στατική ανάλυση είναι γενικά χρήσιμη για την γενική εξαγωγή συμπερασμάτων για το σύστημα της λαβής ιδιαίτερα στη γραμμική προσέγγιση γύρω από ένα σημείο ισορροπίας ή κατά τις μικρές κινήσεις όπου οι αδρανειακοί όροι είναι μικροί.

Μία μεθοδολογία για την επίτευξη ελέγχου συμμόρφωσης στο επίπεδο του αντικειμένου συνίσταται στο κατάλληλο προσδιορισμό των μητρών ακαμψίας αρχικά ως προς τα ακροδάκτυλα – σημεία επαφής και στη συνέχεια ως προς τις αρθρώσεις των δακτύλων όπως δηλαδή και στον έλεγχο ακαμψίας του αντικειμένου (object stiffness control) όπως περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες. Στην [18] προτείνεται ένα σχήμα ελέγχου για την επίτευξη συμμόρφωσης στο επίπεδο του αντικειμένου με μεθοδολογία προσδιορισμού των μητρών ακαμψίας έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ταυτόχρονα αποσύζευξη μεταξύ των δακτύλων αλλά και μεταξύ των αρθρώσεων κάθε δακτύλου. Αυτή η αποσύζευξη διευκολύνει τον έλεγχο του χεριού. Πιο συγκεκριμένα

η υλοποίηση περιλαμβάνει δύο βασικά στάδια υλοποιούμενα με δύο διαφορετικούς αλγόριθμους αντίστοιχα.

- **Resolved Interfinger Decoupling Solver (RIFDS)**

Αρχικά ελέγχεται κατά πόσο ο επιθυμητός πίνακας ακαμψίας του αντικειμένου είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί από την εκάστοτε ρομποτική διάταξη χειρισμού βάσει ευριστικού μοντέλου υλοποιούμενου με προκαθορισμένους πίνακες οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη το μοντέλο των επαφών καθώς και τη κινηματική διάταξη βάσει των διαθέσιμων βαθμών ελευθερίας. Στη συνέχεια αφού υπολογιστεί ο πίνακας λαβής (Grasping Matrix) για το τρέχον χρονικό βήμα οι εξισώσεις που συνδέουν τις μήτρες ακαμψίας του αντικειμένου και των ακροδακτύλων, οι οποίες προκύπτουν από τη στατική εξίσωση δυνάμεων – ταχυτήτων της λαβής, μετασχηματίζονται κατάλληλα σε γραμμική σχέση με τον υπολογισμό πλέον της μήτρας ακαμψίας των ακροδακτύλων να έχει μετατραπεί πλέον σε πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού.

- **Resolved Interjoint Decoupling Solver (RIJDS)**

Σε αυτό το στάδιο στόχο αποτελεί ο προσδιορισμός των παραμέτρων ακαμψίας για κάθε άρθρωση των δακτύλων δεδομένου ότι ήδη έχει προσδιορισθεί η μήτρα ακαμψίας ως προς το ακροδάκτυλο με τον αλγόριθμο RIFDS. Με παρόμοιο τρόπο η μαθηματική σχέση που συνδέει τις δύο μήτρες ακαμψίας βάσει της Ιακωβιανής διαφορικής μήτρας μετασχηματίζεται σε γραμμική μορφή εξασφαλίζοντας αποσυζευγμένη συμπεριφορά μεταξύ των αρθρώσεων. Η τελική λύση προκύπτει με απλή αντιστροφή της μήτρας γραμμικής απεικόνισης αυτής της σχέσης.

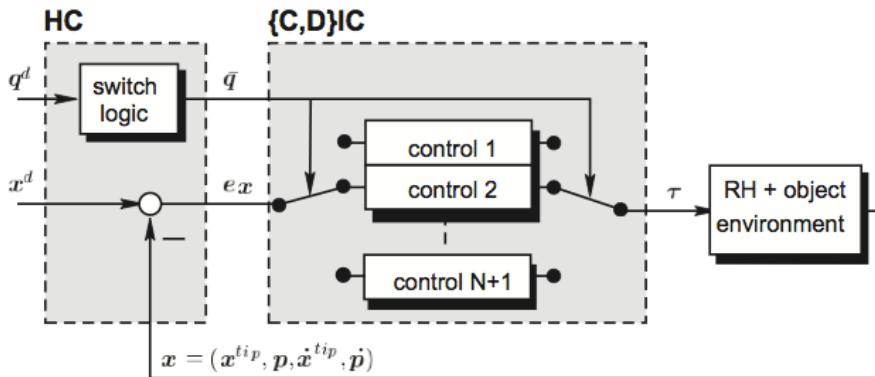
2.3.5 Υβριδικός Δυναμικός Έλεγχος Συστήματος Ρομποτικής Λαβής

Όπως αναφέραμε σχετικά στο κεφάλαιο που πραγματεύεται το κομμάτι της μοντελοποίησης του συστήματος 2.2.1, το υψηλότερο επίπεδο φορμαλισμού που μπορούμε να επιτύχουμε για την πλήρη περιγραφή του συστήματος της ρομποτικής λαβής – αντικειμένου είναι αυτό των υβριδικών δυναμικών συστημάτων τα οποία συνδυάζουν δυναμική διακριτής και συνεχούς φύσεως. Οι Schleg, Buss & Schmidt στην εργασία τους [16] επιχειρούν στο πλαίσιο αυτής της ολιστικής θεώρησης του προβλήματος να εισάγουν ένα σύνθετο σχήμα ελέγχου με το οποίο μπορούν να προσδόσουν στη ρομποτική λαβή σχεδόν το σύνολο των χαρακτηριστικών που μπορούν να τη χαρακτηρίσουν επιδέξια. Πιο αναλυτικά ο σχεδιασμός τους επιτρέπει στη ρομποτική λαβή την εύρωστη αρπαγή αντικειμένων, ελεύθερη τοποθέτηση σε θέση και προσανατολισμό, αλλαγή διάταξης λαβής με regrasping, αντιμετώπιση διαταραχών και ανακριβειών στη μοντελοποίηση.

Ο σύνθετος αυτός έλεγχος απαρτίζεται από τρία βασικά μέρη,

- Γεννήτρια Υβριδικών τροχιών Αναφοράς – Hybrid Reference Generator (HRG). Οι επιθυμητές τροχιές παράγονται με τη χρήση υβριδικών αυτόματων αναφοράς. Η υβριδική τροχιά συνδυάζει την επιθυμητή κατάσταση επαφής η οποία χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των δακτύλων υπό επαφή, τον τύπο της επαφής, την επιθυμητή θέση των ακροδακτύλων καθώς και τις αντίστοιχες ταχύτητες αυτών.
- Υβριδικός Ελεγκτής – Hybrid Controller (HC). Ο εσωτερικός αυτός βρόχος ελέγχου οδηγεί το σύστημα ως προς την επιθυμητή τροχιά αναφοράς. Στο διακριτό του τμήμα παράγει κατάλληλο διάνυσμα διακόπτη βάσει του διανύσματος διακριτής κατάστασης της λαβής, που στόχο έχει την εναλλαγή των impedance controllers. Στο συνεχές του κομμάτι αναλαμβάνει τη παραγωγή του σήματος λάθους που στη συνέχεια τροφοδοτεί τον επιλεγέντα ελεγκτή εμπέδησης.
- Βελτιστοποίηση Δυνάμεων Λαβής & Έλεγχος Εμπέδησης Grasp Force Optimization (GFO) & Impedance Control. Η τεχνική GFO που χρησιμοποιείται αναλύεται στην επόμενη ενότητα [24]. Ο ελεγκτής εμπέδησης διαθέτει μία σειρά από επιμέρους ελεγκτές εμπέδησης από τους οποίους επιλέγεται κάθε στιγμή ο κατάλληλος από τον υβριδικό ελεγκτή βάσει του διανύσματος που περιγράφει τη κατάσταση της λαβής κάθε χρονική στιγμή (βλ. σχήμα 2.3) εξασφαλίζοντας με αυτό το τρόπο την επιθυμητή δυναμική απόκριση του συστήματος για κάθε δεδομένη στιγμή.

Η γνώση για την ασκούμενη δύναμη στο αντικείμενο, απαραίτητη για το στάδιο ελέγχου GFO, παρέχεται βάσει μετρήσεων από αισθητήρες γενικευμένων δυνάμεων στα ακροδάκτυλα 6D και με απεικόνιση αυτών στο χώρο των ασκούμενων δυνάμεων στο αντικείμενο μέσω της μήτρας μετασχηματισμού της λαβής.



Σχήμα 2.3: Bank of Impedance Controllers [16]

2.3.6 Βελτιστοποίηση Δυνάμεων Λαβής (Grasping Force Optimization – GFO)

Η άσκηση δυνάμεων λαβής από τη ρομποτική διάταξη χειρισμού στο αντικείμενο με βέλτιστο τρόπο αποτελεί μία από τις βασικές προυποθέσεις για την επίτευξη εύρωστου επιδέξιου χειρισμού. Οι κλασσικές προσεγγίσεις του συγκεκριμένου προβλήματος λειτουργούν υπό τις παραδοχές της σημειακής επαφής με τριβή και την αλληλεπίδραση συμπαγών αντικειμένων. Υπό αυτό το απλούστευτικό για την ανάλυση πρίσμα τα δύο βασικότερα σημεία που πρέπει να ικανοποιεί ο βέλτιστος έλεγχος των δυνάμεων λαβής είναι η κίνηση πάντα εντός του κώνου τριβής εξασφαλίζοντας την ικανή στήριξη του αντικειμένου και παράλληλα η ελαχιστοποίηση των εσωτερικών δυνάμεων υπό τη λογική της ελάχιστης προσπάθειας αλλά και της προστασίας του συνολικού συστήματος από φθορές. Είναι άμεσα προφανές ότι αυτοί οι στόχοι είναι αντιδιαμετρικοί και απαιτούν ένα συμβιβασμό.

Ως προς το φορμαλισμό της περιγραφής του προβλήματος βελτιστοποίησης της άσκησης δυνάμεων λαβής, μεγάλη συνεισφορά έχει η διατύπωση των όρων του μοντέλου τριβής Coulomb για κάθε επαφή με τη μορφή θετικά ορισμένου πίνακα. Βάσει αυτού μπορεί να σχηματιστεί αντίστοιχη συνάρτηση κόστους η οποία περιγράφει τα κριτήρια βελτιστοποίησης που αναφέραμε παραπάνω. Μία τέτοια συνάρτηση κόστους θα μπορούσε να είναι για παράδειγμα το άθροισμα των στοιχείων του σταθμισμένου πίνακα όρων τριβής συν το άθροισμα του σταθμισμένου αντίστροφου πίνακα των όρων τριβής. Έτσι με επιλογή κατάλληλων πινάκων στάθμισης και ελαχιστοποίησης της συνάρτησης κόστους είναι δυνατό να ικανοποιήσουμε τα κριτήρια που περιγράφαμε. Η στάθμιση αυτή μάλιστα μπορεί να αλλάζει δυναμικά για την εφαρμογή σε τεχνική regrasping όπου απαιτείται ομαλή μετάβαση από το στάδιο της επαφής στο στάδιο της μη επαφής για κάθε δάκτυλο και αντίστροφα σε συνδιασμό με ένα σύνολο επιπρόσθετων γραμμικών περιορισμών ως προς τη μήτρα των όρων τριβής για βελτίωση της αποτελεσματικότητας της τεχνικής [24].

Ως προς το υπολογιστικό σκέλος αυτής της μεθόδου υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις βάσει της κλασσικής θεωρίας τεχνικών βελτιστοποίησης οι οποίες όμως δεν κρίνονται κατάλληλες για εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο [24]. Στη περίπτωση που απαιτείται αντίδραση σε πραγματικό χρόνο είναι προτιμότεροι αλγόριθμοι επαναληπτικών τεχνικών αριθμητικών λύσεων οι οποίοι μάλιστα δεν αποκλείεται να να μειώνουν τις απαιτήσεις ως προς την ακρίβεια των λύσεων επ' αφελεία της ταχύτητας του συστήματος, για την εξασφάλιση δηλαδή άμεσης απόκρισης.. Οι Buss και Schleg [24] προτείνουν ένα αλγόριθμο ο οποίος, αρχικά, δεδομένης της εξωτερικής δύναμης ως προς το αντικείμενο, αυξάνει με γραμμικό τρόπο τις εσωτερικές δυνάμεις, έτσι ώστε η συνολική δύναμη από κάθε δάκτυλο να βρίσκεται εντός κώνου τριβής και στη συνέχεια η ρύθμιση των εσωτερικών δυνάμεων γίνεται βελτιστοποιώντας τη συνάρτηση κόστους που περιγράφαμε παραπάνω με επαναληπτική αριθμητική μέθοδο.

2.3.7 Προσχηματισμός Ρομποτικής Λαβής – Preshaping Robot Hand

Απαραίτητο για το χειρισμό ενός αντικειμένου αποτελεί το στάδιο κατά το οποίο η ρομποτική διάταξη προσεγγίζει το αντικείμενο σχηματίζοντας κατάλληλο σχήμα για τη σύναψη κλειστής λαβής. Η προσέγγιση αυτή, αν και διαισθητικά απλή, προϋποθέτει ένα συντονισμό σύνθετων υποεργασιών.

- Την αναγνώριση του αντικειμένου, της θέσης, του σχήματος και του μεγέθους του.
- Παραγωγή κατάλληλων σημάτων ελέγχου της κινηματικής διάταξης για τη παρακολούθηση της κίνησης του αντικειμένου.
- Το σχεδιασμό κατάλληλης λαβής βάσει του σχήματος και της μορφολογίας της επιφάνειας του αντικειμένου, την εφαρμογή αυτής και τελικά το χειρισμό του αντικειμένου.

Μία ενδιαφέρουσα προσέγγιση [25] θετεί κατάλληλο σχήμα εικονικής εμπέδησης (virtual impedance) με δύο συνιστώσες. Η μία συνιστώσα ορίζεται ως η εικονική ακαμψία (virtual stiffness) για το κάθε άκρο των δακτύλων ως προς τη θέση του αντικειμένου κάθε χρονική στιγμή, εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο παρακολούθηση της κίνησης του αντικειμένου. Η δεύτερη συνιστώσα εικονικής ακαμψίας εξασφαλίζει ότι τα ακροδάκτυλα θα καλύψουν συμμετρικά το χώρο “αγκαλιάζοντας” συμμετρικά το αντικείμενο με χρήση κατάλληλων συναρτήσεων, οι οποίες απωθούν όλα τα δάκτυλα μεταξύ τους, εξασφαλίζοντας με αυτό το τρόπο κλειστότητα. Αυτές οι δύο εικονικές εμπεδίσεις υπερτίθενται στο τελικό σήμα ελέγχου και απεικονίζονται στο χώρο των αρθρώσεων κατά το κλασικό στατικό μοντέλο με την ανάστροφη ιακωβιανή διαφορική μήτρα.

2.3.8 Άλλες Τεχνικές

Τεχνικές Μηχανικής Μάθησης

Οι τεχνικές μηχανικής μάθησης κερδίζουν συνεχώς έδαφος στα ρομποτικά συστήματα είτε συμπληρωματικά με τις κλασσικές τεχνικές ελέγχου είτε και ως αυτοτελή συστήματα ευφυούς ελέγχου.

Στην [12] παρουσιάζεται μία τεχνική ελέγχου για ένα σύστημα λαβής 2 δακτύλων 2 DOFs με εύκαμπτα ακροδάκτυλα με ικανότητα κύλισης ως προς την επιφάνεια του αντικειμένου. Η δυναμική του συστήματος αυτού, αναφερόμενη και ως “κίνηση τσιμπήματος – Pinching Motion” περιγράφεται με Lagrangian δυναμικό μοντέλο μόνο για τη κίνηση σε επίπεδο 2 διαστάσεων. Ο έλεγχος βασίζεται στο ότι το σύστημα είναι παθητικό (Passivity Based Control) και περιλαμβάνει τρεις προστιθέμενους επιμέρους όρους. Ο πρώτος όρος πραγματοποιεί ευσταθή δυναμική λαβή ελέγχοντας τις εσωτερικές δυνάμεις με τον δεύτερο να αναλαμβάνει τη περιστροφή του αντικειμένου, ενώ ο τρίτος όρος, όρος μάθησης, ανανεώνεται επαναληπτικά με τη χρήση διαφορικού όρου ολοκλήρωσης δυναμικής παλινδρόμησης (regression) ο οποίος βασίζεται στα δυναμικά χαρακτηριστικά του Lagrangian ρομποτικού μοντέλου του χεριού. Στόχος του ελέγχου αποτελεί η πραγματοποίηση σταθερής περιοδικής κίνησης με σταδιακή σύγκλιση στην επιθυμητή τροχιά με μηδενισμό του σφάλματος θέσης ως προς το αντικείμενο μέσω του όρου δυναμικής μάθησης. Η τεχνική αυτή γενικεύεται και σε δάκτυλα 3DOFs με επιτυχή αποτελέσματα [12].

Έλεγχος με εύκαμπτα σημεία επαφής

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει οι περισσότερες αναλυτικές μελέτες κάνουν υπόθεση άκαμπτων δακτύλων και άκαμπτου αντικειμένου περιβάλλοντος. Αυτό στις πρακτικές εφαρμογές δημιουργεί προβλήματα αστάθειας και προσαρμοστικότητας σε διαφορετικές καταστάσεις. Για το λόγο αυτό διαφαίνεται μία ιδιαίτερη ανάπτυξη του κλάδου των εύκαμπτων ρομποτικών συστημάτων (Soft Robotics).

Μία ενδιαφέρουσα τεχνική για το χειρισμό αντικειμένων με 2 εύκαμπτα ακροδάκτυλα τα οποία διαθέτουν προσαρμοσμένους αισθητήρες δύναμης κάνει χρήση κλασσικού PID ελεγκτή στις αρθρώσεις όπου η επιθυμητή θέση δρα ως ρυθμιστής της ασκούμενης δύναμης [4]. Πιο αναλυτικά αρχικά ορίζεται φίλτρο το οποίο αποθρυβοποιεί το σήμα από τους αισθητήρες δύναμης. Στη συνέχεια ορίζεται η δύναμη λαβής ως η μικρότερη τιμή από τις δυνάμεις οι οποίες δρουν στο αντικείμενο στον άξονα μεταξύ των δύο σημείων επαφής. Το σφάλμα μεταξύ της δύναμης λαβής και της επιθυμητής ορίζεται ως ανάλογο του ρυθμού μεταβολής της απόστασης των ακροδακτύλων από το κέντρο. Βάσει ανάστροφης κινηματικής ορίζεται τελικά η επιθυμητή θέση των αρθρώσεων. Μία προέκταση που γίνεται στο συγκεκριμένο σχήμα είναι η εισαγωγή τεχνικής συμμόρφωσης για μεγάλες δυνάμεις. Στην περίπτωση αυτή όταν ανιχνευθεί εξωτερικά ασκούμενη δύναμη πάνω στο αντικείμενο μεγαλύτερη από ένα κατώφλι τότε το κέντρο μεταξύ των δύο σημείων επαφής μετακινείται προς τη κατεύθυνση της εξωτερικά ασκούμενης δύναμης με σκοπό να τη

μειώσει. Αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση εργασιών όπου οι εξωτερικές δυνάμεις οδηγούν την εργασία [4].

2.3.9 Θέματα Ευστάθειας

Μία από τις σημαντικότερες ιδιότητες της λαβής είναι η ευστάθεια αυτής. Στη βιβλιογραφία ο όρος της ευστάθειας χρησιμοποιείται βάσει δύο τουλάχιστον εννοιών [8] και προσδιορίζεται χυρίως στο επίπεδο του αντικειμένου [23]. Η μία έχει να κάνει με την ευστάθεια κατά Lyapunov, και υποδεικνύει (ασυμπτωτική) ευστάθεια αν η δυναμική του συστήματος είναι τέτοια, όπου όταν το αντικείμενο μετατοπίζεται από τη θέση/προσανατολισμό αναφοράς, να μένει κοντά (και τελικά να επιστρέψει σε αυτήν). Ένας δεύτερος ορισμός, κατά Lagrange stability, αναφέρει ότι ένα συντηρητικό σύστημα θεωρείται ευσταθές αν βρίσκεται σε ένα αυστηρό τοπικό ελάχιστο της δυναμικής του ενέργειας. Ο δεύτερος ορισμός είναι και ο χυρίαρχος στην ανάλυση και τη μελέτη της ευστάθειας συστημάτων ρομποτικής λαβής. Στην ανάλυση της ευστάθειας πρέπει να προσμετρηθούν και οι συμμορφωτικές δυναμικές του συστήματος, όπως τυχόν φαινόμενα ελαστικότητας στα δάκτυλα.

Η ανάλυση της ευστάθειας κατά Lagrange παρουσιάζει κάποια πρακτικά προβλήματα. Στη μηχανική η θέση ότι ένα σημείο ισορροπίας είναι ασταθές αν δεν είναι ελάχιστο σημείο δυναμικού δεν αποδεικνύεται και για συστήματα με περισσότερους από 2 βαθμούς ελευθερίας. Σε μία πραγματική εφαρμογή μπορούν επίσης να επιδρούν και μη συντηρητικές δυνάμεις, δημιουργούμενες από ατέλειες στη μηχανική δομή των στοιχείων, ή/και από το νόμο ελέγχου, καθιστώντας την ανάλυση της ευστάθειας κατά Lagrange μη έγκυρη. Η ανάλυση της ευστάθειας κατά Lyapunov όπως και άλλες δομικές ιδιότητες (ελεγξιμότητα, παρατηρησιμότητα, σταθεροποίηση) στο γενικό σύστημα της λαβής, αναλύονται ως προς τη γραμμική τους προσέγγιση όπου το σύστημα είναι πρακτικά ελαστικό γύρω από το σημείο ισορροπίας.

Σε ένα ελαστικό σύστημα, ευστάθεια πρακτικά μεταφράζεται ως η ιδιότητα σύμφωνα με την οποία, οποιαδήποτε μετατόπιση από το σημείο ισορροπίας θα δημιουργήσει δύναμη η οποία θα τείνει να επιστρέψει το σύστημα στη κατάσταση ισορροπίας (*stiffness-effect*). Ενεργειακά αυτό ερμηνεύεται ως προς το έργο που πρέπει να παράξει το σύστημα για την επαναφορά στο σημείο ισορροπίας. Για την ανάλυση αυτού του προβλήματος συνήθως δομείται αρχικά η σχέση μεταξύ των μητρών ακαμψίας μεταξύ αντικειμένου, ακροδακτύλων και αρθρώσεων η οποία προκύπτει από τη στατική ανάλυση του συστήματος στο επίπεδο του αντικειμένου μέσω της μήτρας λαβής και της Ιακωβιανής μήτρας του χεριού. Από αυτή τη σχέση εξάγονται οι συνθήκες ευστάθειας της λαβής συνήθως βάσει κάποιων απλουστευτικών παραδοχών προς διευκόλυνση της ανάλυσης όπως για παράδειγμα παραλείποντας τη βαρυτική επίδραση ή άλλες τυχόν μη μοντελοποιημένες επιδράσεις και όρους δεύτερης τάξης. Σε αυτή την απλουστευτική παραδοχή θέτοντας τη μήτρα ακαμψίας του αντικειμένου θετικά ορισμένη εξασφαλίζεται η ευστάθεια για το ελαστικό σύστημα. Συνήθως οι μήτρες ακαμψίας επιλέγονται διαγώνιες εξασφαλίζοντας ευκολία στην ανάλυση και

αποσυζευγμένη συμπεριφορά ως προς τις καρτεσιανές διευθύνσεις.

Προφανώς απαραίτητη κρίνεται η κατάλληλη αντιστάθμιση των διαφόρων επιδράσεων στο σύστημα για την επίτευξη ευστάθειας. Πάνω σε αυτή τη κατεύθυνση στην [22] προτείνεται αλγόριθμος κατάλληλης επιλογής μήτρας ακαμψίας για το αντικείμενο μέσω επαναληπτικής ευριστικής μεθόδου η οποία εγγυάται την ευστάθεια για το ελαστικό σύστημα λαμβάνοντας υπόψη κάθε φορά τη βαρυτική επίδραση καθώς και την επίδραση των εσωτερικών δυνάμεων. Στην [23] θεωρώντας ότι στο σύστημα της λαβής επιδρά νόμος αμέσου ελέγχου δύναμης (direct force control) στα ακροδάκτυλα (Closed Loop), δομούνται οι συνθήκες ευστάθειας της λαβής για το γραμμικοποιημένο ελαστικό σύστημα με βαρυτική επίδραση, υπό απλό μοντέλο σημειακών επαφών με τριβή, επεκτείνοντας τις αντίστοιχες συνθήκες για το ανοικτό (Open Loop) σύστημα. Μία άλλη προσέγγιση προτείνει την εισαγωγή παρατηρητή διαταραχών (disturbance observer) στο σχήμα ελέγχου είτε του σερβομηχανισμού είτε στον έλεγχο δύναμης ή συμμόρφωσης, για την αντιστάθμιση της αβεβαιότητας, του βαρυτικού όρου, της ελαστικότητας και της τριβής των συνδέσμων. Η αποτελεσματικότητα και οι επιδόσεις του παρατηρητή διαταραχών κρίνεται υψηλή αλλά η ευστάθεια δεν μπορεί να καταστεί εγγυημένη βάσει αναλυτικής λύσης εκ των προτέρων πριν την εφαρμογή του ελεγκτή στο τελικό σύστημα. Οι συνθήκες ευστάθειας που δομούνται στις ερευνητικές προσπάθειες μέχρι στιγμής εξετάζονται μόνο ως προς ορισμένες συνιστώσες των διαταραχών στο σύστημα και οι παράμετροι του ελεγκτή ρυθμίζονται είτε μέσω επαναληπτικών ή γραφικών μεθόδων, είτε διαισθητικά [26]. Στην [26] δομούνται αρχικά αναλυτικές ικανές συνθήκες για την εξασφάλιση ευστάθειας (stiffness-effect) για μικρές μετατοπίσεις γύρω από το σημείο ισορροπίας όπου υπάρχει ελαστική περιοχή λειτουργίας υπό την επίδραση του βαρυτικού όρου του αντικειμένου και ως προς τη μάζα αυτού, τα σημεία επαφής και τους ελαστικούς όρους των ακροδακτύλων. Στη συνέχεια για τη ρύθμιση των παραμέτρων του ελεγκτή (ο οποίος ενσωματώνει παραρατηρητή αντιστάθμισης διαταραχών-Disturbance Observer) για την εξασφάλιση ευστάθειας, δομείται συνάρτηση Lyapunov για το σύστημα από την οποία απαιτείται και η ικανοποίηση των αντίστοιχων συνθηκών ευστάθειας. Η ασυμπτωτική ευστάθεια αποδεικνύεται με την αρχή αμεταβλητότητας του LaSalle (LaSalle's invariance principle).

Για τη σύγκριση της ευστάθειας μεταξύ διαφορετικών λαβών αλλά και γενικότερα για την ανάλυση της ευστάθειας κρίνεται χρήσιμος ο υπολογισμός μίας αντίστοιχης κατάλληλης μετρικής, όπως για παράδειγμα το πραγματικό μέρος των κυρίαρχων ιδιοτιμών του γραμμικοποιημένου μοντέλου λαβής. Μία πιο χρήσιμη προσέγγιση σε αρκετές εφαρμογές θα ήταν ο υπολογισμός της διανυσματικής βάσης των γενικευμένων ελκτικών δυνάμεων γύρω από το σημείο ισορροπίας, παρέχοντας έτσι πληροφορία σχετικά με το εύρος του μέτρου των δυνάμεων για τις οποίες το σύστημα είναι ευσταθές. Αποδοτικοί αλγόριθμοι για τον υπολογισμό αυτού του μεγέθους δεν έχουν ακόμα αναπτυχθεί [8].

Κεφάλαιο 3

Μοντελοποίηση & Έλεγχος Ρομποτικής Λαβής: Θεωρητικό Υπόβαθρο

Βασικός στόχος ενός ρομποτικού χεριού είναι ο χειρισμός αντικειμένων και στις 6 διαστάσεις. Στο παρελθόν πολλοί αλγόριθμοι έχουν προταθεί βασιζόμενοι στην φευδοαντίστροφη μήτρα της λαβής με κάποιο συντελεστή βάρους συνδυασμένοι με έλεγχο εσωτερικής δύναμης. Οι περισσότερες από αυτές τις μεθοδολογίες απαιτούν εύρωστη ανίχνευση/παρακολούθηση των επαφών καθώς και διακοπτικούς ελεγκτές. Εισάγοντας την έννοια του εικονικού-αντικειμένου (*virtual-object*) έχουν αναπτυχθεί και αναφέρονται στη βιβλιογραφία τεχνικές ελέγχου ρομποτικής λαβής σε επίπεδο αντικειμένου (*object-level*) [27, 28, 29]. Ο έλεγχος παίρνει ως είσοδο το επιθυμητό πλαίσιο του αντικειμένου και τις επιθυμητές δυνάμεις λαβής. Ο έλεγχος σε επίπεδο αντικειμένου έχει γενικά τα κάτωθι πλεονεκτήματα,

- Εύκολος ορισμός δυνάμεων λαβής ως αντιστάθμιση των αδρανειακών χαρακτηριστικών ρομπότ-αντικειμένου
- Εύκολος ορισμός εξωτερικών δυνάμεων που δρουν στο αντικείμενο
- Αποφυγή αναίτιων μεγάλων εσωτερικών δυνάμεων

Ουσιαστικά ο στόχος της εργασίας αυτής είναι η δημιουργία εύρωστου και διαίσθητικού νόμου ελέγχου για έλεγχο στο αντικείμενο ο οποίος δεν απαιτεί εύρωστη ανίχνευση/παρακολούθηση των επαφών.

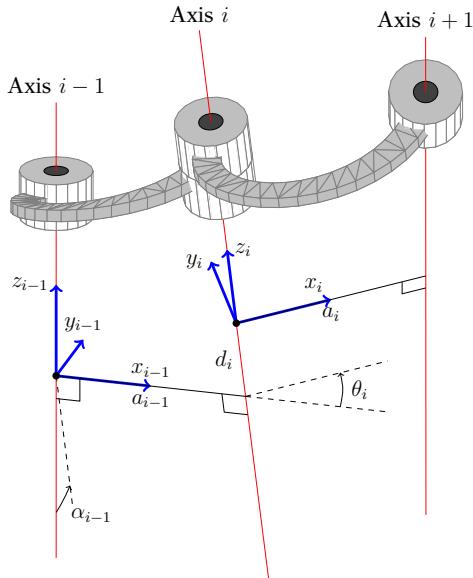
3.1 Μοντελοποίηση Ρομποτικού Χεριού

Σε αυτή την ενότητα δομούνται διαδοχικά το κινηματικό, διαφορικό και δυναμικό μοντέλο του ρομποτικού χεριού.

3.1.1 Κινηματικό Μοντέλο Ρομποτικού Χεριού

Ορθή Κινηματική Ανάλυση

Για την περιγραφή της θέσης και του προσανατολισμού μίας κινηματικής αλυσίδας η οποία αποτελείται από πρισματικές και στροφικές αρθρώσεις με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό παραμέτρων ακολουθείται η μέθοδος Denavit–Hartenberg [30].



Σχήμα 3.1: Denavit–Hartenbeg Parameters [31]

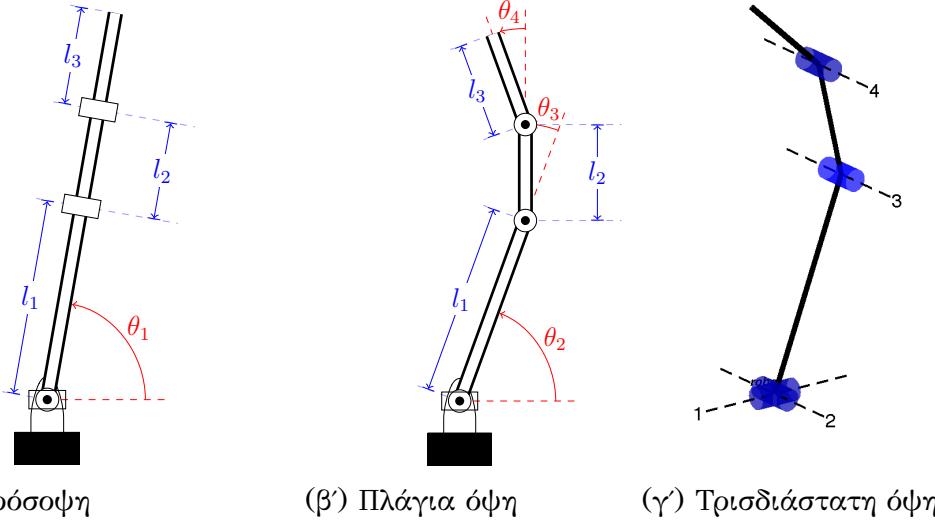
Σύνδεσμος i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	l_1	$\pi/2$	0	θ_2
3	l_2	0	0	θ_3
4	l_3	0	0	θ_4

Πίνακας 3.1: Πίνακας παραμέτρων Denavit–Hartenberg ανθρωπομορφικού δακτύλου 4 Βαθμών Ελευθερίας

Έτσι λοιπόν για τη περιγραφή της κινηματικής σχέσης του ακροδακτύλου ως προς το κοινό πλαίσιο αναφοράς έχουμε τους ακόλουθους διαδοχικούς ομογενείς μετασχηματισμούς,

$$T_i(\theta_i) = A_{\Sigma_i}^O [Rot_z(\theta_{i1}) * Rot_x(\pi/2)] [Rot_z(\theta_{i2}) * Tra_x(l_1)] \\ [Rot_z(\theta_{i3}) * Tra_x(l_2)] [Rot_z(\theta_{i4}) * Tra_x(l_3)] \quad (3.1)$$

Όπου $A_{\Sigma_i}^O$ ο ομογενής μετασχηματισμός του πλαισίου βάσης Σ_i του δακτύλου i ως



Σχήμα 3.2: Κινηματική Δομή Ανθρωπομορφικού Δακτύλου 4 Βαθμών Ελευθερίας

προς το κοινό πλαισιο αναφοράς O και $\theta_i = [\theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{i3}, \theta_{i4}]^T$. Ο πίνακας $T_i(\theta_i)$ απαρτίζεται από τη μήτρα στροφής $R_i(\theta) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ και τη θέση $x_i(\theta_i) = [x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}]^T \in \mathbb{R}^3$.

$$T_i(\theta_i) = \begin{bmatrix} R_i(\theta_i) & x_{i1}(\theta_i) \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Για N δάκτυλα η κινηματική μήτρα ολόκληρου του χεριού προκύπτει,

$$T(\theta) = \begin{bmatrix} T_1(\theta_1) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \ddots \\ \mathbf{0} & T_N(\theta_N) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

όπου $\theta = [\theta_1^T, \theta_2^T, \dots, \theta_N^T]^T \in \mathbb{R}^{4N}$.

Διαφορική Κινηματική Ανάλυση

Σε αυτό το στάδιο επιθυμούμε τον προσδιορισμό της διαφορικής απεικόνισης μεταξύ της γενικευμένης ταχύτητας του ακροδακτύλου ως προς τις ταχύτητες των αρθρώσεων.

Διαφορίζοντας τη τελική θέση του κάθε δακτύλου $x_i(\theta_i)$ έχουμε,

$$\dot{x}_i(\theta_i) = \frac{\partial x_i}{\partial \theta_i} \dot{\theta}_i \quad (3.4)$$

και για τη γωνιακή ταχύτητα του ακροδακτύλου έχουμε,

$$[\omega_i \times] = R_i^T \dot{R}_i \quad (3.5)$$

όπου $[r \times]$ ο αντισυμμετρικός τελεστής στροφής (skew-symmetric operator) $[r \times] : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^{3 \times 3}$,

$$[r \times] = \begin{bmatrix} 0 & -r_3 & r_2 \\ r_3 & 0 & -r_1 \\ -r_2 & r_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

αναπτύσσοντας το \dot{R}_i προκύπτει,

$$[\omega_i \times] = R_i^T \frac{\partial R_i}{\partial \theta_i} \dot{\theta}_i \quad (3.7)$$

Τελικά μπορούμε να ορίσουμε ένα ανάστροφο τελεστή στροφής $[[r \times]]^{-1} : \mathbb{R}^{3 \times 3} \rightarrow \mathbb{R}^3$

$$[[r \times]]^{-1} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Η Ιακωβιανή μήτρα για το δάκτυλο i προκύπτει λοιπόν,

$$J_i(\theta_i) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_i}{\partial \theta_i} \\ [[(R_i^T \frac{\partial R_i}{\partial \theta_i})]]^{-1} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Η Ιακωβιανή μήτρα ολόκληρου του χεριού ορίζεται,

$$J_H(\theta) = \begin{bmatrix} J_1(\theta_1) & & \mathbf{0} \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & J_N(\theta_N) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

με τη σχέση των ταχυτήτων να είναι τελικά,

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \omega \end{bmatrix} = J_H(\theta) \dot{\theta} \quad (3.11)$$

3.1.2 Δυναμικό Μοντέλο Ρομποτικού Χεριού

Το δυναμικό μοντέλο του ρομποτικού χεριού με N δάκτυλα τεσσάρων βαθμών ελευθερίας περιγράφεται από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση η οποία προκύπτει με τη δυναμική μέθοδο Lagrange.

Η Lagrangian συνάρτηση ορίζεται για το δάκτυλο i ,

$$L_i = K_i - P_i \quad (3.12)$$

όπου $K_i = \sum_{j=1}^4 K_{ij}$, $P_i = \sum_{j=1}^4 P_{ij}$ η συνολική κινητική και δυναμική ενέργεια αντίστοιχα κάθε δακτύλου. Η κινητική ενέργεια κάθε δακτύλου είναι το άθροισμα της κινητικής ενέργειας του κέντρου μάζας κάθε συνδέσμου ως προς τις γραμμικές μετατοπίσεις και της κινητικής ενέργειας λόγω περιστροφής.

$$K_{ij} = \frac{1}{2} m_{ij} \dot{x}_{cm_ij}^T \dot{x}_{cm_ij} + \frac{1}{2} \omega_{ij}^T I_{ij} \omega_{ij} \quad (3.13)$$

$$P_{ij} = m_{ij}gh_{ij} \quad (3.14)$$

με m_{ij} , \dot{x}_{cm_ij} τη μάζα και τη γραμμική ταχύτητα αντίστοιχα του κέντρου μάζας cm συνδέσμου ij . ω_{ij} , I_{ij} η γωνιακή ταχύτητα και ο τανυστής αδρανείας του συνδέσμου ij . h_{ij} είναι το ύψος του κέντρου μάζας του συνδέσμου ij .

Το δυναμικό μοντέλο Lagrange εκφράζεται,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_i}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L_i}{\partial \theta_i} = \tau_i \quad (3.15)$$

Από τις (3.12)–(3.15) προκύπτει το δυναμικό μοντέλο του ρομποτικού δακτύλου i .

$$M_i(\theta_i)\ddot{\theta}_i + C_i(\theta_i, \dot{\theta}_i)\dot{\theta}_i + g_i(\theta_i) = \tau_i + \tau_{i_ext} \quad (3.16)$$

όπου, θ_i , $\tau_i = [\tau_{i1}, \tau_{i2}, \tau_{i3}, \tau_{i4}]^T$, $\tau_{i_ext} \in \mathbb{R}^4$ οι γωνίες των αρθρώσεων, οι ροπές στις αρθρώσεις και η εξωτερικά ασκούμενη ροπή αντίστοιχα. $M_i(\theta_i) \in \mathbb{R}^{4N \times 4N}$, $C_i(\theta_i, \dot{\theta}_i)$, $g(\theta_i) \in \mathbb{R}^{4N}$ η μήτρα αδράνειας, οι φυγοκεντρικοί και Coriolis όροι και ο βαρυτικός δυναμικός όρος, αντίστοιχα. Όλοι αυτοί οι όροι είναι εκφρασμένοι στο χώρο των αρθρώσεων.

Τελικά για το ρομποτικό χέρι N δακτύλων η δυναμική εξίσωση είναι,

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta) = \tau + \tau_{ext} \quad (3.17)$$

με,

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} M_1(\theta_1) & & & \mathbf{0} \\ & \ddots & & \\ \mathbf{0} & & M_N(\theta_N) & \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$C(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} C_1(\theta_1, \dot{\theta}_1) & & & \mathbf{0} \\ & \ddots & & \\ \mathbf{0} & & C_N(\theta_N, \dot{\theta}_N) & \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$g(\theta) = \begin{bmatrix} g_1(\theta_1) & & & \mathbf{0} \\ & \ddots & & \\ \mathbf{0} & & g_N(\theta_N) & \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

και $\tau = [\tau_1^T, \tau_2^T, \dots, \tau_4^T]^T \in \mathbb{R}^{4N}$.

3.1.3 Βασικές Ιδιότητες Δυναμικού Μοντέλου Ρομποτικού Χεριού

Η δυναμική εξίσωση (3.16) και κατ' επέκταση η (3.17) είναι μη γραμμικές. Εφόσον λοιπόν τα εργαλεία της κλασικής θεωρίας ελέγχου γραμμικών–χρονικά αναλλοίωτων

(LTI) συστημάτων δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν, τουλάχιστον άμεσα, αναζητούνται νέες προσεγγίσεις βασιζόμενες στις βασικές δομικές τους ιδιότητες.

- $M(\theta) > 0$ & $M(\theta)^T = M(\theta)$.
- $(\dot{M} - 2C)^T = -(\dot{M} - 2C)$ μήτρα αντισυμμετρική (skew-symmetric)

3.1.4 Ρομποτικός Έλεγχος Βασιζόμενος στη Παθητικότητα

Από τη θεωρία μη-γραμμικών συστημάτων έχουμε τον ακόλουθο ορισμό για τα παθητικά συστήματα (Passive) [32].

Έστω το σύστημα,

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (3.21)$$

$$y = h(x) \quad (3.22)$$

όπου $f(0, 0) = 0$ και $h(0) = 0$. Το σύστημα αυτό είναι παθητικό (Passive) αν υπάρχει θετικά ημι-ορισμένη συνάρτηση $V(x)$ (συνάρτηση συσσώρευσης) τέτοια ώστε,

$$u^T y \geq \dot{V} = \frac{\partial V}{\partial x} f(x, u). \quad (3.23)$$

Το σύστημα είναι μάλιστα παρατηρήσιμο στη μηδενική-κατάσταση (zero-state observable) αν καμία λύση του $\dot{x} = f(x, 0)$ δεν ανήκει στο σύνολο $\{x | h(x) = 0\}$ εκτός από τη τετριμένη λύση $x(t) = 0$.

Σκεπτόμενοι τη συνάρτηση συσσώρευσης $V(x)$ ως την ενέργεια του συστήματος παρατηρούμε ότι ένα παθητικό σύστημα έχει ευσταθή κατάσταση ισορροπίας στην αφετηρία του ($x(t) = 0$). Ο έλεγχος βασίζεται λοιπόν στη χρήση ανατροφοδότησης (feedback) η οποία εξαναγκάζει το σύστημα να είναι παθητικό.

Για οικουμενική σταθεροποίηση του παθητικού συστήματος στην αφετηρία του δεδομένης συμμετρικά μη φραγμένης θετικά ορισμένης συνάρτησης συσσώρευσης καθώς και με παρατηρησιμότητα μηδενικής κατάστασης (zero-state observable) μπορεί να εφαρμοστεί έλεγχος της μορφής $u = -\phi(y)$, όπου $\phi(y)$ τοπικά Lipschitz συνάρτηση τέτοια ώστε $\phi(0) = 0$ και $y^T \phi(y) > 0, \forall y \neq 0$.

$$\dot{x} = f(x, -\phi(y)) \quad (3.24)$$

Με δεδομένη τη συνάρτηση συσσώρευσης $V(x)$ ως υποψήφια συνάρτηση Lyapunov έχουμε,

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial x} f(x, -\phi(y)) \leq -y^T \phi(y) \leq 0 \quad (3.25)$$

έτσι ώστε η \dot{V} να είναι αρνητικά ημι-ορισμένη. Παρατηρούμε ότι ισχύει $\dot{V} = 0$ αν και μόνο αν $y = 0$. Βάσει της αρχής της αμεταβολητότητας (invariance principle) του

LaSalle για το σύστημα προκύπτει ασυμπτωτική ευστάθεια για $y = 0$ που συνεπάγεται $u(t) = 0$ και τελικά $x(t) = 0$.

Στο πρόβλημα του ελέγχου της ρομποτικής διάταξης επιθυμούμε τη σταθεροποίηση του συστήματος σε ένα σημείο αναφοράς $q = q_r$. Η δυναμική του σφάλματος παρακολούθησης τροχιάς $e = q - q_r$, $\dot{e} = \dot{q}$ προκύπτει από την (3.17),

$$M(\theta)\ddot{e} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{e} + g(\theta) = \tau \quad (3.26)$$

Το σημείο ($e = 0, \dot{e} = 0$) δεν είναι ευσταθές σημείο της ανοικτής διάταξης (open-loop equilibrium state).

Έστω το σήμα ελέγχου με όρο βαρυτικής αντιστάθμισης, συνάρτηση του σφάλματος θέσης και όρο απόσβεσης,

$$\tau = g(q) - \phi_p(e) - D\dot{e} \quad (3.27)$$

όπου $\phi_p(0) = 0$, D θετικά ορισμένη ($D > 0$) μήτρα κέρδους ανάδρασης ταχύτητας, και $e^T \phi_p(e) > 0, \forall e \neq 0$. Η εξίσωση του κλειστού συστήματος είναι,

$$M(\theta)\ddot{e} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{e} + D\dot{e} + \phi_p(e) = \tau_{ext} \quad (3.28)$$

Η ενέργεια του συστήματος – συνάρτηση συσσώρευσης είναι το άθροισμα κινητικής ενέργειας και δυναμικού του συστήματος,

$$V = \frac{1}{2}\dot{e}^T M(\theta)\dot{e} + V_d(e) \quad (3.29)$$

όπου,

$$V_d(e) = \int_0^e \phi_p^T(\sigma)d\sigma \quad (3.30)$$

Η ολική παράγωγος της ενέργειας του συστήματος είναι,

$$\dot{V} = \frac{1}{2}\dot{e}^T (\dot{M} - 2C)\dot{e} - \dot{e}^T D\dot{e} - \dot{e}^T \phi_p(e) + \dot{e}^T \tau_{ext} + \phi_p^T(e)\dot{e} \leq \dot{e}^T \tau_{ext} \quad (3.31)$$

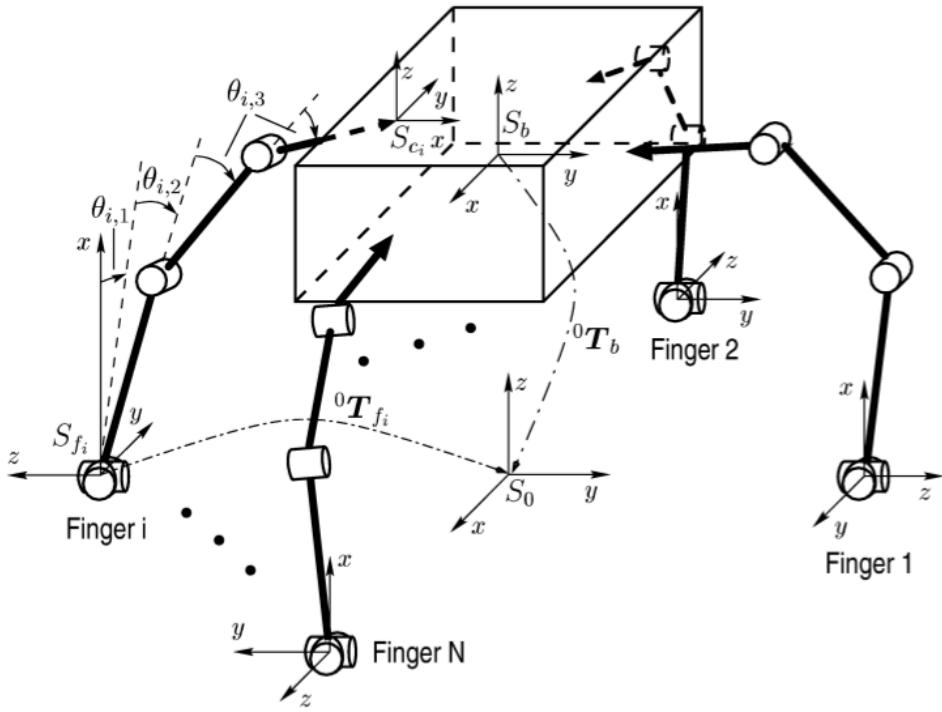
και τελικά με $\tau_{ext} = 0$,

$$\dot{V} = \frac{1}{2}\dot{e}^T (\dot{M} - 2C)\dot{e} - \dot{e}^T D\dot{e} \leq 0 \quad (3.32)$$

Ορίζοντας ως έξοδο $y = \dot{e}$ παρατηρούμε ότι το σύστημα με είσοδο τ και έξοδο y είναι παθητικό με V ως συνάρτηση συσσώρευσης. Από την invariance principle του LaSalle έχουμε για $\dot{V} = 0 \Rightarrow \dot{e} = 0 \Rightarrow \ddot{e} = 0 \Rightarrow \phi_p(e(t)) = 0 \Rightarrow e(t) = 0$.

3.2 Στατική Ανάλυση Λαβής

Στο κεφάλαιο αυτό διατυπώνονται οι σχέσεις του στατικού μοντέλου λαβής σημειακών επαφών με τριβή. Αρχικά ορίζεται η Μήτρα Μετασχηματισμού Λαβής (Grasp Force Transformation Matrix) μέσα από τη διατύπωση των σχέσεων στατικής ισορροπίας. Στη συνέχεια δίνεται ο ορισμός του φαινομένου της μηχανικής ακαμψίας (stiffness effect) και κατ' επέκταση συνθήκες ευστάθειας για τη ρομποτική λαβή.



Σχήμα 3.3: Σχηματικό Διάγραμμα Αντικειμένου υπό Λαβή Ν-Δακτύλων Σημειακών Επαφών με Τριβή [16]

3.2.1 Στατική Ισορροπία & Μήτρα Μετασχηματισμού Δυνάμεων Ρομποτικής Λαβής

Οι σχέσεις για τη στατική ισορροπία ως προς τις δυνάμεις και τις ροπές είναι,

$$\sum_{i=1}^N f_{ci}^o + f_{ext} = 0 \quad (3.33)$$

$$\sum_{i=1}^N (r_{ci} \times f_{ci}^o) + n_{ext} = 0 \quad (3.34)$$

όπου f_{ci} οι δυνάμεις που ασκούνται από το ακροδάκτυλο i , f_{ext} , n_{ext} συνολική εξωτερικά ασκούμενη δύναμη και ροπή αντίστοιχα, r_{ci} το διάνυσμα θέσης του ακροδακτύλου. Όλα αυτά τα μεγέθη είναι εκφρασμένα ως προς το τοπικό πλαίσιο του αντικειμένου. Γράφοντας τις σχέσεις αυτές σε μορφή μητρώων έχουμε,

$$\begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & \dots & I_{3 \times 3} \\ [r_{c1} \times] & [r_{c2} \times] & \dots & [r_{cN} \times] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{c1} \\ f_{c2} \\ \vdots \\ f_{cN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{ext} \\ -f_{ext} \\ \vdots \\ -n_{ext} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Τελικά συνοψίζουμε τη σχέση στη ακόλουθη μορφή, θεωρώντας την έκφραση των δυνάμεων στα ακροδάκτυλα ως προς το αντίστοιχο πλαίσιο στο οποίο είναι εκφρα-

συμένα,

$$f_c^o = \begin{bmatrix} R_o^T & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & R_o^T \end{bmatrix} f_c \quad (3.36)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} R_o^T & R_o^T & \dots & R_o^T \\ [r_{c1} \times] R_o^T & [r_{c2} \times] R_o^T & \dots & [r_{cN} \times] R_o^T \end{bmatrix}}_G \underbrace{\begin{bmatrix} f_{c1} \\ f_{c2} \\ \vdots \\ f_{cN} \end{bmatrix}}_{f_c} = \underbrace{\begin{bmatrix} -f_{ext} \\ -n_{ext} \end{bmatrix}}_{F_{ext}} \quad (3.37)$$

$$F_{ext} = Gf_c \quad (3.38)$$

όπου $G \in \mathbb{R}^{6 \times 3N}$ ο πίνακας μετασχηματισμού δυνάμεων της ρομποτικής λαβής.

Η γενική λύση βάση των ελάχιστων τετραγώνων $\min\|F_{ext} - Gf_c\|$ είναι,

$$f_c = [G]^+ F_{ext} + (\mathbf{I} - [G]^+ G) \xi \quad (3.39)$$

όπου $[G]^+ = G(GG^T)^{-1}$ η ψευδοαντίστροφη μήτρα Moore και $\xi \in \mathbb{R}^{4N}$ τυχαίο διάνυσμα.

Ο απ' ευθείας έλεγχος δύναμης βάσει της σχέσης (3.39) αποφεύγεται συνήθως καθώς οι απ' ευθείας μετρήσεις των δυνάμεων στα ακροδάκτυλα είναι πρακτικά δύσκολες και όταν αυτές συμβαίνουν τα λαμβανόμενα σήματα είναι θορυβώδη και γενικά δύσκολα στην επεξεργασία [21, 18, 16, 19, 14, 13]. Για αυτό το λόγο προτιμούνται σχήματα έμμεσου ελέγχου της δύναμης συνήθως εκφρασμένα μέσω τεχνικών ελέγχου μηχανικής εμπέδησης (impedance) ή της πιο απλοποιημένης μορφής του ελέγχου μηχανικής ακαμψίας (stiffness).

Το δυικό ανάλογο της σχέσης (3.38) μας δίνει τη σχέση μεταξύ των ταχυτήτων του αντικειμένου και των ακροδακτύλων,

$$\dot{x} = G\dot{x}_o \quad (3.40)$$

με τη πλήρη περιγραφή των κινηματικών περιορισμών για τη ρομποτική λαβή–αντικέιμενο να δίνεται,

$$J_H(\theta)\dot{\theta} = G\dot{x}_o \quad (3.41)$$

3.3 Έλεγχος Μηχανικής Εμπέδισης σε Επίπεδο Αντικειμένου Βάσει Παθητικότητας

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται μέθοδος ελέγχου ρομποτικής λαβής σε επίπεδο αντικειμένου βάσει παθητικότητας (Passivity Based Object Level Impedance Control), η οποία έχει αρκετά προταθεί από τους Wimboeck, Ott, Hirzinger για τον έλεγχο της εμπέδισης του αντικειμένου υπό χειρισμό με τη χρήση εικονικού πλαισίου. Το

σχήμα αυτό αναφέρεται ως Εγγενώς Παθητικός Έλεγχος (Intrinsically Passive Control – IPC).

Επιπρόσθετα παρουσιάζουμε τεχνική αντιμετώπισης των πλεοναζόντων βαθμών ελευθερίας μέσω ορισμού κατάλληλης υποεργασίας στο μηδενικό χώρο του ρομποτικού χεριού.

Για τη μοντελοποίηση της δυναμικής αλλά και το σχεδιασμό του σχήματος ελέγχου λαμβάνονται υπόψη οι κάτωθι παραδοχές ως προς τα χαρακτηριστικά ρομποτικής λαβής και χειρισμού αντικειμένου,

- Επαφές σημειακές με τριβή
- Οι εσωτερικές δυνάμεις επιλέγονται έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί του μοντέλου τριβής.
- Για την επίτρεψη κίνησης του αντικειμένου σε 6D οι επαφές μεταξύ αντικειμένου και ρομποτικού χεριού περιορίζονται στα ακροδάκτυλα

3.3.1 Εικονικό Πλαίσιο Αντικειμένου – Virtual Object Frame

Για τον έλεγχο των ακροδακτύλων ορίζεται εικονικό πλαίσιο το οποίο βρίσκεται στο κέντρο των σημείων επαφής,

$$x_o(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^N x_i(\theta)}{N} \quad (3.42)$$

όπου $x_i(\theta) \in \mathbb{R}$ αναπαριστούν την καρτεσιανή θέση των ακροδακτύλων για το δάκτυλο i ως προς το πλαίσιο βάσης (πλαίσιο 0). Ο προσανατολισμός $R_o = [r_{1,o}, r_{2,o}, r_{3,o}]$ του εικονικού πλαισίου ορίζεται επίσης βάση των καρτεσιανών θέσεων των ακροδακτύλων. Για $N = 4$ δάκτυλα το μοναδιαίο διάνυσμα $r_{1,o}$ ορίζεται παράλληλο με το επίπεδο που σχηματίζουν οι άξονες που ορίζουν τα δάκτυλα $i = 1, 3$ και $i = 2, 4$ αντίστοιχα.

$$\tilde{r}_{1,o} = \frac{x_1 - x_3}{\|x_1 - x_3\|} + \frac{x_2 - x_4}{\|x_2 - x_4\|}, \quad r_{1,o} = \frac{\tilde{r}_{1,o}}{\|\tilde{r}_{1,o}\|} \quad (3.43)$$

Το μοναδιαίο διάνυσμα $r_{3,o}$ ορίζεται κάθετο σε αυτό το επίπεδο, και τέλος το $r_{2,o}$ ορίζεται έτσι ώστε το πλαίσιο του προσανατολισμού να ικανοποιεί το δεξιόστροφο κανόνα, $R_o \in SO(3)$

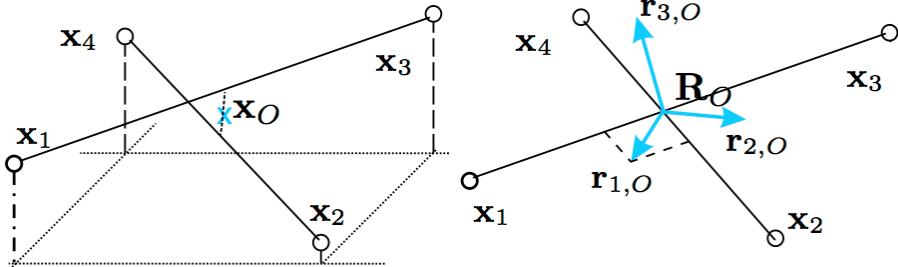
$$\tilde{r}_{3,o} = [(x_1 - x_3) \times] (x_2 - x_4), \quad r_{3,o} = \frac{\tilde{r}_{3,o}}{\|\tilde{r}_{3,o}\|} \quad (3.44)$$

$$r_{2,o} = [r_{3,o} \times] r_{1,o} \quad (3.45)$$

Τελικά το εικονικό πλαίσιο του αντικειμένου H_o ορίζεται,

$$H_o = [R_o, x_o] \in SE(3) \quad (3.46)$$

Η αναπαράσταση αυτή παρουσιάζει ιδιομορφίες στη περίπτωση που για τα ακροδάκτυλα ισχύει $x_j - x_{j+2} = 0$ ή $(x_1 - x_3) \parallel (x_2 - x_4)$. Αυτές οι ιδιομορφίες δεν προκαλούνται για κοινά κυρτά αντικείμενα με γεωμετρίες όπως αυτές του ορθογώνιου παραλληλογράμμου, κυλινδρικές ή σφαιρικές.



Σχήμα 3.4: Κατασκευή Εικονικού Πλαισίου [27]

Εφόσον έχει οριστεί το εικονικό πλαίσιο κεντρικό σημείο στην όλη προσπάθεια δόμησης κατάλληλου σχήματος ελέγχου αποτελεί η συσχέτιση αυτού με το πραγματικό πλαίσιο του χειριζόμενου αντικειμένου.

Θεωρείται λοιπόν ότι το εικονικό πλαίσιο είναι συσχετιζόμενο κινηματικά με το πλαίσιο του αντικειμένου αν και μόνο αν, τα σημεία επαφής αντικειμένου δακτύλων παραπέντε σταθερά καθ' όλο το στάδιο του χειρισμού παραβλέποντας τυχών φαινόμενα κύλισης ή ολίσθησης.

3.3.2 Νόμος ελέγχου στο επίπεδο του αντικειμένου

Το σήμα ελέγχου που είναι η ροπή στις αρθρώσεις σχηματίζεται ως εξής,

$$\tau = -D(\theta)\dot{\theta} - \frac{\partial V_d}{\partial \theta}(\theta) + g(\theta) \quad (3.47)$$

όπου $D(\theta)$ θετικά ορισμένος πίνακας δυναμικής απόσβεσης (damping). Ορίζουμε συνάρτηση επιθυμητής δυναμικής ενέργειας, η οποία περιλαμβάνει τους ακόλουθους υπερτιθέμενους όρους,

$$V_d(\theta) = V_{o,t}(\theta) + V_{o,r}(\theta) + V_{Conn}(\theta) \quad (3.48)$$

όπου από αυτούς τους όρους των επιμέρους δυναμικών $V_{o,t}(\theta)$, $V_{o,r}(\theta)$, $V_{o,Conn}(\theta)$ μέσω μερικής παραγώγισης ως προς τις γωνίες των αρθρώσεων θ προκύπτει αντίστοιχα η ακαμψία μεταφορικής κίνησης, η ακαμψία περιστροφικής κίνησης καθώς και η ακαμψία μεταξύ ακροδακτύλων και κέντρου του εικονικού πλαισίου.

Από τη θεωρία ελέγχου βασιζόμενη στη παθητικότητα (passivity based control) αν επιλέξουμε τη συνάρτηση $V_d(\theta)$ θετικά ημιορισμένη εξασφαλίζεται η παθητικότητα

και για το σύστημα κλειστού βρόχου. Αν μάλιστα είναι θετικά ορισμένη τότε εξασφαλίζεται και η ευστάθεια. Για ασυμπτωτική ευστάθεια μπορεί να γίνει αναφορά στο θεώρημα του LaSalle.

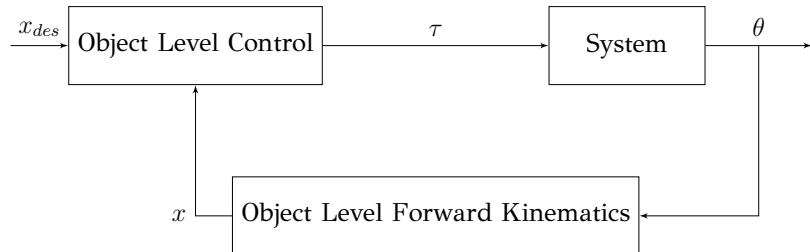
Οι συναρτήσεις δυναμικού σχεδιάζονται ως εξής,

$$V_{o,t}(\theta) = \frac{1}{2}(x_o - x_{o,des})^T R_o K_{o,t} R_o^T (x_o - x_{o,des}) \quad (3.49)$$

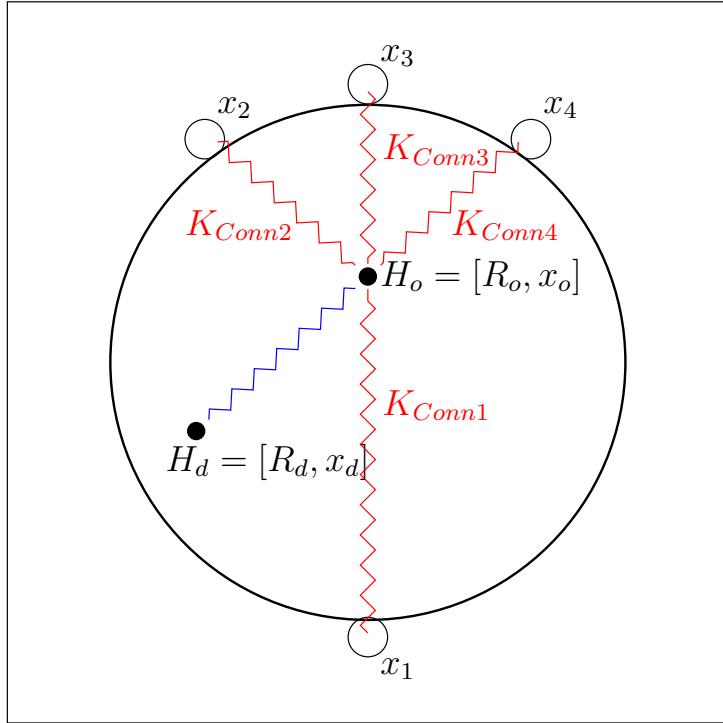
$$V_{o,r}(\theta) = 2\epsilon_b^T K_{o,r} \epsilon_b \quad (3.50)$$

$$V_{Conn}(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N K_{Conn,i} [||\Delta x_i|| - l_{i,des}]^2 \quad (3.51)$$

όπου $x_{o,des}$, ϵ_b η επιθυμητή θέση και το λάθος της περιστροφής του εικονικού πλαισίου αναπαριστώμενο από το διανυσματικό κομμάτι του μοναδιαίου quaternion το οποίο προκύπτει από το γινόμενο $R_o^T R_{o,des}$ με $R_{o,des}$ την επιθυμητή μήτρα περιστροφής. $K_{o,t}$, $K_{o,r}$ είναι οι μήτρες ακαμψίας ως προς τη γραμμική μετατόπιση και τη περιστροφή ως προς το πλαίσιο του αντικειμένου και $K_{Conn} = diag\{K_{Conn,1}, K_{Conn,2}, \dots, K_{Conn,N}\}$ η μήτρα ακαμψίας των εικονικών ελατηρίων σύνδεσης των ακροδακτύλων με το κέντρο του πλαισίου. Επιλέγονται και οι τρεις μήτρες θετικά ορισμένες. Οι ακαμψίες όπως προκύπτουν από τα δυναμικά (3.49)–(3.51) απεικονίζονται στο σχήμα 3.6



Σχήμα 3.5: Εγγενώς Παθητικό Σχήμα Ελέγχου [29]



Σχήμα 3.6: Τα ακροδάκτυλα $x = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T$ συγκρατούν σφαιρικό–κυλινδρικό αντικείμενο με τα εικονικά ελατήρια που διαμορφώνουν τον έλεγχο όπως περιγράφεται στη σχέση (3.48)

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε αναλυτικά τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζονται οι μερικές παράγωγοι των επιμέρους δυναμικών ως προς τη γωνία των αρθρώσεων θ για την εισαγωγή τους στο σχήμα ελέγχου ξεκινώντας από το δυναμικό της ακαμψίας της περιστροφικής κίνησης.

3.3.3 Περιστροφική Ακαμψία

Η σχέση της παραγώγου αυτής με τη μερική παράγωγο $\frac{\partial V_{o,r}(\theta)}{\partial \theta}$ είναι η ακόλουθη,

$$\dot{V}_{o,r}(\theta) = \dot{\theta}^T \frac{\partial V_{o,r}(\theta)}{\partial \theta}. \quad (3.52)$$

Παραγγιση στο χρόνο του δυναμικού $V_{o,r}$ όπως ορίστηκε στην (3.50) δίνει,

$$\dot{V}_{o,r}(\theta) = 4\epsilon_b^T K_{o,r} \dot{\epsilon}_b. \quad (3.53)$$

Από το ρυθμό μεταβολής του κουατέρνιου $\dot{\epsilon}_b$ μπορούμε να πάρουμε τη σχέση που δίνει την αντίστοιχη γωνιακή ταχύτητα ω_o του πλαισίου. Η σχέση που επιτελεί αυτή την διαφορική αντιστοίχηση είναι η ακόλουθη,

$$\dot{\epsilon}_b = J_{\omega\epsilon}(\theta) \omega_o \quad (3.54)$$

Η μετατροπή από ένα πίνακα στροφής R στο αντίστοιχο quaternion $\epsilon = [\epsilon_0 \ (\epsilon_{b1} \ \epsilon_{b3} \ \epsilon_{b3})]$ δεν είναι μονοσήμαντη και γίνεται χρήση ειδικού αλγορίθμου επιλογής της κατάλληλης σχέσης κάθε φορά ανάλογα με τις τιμές των στοιχείων του πίνακα στροφής [33]. Η Ιακωβιανή μήτρα $J_{\omega\epsilon}(\theta)$ είναι [33],

$$J_{\omega\epsilon}(\theta) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \epsilon_0 & -\epsilon_3 & \epsilon_2 \\ \epsilon_3 & \epsilon_0 & -\epsilon_1 \\ -\epsilon_2 & \epsilon_1 & \epsilon_0 \end{bmatrix}^T \quad (3.55)$$

Για τη γωνιακή ταχύτητα του πλαισίου ισχύει η ακόλουθη σχέση,

$$[\omega_o \times] = R_o^T \dot{R}_o \quad (3.56)$$

Αναπτύσουμε το δεύτερο όρο με το κανόνα της αλυσίδας (chain rule) έτσι ώστε να προκύψουν διακριτά οι διαφορικοί κινηματικοί συσχετισμοί μεταξύ εικονικού πλαισίου – ακροδακτύλων και ακροδακτύλων – αρθρώσεων,

$$\dot{R}_o = \frac{\partial R_o}{\partial x^T} \frac{\partial x}{\partial \theta^T} \dot{\theta} \quad (3.57)$$

ο όρος $\frac{\partial R_o}{\partial x^T}$ μπορεί εύκολα να υπολογισθεί παραγωγίζοντας τις (3.43) (3.44) (3.45) μερικώς ως προς το διάνυσμα x^T . Ο όρος $\frac{\partial x}{\partial \theta^T}$ είναι η Ιακωβιανή μήτρα του χεριού $J_H = \frac{\partial x}{\partial \theta^T}$ (3.10). Τελικά έχουμε

$$\omega_o = J_{o,r}(\theta) \dot{\theta}. \quad (3.58)$$

Με αντικατάσταση στην (3.54) και στη συνέχεια στην (3.53) έχουμε

$$\dot{V}_{o,r}(\theta) = \dot{\theta}^T J_{o,r}^T 4 J_{\omega\epsilon}^T K_{o,r} \epsilon_b \quad (3.59)$$

και από (3.52) και (3.59) προκύπτει τελικά,

$$\frac{\partial V_{o,r}(\theta)}{\partial \theta} = J_{o,r}^T 4 J_{\omega\epsilon}^T K_{o,r} \epsilon_b \quad (3.60)$$

3.3.4 Ακαμψία Γραμμικής Μετατόπισης

Αυτή τη φορά παραγωγίζουμε τον όρο δυναμικού της γραμμικής μετατόπισης (3.49) ως προς το χρόνο και έχουμε,

$$\dot{V}_{o,t}(\theta) = (x_o - x_{o,des})^T R_o K_{o,t} \frac{d}{dt} \{ R_o^T (x_o - x_{o,des}) \} \quad (3.61)$$

Αναπτύσουμε τον όρο $\frac{d}{dt} \{ R_o^T (x_o - x_{o,des}) \}$,

$$\frac{d}{dt} \{ R_o^T (x_o - x_{o,des}) \} = \dot{R}_o^T (x_o - x_{o,des}) + R_o^T \frac{\partial x_o}{\partial x^T} \frac{\partial x^T}{\partial \theta^T} \dot{\theta} \quad (3.62)$$

από (3.56)(3.58) σε συνδιασμό με τις ιδιότητες των συμμετρικών πινάκων στροφής $[v \times]^T = -[v \times]$, $[v \times]w = -[w \times]v$ βγαίνει κοινός παράγοντας η γωνιακή ταχύτητα των αρθρώσεων $\dot{\theta}$

$$\frac{d}{dt}\{R_o^T(x_o - x_{o,des})\} = [[(R_o^T(x_o - x_{o,des})) \times] J_{o,r} + R_o^T \frac{\partial x_o}{\partial x^T} \frac{\partial x^T}{\partial \theta^T}] \dot{\theta} \quad (3.63)$$

Η μερική παράγωγος της θέσης του πλαισίου ως προς τις θέσεις των ακροδακτύλων από την (3.42) $\frac{\partial x_o}{\partial x^T} = \frac{1}{N} I_{3N \times 3}$ και $\frac{\partial x^T}{\partial \theta^T}$ είναι η ιακωβιανή μήτρα του χεριού $J_H = \frac{\partial x}{\partial \theta^T}$. Τελικά λοιπόν η παράγωγος του δυναμικού της γραμμικής μετατόπισης είναι,

$$\dot{V}_{o,t}(\theta) = \dot{\theta}^T J_{o,t}^T K_{o,t} R_o^T(x_o - x_{o,des}) \quad (3.64)$$

απ' όπου προκύπτει η μερική παράγωγος που είναι και ο όρος που θα προστεθεί στο σήμα ελέγχου της ροπής στις αρθρώσεις είναι,

$$\frac{\partial V_{o,t}(\theta)}{\partial \theta} = J_{o,t}^T K_{o,t} R_o^T(x_o - x_{o,des}) \quad (3.65)$$

με

$$J_{o,t} = [\frac{1}{N} J_H^T I_{3N \times 3} R_o - J_{o,r}^T ((R_o^T(x_o - x_{o,des})) \times)]^T \quad (3.66)$$

Αθροίζοντας τις (3.65) (3.60) ουσιαστικά διαμορφώνεται στο χώρο ένα ελατήριο 6 διαστάσεων, ως προς τις γραμμικές και περιστροφικές μετατοπίσεις, συσχετιζόμενο με το αντικείμενο.

3.3.5 Συνδετική Ακαμψία

Για τον έλεγχο των εσωτερικών δυνάμεων (grasping forces) ορίζονται εικονικά ελατήρια μεταξύ ακροδακτύλων x_i και της θέσης x_o του εικονικού πλαισίου με ρυθμιζόμενο το σημείο ισορροπίας αυτών $l_{i,des}$ έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί των τριβών (βλ σχήμα 3.48).

Το εικονικό δυναμικό για τον όρο της συνδετικής ακαμψίας διαμορφώνεται σφαιρικά συμμετρικά ως προς τα ακροδάκτυλα,

$$V_{conn}(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N K_{conn,i} [||\Delta x_i|| - l_{i,des}]^2 \quad (3.67)$$

όπου $\Delta x_i = x_i - x_o$ και $K_{conn,i}$ η αντίστοιχη ακαμψία επιλέγεται πάντα θετική. Παραγωγίζοντας μερικώς ως προς τη γωνιακή θέση των αρθρώσεων θ έχουμε,

$$\frac{\partial V_{Conn}(\theta)}{\partial \theta} = J_H^T \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial \Delta x_i^T}{\partial x} \frac{K_{conn,i} (||\Delta x_i|| - l_{i,des})}{||\Delta x_i||} \Delta x_i \right] \quad (3.68)$$

η μερική παράγωγος $\frac{\partial \Delta x_i^T}{\partial x}$ υπολογίζεται,

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Delta x_1^T}{\partial x} &= [(1 - \frac{1}{N})I_{3 \times 3} \quad (-\frac{1}{N})I_{3 \times 3} \quad \dots \quad (-\frac{1}{N})I_{3 \times 3}] \\ \frac{\partial \Delta x_2^T}{\partial x} &= [(-\frac{1}{N})I_{3 \times 3} \quad (1 - \frac{1}{N})I_{3 \times 3} \quad \dots \quad (-\frac{1}{N})I_{3 \times 3}] \\ &\vdots \\ \frac{\partial \Delta x_N^T}{\partial x} &= [(-\frac{1}{N})I_{3 \times 3} \quad (-\frac{1}{N})I_{3 \times 3} \quad \dots \quad (1 - \frac{1}{N})I_{3 \times 3}] \\ &\quad \begin{matrix} 1 & 2 & \dots & N \end{matrix}\end{aligned}\tag{3.69}$$

τελικά ο όρος της συνδετικής ακαμψίας γράφεται πιο κομψά σε μορφή πινάκων ως εξής,

$$\frac{\partial V_{Conn}(\theta)}{\partial \theta} = J_{conn}^T K_{Conn} \begin{bmatrix} ||\Delta x_1|| - l_{1,des} \\ \vdots \\ ||\Delta x_N|| - l_{N,des} \end{bmatrix}\tag{3.70}$$

με,

$$J_{Conn}^T = J_H^T \left[\frac{\partial \Delta x_1^T}{\partial x} \frac{\Delta x_1}{||\Delta x_1||} \quad \dots \quad \frac{\partial \Delta x_N^T}{\partial x} \frac{\Delta x_N}{||\Delta x_N||} \right]\tag{3.71}$$

και,

$$K_{Conn} = blockdiag\{K_{Conn,1}, \dots, K_{Conn,N}\}\tag{3.72}$$

3.3.6 Έλεγχος Πλεοναζόντων Βαθμών Ελευθερίας

Βάσει του μέχρι τώρα σχεδιασμού του ελεγκτή ουσιαστικά διατυπώνεται πλήρης ορισμός μόνο για τις θέσεις των ακροδακτύλων $x_i(\theta_i)$. Δεδομένου ότι η θέση x_i είναι προφανώς διάνυσμα $\in \mathbb{R}^3$ και οι βαθμοί ελευθερίας του κάθε δακτύλου είναι 4 η ρομποτική διάταξη είναι κινηματικά πλεονασματική κατά 1 βαθμό ελευθερίας.

Εκμεταλευόμενοι αυτό το γεγονός ορίζουμε υποεργασία στο μηδενικό χώρο (Null Space) του ρομποτικού δακτύλου έτσι ώστε να εισάγουμε μία σύζευξη ανθρωπορφικού χαρακτήρα μεταξύ των δύο τελευταίων αρθρώσεων θ_{i3} και θ_{i4} με στόχο την εξασφάλιση κάθετης προβολής του ακροδακτύλου στην επιφάνεια του αντικειμένου μεγιστοποιώντας τον κώνο τριβής.

Ο επιθυμητός έλεγχος διαμορφώνεται για πλεονασματικές διατάξεις με τον ακόλουθο τρόπο,

$$\tau_d = \tau_{d,cart} + N(\theta)\tau_{d,N}\tag{3.73}$$

όπου $\tau_{d,cart}$, ο επιθυμητός έλεγχος στο καρτεσιανό επίπεδο των ακροδακτύλων όπως ουσιαστικά τον ορίσαμε στις αμέσως προηγούμενες ενότητες διά της ακαμψίας του εικονικού πλαισίου, $N(\theta)$ ο πίνακας προβολής στο μηδενικό χώρο της ρομποτικής λαβής και τέλος,

$$\tau_{d,N} = -K_N(\theta - \theta_N) - D_N \dot{\theta}\tag{3.74}$$

ο νόμος ελέγχου PD της επιθυμητής υποεργασίας.

Ο πίνακας προβολής μπορεί να προκύψει στατικά,

$$N(\theta) = V(\theta)^T V(\theta) \quad (3.75)$$

όπου για τον πίνακα $V(\theta)$ ισχύει,

$$V(\theta) J^T(\theta) = 0 \quad (3.76)$$

Ο $V(\theta)$ αποτελεί ουσιαστικά έναν πίνακα μηδενισμού της Ιακωβιανής μήτρας και μπορεί να υπολογιστεί πρακτικά με ανάλυση της Ιακωβιανής σε ιδιάζουσες μορφές. Πρακτικά προκύπτει ότι αυτού του τύπου στατική ανάλυση για τη προβολή στο μηδενικό χώρο της Ιακωβιανής επηρεάζει τελικά το καρτεσιανό χώρο του στοιχείου δράσης [34]. Προκειμένου να λάβουμε δυναμικά συνεπή συμπεριφορά μεταφέρουμε αρχικά τη δυναμική εξίσωση (3.17) του ρομποτικού χεριού από το χώρο των αρθρώσεων στο χώρο των ακροδακτύλων. Για τη ταχύτητα των ακροδακτύλων καθώς και για την επιτάχυνση ισχύει,

$$\dot{x} = J(\theta)\dot{q} \quad (3.77)$$

$$\ddot{x} = J(\theta)\ddot{q} + \dot{J}(\theta)\dot{q} \quad (3.78)$$

Με αντικατάσταση στην (3.17) έχουμε,

$$\ddot{x} - \dot{J}(\theta)\dot{\theta} + J(\theta)M^{-1}(\theta)(C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta)) = J(\theta)M^{-1}(\theta)\tau_d \quad (3.79)$$

έτσι λοιπόν προκύπτει εύλογα ότι για την εξασφάλιση δυναμικά συνεπούς ελέγχου στο μηδενικό χώρο ο πίνακας προβολής πρέπει να εξασφαλίζει,

$$J(\theta)M(\theta)^{-1}N(\theta) = 0 \quad (3.80)$$

τελικά η λύση που χρησιμοποιούμε για το δυναμικό πίνακα προβολής στο μηδενικό χώρο [35],

$$N(\theta) = (I - J^T(\theta)\Lambda(\theta)J(\theta)M^{-1}(\theta)) \quad (3.81)$$

όπου,

$$\Lambda(\theta) = (J(\theta)M^{-1}(\theta)J(\theta)^T)^{-1} \quad (3.82)$$

Ο νόμος ελέγχου στο μηδενικό χώρο σχεδιάζεται, όπως προείπαμε για τη σύζευξη των δύο τελευταίων βαθμών ελευθερίας, με τον ακόλουθο τρόπο,

$$\tau_{d,N} = -K_{Null}(\theta_{i3} - \alpha\theta_{i4}) - D_{Null}\dot{\theta} \quad (3.83)$$

όπου $\alpha \in [0, 1]$ ο συντελεστής με τον οποίο μπορούμε να ρυθμίσουμε τη σχέση της σύζευξης μεταξύ των θ_{i3} και θ_{i4} .

3.3.7 Σχεδιασμός Όρου Απόσβεσης

Προκειμένου να καθοριστεί και η μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος σχεδιάζεται ο δυναμικός όρος απόσβεσης $D(\theta)$ του ελεγκτή βάση της ακόλουθης μεθοδολογίας [34, 36, 27].

Αρχικά βάσει των διαφορικών αντιστοιχίσεων μεταξύ των γωνιακών ταχυτήτων των αρθρώσεων $\dot{\theta}$ και των ταχυτήτων των μεταβλητών στο χώρο εργασίας \dot{x}_o , ω_o , $\|\Delta\dot{x}\|$ όπως περιγράφονται από τις σχέσεις (3.66) (3.58) (3.71) αντίστοιχα, μπορούν να ομαδοποιηθούν αυτοί οι διαφορικοί συσχετισμοί με τον ακόλουθο τρόπο,

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{x}_o \\ \omega_{o,0} \\ \|\Delta\dot{x}\| \end{bmatrix}}_{\dot{\bar{x}}} = \underbrace{\begin{bmatrix} J_{o,t} \\ J_{o,r} \\ J_{conn} \end{bmatrix}}_{J_{tot}} \dot{\theta} \quad (3.84)$$

ορίζοντας το $\dot{\bar{x}} \in \mathbb{R}^{6+N}$ το γενικευμένο διάνυσμα διαφορικών συντεταγμένων και J_{tot} η συμπτυγμένη Ιακωβιανή μήτρα.

Στις εξισώσεις, (3.77) (3.78) (3.79), βλέπουμε το μετασχηματισμό του δυναμικού μοντέλου του χεριού από το χώρο των γωνιών των αρθρώσεων στον καρτεσιανό χώρο μεταβλητών θέσης. Στη προκειμένη περίπτωση θεωρώντας το \bar{x} ως τις γενικευμένες μεταβλητές θέσης του συστήματος της ρομποτικής λαβής μετασχηματίζουμε αντίστοιχα και έχουμε,

$$\ddot{\bar{x}} - J_{tot}(\theta)\dot{\theta} + J_{tot}(\theta)M^{-1}(\theta)(C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta)) = J_{tot}(\theta)M^{-1}(\theta)\tau \quad (3.85)$$

Με τον νόμο ελέγχου όπως τον έχουμε ορίσει για το σύστημα βάσει των σχέσεων (3.47) (3.60) (3.71) έχουμε,

$$\ddot{\bar{x}} - J_{tot}(\theta)\dot{\theta} + J_{tot}(\theta)M^{-1}(\theta)(C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta)) = J_{tot}(\theta)M^{-1}(\theta)(-D(\theta)\dot{\theta} - \frac{\partial V_d}{\partial \theta}(\theta) + g(\theta)) \quad (3.86)$$

και ορίζοντας την ακόλουθη σχέση μεταξύ της απόσβεσης του χώρου των αρθρώσεων στο χώρο των γενικευμένων συντεταγμένων του χώρου εργασίας,

$$D(\theta) = J_{tot}^T D_{\bar{x}}(\theta) J_{tot} \quad (3.87)$$

έχουμε τελικά,

$$\ddot{\bar{x}} - J_{tot}(\theta)\dot{\theta} + J_{tot}(\theta)M^{-1}(\theta)(C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}) = J_{tot}(\theta)M^{-1} J_{tot}(\theta)(-D_{\bar{x}}\dot{\bar{x}} - F_{\bar{x}}) \quad (3.88)$$

όπου $F_{\bar{x}} = [f_o \ m_o \ f_{Conn}]^T = K_{\bar{x}}(\bar{x} - \bar{x}_{des}) = K_{\bar{x}}e_{\bar{x},o}$ με $K_{\bar{x}} = blockdiag\{K_{o,t} \ K_{o,r} \ K_{Conn}\}$.

Για λόγους απλότητας λαμβάνονται υπ' όψη μόνο τα γνήσια αδρανειοκά φαινόμενα 2ης τάξης για το σχεδιασμό του δυναμικού πίνακα απόσβεσης, παραλείποντας

δηλαδή τους όρους Coriolis οι οποίοι περιλαμβάνουν τα γινόμενα μεταξύ γωνιακών ταχυτήτων. Η προηγούμενη σχέση (3.88) απλοποιείται ακολούθως,

$$M_{H,\bar{x}}(\theta)\ddot{\bar{x}} = -D_{\bar{x}}\dot{\bar{x}} - F_{\bar{x}} \quad (3.89)$$

όπου,

$$M_{H,\bar{x}}(\theta) = (J_{tot}M(\theta)^{-1}J_{tot}^T)^{-1} \quad (3.90)$$

Σε αυτό το σημείο μπορούμε να εισάγουμε και τη δυναμική επίδραση του αντικειμένου, $F_o = M_o[\ddot{x}_o \ \dot{\omega}_o \ O_{N \times 6}]^T$ (θεωρούμε ότι η βαρυτική δύναμη του αντικειμένου αντισταθμίζεται όπως εξηγούμε αναλυτικά στην επόμενη ενότητα), ως εξωτερική δύναμη, οπότε και έχουμε,

$$M_{H,\bar{x}}(\theta)\ddot{\bar{x}} = -D_{\bar{x}}\dot{\bar{x}} - F_{\bar{x}} - F_o \quad (3.91)$$

και τελικά,

$$M_{\bar{x}}(\theta)\ddot{\bar{x}} = -D_{\bar{x}}\dot{\bar{x}} - F_{\bar{x}} \quad (3.92)$$

όπου,

$$M_{\bar{x}}(\theta) = M_{H,\bar{x}}(\theta) + \begin{bmatrix} I_{6 \times 6} \\ 0_{N \times 6} \end{bmatrix} M_o[I_{6 \times 6}, 0_{6 \times N}] \quad (3.93)$$

Η δυναμική του λάθους παρακολούθησης τροχιάς προκύπτει βάσει της (3.92) για μηδενικές εξωτερικές δυνάμεις.

$$M_H(\theta)e_{\bar{x},o}^{\ddot{\cdot}} + D_{\bar{x}}e_{\bar{x},o}^{\dot{\cdot}} - K_{\bar{x}}e_{\bar{x},o} = 0 \quad (3.94)$$

Σε αυτό το σημείο ο όρος απόσβεσης επιλέγεται ως συνάρτηση της μήτρας αδράνειας $M_{\bar{x}}$ και του αναλογικού κέρδους $K_{\bar{x}}$ έτσι ώστε να προκύπτει δυναμικά συνεπής απόσβεση για όλες τις δυνατές θέσεις της διάταξης.

Βάσει της μεθοδολογίας της διπλής διαγωνοποίησης της θεωρίας της γραμμικής άλγεβρας προκύπτει ότι για ένα θετικά ορισμένο συμμετρικό πίνακα $n \times n$ $M_{\bar{x}}$ και για ένα πίνακα $K_{\bar{x}}$ συμμετρικό $n \times n$, υπάρχει πίνακας πλήρους τάξης Q έτσι ώστε, $M_{\bar{x}} = QQ^T$ και $K_{\bar{x}} = QK_{d0}Q^T$ για τυχαίο διαγώνιο πίνακα K_{d0} .

Επιλέγοντας τον πίνακα απόσβεσης,

$$D_{\bar{x}}(\theta) = 2Q(\theta)D_{\xi}K_{d0}^{1/2}Q(\theta)^T \quad (3.95)$$

η δυναμική του σφάλματος παρακολούθησης τροχιάς διαμορφώνεται,

$$Q(\theta)Q(\theta)e_{\bar{x},o}^{\ddot{\cdot}} + 2Q(\theta)D_{\xi}K_{\bar{x}}^{1/2}Q(\theta)^Te_{\bar{x},o}^{\dot{\cdot}} - Q(\theta)K_{\bar{x}}Q(\theta)^Te_{\bar{x},o} = 0 \quad (3.96)$$

Βγάζοντας κοινό παράγοντα τη μήτρα $Q(\theta)$ και ανάγοντας το σύστημα ως προς στο νέο χώρο γενικευμένων μεταβλητών $w = Q^T(\theta)e_{\bar{x},o}$ προκύπτει η επιθυμητή συμπεριφορά συστήματος,

$$\ddot{w} + 2D_{xi}K_{\bar{x}}^{1/2}\dot{w} + K_{\bar{x}}w = 0 \quad (3.97)$$

Προκύπτει ότι τα στοιχεία της διαγωνίου της μήτρας αδράνειας $M_{\bar{x}}$ είναι τα κυρίαρχα επηρεάζοντας ουσιαστικά τα αδρανειακά χαρακτηριστικά του συστήματος. Λαμβάνοντας υπόψη λοιπόν μόνο τα διαγώνια στοιχεία έχουμε,

$$M_{\bar{x}}(\theta) = (\text{blockdiag}\{\text{diag}\{J_{tot}M(\theta)^{-1}J_{tot}^T\}\})^{-1} + \begin{bmatrix} I_{6 \times 6} \\ 0_{N \times 6} \end{bmatrix} M_o [I_{6 \times 6}, 0_{6 \times N}] \quad (3.98)$$

Οπότε επιλέγεται ουσιαστικά, $Q(\theta) = \sqrt{M_{\bar{x}}}$.

Τελικά ο όρος της απόσβεσης που καθορίζει τη ματαβατική δυναμική συμπεριφορά του κλειστού συστήματος επιλέγεται ορίζοντας τα ακόλουθα διαγώνια στοιχεία

$$D_{\bar{x},ii}(\theta) = 2\xi_i \sqrt{M_{\bar{x},ii}(\theta)K_{\bar{x},ii}} \quad (3.99)$$

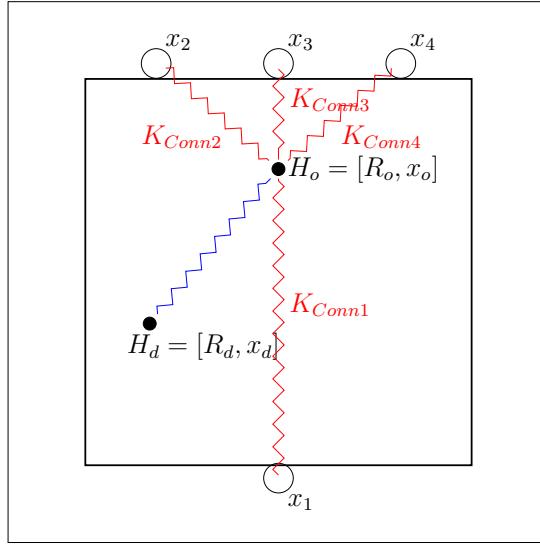
όπου $\xi_i \in [0, 1]$, ο επιθυμητός παράγωντας της απόσβεσης για την αντίστοιχη γενικευμένη μεταβλητή \bar{x}_i και $K_{\bar{x},ii}$ τα διαγώνια στοιχεία της μήτρας των κερδών $K_{\bar{x}} = \text{blockdiag}\{K_{o,t}, K_{o,r}, K_{Conn}\}$.

3.4 Επεκτάσεις–Τροποποιήσεις του Ελεγκτή Εμπέδησης στο επίπεδο του αντικειμένου

Ο έλεγχος των εσωτερικών δυνάμεων της λαβής με βάση το σχήμα συνδετικής ακαμψίας V_{Conn} όπως περιγράφηκε στη προηγούμενη υποενότητα δίνει ικανοποιητικές επιδόσεις και εύρωστη–ευσταθή λαβή [27, 28, 29]. Ιδιαίτερα εντυπωσιακό αν αναλογιστεί κανείς ότι ουσιαστικά το σύστημα είναι "τυφλό" καθώς δε βασίζεται σε κανενός είδους αισθητηριακή πληροφόρηση (force–sensor–tactile) με μόνη παραδοχή ότι τα αντικείμενα υπό χειρισμό θα προσεγγίζουν κανονικές τρισδιάστατες γεωμετρίες.

Η κριτική που μπορεί κανείς να ασκήσει στο συγκεκριμένο σχήμα ελέγχου των εσωτερικών δυνάμεων αποτελείται από δύο βασικούς άξονες,

- Ιδιαίτερα αυξημένες απαιτήσεις από τον κώνο τριβής της επαφής στη περίπτωση χειρισμού αντικειμένου με επίπεδες επιφάνειες όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.7 καθώς η κατεύθυνση του εικονικού ελατηρίου $V_{Conn,i}$ τείνει σε εφαπτομενικές ως προς την επιφάνεια του αντικειμένου διευθύνσεις.
- Πρακτικά δύσκολη η ρύθμιση των σημείων ισορροπίας $l_{i,des}$ για κάθε σύνδεση $V_{Conn,i}$ σε πραγματικό χρόνο για διαφορετικά αντικείμενα με αποτέλεσμα πιθανή παρουσία συνιστάμενης δύναμης στο αντικείμενο και κατά συνέπεια παρουσία τελικού σφάλματος θέσης.



Σχήμα 3.7: Μεγάλη εφαπτομενική δύναμη ως προς την επιφάνεια του αντικειμένου στα ακροδάκτυλα x_2, x_3 από τις σφαιρικά συμμετρικές αντίστοιχες ακαμψίες K_{Conn2}, K_{Conn4}

3.4.1 Έλεγχος Εσωτερικών Δυνάμεων βάση Χαρακτηριστικών Επιφανείας (IPC–IF)

Βασικό επιχείρημα στη προσέγγισή μας είναι ότι σε πραγματικές ολοκληρωμένες ρομποτικές εφαρμογές ρομποτικών χειριστών υπάρχουν τουλάχιστον ένα ή και περισσότερα αισθητηριακά σύνολα (Δυνάμεων, Αφής, Όρασης) ικανά να μας δώσουν πληροφορία για την επιφάνεια του αντικειμένου και συγκεκριμένα για τη κάθετη στην επιφάνεια κατεύθυνση.

Έτσι λοιπόν, προτείνουμε επέκταση του Εγγενώς Παθητικού Έλεγκτη (IPC) εφαρμόζοντας έλεγχο των εσωτερικών δυνάμεων με την άσκηση δυνάμεων από τα ακροδάκτυλα με κατεύθυνση κάθετη και εσωτερική ως προς το αντικείμενο και την επιφάνειά που ορίζουν οι επαφές (IPC–IF) (βλ. σχήμα 3.8).

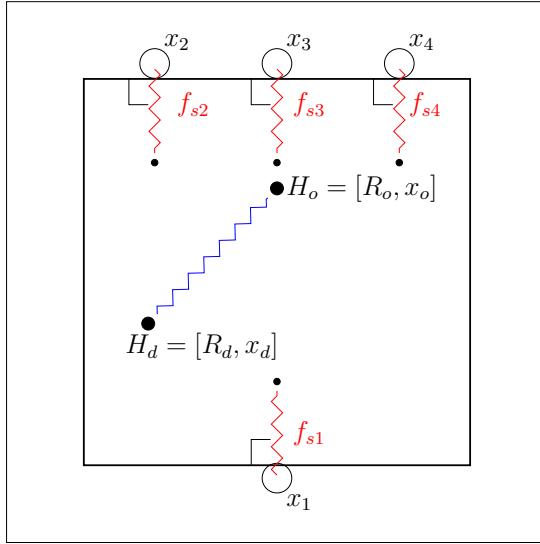
Για τη κατάλληλη ρύθμιση αυτών των εσωτερικών δυνάμεων προτείνουμε τη προβολή στο μηδενικό χώρο της μήτρας λαβής..

Κατά τη στατική ανάλυση (3.103) έχουμε,

$$\begin{bmatrix} R_o^T & R_o^T & R_o^T & R_o^T \\ [r_{c1} \times] R_o^T & [r_{c2} \times] R_o^T & [r_{c2} \times] R_o^T & [r_{cN} \times] R_o^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{s1} \\ F_{s2} \\ F_{s2} \\ F_{sN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_{ext} \\ -n_{ext} \end{bmatrix} \quad (3.100)$$

με το διάνυσμα r_{ci} να ορίζεται,

$$r_{ci} = \frac{x_i - x_o}{\|x_i - x_o\|} \quad (3.101)$$



Σχήμα 3.8: Εγγενώς Παθητικός Έλεγχος με Έλεγχο Εσωτερικών Δυνάμεων ασκώντας κάθετη πίεση στις επιφάνειες που ορίζουν οι επαφές (IPC–IF).

Οι εσωτερικές, κάθετες στο αντικείμενο δυνάμεις είναι,

$$F_s = n f_s \quad (3.102)$$

όπου $n = \text{blockdiag}\{n_1, n_2, n_3, n_4\} \in \mathbb{R}^{12 \times 4}$ τα μοναδιαία διανύσματα n_i κάθετα στην επιφάνεια της επαφής i αντίστοιχα. Άρα έχουμε από (??),

$$\underbrace{\begin{bmatrix} R_o^T n_1 & R_o^T n_2 & R_o^T n_3 & R_o^T n_4 \\ [r_{c1} \times] R_o^T n_1 & [r_{c2} \times] R_o^T n_2 & [r_{c3} \times] R_o^T n_3 & [r_{cN} \times] R_o^T n_4 \end{bmatrix}}_G \underbrace{\begin{bmatrix} f_{s1} \\ f_{s2} \\ f_{s3} \\ f_{s4} \end{bmatrix}}_{f_s} = \underbrace{\begin{bmatrix} -f_{ext} \\ -n_{ext} \end{bmatrix}}_{F_{ext}} \quad (3.103)$$

όπου $G \in \mathbb{R}^{6 \times 4}$ η προκύπτουσα μήτρα λαβής. Από (3.39) η προβολή στο μηδενικό χώρο της G θα είναι,

$$f_{s,Null} = \underbrace{(\mathbf{I} - [G]^+ G)}_{G_{s,Null}} f_s \quad (3.104)$$

Τελικά ο νόμος ελέγχου τ_N για τις εσωτερικές δυνάμεις διαμορφώνεται,

$$\tau_N(\theta) = J_H^T(\theta) (\mathbf{I} - [G]^+ G) f_s \quad (3.105)$$

3.4.2 Βαρυτική Αντιστάθμιση

Εφόσον έχουμε ορίσει τις ακαμψίες των γραμμικών και στροφικών μετατοπίσεων ορίζοντας τη δύναμη f_o και τη ροπή εμπέδησης m_o μπορούμε εύκολα να επεκτείνουμε την υπάρχουσα δομή για την εισαγωγή όρων αντιστάθμισης της βαρυτικής επίδρασης μέσω του βαρυτικού διανύσματος $G = [0, 0, mg]$. Η μεταφορική επίδραση της βαρύτητας ως προς το πλαίσιο θα είναι,

$$f_g = R_o^T G \quad (3.106)$$

και η ροπή που θα ασκεί,

$$m_{o,g} = [r_{COG} \times] R_o^T G \quad (3.107)$$

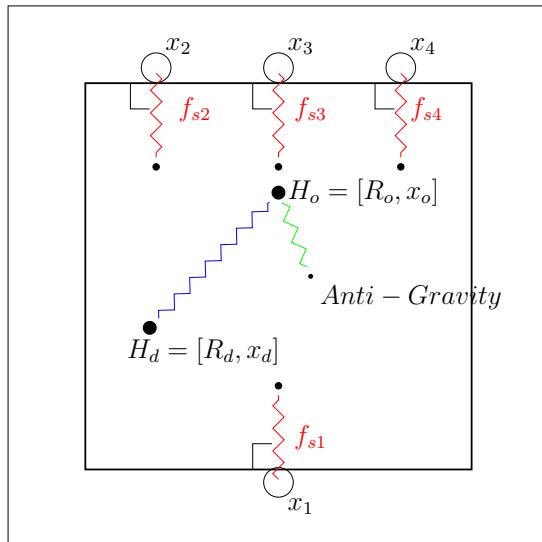
όπου r_{COG} , το διάνυσμα θέσης του κέντρου βάρους του αντικειμένου ως προς το πλαίσιο H_o .

Εισάγουμε του όρους αυτούς στις (3.60), (3.65) και έχουμε αντίστοιχα,

$$\frac{\partial V_{o,r}(\theta)}{\partial \theta} = J_{o,r}^T \underbrace{(4J_{\omega\epsilon}^T K_{o,r} \epsilon_b + m_{o,g})}_{m_o} \quad (3.108)$$

$$\frac{\partial V_{o,t}(\theta)}{\partial \theta} = J_{o,t}^T \underbrace{(K_{o,t} R_o^T (x_o - x_{o,des}) + f_{o,g})}_{f_o} \quad (3.109)$$

Η προσθήκη της βαρυτικής αντιστάθμισης απεικονίζεται γραφικά στο σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9: Έλεγχος Εσωτερικών Δυνάμεων με κάθετη πίεση στις επιφάνειες του αντικειμένου σε συνδυασμό με τους όρους βαρυτικής αντιστάθμισης.

Κεφάλαιο 4

Υλοποίηση & Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζουμε τη μεθοδολογία υλοποίησης και τα αποτελέσματα της δυναμικής προσομοίωσης που πραγματοποιήσαμε για τον έλεγχο ρομποτικού χεριού με κινηματικά και δυναμικά χαρακτηριστικά κατ' αναλογία όμοια με αυτά του DLR Hand 2 του γερμανικού κέντρου αεροδιαστηματικής. Αρχικά υλοποιούμε τον Εγγενώς Παθητικό Ελεγκτή-IPC, με χρήση εικονικού πλαισίου λαμβάνοντας αντίστοιχα μετρήσεις σε σενάριο γραμμικής αλλά και στροφικής μετατοπίσεως καθώς και κατά την άσκηση εξωτερικών δυνάμεων. Στη συνέχεια εισάγουμε το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου των εσωτερικών δυνάμεων βασιζόμενο στα επιφανειακά χαρακτηριστικά του αντικειμένου IPC-IF, επαναλαμβάνοντας το ίδιο σύνολο μετρήσεων και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με τη προηγούμενη περίπτωση. Τέλος υλοποιούμε τον ελεγκτή βαρυτικής αντιστάθμισης

4.1 Δόμηση Περιβάλλοντος Προσομοίωσης

Εξετάζοντας ιστορικά τα συστήματα αυτόματου ελέγχου παρατηρούμε ότι αρχικά, και ιδιαίτερα πριν αρχίσει η μαθηματική θεμελίωση τους μετά τα μέσα του 19ου αιώνα, αποτελούσαν κατασκευές χυρίως εμπειρικές με απ' ευθείας εφαρμογή και ρύθμιση της διάταξης του ελεγκτή στη τελική κατασκευή. Ενώ η μαθηματική θεμελίωση του κλάδου των συστημάτων αυτόματου ελέγχου σημείωσε ραγδαία πρόοδο με την ωρίμανση της κλασικής θεωρίας μέχρι και τη δεκαετία του '50 η προσαρμογή και τελική ρύθμιση των ελεγκτών εξακολουθούσε να πραγματοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις απ' ευθείας στο τελικό σύστημα καθιστώντας την εν δυνάμει επικίνδυνη και δαπανηρή ίσως και σε ορισμένες περιπτώσεις αδύνατη αναλογιζόμενοι ότι οι εφαρμογές μπορεί να απαντώνται σε συστήματα όπως αυτά της αεροδιαστηματικής ή και πυρηνικής τεχνολογίας.

Για την αντιμετώπιση αυτών των θεμάτων ήταν προφανές ότι η εισαγωγή μίας διάταξης που να προσομοιώνει επιμέρους υποσυστήματα ή και ολόκληρο το σύστημα ήταν απαραίτητη για τη δοκιμή και ρύθμιση των ελεγκτών. Χαρακτηριστικό

και ακραίο παράδειγμα αυτού αποτελεί το σύστημα προσομοίωσης της σεληνιακής ατράκτου του προγράμματος Apollo τη δεκαετία του '60, το οποίο περιελάμβανε όλα τα συστήματα του οχήματος, με τους δυναμικούς υπολογισμούς να πραγματοποιούνται από αναλογικό υπολογιστή λυχνιών κενού, ο οποίος καταλάμβανε πλήρως ένα κτίριο τεσσάρων ορόφων. Στη συνέχεια τα φηφιακά συστήματα με την άφθονη υπολογιστική τους ισχύ, την ικανότητα εύκολου προγραμματισμού τους καθώς και τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης λογισμικού αποτέλεσαν τον πυρήνα για τη δόμηση περιβαλλόντων προσομοίωσης.

Σήμερα η προσομοίωση αποτελεί κοινή πρακτική για την κατασκευή οποιουδήποτε ολοκληρωμένου συστήματος συμπεριλαμβάνοντας στο βρόχο ειδικά προσαρμοσμένα κομμάτια υλικού (Hardware in the Loop – HiL) ή και λογισμικού (Software in the Loop – SiL) βελτιώνοντας τη τελική ποιότητα, μειώνοντας το χρόνο και το κόστος ανάπτυξης παραμένοντας σε ασφαλές και ελεγχόμενο περιβάλλον.

Για την προσομοίωση της δυναμικής συστημάτων μηχανικής πολλαπλών σωμάτων υπάρχουν πολλές διαθέσιμες επιλογές σε επίπεδο λογισμικού για υλοποιήσεις σε επαγγελματικό ή μη επίπεδο. Οι επαγγελματικές εφαρμογές συνήθως προσφέρουν αρκετά εξειδικευμένες λύσεις προσαρμοσμένες στο κάθε πρόβλημα και είναι εμπορικά διαθέσιμες έναντι κάποιου κόστους. Ενώ τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα είναι σε θέση να προσομοιώσουν κινηματικές μηχανικές δομές υπό περιορισμούς καθώς και ένα πλήθος παράλληλων φυσικών φαινομένων η λίστα των διαθέσιμων εφαρμογών μικραίνει ιδιαίτερα όταν η ανίχνευση και διαχείριση συγκρούσεων και επαφών μεταξύ των προσομοιωμένων σωμάτων (Collision Detection & Handling) τίθεται ως προαπαιτούμενο. Αυτό αποτελεί και το βασικό χαρακτηριστικό των προσομοιωτών φυσικής (Physics Engines) οι οποίοι φέρουν όλους τους υπολογισμούς για τη κίνηση των στερεών σωμάτων αλλά ταυτόχρονα είναι σε θέση να ανιχνεύσουν και να διαχειριστούν φαινόμενα επαφών και συγκρούσεων μεταξύ των. Η διαχείριση γεγονότων σύγκρουσης είναι προφανούς χρησιμότητας για συστήματα ρομποτικής ιδιαίτερα για ρομποτικά συστήματα βάδισης ή χειρισμού.

Γενικά μπορούμε να συναντήσουμε προσομοιωτές φυσικής για χρήση σε εφαρμογές όπως,

- 3D Animation εφαρμογές όπως παιχνίδια, ταινίες, καθώς και κάθε εφαρμογή γραφικών.
- Επιστημονικές – Βιομηχανικές εφαρμογές για μοντελοποίηση έρευνα και ανάπτυξη τεχνολογικών εφαρμογών όπως αυτών της ρομποτικής, διαστημικής, αυτοκινητοβιομηχανίας καθώς και ανάπτυξη εφαρμογών για εκπαιδευτικούς προσομοιωτές χειριστών οχημάτων παντός τύπου.

4.1.1 DLR Hand 2

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζουμε μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά του Ρομποτικού Χεριού DLR Hand 2 δημιούργημα του γερμανικού κέντρου αερο-

διαστημικής (DLR German Space Center) το οποίο και χρησιμοποιούμε ως πρότυπο για τη δόμηση του περιβάλλοντος προσομοίωσης του ρομποτικού χεριού αποτελώντας το πεδίο δοκιμών για την εφαρμογή των σχημάτων ελέγχου που υλοποιούμε.

Το DLR Hand 2 είναι ένα πολυαρθρωτό ρομποτικό χέρι τεσσάρων δακτύλων ανθρωπομορφικού τύπου όπου το κάθε δάκτυλο έχει τέσσερις βαθμούς ελευθερίας με τους δύο τελευταίους να είναι συζευγμένοι. Η κινηματική δομή του κάθε δακτύλου απεικονίζεται στο σχήμα 3.2. Επιπρόσθετα το DLR Hand 2 διαθέτει 2 βαθμούς ελευθερίας ακόμα για τη μετακίνηση του αντίχειρα αλλά και του 4ου δακτύλου οι οποίοι κρίθηκαν απαραίτητοι για την εισαγωγή της δυνατότητας της πραγματοποίησης λαβών δύναμης αλλά και επιδέξιου χειρισμού με τα ακροδάκτυλα. Το μέγεθος του ρομποτικού χεριού είναι 1.5 φορές μεγαλύτερο περίπου από το ανθρώπινο.

Για την πραγματοποίηση αυτών των κινήσεων επιστρατεύεται σύστημα επενεργητών στις αρθρώσεις το οποίο αποτελείται από κινητήρες συνεχούς, οδοντωτούς ιμάντες για τις συζευγμένες αρθρώσεις και harmonic drives για τις υπόλοιπες. Τελικά το κάθε δάκτυλο είναι σε θέση να ασκήσει εφαπτομενικά στο άκρο του δακτύλου δύναμη μέχρι 30N.

Το αισθητηριακό σύνολο του DLR Hand 2 αποτελείται από τους ακόλουθους αισθητήρες σε κάθε δάκτυλο,

- 3 αισθητήρες θέσης των αρθρώσεων ειδικά σχεδιασμένοι βασιζόμενοι σε επαγγειακό συνθετικό ποτενσιόμετρο.
- 3 αισθητήρες ροπής στις αρθρώσεις βασιζόμενοι σε μέτρηση της παραμορφωτικής ιδιότητας.
- 3 αισθητήρες μέτρησης θέσης–ταχύτητας, αναλογικοί Hall Sensors, με παρεμβολή.
- 1 αισθητήρας δύναμης έξι διαστάσεων στο ακροδάκτυλο βασιζόμενος σε μέτρηση της παραμορφωτικής ιδιότητας.
- 3 αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας στους κινητήρες.
- 3 αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας για θερμοκρασιακή αντιστάθμιση.

Τα ηλεκτρονικά στοιχεία του χεριού είναι πλήρως ενσωματωμένα στο κυρίως σώμα κάτι το οποίο έγινε εφικτό με τη χρήση εύκαμπτων τυπωμένων κυκλωμάτων (flexible PCBs). Σε κάθε σύνδεσμο κάθε δακτύλου υπάρχει τουλάχιστον ένα κύκλωμα, μετατροπέας αναλογικού–ψηφιακού 8 καναλιών ανάλυσης 12-bit για την ανάγνωση των σημάτων των αισθητήρων. Ακόμα είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι τα ηλεκτρονικά ισχύος κάθε κινητήρα είναι τοποθετημένα κοντά στον κινητήρα. Έτσι λοιπόν το DLR Hand 2 επιτυγχάνει πλήρη ικανότητα αυτονόμησης όντας ικανό να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε ρομποτικό βραχίονα χωρίς να απαιτείται ειδική υποδομή.

Ο έλεγχος πραγματοποιείται από εξωτερικό υπολογιστή. Για την επικοινωνία μεταξύ των υπομέρους στοιχείων και αυτών με το εξωτερικό υπολογιστικό σύστημα χρησιμοποιείται ένα προηγμένο πλήρως ενσωματωμένο σύστημα σειριακού ελέγχου με στόχο την ελαχιστοποίηση των εσωτερικών καλωδιώσεων. Η δομή του συστήματος αυτού είναι ιεραρχική αποτελούμενη αρχικά από ένα τηλεπικοινωνιακό ελεγκτή στη βάση του κάθε δακτύλου ο οποίος πραγματοποιεί επεξεργασία στα σήματα του αντίστοιχου δακτύλου (40 κανάλια 12-bits αγάλυση) καθώς και ένα τηλεπικοινωνιακό ελεγκτή στη βάση του χεριού υπεύθυνο για την επικοινωνία μεταξύ του ελεγκτή κάθε δακτύλου και του εξωτερικού υπολογιστικού συστήματος.

Το συνολικό βάρος κάθε ενός από τα 4 πανομοιότυπα δάκτυλα, είναι 375gr. Η πυκνότητας κατανομής μάζας, θεωρώντας απλουστευτικά ότι είναι σταθερή καθ' όλο το συνολικό μήκος συνδέσμων $l_1 + l_2 + l_3 = 155mm$, προκύπτει $d = 2.49gr/mm$. Στον πίνακα 4.1 παραθέτουμε τα βασικά γεωμετρικά – αδρανειακά χαρακτηριστικά του DLR Hand 2.

Σύνδεσμος i	Μήκος [mm]	Μάζα [gr]
1	75	187
2	40	94
3	40	94

Πίνακας 4.1: Πίνακας βασικών γεωμετρικών – αδρανειακών χαρακτηριστικών DLR Hand 2

4.1.2 Open Dynamics Engine (ODE)

Μία δημοφιλής λύση για την προσομοίωση της φυσικής στερεών σωμάτων βάσει ενός απλού και αποτελεσματικού API (Application Programming Interface) σε C ή C++ ανοικτού κώδικα, αποτελεί η Open Dynamics Engine (ODE) η οποία βρίσκεται ευρύτατη εφαρμογή και στους δύο κλάδους που προαναφέραμε, αυτών των 3D Animations καθώς των προσομοιωτών για επιστημονικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Ιδιαίτερα δε στο τομέα της ρομποτικής χρησιμοποιείται ευρύτατα για την ανάπτυξη εφαρμογών είτε ως μέρος προσαρμοσμένης λύσης είτε ως μέρος κάποιου έτοιμου ολοκληρωμένου προγράμματος προσομοίωσης για συστήματα ρομποτικής όπως για παράδειγμα το Webots ή το V-Rep αλλά και το ROS.

Μερικά χαρακτηριστικά που καθιστούν την ODE ικανή για δυναμικές προσομοιώσεις συστημάτων πολλών σωμάτων είναι,

- Ευσταθής και εύρωστη αριθμητική ολοκλήρωση για τον υπολογισμό της κίνησης των σωμάτων.
- Δυνατότητα άσκησης σήματος ελέγχου ροπής απ' ευθείας στις επιθυμητές αρθρώσεις.

- Εύκολος έλεγχος και ορισμός κάθε παραμέτρου του συστήματος.

Όπως και σε κάθε προσομοιωτή φυσικής λαμβάνεται από τον κατασκευαστή ένας θεμελιώδης σχεδιαστικός συμβιβασμός μεταξύ ακρίβειας και ευστάθειας – ταχύτητας – ευρωστίας. Η ODE είναι προσομοιωτής ξεκάθαρα προσανατολισμένος στην ευστάθεια και τη ταχύτητα των υπολογισμών με αποτέλεσμα να χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή ως προς την εξαγωγή συμπερασμάτων που τυχών προκύπτουν από τα αποτελέσματα κάθε προσομοίωσης. Για τον ίδιο λόγο χρησιμοποιείται από την ODE ένα ιδιαίτερα απλοποιημένο μοντέλο χειρισμού των φαινομένων τριβής το οποίο απέχει ακόμα και από το κλασικό στατικό μοντέλο του κώνου τριβής[37].

Για την μετρίαση αυτών των χαρακτηριστικών ακολουθούμε τους ακόλουθους κανόνες,

- Μικρό χρονικό βήμα world time step για τη βελτίωση της ακρίβειας και της αριθμητικής ευρωστίας
- Ο λόγος μεταξύ των μαζών ιδιαίτερα αυτών που συνδέονται μέσω συνδέσμου φροντίζουμε να είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στη μονάδα και σε καμία περίπτωση να μην είναι μεγαλύτερος του 10.

Οι παράμετροι προσομοίωσης που επιλέγουμε απεικονίζονται στον πίνακα 4.2. Εφόσον επιλέγουμε μικρό χρονικό βήμα, πρακτικά η τιμή διόρθωσης σφαλμάτων (error reduction parameter – ERP) μπορεί να παραμείνει σχετικά χαμηλή. Επίσης θεωρούμε απόλυτα άκαμπτες επαφές επιλέγοντας μηδενική τιμή για τη παράμετρο constraint force mixing – CFM της ODE.

World Time Step	656.25 μsec
ERP	0.2
CFM	~ 0

Πίνακας 4.2: Τιμές παραμέτρων ODE

4.1.3 Open Dynamics Engine S-Function Block – Προσομοίωση Ρομποτικού Χεριού

Ως βασικό εργαλείο για την ανάπτυξη του ελεγκτή επιδέξιου ρομποτικού χειρισμού επιλέγουμε το Simulink της Mathworks. Μερικοί λόγοι που συντελούν σε αυτή την επιλογή είναι,

- Έτοιμες βιβλιοθήκες Blocks με τυπικά αλλά και εξελιγμένα εργαλεία για τον αυτόματο έλεγχο.
- Το γραφικό περιβάλλον με τα blocks δίνει τη δυνατότητα για εύκολες αλλαγές, εύκολο εντοπισμό λαθών καθώς και εποπτικό έλεγχο όλων των παραμέτρων του συστήματος.

- Εξαιρετική ευελιξία ως προς την ανάπτυξη προσαρμοσμένων και εξειδικευμένων λύσεων με δυνατότητα ανάπτυξης δομικών στοιχείων blocks σε C, C++ ή Matlab κώδικα με τη λειτουργική συναρτησιακή δομή s-function.
- Αυτοματοποιημένη παραγωγή C, C++ κώδικα για τη βελτίωση των επιδόσεων καθώς και την εύκολη μεταφορά της υλοποίησης στο τελικό σύστημα πραγματικού χρόνου (real time target machine).

Να σημειώσουμε ότι ο λόγος που δε χρησιμοποιούμε τις βιβλιοθήκες και τα έτοιμα blocks SimMechanics του Simulink για τη προσομοίωση του συστήματός μας είναι η απουσία συστήματος ανίχνευσης και διαχείρισης γεγονότων συγκρούσεων και επαφών(Collision Detection & Handling). Ενώ ένα τέτοιο σύστημα χειρισμού συγκρούσεων απουσιάζει στη βασική του μορφή, είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί προσαρμοσμένα με χρήση επιμέρους στοιχείων του Simulink [38].

Τελικά η λύση που προτείνουμε και υλοποιούμε είναι η κατασκευή προσαρμοσμένου block ως s-function Mex file το οποίο θα χρησιμοποιεί το API της ODE για τη προσομοίωση του ρομποτικού συστήματος. Μεγάλη συνεισφορά προς αυτή τη κατεύθυνση προσέφερε η παρόμοια προσπάθεια [39].

Όπως ήδη αναφέραμε βασιζόμαστε στα κινηματικά – δυναμικά χαρακτηριστικά του DLR Hand 2 για την κατασκευή του μοντέλου του ρομποτικού χεριού. Προσομοιώνουμε τον κάθε ρομποτικό σύνδεσμο με χρήση του γεωμετρικού αντικειμένου κυλινδρικού τύπου “κάψουλα” (capsule) της ODE. Η ακτίνα της κάθε κάψουλας ορίζεται μικρή έτσι ώστε να προσομοιωθεί όσο το δυνατόν πιο πιστά η συνθήκη για σημειακές επαφές με τριβή. Η ODE στην εσωτερική της λειτουργία δεν αντιμετωπίζει τα μεγέθη με την αυστηρή φυσική τους σημασία παρά μόνο κατ’ αναλογία. Βάση αυτού λοιπόν, ορίζουμε την απόλυτη τιμή στα σχετικά μεγέθη βάσει των οδηγιών του κατασκευαστή για μέγιστη αξιοπιστία προσομοίωσης, όπως απεικονίζονται στον πίνακα 4.3.

Όλα τα δάκτυλα τοποθετούνται έτσι ώστε οι βάσεις του να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, με τις σχετικές τους θέσεις να ορίζονται αντίστοιχα για τα δάκτυλα 1, 2, 3 και 4, $(-0.7, 0, 0)$, $(0.6, -0.4, 0)$, $(0.7, 0, 0)$, και $(0.6, 0.4, 0)$.

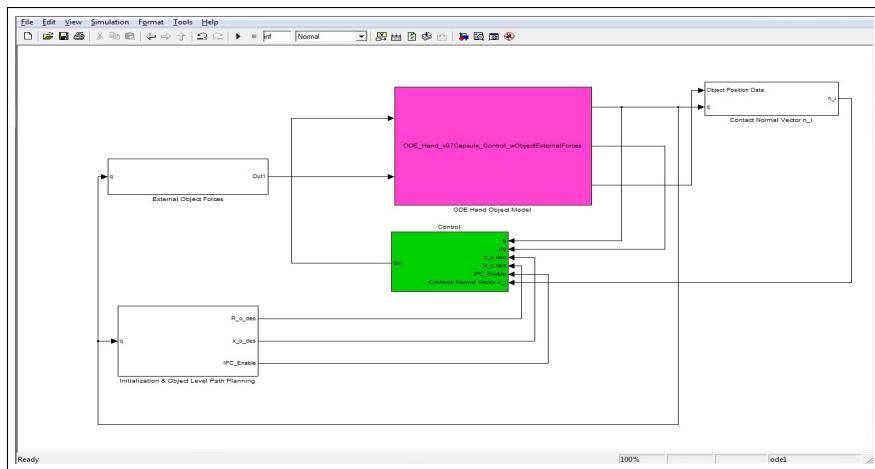
Σύνδεσμος i	Μήκος	Μάζα	Ακτίνα συνδέσμου “κάψουλας”
1	1	2.49	0.04
2	0.53	1.25	0.04
3	0.53	1.25	0.02

Πίνακας 4.3: Πίνακας βασικών γεωμετρικών – αδρανειακών χαρακτηριστικών του προσομοιωθέντος ρομποτικού χεριού

4.1.4 Συγκεντρωτική Δομή Υλοποίησης Συστήματος

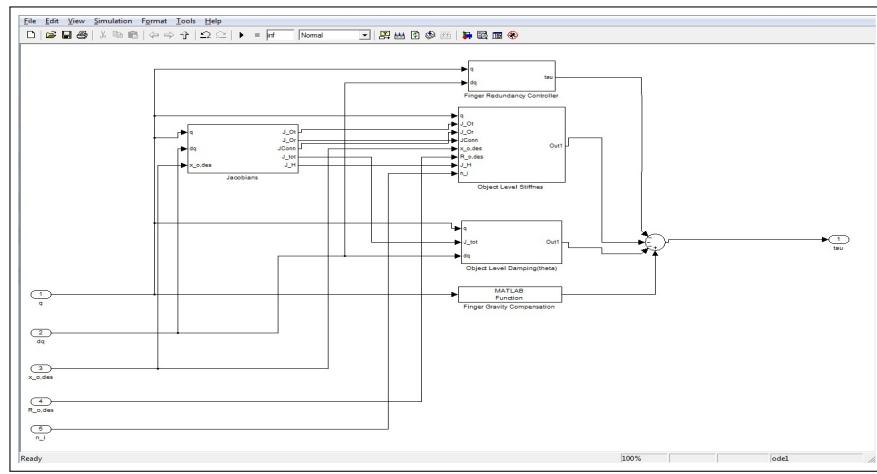
Το σύστημά μας δομείται στο Simulink σε ιεραρχικά επίπεδα. Το ανώτερο ιεραρχικά επίπεδο το οποίο δίνει τη γενική εικόνα του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 4.1 περιγράφοντας τη διασύνδεση μεταξύ των βασικών δομικών στοιχείων τα οποία είναι,

- Mex C S-Function Block Open Dynamics Engine Προσομοίωση Ρομποτικού Χειρισμού και περιβάλλοντος.
- Ελεγκτής
- Σχεδιασμός Δρόμου σε επίπεδο αντικειμένου
- Σύστημα Εξαγωγής Χαρακτηριστικών Επιφανείας – Εξαγωγή κάθετου διαγύμνατος επιφανείας αντικειμένου n_i
- Σύστημα Άσκησης Εξωτερικών Δυνάμεων και Ροπών στο Αντικείμενο υπό χειρισμό.

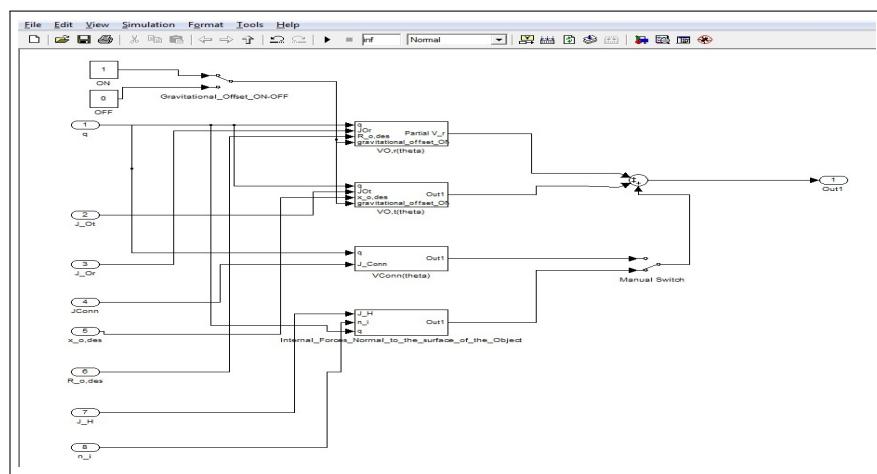


Σχήμα 4.1: Ανώτερο επίπεδο υλοποίησης Simulink με το μοντέλο του συστήματος των ελεγκτή και τα επιμέρους εργαλεία.

Η γραφική αναπαράσταση γίνεται στον ίδιο χρόνο που πραγματοποιείται η προσομοίωση στο Simulink. Η αρχική διάταξη με αντικείμενο σφαίρα υπό χειρισμό φαίνεται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.2: Γενική άποψη δομής ελεγκτή Simulink



Σχήμα 4.3: Όψη των όρων στροφικής, μεταφορικής εσωτερικής ακαμψίας Simulink

4.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Ελεγκτή IPC

Στη παράγραφο αυτή παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του ελεγκτή ρομποτικής λαβής IPC, ο οποίος έχει περιγραφεί αναλυτικά στην ενότητα 3.3 του προηγούμενου κεφαλαίου. Αρχικά εφαρμόζουμε τον έλεγχο βάσει της παθητικής ιδιότητας όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3 με έλεγχο των εσωτερικών δυνάμεων βάσει ακαμψίας σύνδεσης με το εικονικό πλαίσιο. Εξάγουμε τις απαραίτητες μετρήσεις αρχικά διεγείροντας το σύστημα βηματικά και στη συνέχεια επιτυγχάνουμε μέτρηση της ακαμψίας με την εφαρμογή εξωτερικών δυνάμεων και ροπών στο αντικείμενο.

Τα κέρδη της ακαμψίας για τη μεταφορική–στροφική κίνηση ο συντελεστής απόσβεσης καθώς και τα σημεία ισορροπίας για την ακαμψία σύνδεσης ορίζονται αντίστοιχα.

$$K_{o,r} = \begin{bmatrix} 700 & 0 & 0 \\ 0 & 700 & 0 \\ 0 & 0 & 700 \end{bmatrix}, \quad K_{o,t} = \begin{bmatrix} 200 & 0 & 0 \\ 0 & 200 & 0 \\ 0 & 0 & 200 \end{bmatrix}$$

$$\xi = 0.9, \quad l_{i,des} = 0.15m, \quad i = 1, 2, 3, 4$$

Επίσης τα κέρδη για τον ελεγκτή του μηδενικού χώρου του ρομποτικού χεριού επιλέγονται έτσι ώστε, να είναι χαμηλού εύρους ζώνης, επηρεάζοντας όσο το δυνατόν λιγότερα το χώρο εργασίας με τις ακόλουθες τιμές,

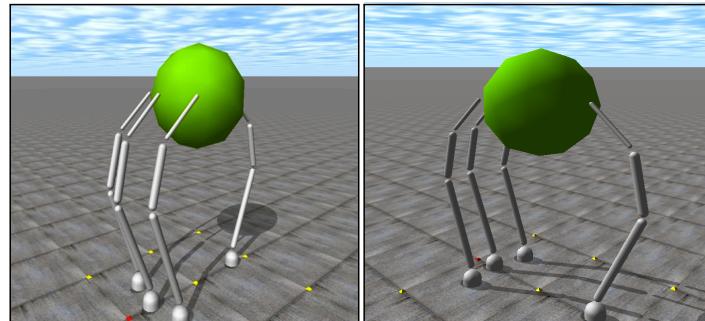
$$K_N = 50, \quad D_N = 0.13K_N^{1/2}$$

4.2.1 Βηματική Απόκριση – Μεταφορική και Στροφική κίνηση

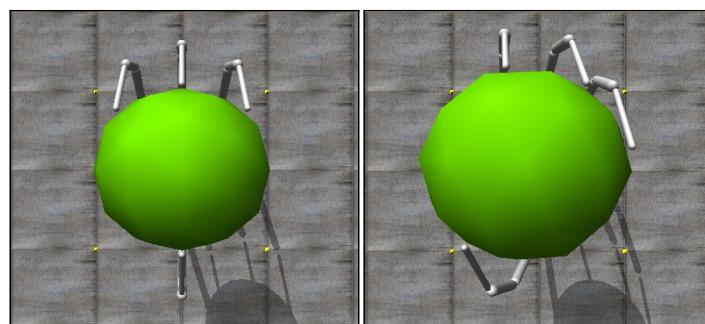
Αρχικά εξετάζουμε δύο σενάρια χειρισμού για μία σφαίρα διαμέτρου 0.54 και βάρους 0.8 (οι φυσικές τιμές των μεγεθών δεν έχουν ιδιαίτερο νόημα για την ODE, όπως ήδη αναφέραμε). Το ένα αφορά στροφική μετατόπιση ως προς τον κάθετο άξονα z , $rotz(0.6rad)$ και το δεύτερο γραμμική μετατόπιση κατά τον άξονα x , $tranx(0.40m)$. Ουσιαστικά και οι δύο αυτοί οι χειρισμοί αποτελούν βηματική είσοδο στο σύστημα, κατά τη κλασσική θεωρία συστημάτων αυτόματου ελέγχου, αναδεικνύοντας τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά της αποτελεσματικότητας και των επιδόσεων του τελικού κλειστού συστήματος όπως μεταβατική απόκριση, υπερπήδηση (overshoot), τελικό σφάλμα θέσης, ταλαντώσεις.

Οι τιμές των κερδών K_{Conn} για τη σύνδεση των ακροδακτύλων με το εικονικό πλαίσιο είναι,

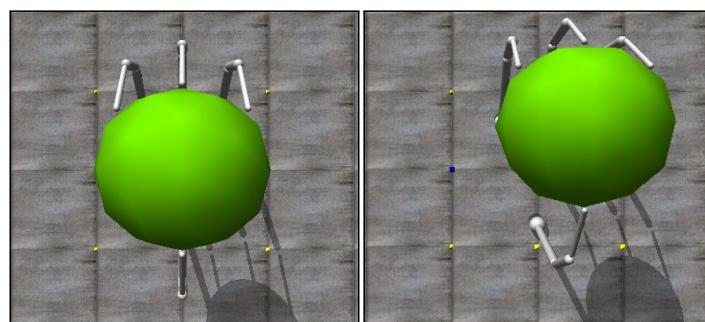
$$K_{Conn} = \begin{bmatrix} 800 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 800 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 800 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 800 \end{bmatrix}$$



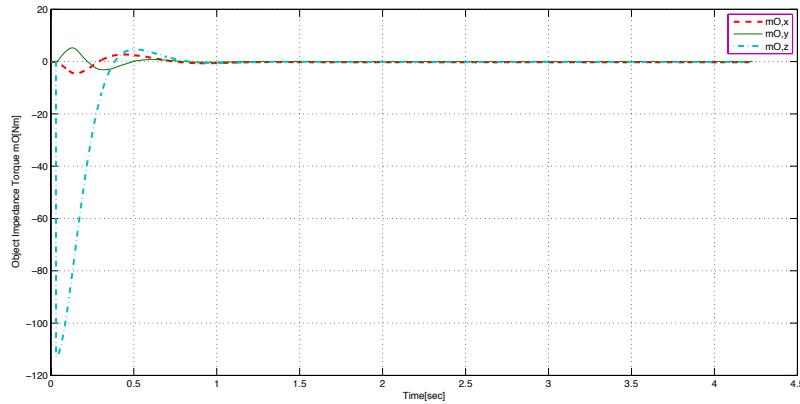
Σχήμα 4.4: Γενική όψη αρχικής διάταξης λαβής με αντικείμενο υπό χειρισμό σφαίρα



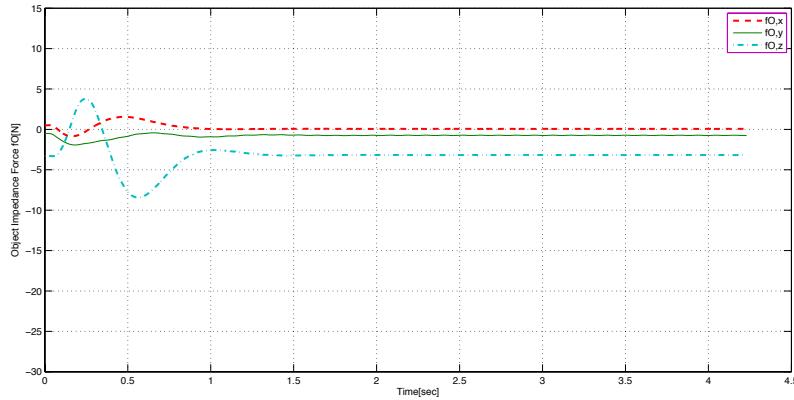
Σχήμα 4.5: Κάτοψη – Τελική Θέση μετά τη στροφική μετατόπιση κατά τον z άξονα (στροφή 0.6 rad)



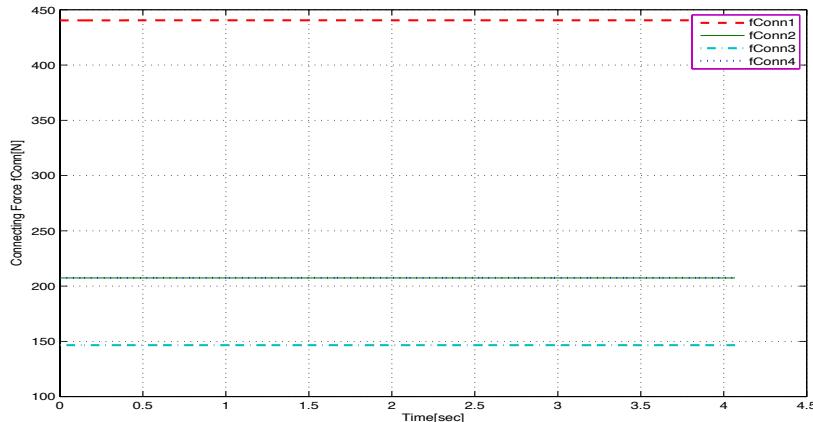
Σχήμα 4.6: Κάτοψη – Μετατόπιση κατά τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm)



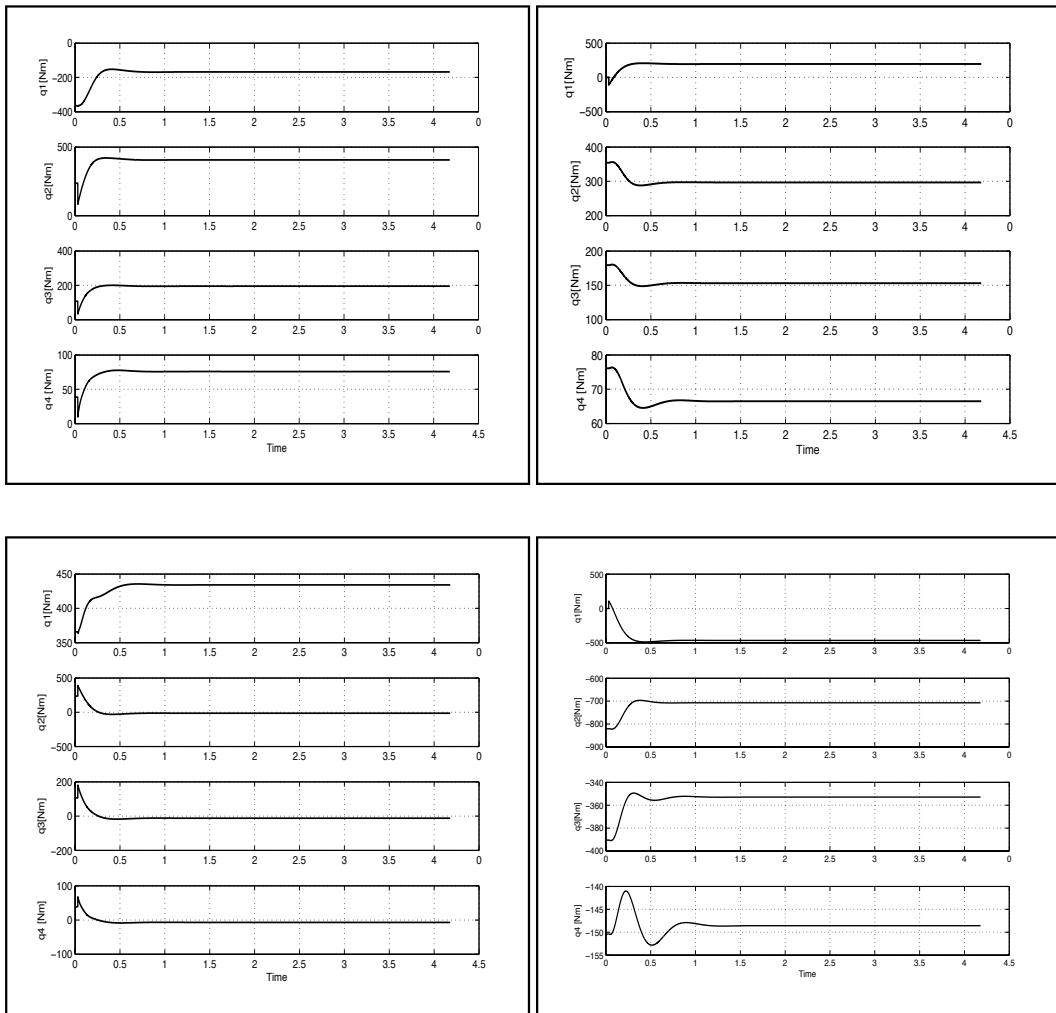
Σχήμα 4.7: Ροπή Εμπέδησης m_O κατά τη στροφή ως προς τον z άξονα (στροφή 0.6 rad)



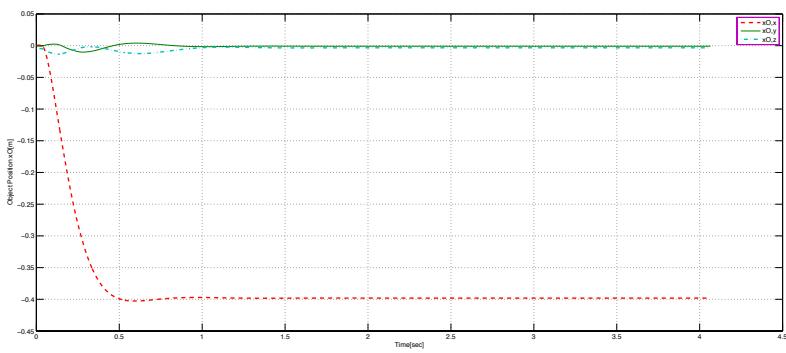
Σχήμα 4.8: Δύναμη Εμπέδησης f_O κατά τη στροφή ως προς τον z άξονα (στροφή 0.6 rad)



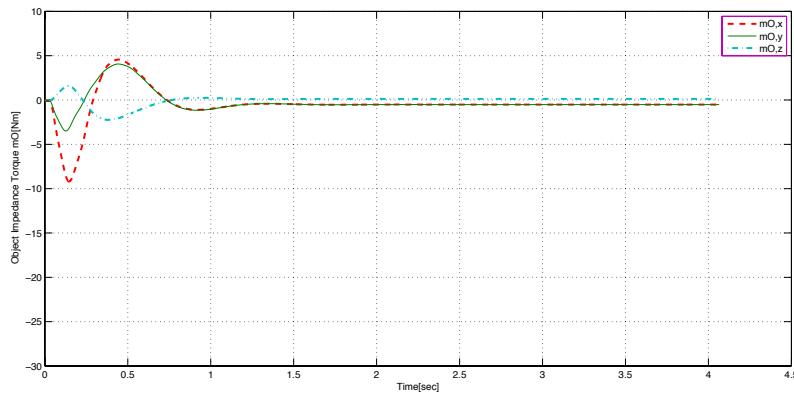
Σχήμα 4.9: Σύνδεση δακτύλων με το εικονικό πλαίσιο f_{Conn} κατά τη στροφή ως προς τον z άξονα (στροφή 0.6 rad)



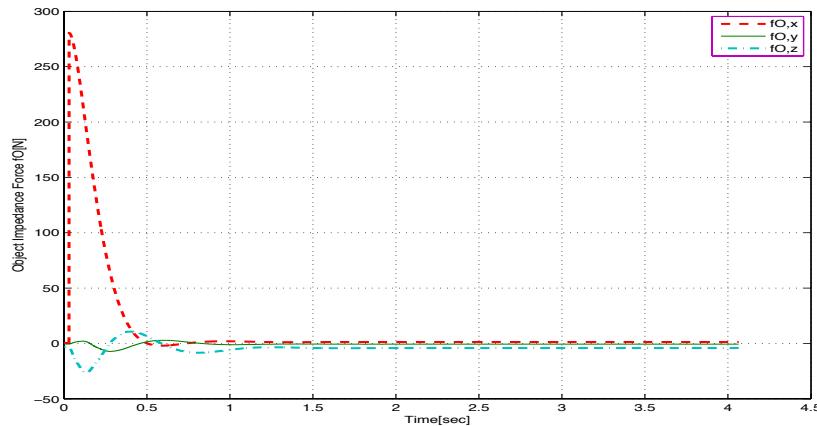
Σχήμα 4.10: Ασκούμενες ροπές στις αρθώσεις των δακτύλων 2,3,4,1-thumb, κατά τη στροφική κίνηση ως προς τον z άξονα (στροφή 0.6 rad).



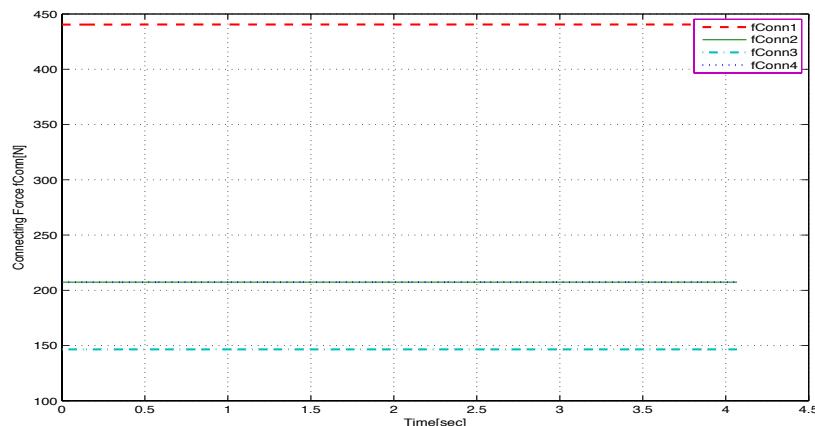
Σχήμα 4.11: Θέση xO αντικειμένου κατά τη μετατόπιση ως προς τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm)



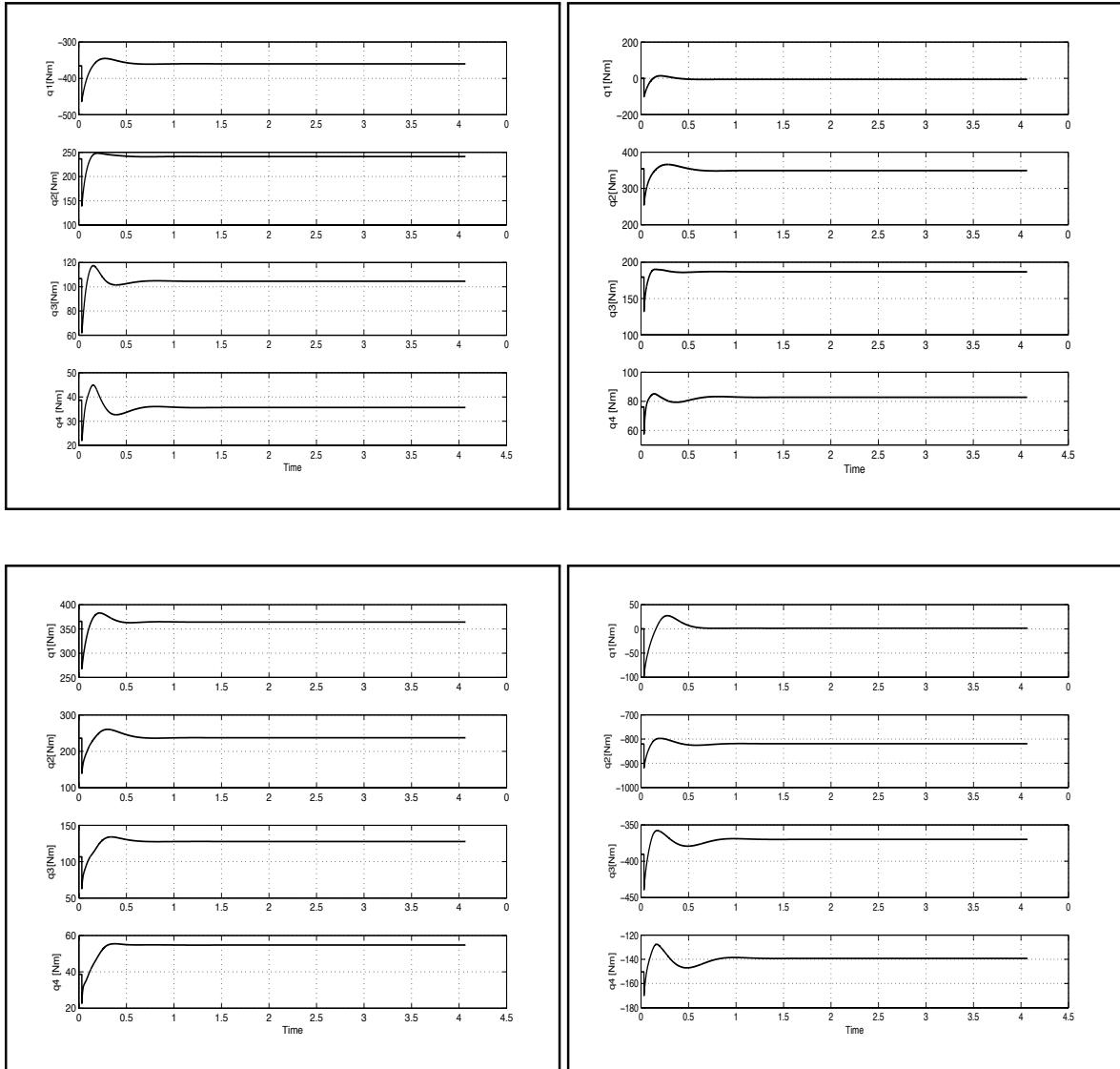
Σχήμα 4.12: Ροπή Εμπέδησης m_O κατά τη μετατόπιση ως προς τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm)



Σχήμα 4.13: Δύναμη Εμπέδησης f_O κατά τη μετατόπιση ως προς τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm)



Σχήμα 4.14: Σύνδεση δακτύλων με το εικονικό πλαίσιο f_{Conn} κατά τη μετατόπιση ως προς τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm)



Σχήμα 4.15: Ασκούμενες ροπές στις αρθώσεις των δακτύλων 2,3,4,1-thumb, κατά τη μεταφορική κίνηση x , 0.40m όπως προκύπτουν από το νόμο ελέγχου.

Βάσει των μετρήσεων παρατηρούμε ότι το σύστημά μας είναι σε θέση να εκτελέσει με επιτυχία τις επιθυμητές κινήσεις εντός του χώρου εργασίας με μικρή ή και μηδενική σύζευξη μεταξύ των διαφορετικών βαθμών ελευθερίας. Η βασική μας κριτική εστιάζει στη παρουσία μόνιμων σφαλμάτων θέσης στη τελική κατάσταση όπως μπορούμε να δούμε χαρακτηριστικά στα σχήματα 4.8, 4.12, και 4.13. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μόνιμο σφάλμα θέσης:

- ως προς τη δύναμη εμπέδησης f_o (3.8N στον άξονα z, 0.7N στον άξονα y, μηδενικό σφάλμα στον άξονα x, βλ. Σχήματα 4.8, 4.13)
- ως προς τη ροπή εμπέδησης m_o (0.1N στον άξονα x όπως και στον y, μηδενικό σφάλμα στον άξονα x, βλ. Σχήμα 4.12).

Αρχική μας υποψία είναι η εισαγωγή μη μηδενικής συνιστάμενης δύναμης στο αντικείμενο από το μηχανισμό ελέγχου εσωτερικών δυνάμεων μέσω σύνδεσης με το εικονικό πλαίσιο η οποία θέτει το σημείο στατικής ισορροπίας του συστήματος μακριά από το επιθυμητό. Σχετικά με τον χώρο των εσωτερικών δυνάμεων έχει ενδιαφέρον να παρατηρήσει κανείς στα σχήματα 4.9, 4.14, 4.10, 4.10 την σημαντικά εντονότερη προσπάθεια που καταβάλει ο αντίχειρας (*finger1*) σε κάθε χρονική στιγμή.

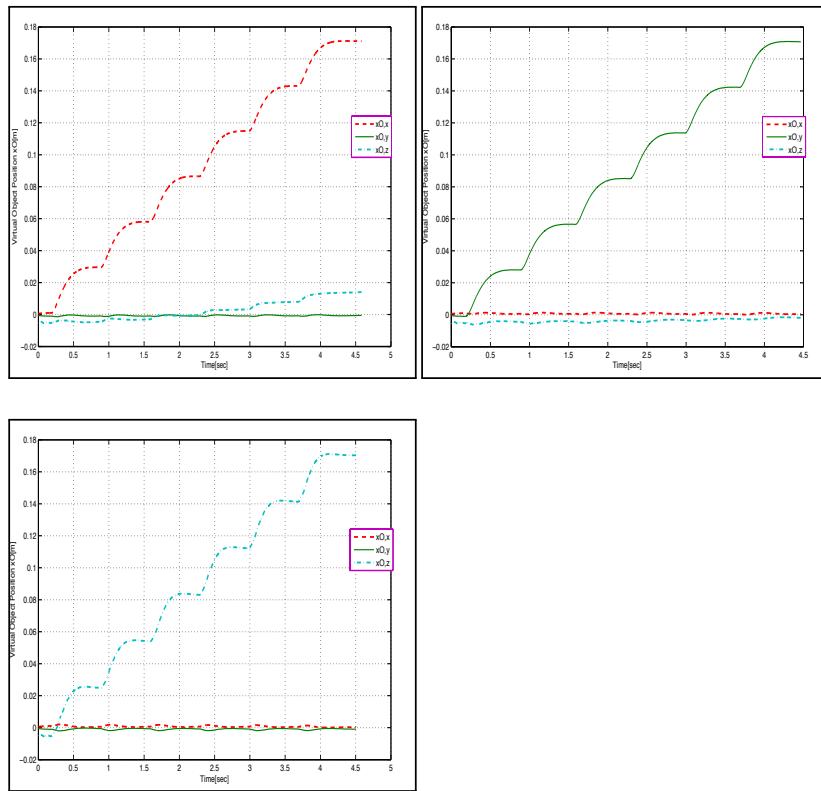
4.2.2 Μέτρηση Ακαμψίας

Σε αυτό το σενάριο μετρήσεων ασκούμε διαδοχικά αυξανόμενες Δυνάμεις/Ροπές στο πλαίσιο H_o στο αντικείμενο έτσι ώστε να εξάγουμε τη προκύπτουσα ακαμψία του συστήματος $K_{\bar{x}}$.

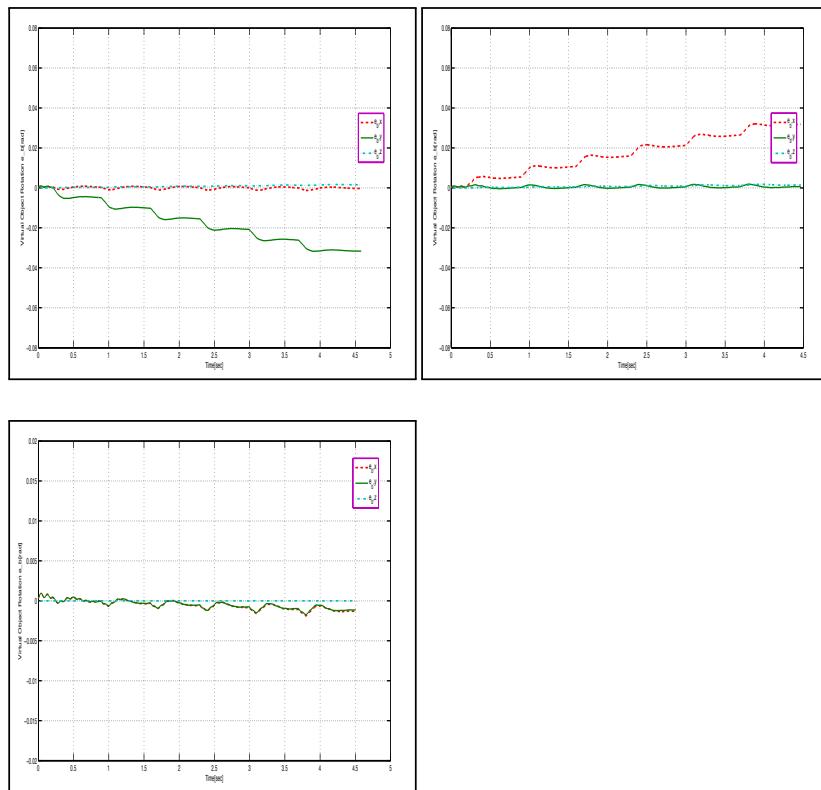
Ξεκινάμε με εφαρμογή αυξανόμενης δύναμης διαδοχικά στους άξονες x, y, z και παρατηρούμε τις μετατοπίσεις–στροφές που προκύπτουν. Αυξάνουμε τη δύναμη κατά 20N κάθε 0.7s. Η περίοδος των 0.7sec θεωρείται ικανή, έτσι ώστε το σύστημα να βρεθεί στη τελική θέση ισορροπίας του. Στη συνέχεια, βάση της ίδιας λογικής, ασκούμε ροπή η οποία αυξάνεται διαδοχικά κατά 3Nm κάθε 0.7sec και στους τρεις άξονες. Η μεταφορική και στροφική ακαμψία προκύπτουν αντίστοιχα βάση ελάχιστου τετραγωνικού σφάλματος από τις μετρηθείσες τιμές,

$$K_{tr,measured} = \begin{bmatrix} 697.9 & 0 & 0 \\ 0 & 703.2 & 0 \\ 0 & 0 & 710.2 \end{bmatrix}, \quad K_{rot,measured} = \begin{bmatrix} 189 & 0 & 0 \\ 0 & 195 & 0 \\ 0 & 0 & 192 \end{bmatrix}$$

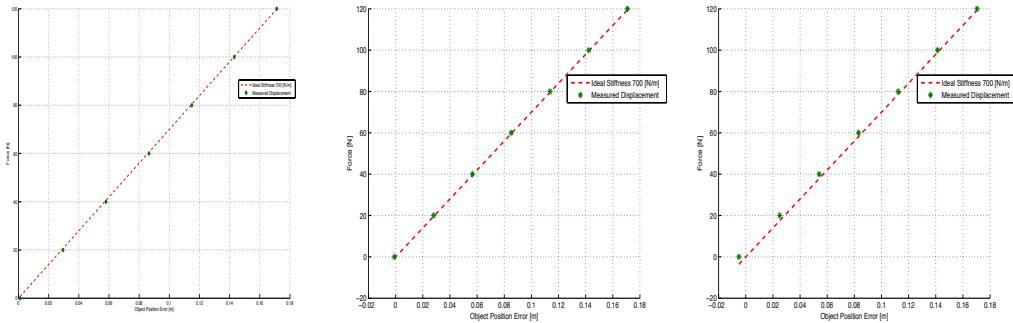
Παρατηρούμε ότι οι τιμές αυτές είναι αρκετά κοντά στις τιμές που ορίσαμε στον έλεγχο ($k_{translation} = 700$, $k_{rotation} = 200$) με μικρές αποκλίσεις αλλά με συνεπή γραμμική συμπεριφορά όπως βλέπουμε στο σχήμα 4.18. Παράλληλα παρατηρούμε τη παρουσία μικρής σύζευξης σε μερικές διευθύνσεις όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στα σχήματα 4.16 4.17 4.20.



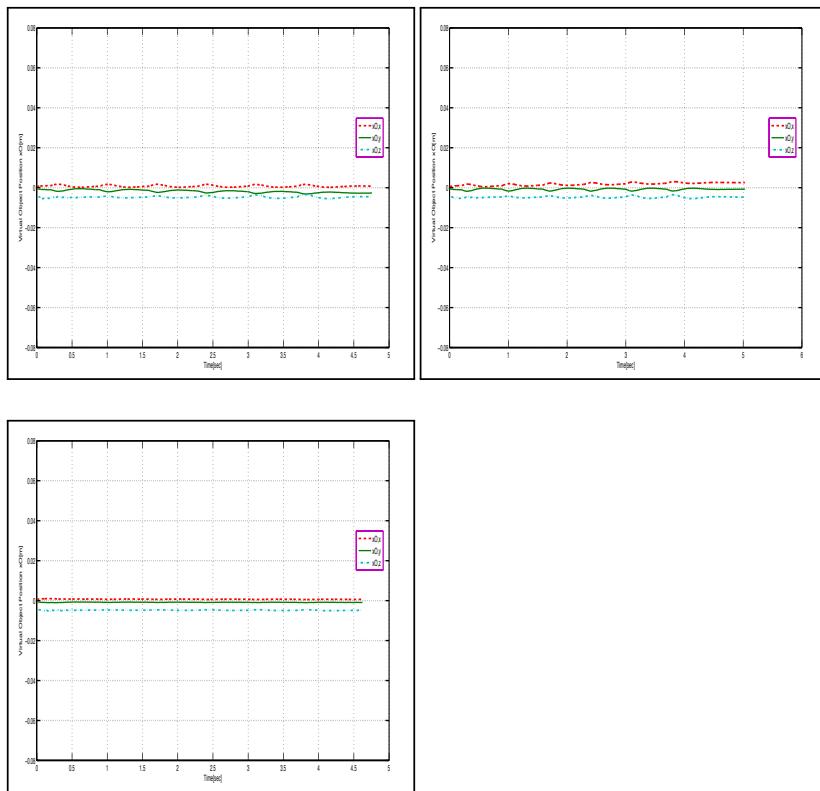
Σχήμα 4.16: Θέση x_o εικονικού πλαισίου κατά την άσκηση δυνάμεων κατά του x, y, z άξονα αντίστοιχα.



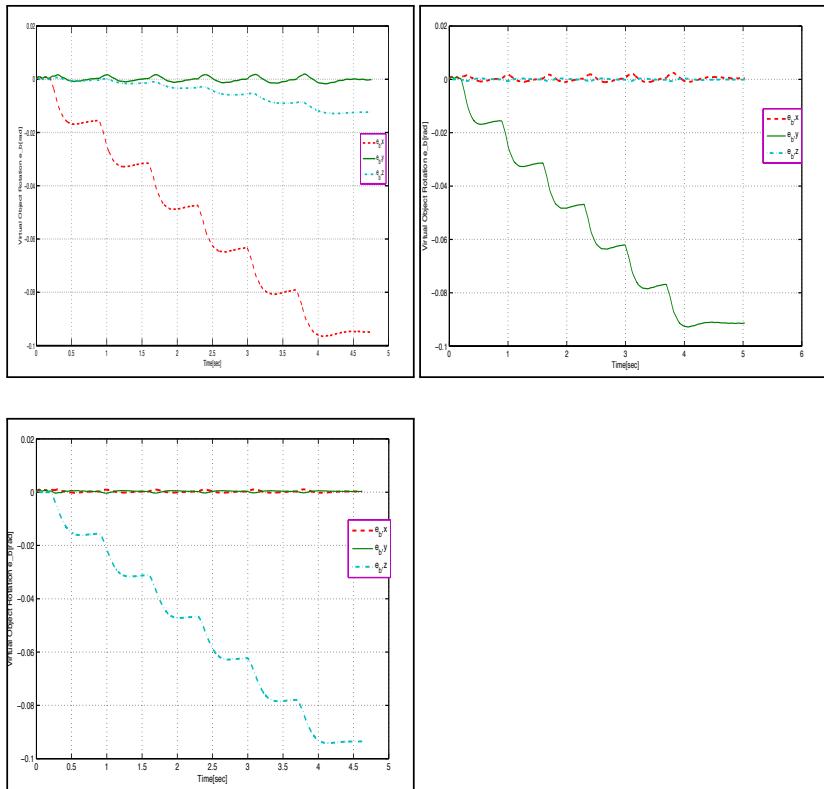
Σχήμα 4.17: Quaternion e_b εικονικού πλαισίου κατά την άσκηση δυνάμεων κατά του x, y, z άξονα αντίστοιχα.



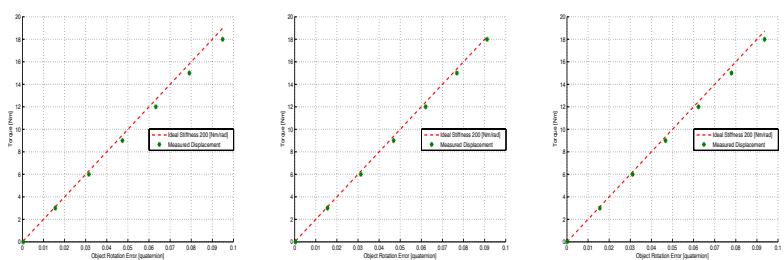
Σχήμα 4.18: Θέση x_o αντικειμένου μετά την άσκηση των δυνάμεων κατά τους άξονες x, y, z του πλαισίου H_o αντίστοιχα.



Σχήμα 4.19: Θέση x_o εικονικού πλαισίου κατά την άσκηση ροπών κατά του x, y, z άξονα αντίστοιχα.



Σχήμα 4.20: Quaternion e_b εικονικού πλαισίου κατά την άσκηση ροπών κατά των x , y , z άξονα αντίστοιχα.



Σχήμα 4.21: Quaternion αντικειμένου μετά την άσκηση των ροπών κατά τους άξονες x , y , z του πλαισίου H_o αντίστοιχα.

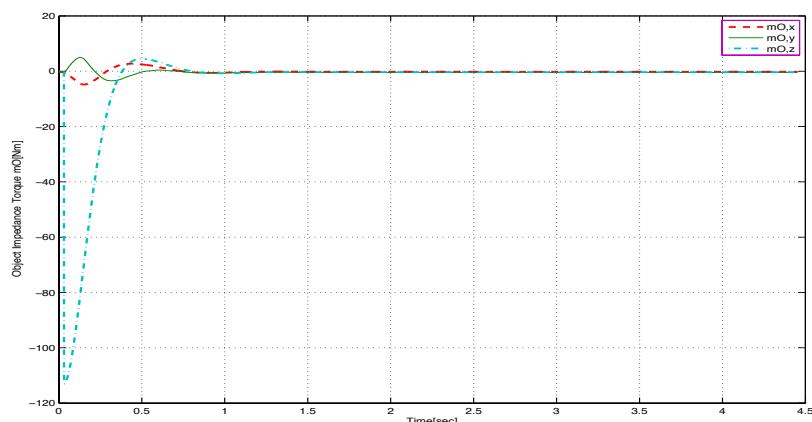
4.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης ελεγκτή ρομποτικής λαβής IPC–IF με αντιστάθμιση εσωτερικών δυνάμεων

Σε αυτή την ενότητα επαναλαμβάνουμε το ίδιο σύνολο μετρήσεων–δοκιμών (Βηματική Απόκριση–Μέτρηση Ακαμψίας) βάση της προτεινόμενης επέκτασης του ελεγκτή IPC για αντιστάθμιση εσωτερικών δυνάμεων (IPC–IF), ο οποίος αναλύθηκε αναλυτικά στην παράγραφο 3.4.1. Μηδενίζοντας τον χώρο των εσωτερικών δυνάμεων στο αντικείμενο αναμένουμε πιο συνεπή παρακολούθηση θέσης αλλά και μικρότερες αποκλίσεις στις τιμές ακαμψίας που ορίζονται στο χώρο του ελεγκτή.

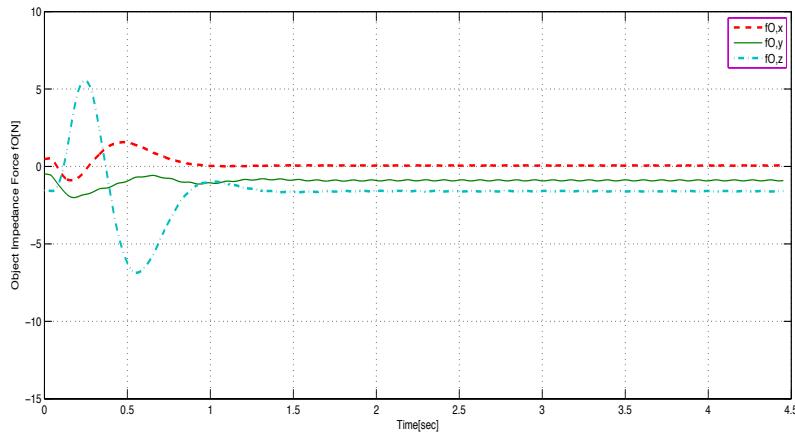
4.3.1 Βηματική Απόκριση – Μεταφορική και Στροφική κίνηση

Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάζουμε δύο σενάρια χειρισμού για μία σφαίρα. Το ένα αφορά στροφική μετατόπιση ως προς τον κάθετο άξονα z , $rotz(0.6\text{rad})$ και το δεύτερο γραμμική μετατόπιση κατά τον άξονα x , $tranx(0.40\text{m})$.

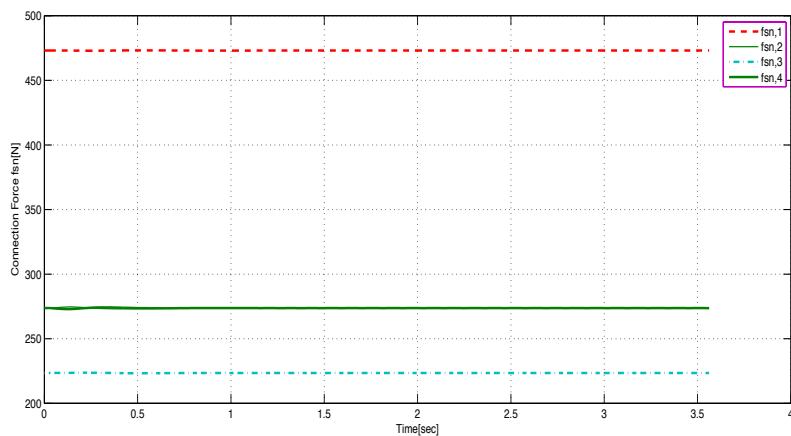
Αυτή τη φορά έχει ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά ως προς τη μείωση του τελικού σφάλματος θέσης όπως παρατηρούμε εμφανώς στα σχήματα 4.23, 4.27, 4.28 αλλά και της σύζευξης μεταξύ διαφορετικών κατευθύνσεων κίνησης. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε σημαντική μείωση του μόνιμου σφάλματος δύναμης εμπέδησης f_o ως προς τον άξονα z , από την τιμή 3.8N (με εφαρμογή του βασικού ελεγκτή IPC) στην τιμή 2N, με εφαρμογή του προτεινόμενου ελεγκτή IPC–IF.



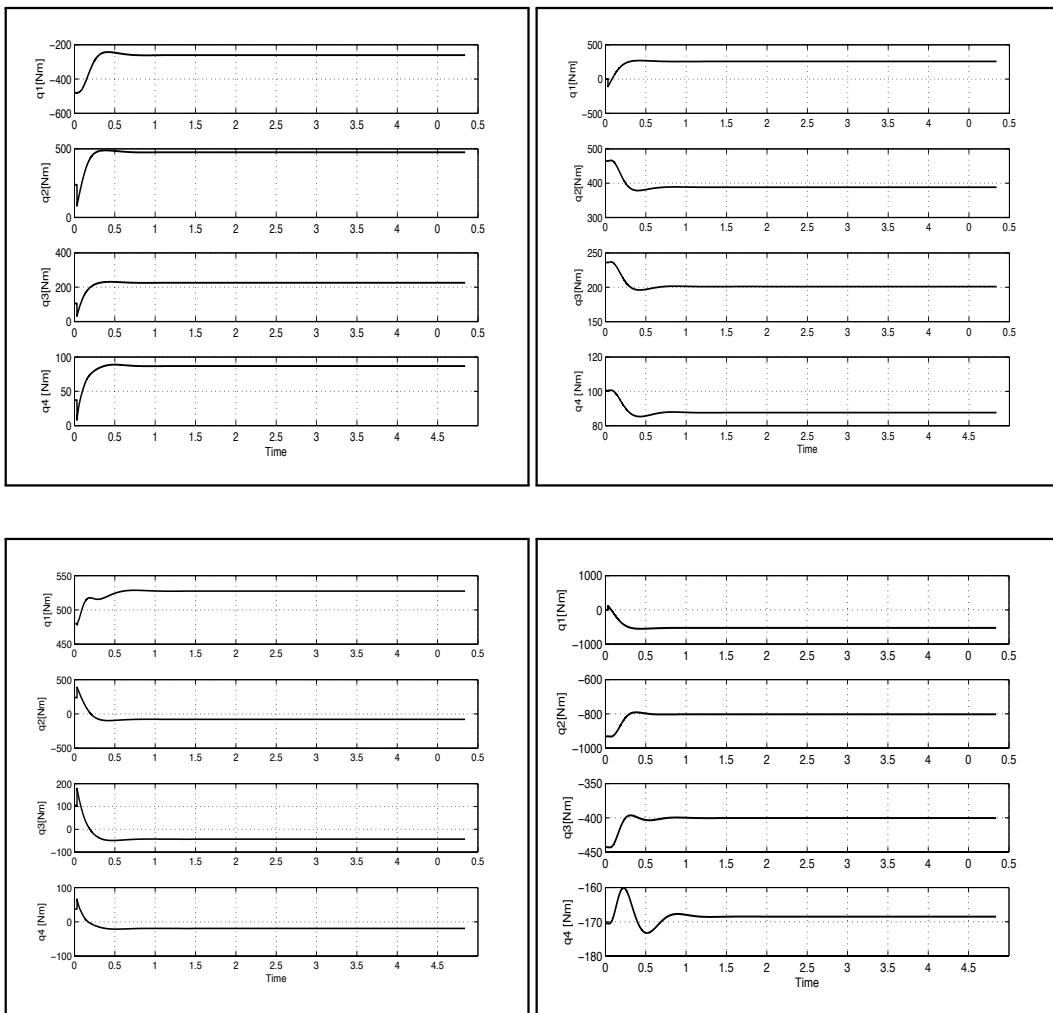
Σχήμα 4.22: Ροπή Εμπέδησης m_O κατά τη στροφή ως προς τον z άξονα (στροφή 0.6 rad), με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF



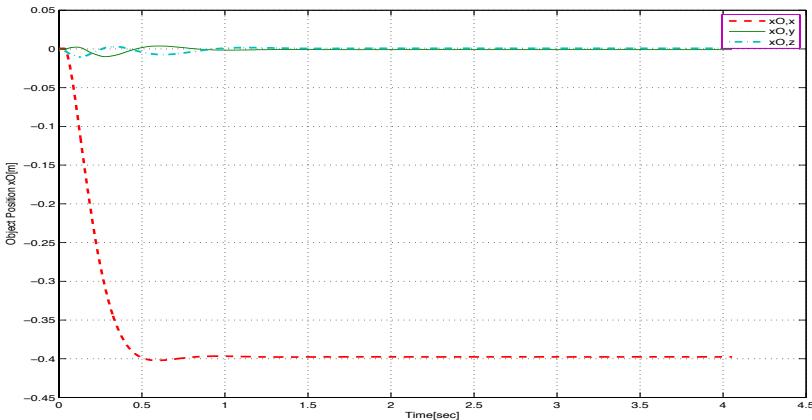
Σχήμα 4.23: Δύναμη Εμπέδησης f_O κατά τη στροφή ως προς τον z άξονα (στροφή 0.6 rad), με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF



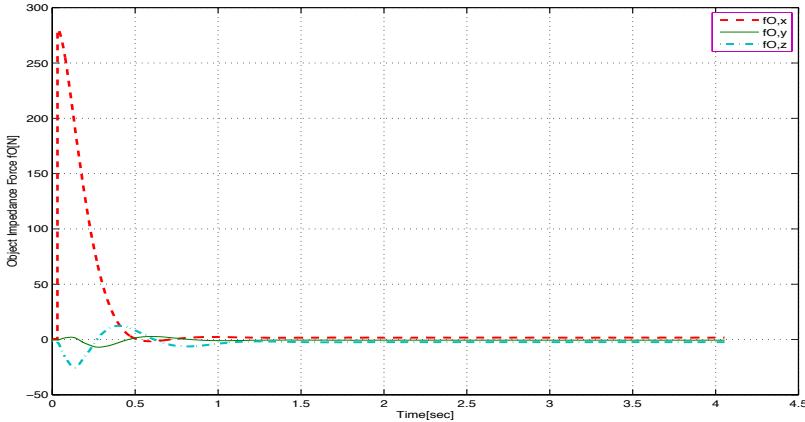
Σχήμα 4.24: Μέτρο Εσωτερικών Δυνάμεων f_{sn} κατά τη στροφή ως προς τον z άξονα (στροφή 0.6 rad), με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF



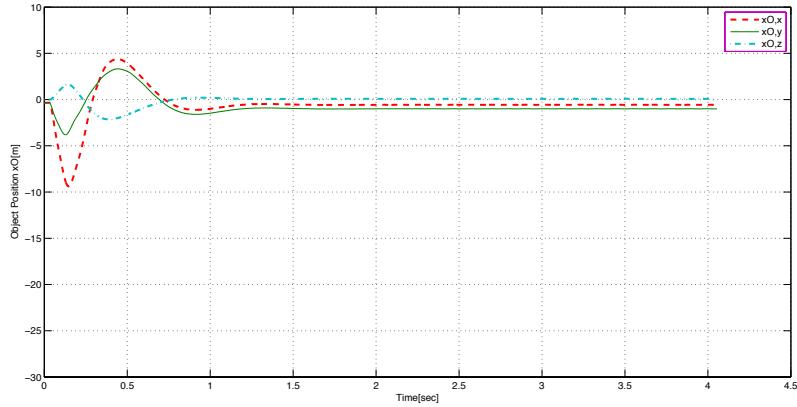
Σχήμα 4.25: Ασκούμενες ροπές στις αρθώσεις των δακτύλων 2,3,4,1-thumb, κατά τη στροφική κίνηση ως προς τον z άξονα (στροφή 0.6 rad), με εφαρμογή του ελεγκτή IPC-IF



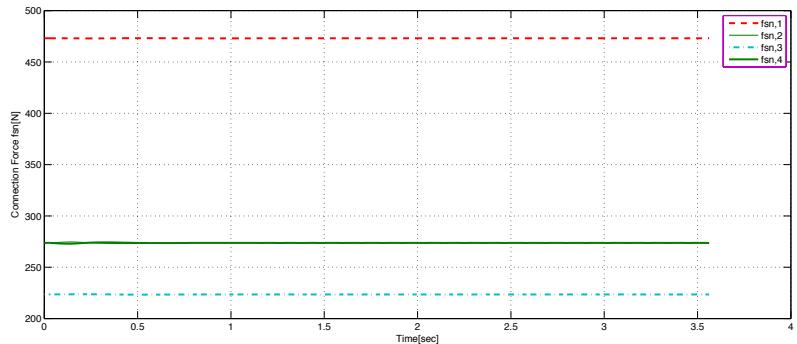
Σχήμα 4.26: Θέση x_O αντικειμένου κατά τη μετατόπιση κατά τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm) με εφαρμογή του ελεγκτή IPC-IF



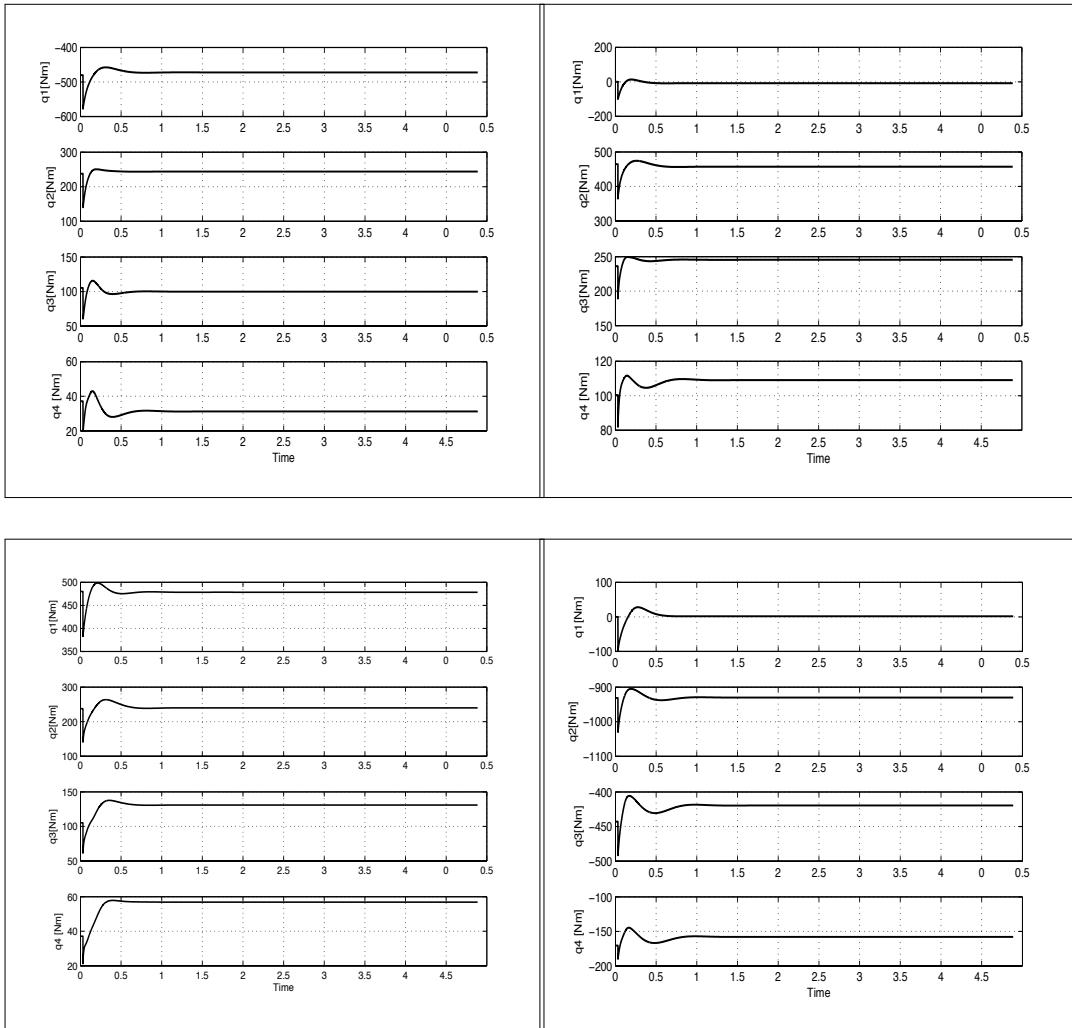
Σχήμα 4.27: Δύναμη εμπέδησης f_O αντικειμένου κατά τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm) με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF



Σχήμα 4.28: Ροπή εμπέδησης m_O κατά τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm) με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF



Σχήμα 4.29: Μέτρο Εσωτερικών Δυνάμεων f_{sn} κατά την μετατόπιση ως προς τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm) με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF



Σχήμα 4.30: Ασκούμενες ροπές στις αρθώσεις των δακτύλων 2,3,4,1-thumb, κατά την μετατόπιση ως προς τον x_o άξονα (μεταφορά 40cm) με εφαρμογή του ελεγκτή IPC-IF.

4.3.2 Μέτρηση Ακαμψίας

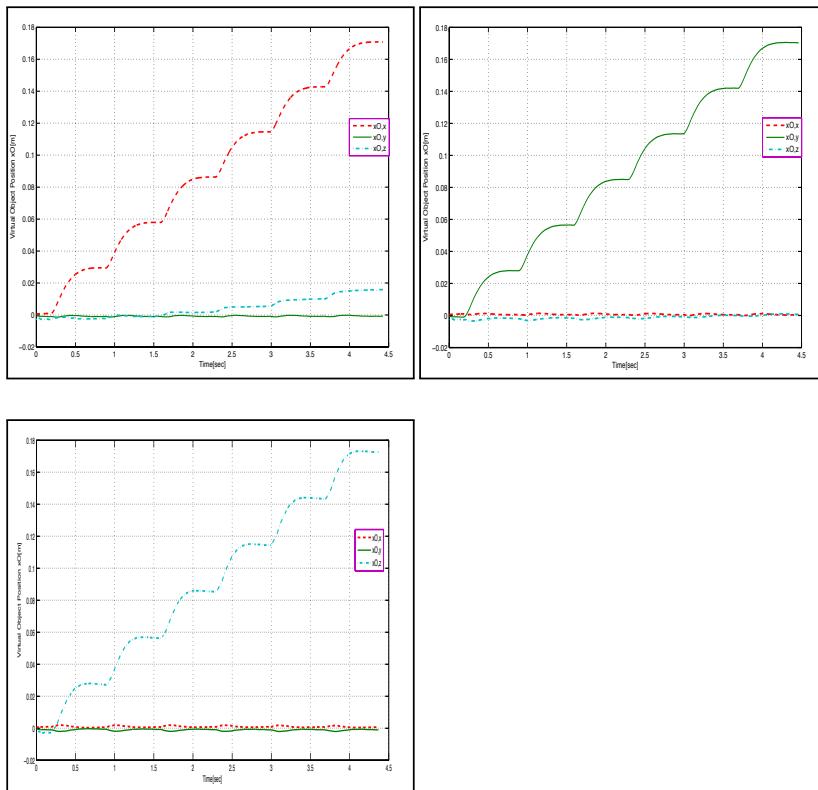
Σε αυτό το σενάριο μετρήσεων κατά τον ίδιο τρόπο με τη προηγούμενη ενότητα ασκούμε διαδοχικά αυξανόμενες Δυνάμεις/Ροπές στο πλαίσιο H_o στο αντικείμενο έτσι ώστε να δούμε τη προκύπτουσα ακαμψία του αντικειμένου $K_{\bar{x}} = \text{blockdiag}\{K_{\text{translational}}, K_{\text{rotational}}\}$.

Ξεκινάμε με εφαρμογή αυξανόμενης δύναμης διαδοχικά στους άξονες x , y , z και παρατηρούμε τις μετατοπίσεις–στροφές που προκύπτουν. Αυξάνουμε τη δύναμη κατά 20 κάθε 0.7sec. Στη συνέχεια ασκούμε ροπή η οποία αυξάνεται διαδοχικά κατά $3Nm$ κάθε 0.7sec και στους τρεις άξονες.

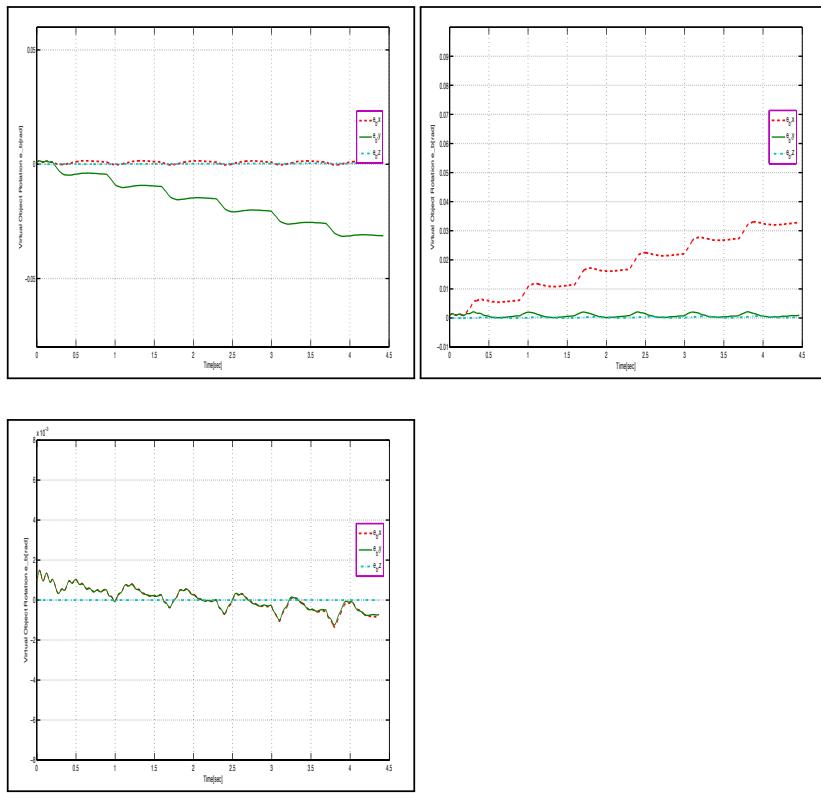
Οι μετρήσεις της ακαμψίας (μεταφορικής–στροφικής) αυτή τη φορά προκύπτουν,

$$K_{tr,measured} = \begin{bmatrix} 699 & 0 & 0 \\ 0 & 704 & 0 \\ 0 & 0 & 698 \end{bmatrix}, \quad K_{rot,measured} = \begin{bmatrix} 191 & 0 & 0 \\ 0 & 196 & 0 \\ 0 & 0 & 192 \end{bmatrix}$$

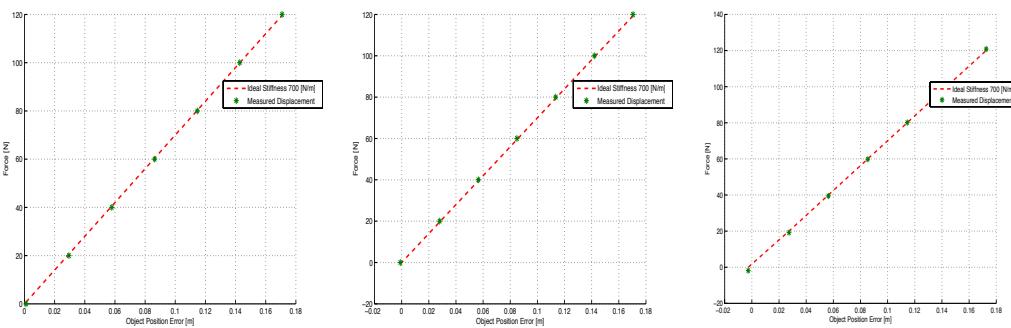
Πράγματι λοιπόν όπως αναμέναμε οι τιμές αυτές είναι σημαντικά πιο κοντά στις επιθυμητές ($k_{\text{translational}} = 700$, $k_{\text{rotational}} = 200$) και ταυτόχρονα οι συζεύξεις μεταξύ διαφορετικών κατευθύνσεων είναι σημαντικά μικρότερες όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στα σχήματα 4.31, 4.32, 4.34, 4.35.



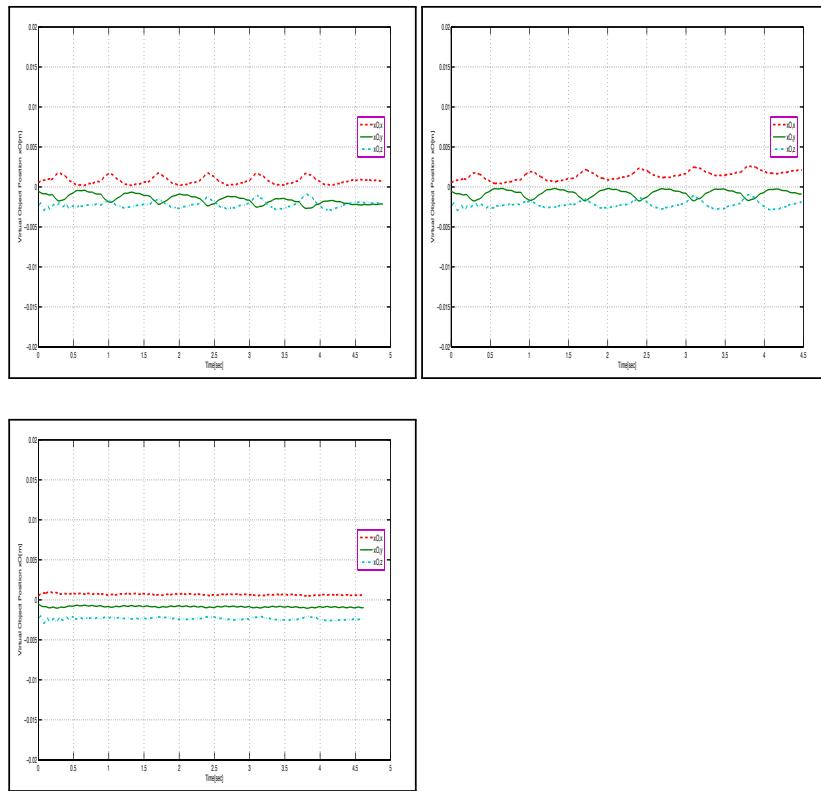
Σχήμα 4.31: Θέση x_o εικονικού πλαισίου κατά την άσκηση δυνάμεων κατά τον x , y , z άξονα αντίστοιχα, με εφαρμογή του ελεγκτή IPC-IF.



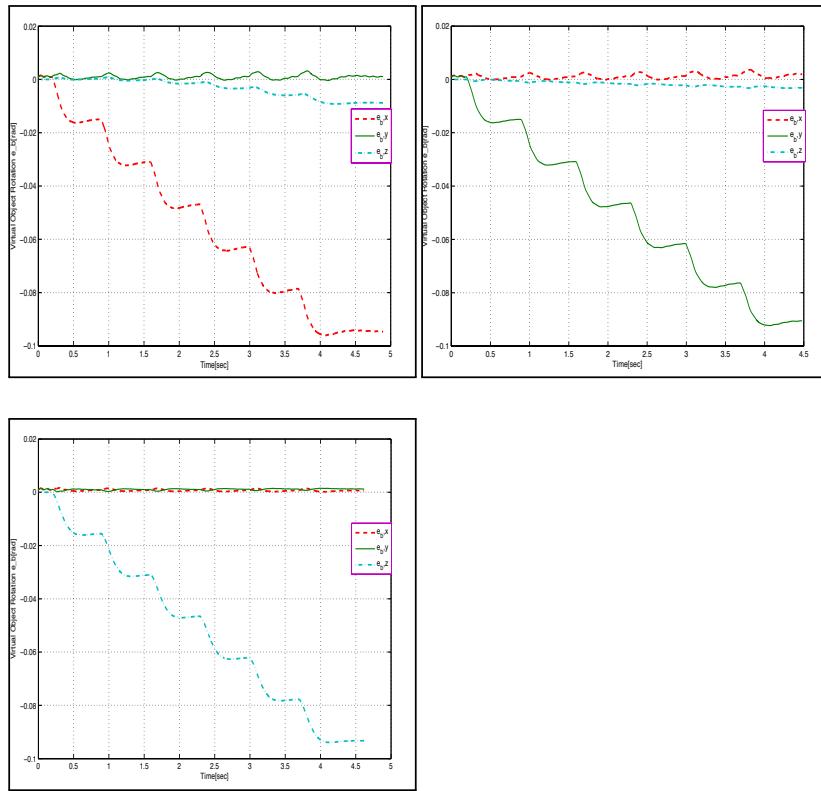
Σχήμα 4.32: Quaternion e_b εικονικού πλαισίου κατά την άσκηση δυνάμεων κατά τον x , y , z άξονα αντίστοιχα, με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF.



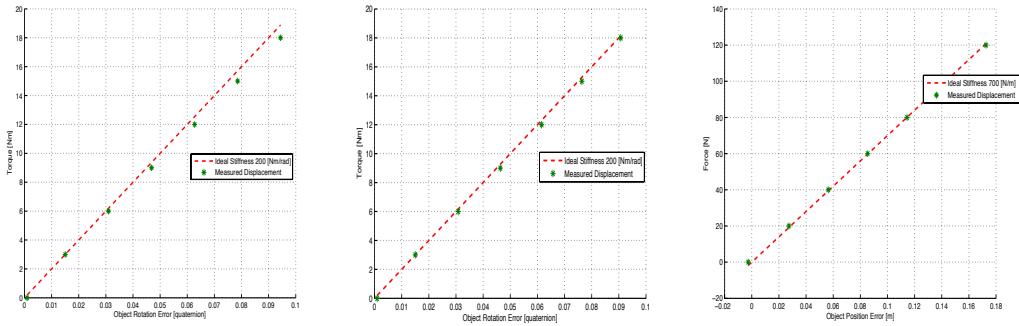
Σχήμα 4.33: Θέση x_o αντικειμένου μετά την άσκηση των δυνάμεων κατά τους άξονες x , y , z του πλαισίου H_o αντίστοιχα, με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF.



Σχήμα 4.34: Θέση x_o εικονικού πλαισίου κατά την άσκηση ροπών κατά τον x, y, z άξονα αντίστοιχα, με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF



Σχήμα 4.35: Quaternion e_b εικονικού πλαισίου κατά την άσκηση ροπών κατά τον x, y, z άξονα αντίστοιχα, με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF



Σχήμα 4.36: Quaternion αντικειμένου μετά την άσκηση των ροπών κατά τους άξονες x , y , z του πλαισίου H_o αντίστοιχα, με εφαρμογή του ελεγκτή IPC–IF

4.4 Σύγκριση ελεγκτών IPC, IPC – IF

Προκειμένου να πραγματοποιήσουμε μία τελική σύγκριση επί των δύο πραγματοποιηθέντων τεχνικών, υπολογίζουμε τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα ως προς τη φαινόμενη μεταφορική και στροφική ακαμψία, τα οποία και παρουσιάζονται στους πίνακες 4.4 και 4.5.

Παρατηρούμε σε κάθε περίπτωση ότι ο ελεγκτής IPC – IF έχει σημαντικά μικρότερο σφάλμα, το οποίο πρακτικά μεταφράζεται σε πιο συνεπή μήτρα ακαμψίας, όπως ήδη έχουμε υπολογίσει.

	Translational Stiffness x	Translational Stiffness y	Translational Stiffness z
IPC	1.29	1.36	3.58
IPC – IF	0.62	1.23	0.68

Πίνακας 4.4: Μέσα τετραγωνικά σφάλματα ($\sum_{i=1}^N e^2/N$) ως προς την φαινόμενη μεταφορική ακαμψία της ρομποτικής λαβής

	Rotational Stiffness x	Rotational Stiffness y	Rotational Stiffness z
IPC	1.67	0.49	0.87
IPC – IF	1.19	0.26	0.73

Πίνακας 4.5: Μέσα τετραγωνικά σφάλματα ($\sum_{i=1}^N e^2/N$) ως προς την φαινόμενη στροφική ακαμψία της ρομποτικής λαβής

Ως προς τα τελικά σφάλματα θέσης πρέπει να σημειώσουμε ότι η απόδοση δεν διαφέρει μεταξύ των δύο ελεγκτών στο βαθμό που αρχικά αναμενόταν. Όπως ήδη σημειώσαμε, παρατηρούμε μία σημαντική μείωση του μόνιμου σφάλματος δύναμης εμπέδησης f_o ως προς τον άξονα z , από την τιμή 3.8N (με εφαρμογή του βασικού

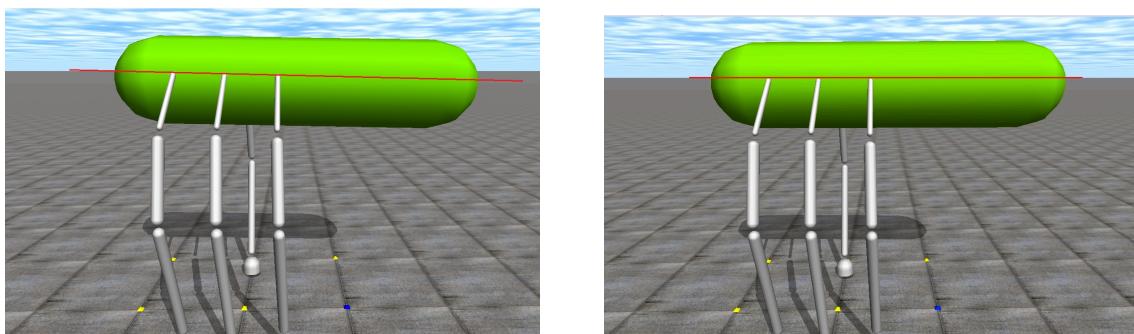
ελεγκτή IPC) στην τιμή $2N$, με εφαρμογή του προτεινόμενου ελεγκτή IPC-IF. Δεδομένου ότι, σε κάθε άλλη περίπτωση το μόνιμο σφάλμα θέσης παραμένει πρακτικά το ίδιο, μπορούμε να πούμε ότι και σε αυτή τη περίπτωση ο ελεγκτής IPC – IF, υπερτερεί.

4.5 Βαρυτική Αντιστάθμιση

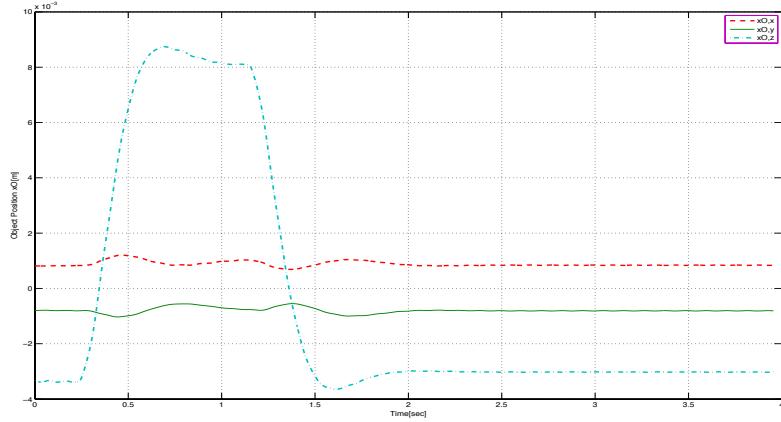
Σε αυτό το σημείο εισάγουμε στο μοντέλο μας τη βαρυτική επίδραση για το αντικείμενο. Αναμένουμε προφανώς τη παρουσία μόνιμων σφαλμάτων θέσης – προσανατολισμού της τελικής κατάστασης όπως παρατηρούμε με τη κλίση του κυλινδρικού αντικειμένου στο σχήμα 4.37α'.

Για την αντιστάθμιση αυτών εφαρμόζουμε το σχήμα που προτείναμε στη παράγραφο 3.4.2 το οποίο ουσιαστικά εισάγει επιπλέον ελαστικούς όρους ακαμψίας μόνιμα προσανατολισμένους στο βαρυτικό διάνυσμα με σκοπό την εξουδετέρωσή του στο επίπεδο του αντικειμένου.

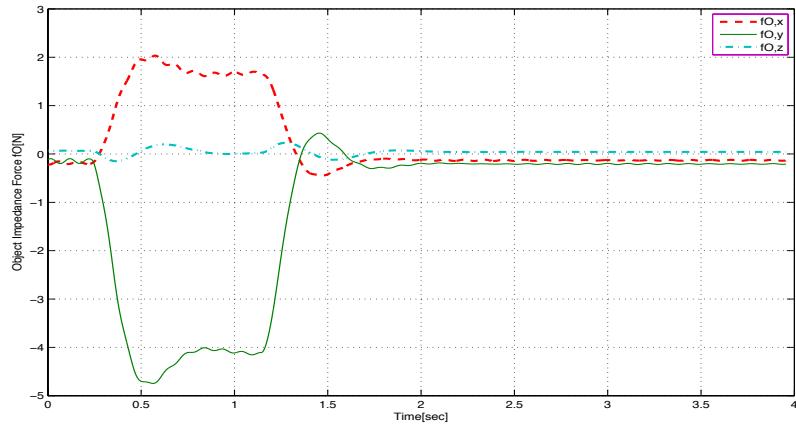
Στο πειραματικό σενάριο αρχικά δεν έχουμε επίδραση του βαρυτικού όρου μέχρι τη χρονική στιγμή $0.3sec$ όπου και ενεργοποιείται η βαρυτική επίδραση στο αντικείμενο. Παρατηρούμε τις αποκλίσεις και τα σφάλματα που παρουσιάζονται μέχρι την ενεργοποίηση του όρου της βαρυτικής αντιστάθμισης η οποία συμβαίνει τη χρονική στιγμή $1.3sec$.



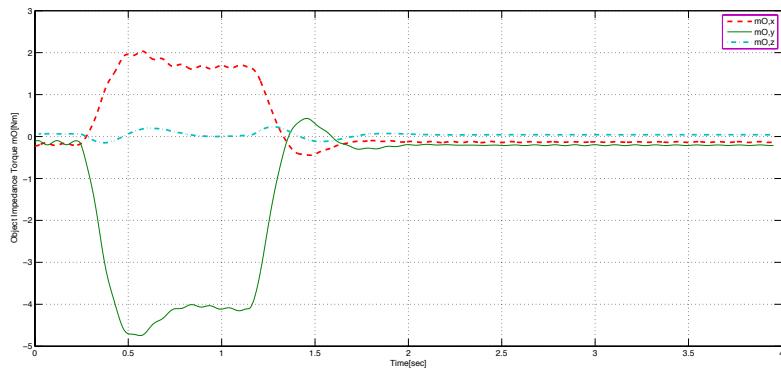
Σχήμα 4.37: Κλίση – μόνιμο σφάλμα θέσης υπό τη παρουσία βαρυτικού πεδίου. Εισαγωγή του όρου βαρυτικής αντιστάθμισης με ανάκτηση θέσης – προσανατολισμού



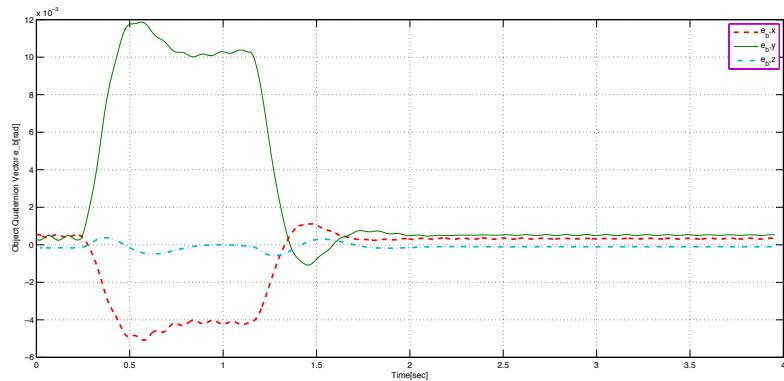
Σχήμα 4.38: Θέση x_O αντικειμένου κατά την εφαρμογή του βαρυτικού όρου στο 0.3sec και του αντισταθμιστικού όρου στο 1.3sec



Σχήμα 4.39: Μεταφορική Δύναμη Εμπέδησης f_O κατά την εφαρμογή του βαρυτικού όρου στο 0.3sec και του αντισταθμιστικού όρου στο 1.3sec



Σχήμα 4.40: Στροφική Εμπέδηση m_O κατά την εφαρμογή του βαρυτικού όρου στο 0.3sec και του αντισταθμιστικού όρου στο 1.3sec



Σχήμα 4.41: Quaternion διάνυσμα e_b κατά την εφαρμογή του βαρυτικού όρου στο 0.3sec και του αντισταθμιστικού όρου στο 1.3sec

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα – Επεκτάσεις

Στο τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζουμε τα κύρια σημεία της παρούσης διπλωματικής εργασίας, τα συμπεράσματα που προκύπτουν καθώς και τις πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις–προεκτάσεις.

5.1 Σύνοψη–Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται όνα ιδιαίτερα απαιτητικό θέμα στον κλάδο της ρομποτικής, αυτό του επιδέξιου ρομποτικού χειρισμού με ανθρωπομορφικές διατάξεις ρομποτικών χεριών (με παράλληλες συνεργαζόμενες κινηματικές αλυσίδες).

Αρχικά στη παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια αναλυτική βιβλιογραφική επισκόπιση βασικών θεμάτων που αφορούν τον επιδέξιο ρομποτικό χειρισμό με έμφαση στις χρησιμοποιούμενες τεχνικές ελέγχου.

Για τη μελέτη και ανάπτυξη λύσεων σε επίπεδο ελέγχου της ρομποτικής λαβής αναπτύξαμε ένα ειδικά προσαρμοσμένο ειδικό περιβάλλον προσομοίωσης εντός του Simulink με τη χρήση των βιβλιοθηκών ανοικτού κώδικα Open Dynamics Engine μεταγλωτισμένων εντός MEX C++S-Function Block με στόχο την δόμηση πλατφόρμας προσομοιώσεων φυσικής πολλών σωμάτων (Multibody Dynamics) με διαχείριση φαινομένων επαφών–συγκρούσεων (Collision Handling).

Πάνω στη πλατφόρμα αυτή εφαρμόζουμε αρχικά τεχνική ελέγχου επιδέξιας ρομποτικής λαβής σε επίπεδο αντικειμένου βασιζόμενη στη παθητική ιδιότητα ταυτόχρονα με δυναμικό έλεγχο απόσβεσης στο επίπεδο του αντικειμένου. Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων αρχικά καταδεικνύουν αξιόπιστη εκτέλεση δυναμικών προσομοιώσεων βάσει του API της ODE εντός πάντα του πλαισίου των αυστηρών υποθέσεων που θέσαμε εξ αρχής πάνω σε θέματα χυρίως της φυσικής των επαφών μεταξύ των σωμάτων. Επίσης βάσει των αποτελεσμάτων αυτών αξιολογείται ο συγκεκριμένος αλγόριθμος ο οποίος εν γένει παρουσιάζει ικανοποιητική συμπεριφορά με την κριτική μας να εστιάζει χυρίως στα ακόλουθα σημεία,

- Μεγάλη εφαπτομενική πίεση σε αντικείμενα κυλινδρικά ή κυβικά από τα ακροδάκτυλα με αποτέλεσμα την πιθανή απώλεια στήριξης λόγου κίνησης εκτός των περιορισμών τριβής του μοντέλου επαφής.
- Παρουσία μόνιμων σφαλμάτων τελικής θέσης.
- Παρουσία παρασιτικής σύζευξης μεταξύ κινήσεων σε διαφορετικές κατευθύνσεις.
- Σφάλμα στη μετρούμενη ακαμψία σε σχέση με αυτή που ορίζουμε σε επίπεδο ελεγκτή.

Τα φαινόμενα αυτά τα αποδίδουμε στη τεχνική ελέγχου εσωτερικών δυνάμεων μέσω ορισμού συντελεστών ακαμψίας μεταξύ ακροδακτύλων και εικονικού πλαισίου αντικειμένου. Οι δυνάμεις που δημιουργούνται από αυτές τις συνδέσεις δεν απεικονίζονται στο μηδενικό χώρο της μήτρας λαβής με αποτέλεσμα να δημιουργούν μία συνισταμένη εξωτερική δύναμη στο αντικείμενο υπό χειρισμό η οποία αποτελεί και αιτία των προβλημάτων που αναφέραμε.

Πάνω σε αυτό το θέμα προτείνουμε λύση βασιζόμενη στη γεωμετρία της επιφάνειας του αντικειμένου και συγκεκριμένα την προβολή στον εσωτερικό χώρο της μήτρας λαβής δυνάμεων κάθετων στην επιφάνεια της επαφής. Θεωρούμε ότι αυτό αποτελεί ρεαλιστική προσέγγιση καθώς η λήψη του κάθετου διανύσματος στην επιφάνεια είναι πιθανή μέσω συστημάτων όρασης–αφής τα οποία, στις περισσότερες των περιπτώσεων, είναι παρόντα στις ρομποτικές εφαρμογές με στόχο τον επιδέξιο χειρισμό. Με αυτό το τρόπο επιτυγχάνουμε τη διατήρηση των δυνάμεων των ακροδακτύλων εντός των περιορισμών τριβής του μοντέλου της επαφής αποφεύγοντας πιθανές ολισθήσεις και ταυτόχρονα απόλυτο έλεγχο των εσωτερικών δυνάμεων. Οι πραγματοποιηθείσες προσομοιώσεις επαληθεύουν ακριβώς αυτές τις υποθέσεις δίνοντας μας μικρότερα μόνιμα σφάλματα θέσης, μικρότερες συζεύξεις μεταξύ διαφορετικών κατευθύνσεων κίνησης καθώς και συνεπή μήτρα ακαμψίας σε σχέση με αυτή που ορίζουμε.

Τέλος εισάγουμε την βαρυτική επίδραση στο σύστημα η οποία όντας μία εξωτερική δύναμη δημιουργεί μόνιμα σφάλματα θέσης. Για τα δάκτυλα έχουμε εισάγει ήδη δυναμικό βαρυτικό όρο αλλά όχι και για το αντικείμενο. Επεκτείνοντας τις ακαμψίες ως προς την μετατόπιση–περιστροφή εισάγουμε όρο αντιστάθμισης βαρύτητας σε επίπεδο αντικειμένου, γεωμετρικά συνεπή, με επιτυχή αποτελέσματα.

5.2 Επεκτάσεις–Μελλοντικές κατευθύνσεις

Προσομοίωση

Η προσομοίωση δυναμικών συστημάτων αποτελεί ένα εξαιρετικά μεγάλο και κρίσιμο κομμάτι της μηχανικής των συστημάτων για την κατασκευή ολοκληρωμένων επιτυχών εφαρμογών. Όπως ήδη αναφέραμε η Open Dynamics Engine αποτελεί μία ιδιαίτερα δημοφιλής λύση για την προσομοίωση συστημάτων ρομποτικής χάρη κυρίως, στην ευρωπαϊκή της, την σταθερότητά της, την ευελιξία της καθώς και την ταχύτητάς της. Παρόλα αυτά παρουσιάζει σημαντικές ελλείψεις και απλοποιήσεις περιοριζόμενη παράλληλα σε προσομοίωσεις απόλυτα στερεών σωμάτων, ενώ αντιθέτως παρατηρούμε ότι ένα μεγάλο μέρος της ρομποτικής έρευνας προσανατολίζεται στην ρομποτική εύκαμπτων–μαλακών στοιχείων (Soft–Robotics). Αν και μπορεί κανείς για αυτές τις περιπτώσεις μπορεί κανείς να αναζητήσει στη βιομηχανία προσαρμοσμένες εμπορικές εφαρμογές το πρόβλημα της ρεαλιστική δυναμικής προσομοίωσης συστημάτων πολλαπλών σωμάτων με ταυτόχρονη διαχείριση φαινομένων συγκρούσεων παραμένει ακόμα ανοικτό.

Έτσι λοιπόν, σήμερα, θα μπορούσε κανείς να αναπτύξει ένα νέο πακέτο λογισμικού ανοικτού κώδικα για τη δυναμική προσομοίωση προσαρμοσμένο στις σημερινές ανάγκες της ρομποτικής κοινότητας. Ενδιαφέρον έχει ότι ενώ έχουν γίνει πολυποικιλες προσπάθειες για τη δημιουργία πλατφόρμας ανάπτυξης ρομποτικών συστημάτων (Webots, V-Reptile, ROS κ.α.), όλες βασίζονται σε απλουστευμένες μηχανικές φυσικής προσανατολισμένες κυρίως στην ανάπτυξη εφαρμογών ψυχαγωγίας και γραφιστικής με κύριες τις ODE, Bullet και PhysX όπου αντικειμενικός τους στόχος είναι η ταχεία και αληθιφανής απόκριση και όχι η δυναμική προσομοίωση με στόχο την απόλυτη ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Έλεγχος

Στο κομμάτι του ελέγχου αρχικά κανείς μπορεί να παρατηρήσει ότι στο σύστημά μας κάνουμε υπόθεση τέλειου ελεγκτή ροπής στις αρθρώσεις όπου το σήμα μας μεταφράζεται απόλυτα στην τελικώς ασκούμενη ροπή στις αρθρώσεις. Αυτό φυσικά αφαιρεί αρκετά σημαντικό κομμάτι από την αξιοπιστία της προσομοίωσης. Έτσι λοιπόν μία προφανής προσθήκη θα ήταν η δημιουργία υποσυστήματος για το χαμηλό επίπεδο του ελεγκτή ροπής το οποίο θα περιλαμβάνει τη δυναμική του συστήματος επενέργησης.

Ως προς το κομμάτι του συνολικού δυναμικού συστήματος του μοντέλου της ρομποτικής λαβής, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, στην ανάλυση μας έγιναν κάποιες απλουστευτικές παραδοχές προς διευκόλυνση του προσδιορισμού του δυναμικού όρου απόσβεσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μία μη αμελητέα ασυνέπεια ως προς το χαρακτήρα των μεταβατικών χαρακτηριστικών για διαφορετικές θέσεις – τοποθετήσεις του συστήματος. Θα ήταν χρήσιμο να διερευνηθεί προς αυτή τη κατεύθυνση ένα

ακόμη πιο ολοκληρωμένο σχήμα ελέγχου το οποίο θα λαμβάνει υπ' όψη του και τους όρους Coriolis – γινομένων γωνιακών ταχυτήτων τους οποίους παραλείφαμε στην ανάλυσή μας.

Στη συνέχεια αυτό που γίνεται προφανές είναι ότι στον αλγόριθμό μας λαμβάνουμε ως δεδομένη τη γνώση για τα αδρανειακά χαρακτηριστικά του αντικειμένου υπό χειρισμό κάτι το οποίο υποσκάπτει τη προσπάθεια για κατασκευή ρομποτικών συστημάτων με αυτοματοποιημένη δράση σε μη δομημένο περιβάλλον. Είναι δυνατή η εισαγωγή σχήματος προσαρμοστικού ελέγχου ο οποίος θα δύναται να ρυθμίσει τις παραμέτρους του συστήματος δυναμικά για διαφορετικά αδρανειακά χαρακτηριστικά αντικειμένων.

Αν και το σύστημα ικανοποιεί το χαρακτηρισμό “επιδέξιο”, στη πραγματικότητα υπάρχουν σημαντικά περιθώρια βελτίωσης ως προς αυτό, αναλογιζόμενοι ότι τα περιθώρια προσανατολισμού του αντικειμένου είναι στη πραγματικότητα περιορισμένα. Εξαιρετικά ενδιαφέρουσα προοπτική, θα ήταν λοιπόν, η επέκταση του σχήματος για πραγματοποίηση finger gaiting ή και κατάλληλης ολίσθησης – κύλισης στα ακροδάκτυλα, για την αύξηση της επιδεξιότητας, εισάγοντας ουσιαστικά με αυτό τον τρόπο δυναμική διακριτών φαινομένων.

Μία εργασία με επίσης μεγάλο ενδιαφέρον, θα ήταν η δοκιμή των συγκεκριμένων αλγορίθμων σε συστήματα με διαφορετικά μοντέλα επαφών που περιλαμβάνουν και φαινόμενα 2ης τάξης.

Πραγματικό Σύστημα

Η θεωρητική ανάλυση και προσομοίωση αποτελούν αναπόσπαστα και αναγκαία κομμάτια κάθε προσπάθειας ανάπτυξης συστημάτων αυτόματου ελέγχου. Όλα αυτά φυσικά μικρό νόημα αποκτούν αν δεν υπάρχει εφαρμογή στον πραγματικό κόσμο και σε πραγματικές συνθήκες.

Βιβλιογραφία

- [1] O. Khatib B. Siciliano, editor. *Handbook of Robotics*. Springer, 2008.
- [2] M. Otter J. Stelter. G.Hirzinger, J. Bals. The dlr-kuka success story robotics research improves industrial robots. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 12(3):16–23, Sept. 2005 2005.
- [3] <http://www.businessinsider.com/the-drones-are-coming-2012-12>.
- [4] Tsuneo Yoshikawa. Multifingered robot hands: Control for grasping and manipulation. *Annual Reviews in Control*, 34(2):199 – 208, 2010.
- [5] <http://www.svrobo.org/>.
- [6] <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/next-big-thing-in-silicon-valley-robotics>.
- [7] <http://faculty.washington.edu/chudler/facts.html>.
- [8] A. Bicchi. Hands for dexterous manipulation and robust grasping:a difficult road toward simplicity. *IEEE Trans Rob Autom*, , 16(6):652–662, December 2000.
- [9] http://www.ieee.ca/millennium/canadarm/canadarm_technical.html.
- [10] Eric Brown, Nicholas Rodenberg, John Amend, Annan Mozeika, Erik Steltz, Mitchell R. Zakin, Hod Lipson, and Heinrich M. Jaeger. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(44):18809–18814, 2010.
- [11] F. Lotti, P. Tiezzi, G. Vassura, L. Biagiotti, and C. Melchiorri. Ubh 3: an anthropomorphic hand with simplified endo-skeletal structure and soft continuous fingerpads. In *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on*, volume 5, pages 4736 – 4741 Vol.5, april-1 may 2004.
- [12] Pham Thuc Anh Nguyen and Suguru Arimoto. Learning motion of dextrous manipulation for a pair of multi-dof fingers with soft-tips. *Asian Journal of Control*, 4(1):11–20, March 2002.

- [13] P. Payeur F. F. Khalil. Dexterous robotic manipulation of deformable objects with multi-sensory feedback - a review. *Robot Manipulators, Trends and Development, In-Teh(eds)*, Chap. 28:33 pages, March 2010.
- [14] V. Kumar A. Bicchi. Robotic grasping and contact: A review. In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 348–353, August 2000.
- [15] Andrey V.Savkin. *Hybrid Dynamical Systems*. Birkhäuser, 2002.
- [16] Thomas Schlegl, Martin Buss, and Günther Schmidt. Hybrid control of multi-fingered dexterous robotic hands. In Sebastian Engell, Goran Frehse, and Eckehard Schnieder, editors, *Modelling, Analysis, and Design of Hybrid Systems*, volume 279, pages 437–465. Springer Berlin Heidelberg, 2002.
- [17] B. Wang, L. Jiang, J.W. Li, H.G. Cai, and H. Liu. Grasping unknown objects based on 3d model reconstruction. In *Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on*, pages 461 – 466, july 2005.
- [18] Byoung-Ho Kim, Byung-Ju Yi, Sang-Rok Oh, and Il Hong Suh. Independent finger and independent joint-based compliance control of multifingered robot hands. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 19(2):185 – 199, April 2003.
- [19] Hanafiah Yussof and Masahiro Ohka. Application of stiffness control algorithm for dexterous robot grasping using optical three-axis tactile sensor system. In *Micro-NanoMechatronics and Human Science, 2009. MHS 2009. International Symposium on*, pages 472 – 476, nov 2009.
- [20] Jeremy A. Fishel and Gerald E. Loeb. Bayesian exploration for intelligent identification of textures. *Frontiers in Neurorobotics*, 6(4), 2012.
- [21] Gregory. P. Starr. An experimental investigation of object stiffness control using a multifingered hand. *Robotics and Autonomous Systems, Elsevier*, 10(1):33 –42, October 1992.
- [22] Y. Youm H.R. Choi, W.K. Chung. Control of grasp stiffness using a multifingered robot hand with redundant joints. *Robotica (1995),Cambridge University Press*, 13:351–362, 1994.
- [23] K. Kumazaki, M. Svinin, Z. Luo, T. Odashima, and S. Hosoe. A study on the stable grasping by a redundant multi-fingered robot hand. In *SICE 2002. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference*, volume 1, pages 230 –231, aug 2002.
- [24] T. Schleg M. Buss. Multi-fingered regrasping using on-line grasping force optimization. In *Robotics and Automation, 1997. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on*, volume 2, pages 998 – 1003, April 1997.

- [25] Zhiwei Luo, T. Ito, N. Sugimoto, T. Odashima, and S. Hosoe. Virtual impedance control for preshaping of a robot hand. In *SICE 2002. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference*, volume 3, pages 2058 – 2059, August 2002.
- [26] Akira Nakashima, Yuta Yoshimatsu, and Yoshikazu Hayakawa. Analysis and synthesis of stable grasp by multi-fingered robot hand with compliance control. In *Control Applications (CCA), 2010 IEEE International Conference on*, pages 1582 – 1589, sept. 2010.
- [27] G. Hirzinger T. Wimboeck, C. Ott. Passivity-based object-level impedance control for a multifingered hand. In *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 4621 – 4627, oct 2006.
- [28] G. Hirzinger T. Wimböck, C. Ott. Impedance behaviors for two-handed manipulation: Design and experiments. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, pages 4182 – 4189, april 2007.
- [29] A. Albu-Schäffer G. Hirzinger T. Wimböck, C. Ott. Comparison of object-level grasp controllers for dynamic dexterous manipulation. *The International Journal of Robotics Research*, 31(1):3 –23, September 2011.
- [30] Σπύρος Γ. Τζαφέστας. *Ρομποτική, Ανάλυση – Έλεγχος – Σχεδιασμός – Προγραμματισμός – Αίσθηση*. 2003.
- [31] <http://www.texample.net/tikz/examples/>.
- [32] Hassan K. Khalil. *Nonlinear Systems*. Prentice Hall, 3rd edition, 2002.
- [33] James Diebel. Representing attitude: Euler angles, unit quaternions, and rotation vectors. Stanford University, October 2006.
- [34] Udo Frese Gerd Hirzinger Alin Albu-Schäffer, Christian Ott. Cartesian impedance control of redundant robots: Recent results with the dlr-light-weight-arms. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA '03.*, volume 3, pages 3704 – 3709, 2003.
- [35] O. Khatib. A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation. *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 3(1):43 – 53, February 1987.
- [36] Gerd Hirzinger Alin Albu-Schäffer, Christian Ott. A passivity based cartesian impedance controller for flexible joint robots - part ii: Full state feedback, impedance design and experiments. In *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on*, volume 3, pages 2666 – 2672 Vol.3, april-1 may 2004.
- [37] <http://www.ode.org/ode-latest-userguide.html>.

- [38] Fanny Ficuciello. *Modelling and Control for Soft Finger Manipulation and Human-Robot Interaction*. PhD thesis, Faculty of Engineering, University of Naples Federico II, 2010.
- [39] <http://code.google.com/p/ode-frank/>.