



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΗΜΑΤΩΝ, ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ

**Απτική Ανάδραση σε Περιβάλλον Εικονικής Προσομοίωσης
Παραμορφώσιμων Φυσικών Δομών:
Εφαρμογή Μοντέλου Δικτυώματος Μαζών-Ελατηρίων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτα Κ. Στράτου

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Σ. Τζαφέστας
Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2005



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΗΜΑΤΩΝ, ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ

**Απτική Ανάδραση σε Περιβάλλον Εικονικής Προσομοίωσης
Παραμορφώσιμων Φυσικών Δομών:
Εφαρμογή Μοντέλου Δικτυώματος Μαζών-Ελατηρίων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτα Κ. Στράτου

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Σ. Τζαφέστας
Λέκτορας ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Ιούλιο 2005.

.....
Κωνσταντίνος Τζαφέστας
Λέκτορας ΕΜΠ

.....
Πέτρος Μαραγκός
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Κωνσταντίνα Νικήτα
Αν. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2005

.....
Παναγιώτα Κ. Στράτου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Παναγιώτα Στράτου, 2005.

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 απόψεις 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.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια - που η υπολογιστική ισχύς και το μειωμένο κόστος το επιτρέπουν - έχουν προκύψει καινούργιοι, πιο προηγμένοι τρόποι επικοινωνίας του ανθρώπου με τον υπολογιστή. Η εικονική πραγματικότητα αποτελεί τον κυριότερο από αυτούς και έχει να επιδείξει ενδιαφέρουσες εφαρμογές σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης ζωής. Πρόκειται για την ανάπτυξη στον υπολογιστή ενός περιβάλλοντος «πλούσιου σε αισθήσεις» οι οποίες προσδίδουν αίσθημα ρεαλισμού και αμεσότητας στο χρήστη. Στην εργασία αυτή θα επικεντρωθούμε στη μελέτη απτικών συστημάτων (συστήματα που παρέχουν τη δυνατότητα στο χρήστη να αποκτήσει πληροφορίες για το εικονικό περιβάλλον μέσω της αίσθησης της αφής), και τα οποία λειτουργούν με ανάδραση δύναμης προς τον άνθρωπο χειριστή. Θα αναφερθούν αρκετά παραδείγματα τέτοιων απτικών διατάξεων που ήδη υπάρχουν. Στόχος μας είναι να αναπτύξουμε ένα τέτοιο σύστημα για την προσομοίωση ψηλαφητικής διάγνωσης. Για το λόγο αυτό, θα γίνει μία σύντομη βιβλιογραφική μελέτη των πιο γνωστών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση παραμορφώσιμων αντικειμένων στο εικονικό περιβάλλον. Θα επιλέξουμε ένα από τα μοντέλα αυτά και θα δημιουργήσουμε μία εικονική δομή που να προσομοιώνει μαλακό ιστό ως προς τις απτικές ιδιότητες. Στη συνέχεια, θα γίνει σύζευξη του εικονικού περιβάλλοντος που δημιουργήσαμε με τη συγκεκριμένη απτική διάταξη που διαθέτουμε, θα μελετηθούν τα προβλήματα που αντιμετωπίσαμε κατά τη διαδικασία αυτή και θα προταθούν κάποιες λύσεις για αυτά. Τέλος, θα αξιολογήσουμε το σύστημα που δημιουργήσαμε ως προς την δυνατότητα αντίληψης διαφοροποιήσεων της σκληρότητας της εικονικής δομής με ένα πείραμα, και συγκρίνοντας την δυνατότητα αντίληψης (που έχει κανείς μέσω του όλου απτικού συστήματος) με την πραγματική.

Λέξεις Κλειδιά

Εικονική πραγματικότητα, Εικονικό περιβάλλον, Απτικό σύστημα, Απτική διάταξη, Μοντέλο παραμόρφωσης, Μοντέλο δικτυώματος μάζας-ελατηρίου, Ανάδραση δύναμης, Σύζευξη απτικής διάταξης, Αντίληψη σκληρότητας, Πειράματα ψυχοφυσικής, Αντίληψη αφής

Abstract

During the last years (with the advance in computing power and the reduction of costs making it feasible) new ways of communication between man and computer have occurred, which are more sophisticated than the traditional ones. Among them, Virtual reality is a very important one and it can demonstrate interesting applications in many fields of human life. The main concept is the development of a computer-based rich sensorial environment, which provides the user with a feeling of immersion and realism. In this particular project, we will concentrate in the study of haptic systems (systems that provide the user with the capability to gain information from the virtual environment through the sense of touch), which are based on force feedback towards the human operator. Some examples of such haptic devices that already exist will be mentioned. Our objective is the development of a haptic system for the simulation of palpation diagnosis. Thus, a brief reference study of the most common deformation models for the simulation of deformable objects is included. One of those models will be chosen to create a virtual structure, which will be used for the simulation of soft tissue as far as its haptic properties are concerned. Further on, the coupling of the virtual environment with the specific haptic device we have in our possession will be accomplished, the problems that occurred during this task will be studied and some solutions for these will be proposed. Finally, we will proceed with an experiment aiming at the evaluation of the haptic system we designed, as far as the perception of stiffness of the virtual structure is concerned. That will be accomplished through comparing the perception of stiffness provided by the haptic system and the one that exists in the real world.

Key Words

Virtual reality, Virtual environment, Haptic system, Haptic device, Deformation model, Mass-spring model, Force feedback, Haptic device coupling, Stiffness perception, Psychophysics experiments, Touch perception.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου Κωνσταντίνο Τζαφέστα για την πολύτιμη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειας αυτής. Επίσης, ευχαριστώ όλους όσους προθυμοποιήθηκαν να λάβουν μέρος στο πειραματικό μέρος της εργασίας αυτής και μας βοήθησαν να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	7
Ευχαριστίες	9
Περιεχόμενα	11
Σχήματα	13
Διαγράμματα	15
Πίνακες	17
1. Εισαγωγή – Βιβλιογραφική επισκόπηση – Στόχοι	19
1.1 Συστήματα ανάδρασης δύναμης	19
1.1.1 Μη φορητά συστήματα	20
1.1.2 Φορητά Συστήματα	24
1.2 Εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας	26
1.2.1 Ψυχαγωγία- Τέχνη	27
1.2.2 Τηλερομποτική	27
1.2.3 Εκπαίδευση-Επιστήμες-Εμπόριο	29
1.2.4 Στρατιωτικές εφαρμογές	29
1.2.5 Ιατρική	30
1.3 Στόχοι της εργασίας	31
2. Μοντελοποίηση Παραμόρφωσης	33
2.1 Μοντέλα Παραμόρφωσης	33
2.1.1 Μη φυσικά μοντέλα	34
2.1.2 Φυσικά μοντέλα	34
2.2 Υλοποίηση μοντέλου δικτύωματος μάζας-ελατηρίου	42
2.2.1 Δομή προς παραμόρφωση	42
2.2.2 Μοντέλο χεριού	44
2.2.3 Επαφή	45
2.2.4 Παρατηρήσεις για το μοντέλο	46

3. Απτική ανάδραση	49
3.1 Έλεγχος απτικής συσκευής	49
3.2 Απτική διάταξη	51
3.3 Δύναμη ανάδρασης προς την απτική διάταξη	53
3.3.1 Πρόβλημα συγχρονισμού	54
3.3.2 Πρόβλημα αριθμητικής ολοκλήρωσης	54
3.3.3 Πρόβλημα σύζευξης	56
3.3.4 Προβλήματα οφειλόμενα στο μοντέλο παραμόρφωσης	56
3.3.5 Φίλτρο	62
4. Πειραματική αξιολόγηση – Απτική αντίληψη	69
4.1 Στοιχεία ψυχοφυσικής – απτική αντίληψη	69
4.2 Πειραματική αξιολόγηση – απτική αντίληψη σκληρότητας εικονικής δομής	72
4.2.1 Πειραματικό πρωτόκολλο – Αποτελέσματα	72
4.2.2 Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα	75
Συμπεράσματα – Μελλοντική έρευνα	77
Παράρτημα : Τμήμα κώδικα C/C++	79
Βιβλιογραφία	89

Σχήματα

1.1 Joystick πλατφόρμας «Stewart» 4 βαθμών ελευθερίας (Burdea, 1996)	20
1.2 Phantom Master (Burdea, 1996)	21
1.3 MEL Master Arm (Burdea, 1996)	22
1.4 SACROS Arm Master (Burdea, 1996)	23
1.5 GLAD-IN-ART Master (Burdea, 1996)	24
1.6 LRP Hand Master (Burdea, 1996)	25
1.7 Rutgers Master I (Burdea, 1996)	26
1.8 Εφαρμογή εικονικής πραγματικότητας στην τηλερομποτική (Burdea, 1996)	28
2.1 Παράδειγμα απλής δομής δικτύωματος μάζας-ελατηρίου	35
2.2 Παραδείγματα απλών στοιχείων που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Παρατηρούμε 2D και 3D στοιχεία, με διάφορους αριθμούς κόμβων	37
2.3 Παράδειγμα διακριτοποίησης LEM. Φαίνονται το απλό στοιχείο, το αντικείμενο προς μοντελοποίηση και πώς τελικά αυτό διακριτοποιείται σε πολλά στοιχεία LEM (Mendoza, Sundaraj, Laugier, 2002)	38
2.4 Δομή δικτύωματος μαζών ελατηρίων	43
2.5 Σύνδεση μαζών στο μοντέλο δικτύωματος μαζών-ελατηρίων	43
2.6 Υλοποίηση τεχνικής εικονικής σύζευξης	44
2.7 Στιγμιότυπο από την προσομοίωση της παραμόρφωσης	45
2.8 Στιγμιότυπα από την προσομοίωση της παραμόρφωσης με χειριστήριο σφαίρα	47
3.1 Διάγραμμα συστήματος σύμφωνα με τη θεώρηση δίθυρων	50
3.2 Απτική διάταξη : Phantom Omni	51
3.3 Βαθμοί ελευθερίας της διάταξης Phantom Omni (SensAble Technologies, 2004)	52
3.4 Ομαλοποίηση της εξόδου με χρήση τοπικού μοντέλου παρεμβολής	55
3.5 Εισαγωγή όρου απόσβεσης ως προς το περιβάλλον στις μάζες του μοντέλου	56
3.6 Στιγμιότυπο από την προσομοίωση : Επαφή δομής – εικονικού χειριστηρίου	58
3.7 Θεώρηση επαφής με φυσικό-οπτικό τρόπο και με τον τρόπο που	59

χρησιμοποιήσαμε	
3.8 Στιγμιότυπα από την προσομοίωση: Χειριστήρια με διαφορετική επιφάνεια δίσκου	59
4.1 Η επιρροή του ερεθίσματος αναφοράς στο λόγο Weber (Tzafestas C.,1998)	70

Διαγράμματα

3.1 Μετρήσεις δύναμης εξόδου (ληφθείσες με σταθερή ταχύτητα) όπου παρατηρούνται φαινόμενα ταλαντώσεων	57
3.2 Βελτίωση των μετρήσεων δύναμης εξόδου (ληφθείσες με σταθερή ταχύτητα) με την προσθήκη του όρου απόσβεσης	58
3.3 Ικανοποιητικές μετρήσεις δύναμης εξόδου (ληφθείσες με σταθερή ταχύτητα) μετά από ρύθμιση παραμέτρων	60
3.4 Μετρήσεις ληφθείσες με το χέρι, με αρχικές ρυθμίσεις	61
3.5 Μετρήσεις ληφθείσες με το χέρι μετά από τροποποίηση κάποιων παραμέτρων	61
3.6 Μετρήσεις ληφθείσες με το χέρι, η δύναμη εξόδου έχει υποστεί κλιμάκωση ³⁰	62
3.7 Μετρήσεις ληφθείσες με το χέρι, παράδειγμα για να φανεί η δράση του φίλτρου	64
3.8 Μετρήσεις ληφθείσες με το χέρι, παράδειγμα για να φανεί η ασυνέχεια του παραθύρου	64
3.9 Μετρήσεις δύναμης εξόδου ως προς χρόνο, παράδειγμα απότομου μηδενισμού της δύναμης επαφής με αντίστοιχη καθυστέρηση του φίλτρου	65
3.10 Μετρήσεις δύναμης εξόδου ως προς χρόνο, παράδειγμα απότομου μηδενισμού της δύναμης επαφής και τροποποίηση του φίλτρου να ακολουθεί	66
3.11 Παράδειγμα μετρήσεων για διάφορες συχνότητες αποκοπής ω	66
3.12 Μετρήσεις (ληφθείσες με το χέρι) μετά από την προσθήκη φίλτρου, ικανοποιητικό αποτέλεσμα	67
4.1 Μορφή δύναμης εξόδου συναρτήσει της παραμόρφωσης	73
4.2 Εκτίμηση της JND για τη σκληρότητα με την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων	74

Πίνακες

3.1 Προδιαγραφές της συσκευής PHANTOM Omni (SensAble Technologies)	53
4.1 Συνολικά αποτελέσματα του πειράματος	74

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή – Βιβλιογραφική επισκόπηση – Στόχοι

Διανύουμε μία εποχή όπου η χρήση των υπολογιστών είναι ευρέως διαδεδομένη σε όλους τους τομείς της ζωής μας. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει συμβάλει σε αυτό, με την αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και τη μείωση των τιμών. Μάλιστα, έχουν προκύψει και νέοι, πιο εξεζητημένοι τρόποι επικοινωνίας του ανθρώπου με τον υπολογιστή. Εμείς θα ασχοληθούμε με έναν από αυτούς, που είναι η συμμετοχή του ανθρώπου σε περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας (virtual reality) που έχει δημιουργηθεί στον υπολογιστή.

Η εικονική πραγματικότητα παρέχει έναν σαφώς ανώτερο τρόπο επικοινωνίας ανθρώπου- υπολογιστή από όλους τους προϋπάρχοντες, επειδή περιέχει περιβάλλον πλούσιο σε αισθήσεις και παρέχει τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης σε πραγματικό χρόνο (Burdea, Coiffet, 1994).

Θα μας απασχολήσουν κυρίως οι εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας με ανάδραση δύναμης. Σε αυτό το κεφάλαιο θα κάνουμε μία σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση των συστημάτων ανάδρασης δύναμης που χρησιμοποιούνται, και θα αναφέρουμε κάποια από τα κυριότερα πεδία εφαρμογών της εικονικής πραγματικότητας. Τέλος, αναφέρουμε τους στόχους της συγκεκριμένης εργασίας.

1.1 Συστήματα ανάδρασης δύναμης

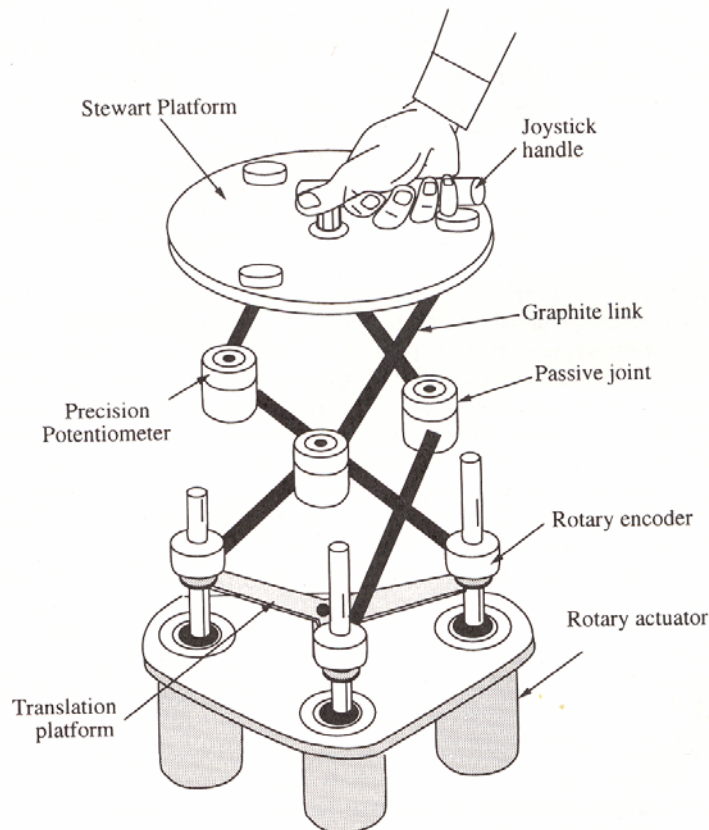
Τα συστήματα με ανάδραση δύναμης σχεδιάζονται έτσι ώστε να ασκούν δυνάμεις ανάλογες εκείνων που υπολογίζονται από το εικονικό περιβάλλον. Πρόκειται για ιδιαίτερους μηχανισμούς οι οποίοι λαμβάνουν είσοδο από το χρήστη σε μορφή θέσης ή δύναμης και επιστρέφουν δύναμη ή θέση αντίστοιχα. Ονομάζονται «masters» επειδή, αντίστοιχα με τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για τηλερομποτική, μέσω αυτών χειριζόμαστε ένα εικονικό «άκρο» στο εικονικό περιβάλλον.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι να κατατάξει κανείς αυτές τις συσκευές. Μπορούν να καταταγούν ανάλογα με τον τρόπο ελέγχου των, με τον τύπο επενεργητών (ενεργοποιητών) που χρησιμοποιούν (υδραυλικούς, ηλεκτρικούς, πνευματικούς κ.τ.λ.) ή με το πού είναι «γειωμένες» ως προς τη δύναμη (force grounded), δηλαδή με το πού είναι η βάση τους (σε τοίχο, τραπέζι, οροφή κ.τ.λ.). Εμείς θα κατατάξουμε τα συστήματα αυτά ανάλογα με το αν είναι φορητά ή όχι (Burdea, 1996).

1.1.1 Μη φορητά συστήματα

Πρόκειται για όλα τα συστήματα που είναι γειωμένα σε τραπέζι, οροφή, τοίχο, πάτωμα και άρα περιορίζουν το χώρο εργασίας τους και την ελευθερία κίνησης του χρήστη. Υπερτερούν σήμερα έναντι των φορητών συστημάτων επειδή τα τελευταία με το βάρος τους επηρεάζουν την αντίληψη του χρήστη και οδηγούν σε κούραση και έλλειψη ισορροπίας (τουλάχιστον μέχρι να επιτευχθεί ικανοποιητικός λόγος ισχύος-βάρους και ισχύος-όγκου στην τεχνολογία ενεργοποιητών για την ανάδραση δύναμης).

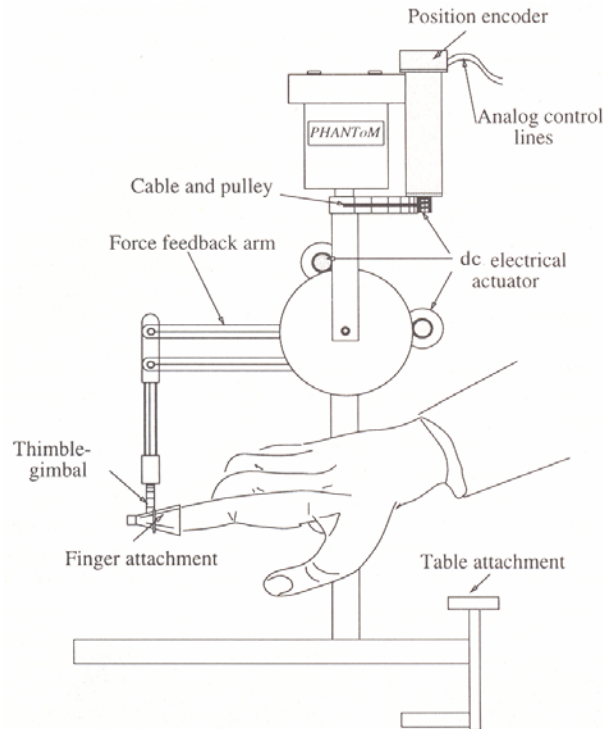
Τα πιο διαδεδομένα συστήματα ανάδρασης δύναμης είναι οι επιτραπέζιες συσκευές (desk-grounded masters), επειδή συνήθως είναι μικρότερα σε μέγεθος, πιο εύκολα ως προς την εγκατάσταση και πιο φτηνά. Από αυτά, μπορούμε χαρακτηριστικά να αναφέρουμε διάφορους τύπους «joysticks» με βαθμούς ελευθερίας από 2 έως 6 (γενικής χρήσεως «joysticks» με 2 βαθμούς ελευθερίας, καρτεσιανά «joysticks» με 3 βαθμούς ελευθερίας, «joystick» «πλατφόρμας Stewart» με 4 βαθμούς ελευθερίας (Σχήμα 1.1) , μαγνητικά «joystick» με 6 βαθμούς ελευθερίας που επιπλέον παρουσιάζουν το προτέρημα μηδενικής τριβής).



Σχήμα 1.1 joystick πλατφόρμας «Stewart» 4 βαθμών ελευθερίας (Burdea, 1996)

Ένας άλλος διαδεδομένος τύπος επιτραπέζιων συσκευών είναι οι «Pen-based Masters» οι οποίες επιτρέπουν αλληλεπίδραση με το εικονικό περιβάλλον μέσω άκρων που μοιάζουν με τα συνηθισμένα εργαλεία, π.χ. στυλό ή σμίλη (σε ιατρικές εφαρμογές). Τα συστήματα αυτά έχουν συνήθως μεγαλύτερο χώρο εργασίας από τα περισσότερα «joysticks», έχουν από 3 έως 6

βαθμούς ελευθερίας και έχουν το πλεονέκτημα ότι το άκρο είναι γεωμετρικά σταθερό ανεξαρτήτως του χρήστη κι έτσι δε χρειάζονται πολύπλοκες διαδικασίες βαθμονόμησης («calibration»). Χαρακτηριστικά αναφέρουμε το σύστημα που αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο της Ουάσιγκτον («Washington Pen-based Force Display» από τους Buttolo and Hannaford) με 3 βαθμούς ελευθερίας, το «PHANToM Master» (Personal Haptic Interface Mechanism) (Massie, Salisbury, 1994) με άκρο μία δαχτυλήθρα ή στυλό, που έχει 6 βαθμούς ελευθερίας (Σχήμα 1.2), και το σύστημα ανάδρασης δύναμης 6 βαθμών ελευθερίας «Six-degree-of-freedom Pen-based Force Display» (University of Tsukuba) που έχει τη δυνατότητα άσκησης και ροπών στο χειριστήριο ελέγχου.



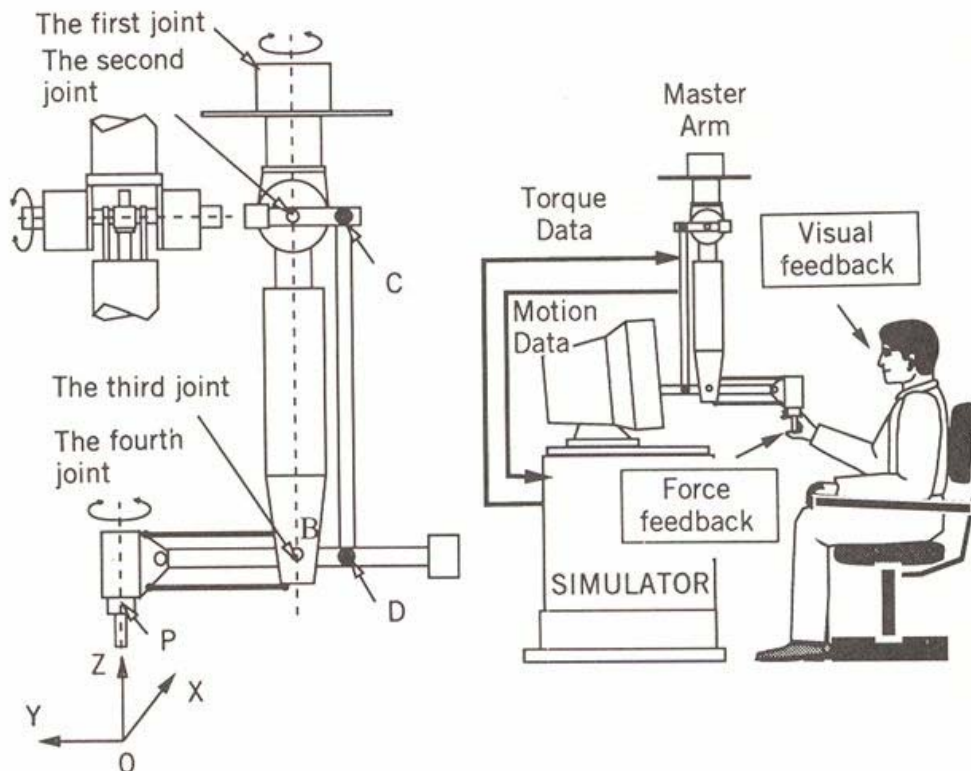
Σχήμα 1.2 Phantom Master (Burdea, 1996)

Επιπρόσθετα, μπορούμε να αναφέρουμε τις συσκευές που ασκούν ανάδραση δύναμης μέσω νημάτων ή ατσάλινων καλωδίων (Stringed Force-Feedback Interfaces), που έχουν το προτέρημα πολύ μικρού βάρους και αδράνειας αλλά και το μειονέκτημα περιορισμένων δυνατοτήτων ανάδρασης ροπών και δύναμης προς όλες τις κατευθύνσεις (κάτι τέτοιο θα απαιτούσε μεγαλύτερο αριθμό νημάτων και ενεργοποιητών). Στην κατηγορία αυτή ανήκει το σύστημα «Texas 9-String Force Display» (από τους Lindemann and Tesar) με 6 βαθμούς ελευθερίας καθώς και το «SPIDAR» (SPace Interface Devise for Artificial Reality).

Τέλος, αναφέρουμε και το «Γάντι Αίσθησης» (The University of Tokyo Sensing Glove) που δημιουργήθηκε στο πανεπιστήμιο στο Τόκιο και μοιάζει με τα συστήματα εξωσκελετών, αλλά υποστηρίζεται από τραπέζι. Το γάντι αυτό παρέχει ξεχωριστή δυνατότητα κίνησης σε κάθε δάχτυλο του χεριού παρέχοντας συνολικά 10 βαθμούς ελευθερίας και άρα είναι κατάλληλο για εργασίες που απαιτούν λεπτομέρεια και δεξιοτεχνία, παρ' ότι δεν επιτρέπει μεταφορική κίνηση του καρπού (μόνο στροφή).

Στην ευρύτερη κατηγορία των «μη φορητών» απτικών διατάξεων ανήκουν και οι συσκευές που γειώνονται στο δάπεδο ή στην οροφή. Γενικά, είναι μεγαλύτερες και πιο πολύπλοκες συσκευές από ότι οι επιτραπέζιες και επειδή, σε αντίθεση με τις τελευταίες, ασκούν πολύ μεγαλύτερες δυνάμεις, πρέπει να εξετάζεται πλέον και η ασφάλεια του χρήστη (ιδιαίτερα στην περίπτωση εξωσκελετικών μηχανισμών όπου ο χρήστης βρίσκεται μέσα στο χώρο εργασίας της ρομποτικής διάταξης καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας). Το θέμα της ασφάλειας του χρήστη, καθώς και τα υψηλά κόστη των συσκευών αυτών καθιστούν τη χρήση τους λιγότερο εκτεταμένη από αυτή των επιτραπέζιων masters.

Υπάρχουν στην κατηγορία αυτή οι masters γενικευμένης χρήσης, η χρήση των οποίων προοριζόταν αρχικά για χειρισμό εξαρτώμενων απομακρυσμένων συσκευών «slaves» (εφαρμογές τηλερομποτικής), οι οποίοι όμως στη συνέχεια προσαρμόστηκαν κατάλληλα να ελέγχουν και εικονικούς «slaves» και οι οποίοι έχουν 4 έως 6 βαθμούς ελευθερίας. Αναφέρουμε χαρακτηριστικά τον «JPL Universal Master» (Bejczy and Salisbury) με 6 βαθμούς ελευθερίας, τον «MEL Master Arm» (Tanie and Kotoku) 4 βαθμών ελευθερίας (Σχήμα 1.3) και τον «Six-Degree-of-Freedom Cartesian Manipulator» (Yokoi et al) επίσης 6 βαθμών ελευθερίας. Μπορούμε επίσης να αναφέρουμε συστήματα με κλασσικούς χειριστές τύπου ρομποτικού βραχίονα (Robot Arm) στα άκρα των οποίων έχουν προσαρτηθεί εργαλεία όπως το «Magnetic Robot Interface» (Luecke and Winkler) που λειτουργεί με πηνία και μαγνητικό πεδίο και η «Shape Approximation Device» (Tachi et al.) που βασίζεται στην αλληλεπίδραση με επιφάνειες διαφόρων σχημάτων και εμποδίων.

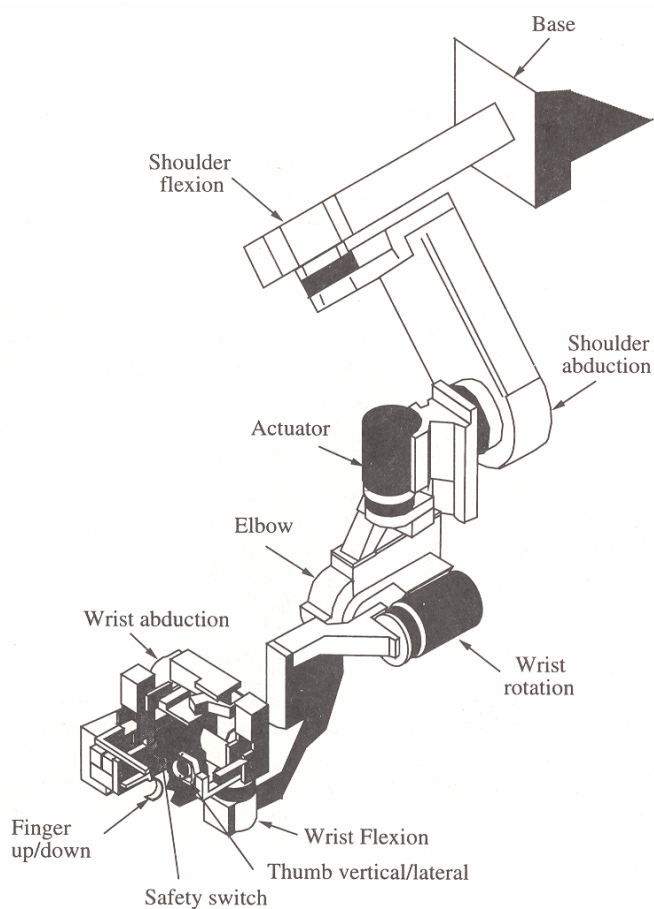


Σχήμα 1.3. MEL Master Arm (Burdea, 1996)

Ένας άλλος τύπος συσκευών γειωμένων στο δάπεδο ή στην οροφή, είναι οι πλατφόρμες κίνησης (Personal Motion Platforms) οι οποίες διανέμουν τις δυνάμεις ανάδρασης σε όλο το

σώμα του χρήστη. Οι συσκευές αυτές είναι τεχνολογικά εφικτές και οικονομικά προσιτές και η αγορά τους παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, κυρίως στον τομέα της ψυχαγωγίας. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε την «University of British Columbia Hydraulic Platform» (Salcudean et al.), την «PemRAM Six-Axis Platform» (Denne Developments Ltd.) και την «Flogiston Chair» (Flogiston Co.).

Τέλος, αναφέρουμε τους γειωμένους στο δάπεδο εξωσκελετικούς μηχανισμούς (Floor-grounded Exoskeletons), οι οποίοι διαφοροποιούνται από τις προαναφερθείσες συσκευές στο ότι ο χρήστης φοράει τις συσκευές αυτές και οι δυνάμεις ανάδρασης ασκούνται όχι μόνο στον καρπό αλλά και σε άλλα μέρη του χεριού του. Μάλιστα, επειδή ακριβώς ο χρήστης φοράει τη συσκευή, αυξάνεται η ελευθερία κινήσεών του και οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος. Πρόκειται για τις πιο πολύπλοκες και ακριβές, μη φορητές συσκευές ανάδρασης δύναμης. Αναφέρουμε δύο από αυτές, τον «SACROS Dexterous Arm Master» (Jacobsen et al.) με 10 βαθμούς ελευθερίας (Σχήμα 1.4) και τον «FREFLEX Master» (Force REFLECTing EXoskeleton).

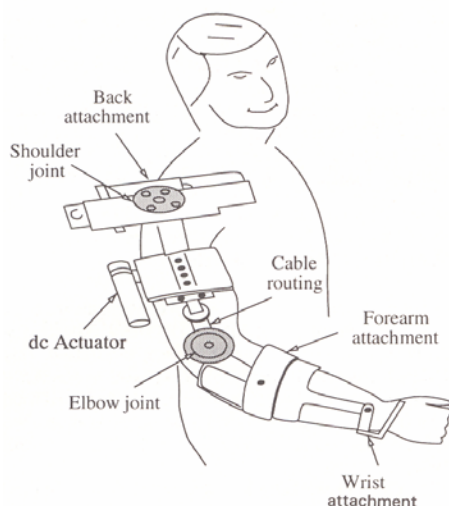


Σχήμα 1.4 SACROS Arm Master (Burdea,1996)

1.1.2 Φορητά Συστήματα

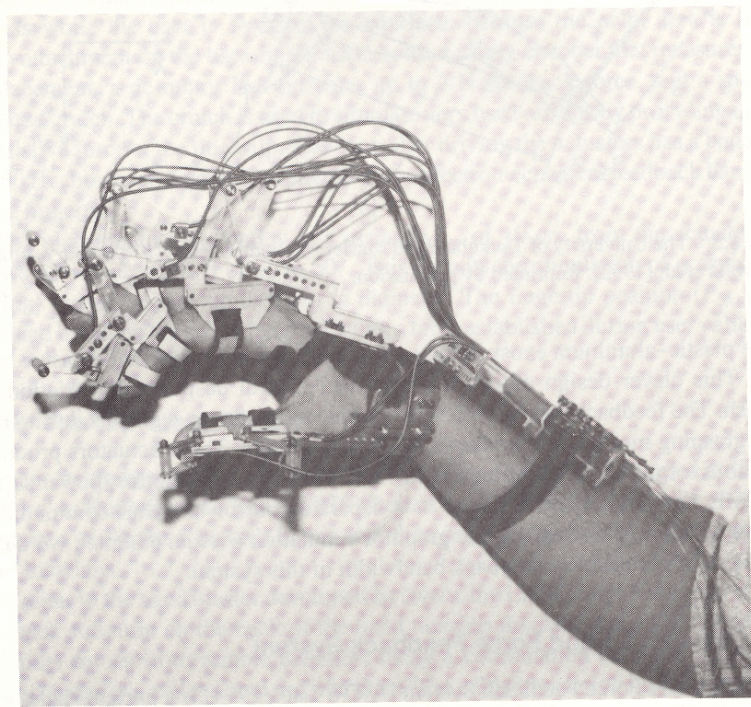
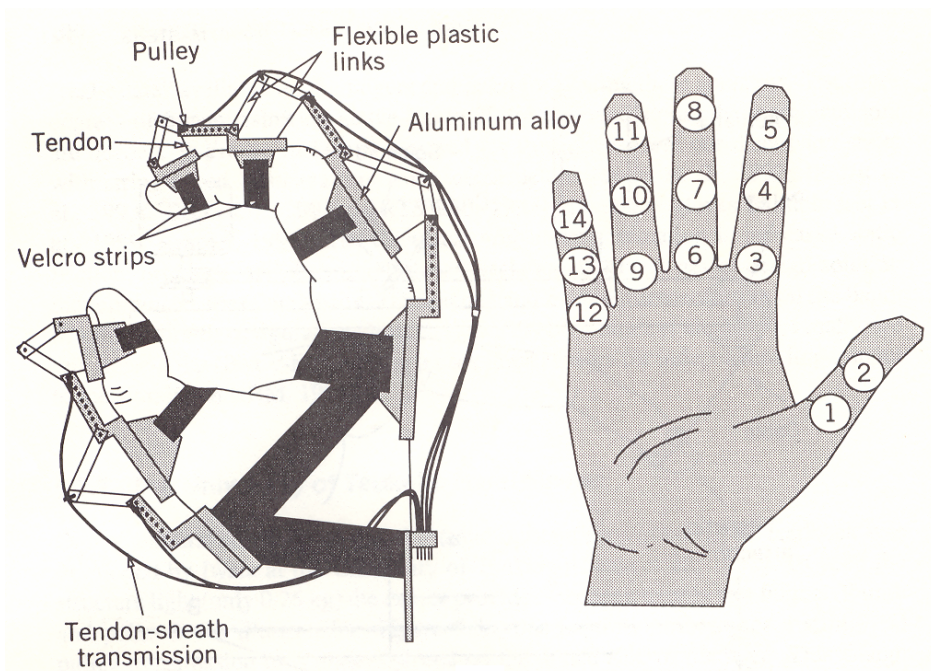
Πρόκειται για συσκευές φερόμενες από το σώμα του χρήστη («γειωμένες») σε πλάτη, βραχίονα, στήθος κ.τ.λ.). Είναι πιο δύσκολα στο σχεδιασμό συστήματα, επειδή υπεισέρχονται περιορισμοί όσον αφορά στο βάρος και στον όγκο τους, ώστε να μην δυσκολεύουν και κουράζουν το χρήστη. Αναφέρουμε στη συνέχεια κάποιους από τους ήδη υπάρχοντες φορητούς μηχανισμούς, κατατάσσοντάς τους ανάλογα με το μέρος του σώματος για το οποίο σχεδιάζονται.

Υπάρχουν οι εξωσκελετικοί μηχανισμοί τύπου βραχίονα (arm exoskeletons) οι οποίοι προσπαθούν να αποδώσουν τους 7 βαθμούς ελευθερίας του ανθρώπινου βραχίονα. Ο «GLAD-IN-ART EFF (external force feedback) master» (Bergamasco et al.) (Σχήμα 1.5) και «EXOS Force ArmMaster» (EXOS Co., Marcus) έχουν μόνο 5 βαθμούς ελευθερίας αλλά πρόσθετη ανάδραση δύναμης στον καρπό από ξεχωριστό master για το χέρι. Ο «University of Salford Arm Master» (Caldwell et al.) που δημιουργήθηκε στη συνέχεια, έχει 7 βαθμούς ελευθερίας και παρουσιάζει το προτέρημα αρκετά μικρού βάρους.

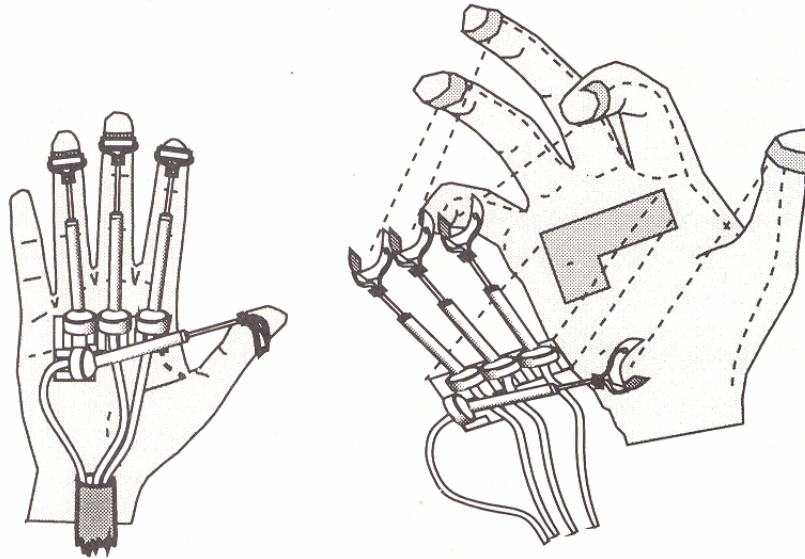


Σχήμα 1.5 GLAD-IN-ART Master (Burdea, 1996)

Τέλος, υπάρχουν οι «Hand Masters» που γειώνονται στην παλάμη ή στον πήχη του χειριστή. Στην κατηγορία αυτή μπορούμε να αναφέρουμε τον «University of Tsukuba Hand Master» (Iwata et al.) του οποίου η λειτουργία βασίζεται σε νήματα, τον «EXOS SAFIRE Master» (EXOS Co.) που είναι ο πρώτος εμπορικά διαθέσιμος φορητός master, τον «LRP Hand Master» (Bouzit, Coiffet) ο οποίος μεταδίδει τα σήματα ανάδρασης από απομακρυσμένους ενεργοποιητές μέσω καλωδίων (Tzafestas C., 2003) (Σχήμα 1.6) , το «Virtex CyberForce Glove» (Kramer) που είναι master σε μορφή γαντιού, και τους «Rutgers Master I και II» (Burdea et al., Burdea and Gomez, Gomez et al.) οι οποίοι παρουσίασαν την καινοτομία να προσθέσουν πνευματικούς ενεργοποιητές πάνω στην παλάμη του χρήστη, για να αποφύγουν την πολυπλοκότητα μεταφοράς σημάτων με καλώδια (Σχήμα 1.7).



Σχήμα 1.6 LRP Hand Master (Burdea, 1996)



Σχήμα 1.7 Rutgers Master I (Burdea, 1996)

1.2 Εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας

Η χρήση εφαρμογών εικονικής πραγματικότητας (Virtual Reality) παρέχει αμεσότητα και δυνατότητα αλληλεπίδρασης στο χρήστη, ιδιότητες που αποδεδειγμένα συμβάλουν με καταλυτικό τρόπο στη μάθηση. Επίσης, παρέχει την δυνατότητα ανάπτυξης περιβάλλοντος, όπου μπορούν να συμμετέχουν και να συνεργάζονται παραπάνω από ένας χρήστες με μειωμένο υπολογιστικό κόστος. Για τους λόγους αυτούς, η εικονική πραγματικότητα έχει να επιδείξει εφαρμογές που εκτείνονται σε μεγάλο εύρος τομέων, όπως ιατρική, ψυχαγωγία και τέχνες, εμπόριο, στρατιωτικές εφαρμογές κ.τ.λ.. Ωστόσο, παρά το συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη εφαρμογών εικονικής πραγματικότητας, η εξέλιξη στον τομέα αυτό περιορίζεται και εξαρτάται αναγκαστικά από την εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων, επειδή οι εφαρμογές αυτές απαιτούν επαρκή υπολογιστική ισχύ αλλά και σχετικά φτηνή, ώστε να διαδοθούν σε ευρύ κοινό. Χαρακτηριστικά, αναφέρουμε ότι η χρήση εικονικής πραγματικότητας άρχισε να διαδίδεται μόλις κατά το 1994, επειδή τα προηγούμενα χρόνια δεν υπήρχε κατάλληλο λογισμικό και hardware να συνοδέψει τις εφαρμογές (Burdea and Coiffet, 1994).

Στη συνέχεια θα κάνουμε μία γενική επισκόπηση των τομέων όπου χρησιμοποιείται περισσότερο εικονική πραγματικότητα και θα δώσουμε παραδείγματα εφαρμογών. Ιδιαίτερη μνεία θα γίνει για τις εφαρμογές βιοϊατρικής, επειδή ο τομέας αυτός συγκεντρώνει πλέον το μεγαλύτερο ενδιαφέρον ως ο άμεσα πιο ωφέλιμος για τον άνθρωπο. Εδώ, μάλιστα, προκύπτει η ιδιαίτερη απαίτηση για καλή ανάδραση δύναμης κατά την επαφή στο εικονικό περιβάλλον, με την οποία θα ασχοληθούμε στην εργασία αυτή.

1.2.1 Ψυχαγωγία- Τέχνη

Από τις πρώτες εφαρμογές της εικονικής πραγματικότητας (και από τα κυριότερα αρχικά κίνητρα ανάπτυξής των) ήταν η ψυχαγωγία, η ανάπτυξη παιχνιδιών όπου ο χρήστης θα μπορεί να έχει άμεση και όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική αλληλεπίδραση με το περιβάλλον και όπου θα παρέχεται δυνατότητα συνεργασίας με άλλους χρήστες. Ήδη από τα πολύ πρώιμα στάδια ανάπτυξης της εικονικής πραγματικότητας η «πλούσια σε αισθήσεις» αλληλεπίδραση του χρήστη με ένα τρισδιάστατο περιβάλλον, αποτέλεσε ελκυστική ιδέα ως ιδανικό περιβάλλον παιχνιδιού. Έτσι, ήδη από το 1990, αναπτύχθηκαν τα πρώτα μεγάλης κλίμακας συστήματα ψυχαγωγίας (παιχνίδια) VR, τα οποία όμως εξαιτίας του υψηλού κόστους των υπολογιστικών μηχανημάτων, ήταν σε σταθερή βάση («location based»). Επίσης, εξαιτίας του κόστους συμμετοχής αλλά κυρίως της πολυπλοκότητας χειρισμού των μηχανημάτων, οι χρήστες περιορίζονταν σε μεγάλες ηλικίες (άνω των 20 ετών). Παρ' όλα αυτά, ο ρεαλισμός που προσέφεραν τα περιβάλλοντα αυτά είχε μεγάλη απήχηση στους χρήστες και τράβηξε το ενδιαφέρον μεγάλων εταιριών παραγωγής που χρηματοδότησαν τον τομέα αυτό.

Έτσι, καθώς με τον καιρό οι υπολογιστικές δυνατότητες αυξήθηκαν και το κόστος των μηχανών έπεσε, αναπτύχθηκαν και τα πρώτα συστήματα για χρήση στο σπίτι («home-based»), που ήταν πιο απλά στη χρήση και πιο προσιτά στον απλό χρήστη κι έτσι η διάδοσή τους πιο μεγάλη.

Επίσης, πέρα από τα παιχνίδια, αναπτύχθηκε η κινηματογραφική βιομηχανία που χρησιμοποίησε «εικονικούς ηθοποιούς» (μη ανθρώπινοι, εικονικοί χαρακτήρες καθώς και αντικείμενα χειριζόμενα από ανθρώπους που βρίσκονται στο παρασκήνιο). Χαρακτηριστικά αναφέρουμε τη μάσκα αισθητήρων που δημιουργήθηκε («Facial Waldo»), την οποία φοράει ένας ηθοποιός και οι εκφράσεις-συσπάσεις του προσώπου του μεταφέρονται σε εικονικό χαρακτήρα κάνοντας τις αντιδράσεις του πιο ρεαλιστικές.

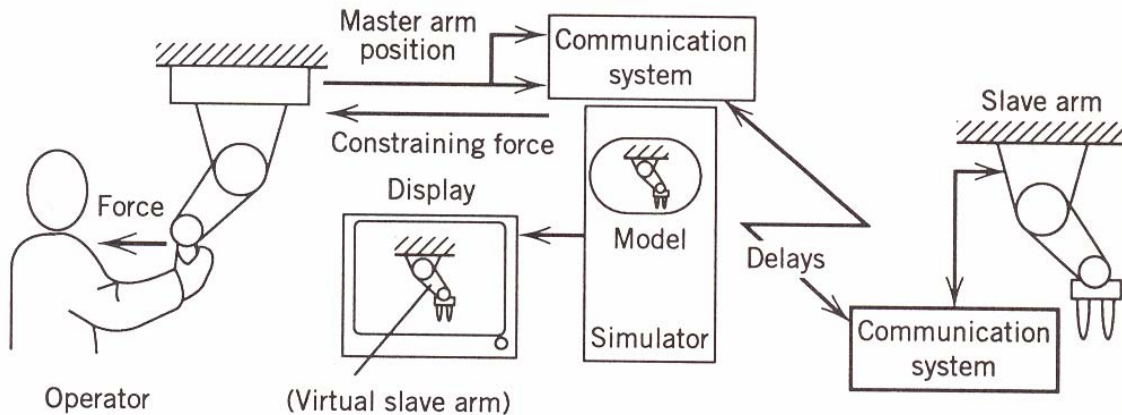
Τέλος, μπορούμε να αναφέρουμε την ανάπτυξη εφαρμογών που προσομοιώνουν διάφορα μουσικά όργανα (π.χ. πιάνο) και λειτουργούν με ανάδραση δύναμης, καθώς και τη μεταφορά διάφορων εκθεμάτων σε εικονικό τρισδιάστατο περιβάλλον (π.χ. περιβάλλον που να προσομοιώνει ολόκληρο μουσείο), το οποίο δίνει τη δυνατότητα σε κάποιον να επισκεφθεί τοπία και εκθέματα από όλον τον κόσμο μένοντας σπίτι του.

1.2.2 Τηλερομποτική

Ένας από τους πιο ενδιαφέροντες τομείς εφαρμογής της εικονικής πραγματικότητας είναι αυτός της ρομποτικής. Με την προσθήκη ανάδρασης δύναμης μέσω μίας ειδικής ρομποτικής διάταξης, ο χρήστης μπορεί να αντιλαμβάνεται και «απτικά» (μέσω της αίσθησης της αφής) το εικονικό περιβάλλον και να εκτελεί ορισμένες διαδικασίες μέσα σε αυτό. Επίσης, η χρήση εικονικής πραγματικότητας συμβάλλει πάρα πολύ στη βελτίωση των εφαρμογών τηλερομποτικής, όπου ο χρήστης ελέγχει τις κινήσεις-ενέργειες ενός ρομπότ σε απομακρυσμένη θέση.

Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν γενικώς προβλήματα ασταθούς συμπεριφοράς που οφείλονται (α) σε μηχανικά φαινόμενα (αδράνεια, τριβή κ.τ.λ) κατά την επαφή με αντικείμενα και την κίνηση μέσα στο περιβάλλον και (β) σε μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις κατά την εκτέλεση. Η χρήση εικονικής πραγματικότητας προσδίδει αμεσότητα στο χειριστή παρέχοντάς του δυνατότητα παρουσίας (εικονικής) στο απομακρυσμένο περιβάλλον («operator

telepresence»), πράγμα που βελτιώνει την απόδοσή του και επιπλέον, βοηθά στην ευστάθεια του τηλερομποτικού συστήματος. Με χρήση εικονικού περιβάλλοντος που προσομοιώνει το απομακρυσμένο χειριζόμενο ρομπότ και το περιβάλλον εργασίας του, μπορούμε να εισάγουμε κάποιους επιθυμητούς περιορισμούς που θα αποτρέπουν επικίνδυνες για την ευστάθεια θέσεις και κινήσεις. Χαρακτηριστικά, αναφέρουμε την ιδέα των Anderson and Davis να εισάγουν εικονικά πεδία δυνάμεων που να απωθούν το μηχανισμό από τα εμπόδια και άρα ο χειριστής να νοιώθει, μέσω της ανάδρασης, αντίσταση όταν πάει να τα πλησιάσει. Όσον αφορά στις χρονικές καθυστερήσεις, αυτές λαμβάνουν χώρα ιδιαίτερα σε συστήματα που ο χειριστής (master) βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τον χειριζόμενο μηχανισμό (slave). Στις περιπτώσεις αυτές, η παρεμβολή εικονικού χειριζόμενου μηχανισμού (virtual slave) βελτιώνει την ευστάθεια και τις ταχύτητες του συστήματος, διότι, ενώ υπάρχει αρκετή καθυστέρηση στο να μεταδοθεί η κίνηση του χειριστή στον απομακρυσμένο μηχανισμό, ο εικονικός χειριζόμενος μηχανισμός αποκρίνεται στις κινήσεις του χειριστή χωρίς καμία καθυστέρηση, αλληλεπιδρά με το εικονικό περιβάλλον και υπολογίζονται οι δυνάμεις ανάδρασης προς τον χειριστή, επίσης χωρίς καμία καθυστέρηση (Σχήμα 1.8). Έτσι, ο χειριστής αντιλαμβάνεται το περιβάλλον και ρυθμίζει την επιθυμητή κίνησή του έγκαιρα και με μεγαλύτερη σιγουριά.



Σχήμα 1.8 Εφαρμογή εικονικής πραγματικότητας στην τηλερομποτική (Burdea, 1996)

Ακόμα καλύτερη προσέγγιση από την πιο πάνω αναφερόμενη (που για να λειτουργήσει ικανοποιητικά προϋποθέτει κατάλληλη μοντελοποίηση του μηχανισμού και του περιβάλλοντος) είναι η πρόταση του Rosenberg για χρήση εικονικών στοιχείων που ονομάζονται «virtual fixtures» και τα οποία απλά εισάγονται στο περιβάλλον χωρίς να αλληλεπιδρούν με αυτό (είναι εικονικά, δεν φαίνονται και δεν καταλαμβάνουν χώρο). Αλληλεπιδρούν μόνο με το χρήστη, καθοδηγώντας τον με ανάλογη ανάδραση δύναμης σε κάποια συμφέρουσα κίνηση-διαδρομή. Με χρήση κατάλληλων fixtures (σε διάφορα σχήματα και με διάφορες ιδιότητες, π.χ. έλκουν ή απωθούν) διευκολύνεται και ακόμα μία μορφή τηλερομποτικής, ο τηλεπρογραμματισμός, όπου τα fixtures καθοδηγούν το χρήστη σε συγκεκριμένες κινήσεις που ο ίδιος έχει προγραμματίσει με βασικές εντολές προς το χειριζόμενο μηχανισμό.

Η τηλερομποτική έχει ήδη να επιδείξει εφαρμογές σε τομείς όπως υποθαλάσσιες και διαστημικές επιχειρήσεις, χειρισμό πυρηνικών ή άλλων επικίνδυνων υλικών, χειρισμό στο

«μικρόκοσμο» και άλλες περιπτώσεις που είναι αδύνατο ή επικίνδυνο να επιτευχθεί πραγματική παρουσία ανθρώπου χειριστή.

1.2.3. Εκπαίδευση-Επιστήμες-Εμπόριο

Στους τομείς αυτούς, μπορούμε απλά να πούμε πως η δυνατότητα αμεσότητας και ρεαλιστικής αλληλεπίδρασης έχει πολύ μεγάλη επιρροή στο χρήστη. Έτσι, η εικονική πραγματικότητα αποτελεί καταπληκτικό μέσο μάθησης (είτε απλής μετάδοσης πληροφοριών είτε εκπαίδευσης με στόχο συγκεκριμένες διεργασίες). Για το λόγο αυτό, αλλά και λόγω της απήχησης και της ελκυστικότητας των εφαρμογών, χρησιμοποιείται για διδακτικούς σκοπούς αλλά και για διαφημιστικούς στον εμπορικό τομέα.

Επίσης, στον εμπορικό τομέα χρησιμοποιείται για να δημιουργούνται εικονικά μοντέλα και να δοκιμάζονται σε εικονικά περιβάλλοντα πριν την κατασκευή-παραγωγή των πραγματικών προϊόντων και κάπως αντίστοιχα, στον τομέα των επιστημών, για να δοκιμάζονται εμπειρικά κάποια πειράματα –διεργασίες πριν γίνουν στην πράξη. Αναφέρουμε χαρακτηριστικά ένα παράδειγμα στον τομέα της βιοτεχνολογίας (αν και τις ιατρικές εφαρμογές θα τις καλύψουμε στη συνέχεια), όπου έχει αναπτυχθεί μοντέλο εικονικής πραγματικότητας για την πραγματοποίηση αντιδράσεων και την κατασκευή φαρμάκων. Ο χειριστής έχει την ικανότητα να χειρίζεται αντικείμενα σε επίπεδο μορίων και να αισθάνεται μέσω της ανάδρασης δύναμης τις ελκτικές ή απωθητικές δυνάμεις που ασκούν τα άλλα μόρια, και άρα να μπορεί να σχεδιάσει κατάλληλα την αντίδραση πριν την πραγματοποιήσει στο εργαστήριο.

Γενικά το εικονικό περιβάλλον βρίσκει μεγάλη εφαρμογή σε όλους τους τομείς όπου χρειάζεται να γίνονται πολυάριθμες δοκιμές μέχρι την επιλογή της τελικής λύσης (trial and error methods) – όπως π.χ. κατά τον εσωτερικό σχεδιασμό χώρων – και όπου με την εικονική δοκιμή εξοικονομείται χρόνος, υλικά και έργο.

1.2.4.Στρατιωτικές εφαρμογές

Πρόκειται για τον τομέα με την παλιότερη αγορά εφαρμογών εικονικής πραγματικότητας εξαιτίας της μεγάλης ζήτησης για εφαρμογές προσομοίωσης για εκπαίδευση που να παρουσιάζουν ευελιξία, και δυνατότητα συμμετοχής πολλών χρηστών ταυτόχρονα.

Πλέον, εκτός από προσομοιωτές εκπαίδευσης για χειρισμό ταנק, προσομοιωτές πτήσεις για πολεμικά αεροσκάφη και χειρισμό πολεμικών υποβρυχίων, έχουν αναπτυχθεί και περιβάλλοντα εκπαίδευσης απλού στρατιώτη κατά τη διάρκεια της μάχης. Οι εφαρμογές εξελίσσονται ώστε να μπορούν να συμμετέχουν πολλοί χρήστες και ο καθένας να επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο την έκβαση της εικονικής μάχης. Ρεαλιστικότερο περιβάλλον οδηγεί και σε αρτιότερη εκπαίδευση των χρηστών.

Τέλος, και στον τομέα της διαστημικής έρευνας, χρησιμοποιούνται εξελιγμένοι προσομοιωτές για την εκπαίδευση των αστροναυτών .

1.2.5. Ιατρική

Και στον τομέα αυτό η χρήση εφαρμογών εικονικής πραγματικότητας έχει να επιδείξει εντυπωσιακά αποτελέσματα. Πρόκειται, μάλιστα, για έναν από τους πιο ενδιαφέροντες σήμερα τομείς ως προς τις εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας, αλλά και από τους πιο απαιτητικούς, καθώς εδώ περισσότερο από όλες τις άλλες εφαρμογές απαιτείται ρεαλισμός και έχει σημασία η λεπτομέρεια κατά την προσομοίωση. Επίσης, όπως ήδη αναφέρθηκε, προκύπτει και ιδιαίτερη απαίτηση για ρεαλιστική ανάδραση δύναμης και μοντελοποίηση της επαφής.

Στον τομέα αυτό προκύπτει άμεσα η ανάγκη για εκπαίδευση (και μάλιστα άρτια) των μελλοντικών γιατρών σε εικονικό περιβάλλον λόγω της έλλειψης άλλου τρόπου εξάσκησης (για να γίνει κανείς άψογος σε μία επέμβαση πρέπει να την επαναλάβει πάρα πολλές φορές), κι επειδή δεν υπάρχει περιθώριο τα λάθη της εκπαίδευσης να γίνονται σε πραγματικούς ασθενείς. Έτσι, μεγάλο μέρος των εφαρμογών προσομοιώνουν εικονικό ανθρώπινο σώμα ή μέρος αυτού και με την εφαρμογή αυτή εκπαιδεύονται οι νέοι γιατροί σε συγκεκριμένες εγχειρήσεις-επεμβάσεις ή και απλά μαθαίνουν ανατομία με πολύ πιο παραστατικό και άμεσο τρόπο από ότι διαβάζοντας μόνο. Έχει ήδη δημιουργηθεί εικονικό μοντέλο σώματος, με το οποίο μάλιστα ο χρήστης μπορεί να αλληλεπιδρά και να μαθαίνει έτσι παραστατικά ανατομία και κινητικότητα του σώματος ή ειδικά μοντέλα για εκμάθηση διαγνωστικών ή θεραπευτικών επεμβάσεων, όπως για παράδειγμα η στεφανιογραφία ή η αγγειοπλαστική στεφανιαίων αρτηριών.

Πολύ σημαντικό στοιχείο στις εφαρμογές αυτές είναι η ύπαρξη ανάδρασης δύναμης για την πραγματοποίηση της επαφής. Είναι επιθυμητό ο νέος γιατρός να εξοικειώνεται όχι μόνο οπτικά με τα διάφορα όργανα και τη διαδικασία της επέμβασης, αλλά και με την υφή τους και τις απτικές ιδιότητές τους, επειδή με την αφή δε λαμβάνει κανείς μόνο πολύ σημαντικές πληροφορίες για τα όργανα κατά τη διάγνωση, αλλά παράλληλα μαθαίνει και να ασκεί τις κατάλληλες δυνάμεις κατά την επέμβαση (π.χ. με πόση δύναμη πρέπει να κόψει με το νυστέρι ώστε να μην τραυματίσει γειτονικά όργανα). Η εξάσκηση της αφής του γιατρού μέσω ανάδρασης δύναμης σε περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας είναι αναγκαία σχεδόν για όλα τα στάδια της φροντίδας ενός ασθενούς. Από τη διάγνωση, η οποία απαιτεί συχνά ψηλάφηση, μέχρι την εφαρμογή ορισμένων μορφών αναισθησίας, ορισμένες διαδικασίες των οποίων απαιτούν λεπτεπίλεπτους χειρισμούς, και τέλος την επέμβαση, ο γιατρός πρέπει να είναι ειδικά εκπαιδευμένος και να έχει μεγάλη απτική εμπειρία.

Χαρακτηριστικά, αναφέρουμε κάποιες εφαρμογές που ήδη υπάρχουν. Για την ψηλάφηση στο γόνατο δημιουργήθηκε από τους Langrana et al. μοντέλο με ανάδραση δύναμης. Επίσης, από τους Peine et al. δημιουργήθηκε σύστημα ψηλάφησης για τον εντοπισμό αρτηριών, που χρειάζεται στις περισσότερες εγχειρήσεις. Για την αναισθησία στον επισκληρίδιο χώρο του νωτιαίου μυελού, όπου χρειάζεται επιδέξια εισαγωγή της βελόνας σε συγκεκριμένο σημείο στη σπονδυλική στήλη του ασθενούς, οι Bostrom et al. ανέπτυξαν έναν προσομοιωτή με ανάδραση δύναμης. Οι Ziegler et al. ανέπτυξαν προσομοιωτή εκπαίδευσης για αρθροσκοπική εγχείρηση, ενώ στη Cine-Med Inc. αναπτύχθηκε σύστημα προσομοίωσης λαπαροσκοπησης το οποίο δεν παρέχει μεν ανάδραση δύναμης, αλλά έχουν μοντελοποιηθεί ρεαλιστικά τα όργανα και αντιδρούν ανάλογα με τις ενέργειες του εκπαιδευόμενου (π.χ. ματώνουν αν κοπούν κ.τ.λ.). Τέλος, οι Salcudean and Yan ανέπτυξαν σύστημα τηλερομποτικής για μικροεγχείρηση στο μάτι, το οποίο μεγαλώνει σε κλίμακα τις δυνάμεις ανάδρασης από τον ιστό ώστε να τις αισθάνεται ο χειρουργός – που είναι μηδαμινές και δεν μπορεί κανονικά να τις αισθανθεί – και παράλληλα μικραίνει σε κλίμακα τις κινήσεις του χειρουργού κατάλληλα για

να γίνει η μικροεπέμβαση αυτή, που παλιότερα γινόταν μόνο μέσω οπτικής ανάδρασης από μικροσκόπιο.

Είδαμε ήδη από το προαναφερθέν παράδειγμα πώς οι εφαρμογές τηλερομποτικής μπορούν να συμβάλουν στην ιατρική φροντίδα ασθενών. Εκτός από τις περιπτώσεις σαν την προηγούμενη, όπου η τηλερομποτική και η ανάδραση δύναμης βοηθούν στο να οξυνθούν ή να αμβλυνθούν κάποιες αισθήσεις ή ενέργειες του γιατρού, πρέπει να αναφέρουμε ότι εφαρμογές τηλερομποτικής χρησιμοποιούνται και σε περιπτώσεις τηλε-εγχείρησης (telesurgery) όπου δηλαδή ο ειδικά εκπαιδευμένος χειρουργός κάνει την επέμβαση σε εικονικό περιβάλλον και το χειριζόμενο ρομπότ εκτελεί σε απομακρυσμένο μέρος την πραγματική εγχείρηση. Ο Philip Green έχει ήδη αναπτύξει ένα πρωτότυπο τέτοιο σύστημα όπου οι δυνάμεις ανάδρασης μεγεθύνονται ώστε ο απομακρυσμένος γιατρός να έχει λεπτομερή αίσθηση ακόμα και των πιο μικρών δυνάμεων ανάδρασης από το σώμα του ασθενούς.

Σημαντική είναι επίσης η συμβολή της ανάδρασης δύναμης στον τομέα της αποκατάστασης των ασθενών μετά από κάποιο ατύχημα ή σοβαρή εγχείρηση. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι ασθενείς χρειάζονται φυσικοθεραπεία, δηλαδή να κάνουν κάποιες συγκεκριμένες κινήσεις για να αποκαταστήσουν τις λειτουργίες του σώματός τους που έχουν πάθει βλάβη. Αυτό μπορεί να γίνει με εξωσκελετικούς μηχανισμούς που θα καθοδηγούν τους ασθενείς να κάνουν τις επιθυμητές κινήσεις ασκώντας τους κατάλληλη δύναμη. Έχουν ήδη δημιουργηθεί αρκετές τέτοιες εφαρμογές για αποκατάσταση λειτουργιών όπως π.χ. του χεριού-παλάμης (Brown et al. , Burdea et al.) και των ποδιών για παραπληγικούς ασθενείς (Durfée and Goldfarb). Επιπρόσθετα, συμβάλλουν στην βελτίωση της ποιότητας ζωής ατόμων με ειδικές ανάγκες.

1.3 Στόχοι της εργασίας

Από τα παραπάνω συνειδητοποιούμε ότι εξαιτίας της σημαντικότητας και της απαιτητικότητας των ιατρικών εφαρμογών εικονικής πραγματικότητας με ανάδραση δύναμης, είναι επιτακτικό να αναπτυχθεί ένα ικανοποιητικό μοντέλο για το εικονικό ανθρώπινο σώμα και τις ιδιότητές του. Από όλες τις παραπάνω εφαρμογές επικεντρωθήκαμε στην ψηλαφητική διάγνωση. Θα χρησιμοποιήσουμε ένα μοντέλο για την προσομοίωση μαλακού ιστού (π.χ. ανθρώπινο δέρμα, υποδόριοι ιστοί όπως λίπος κ.τ.λ.) για να προσομοιώσουμε τις απτικές ιδιότητές του σε περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας. Ο χρήστης θα αλληλεπιδρά με την εικονική δομή και θα δέχεται ανάδραση δύναμης μέσω μίας ρομποτικής συσκευής τύπου PHANTOM. Στόχος μας είναι να αξιολογήσουμε την απόδοση του μοντέλου όσον αφορά στην ικανότητα του χρήστη να αντιλαμβάνεται διαφοροποιήσεις (ομοιογενείς ή μη) στη δομή που αγγίζει στο εικονικό περιβάλλον. Ως απώτερος σκοπός μάς ενδιαφέρει η αληθοφάνεια του μοντέλου υπό το πρίσμα της απτικής αντίληψης φυσικών χαρακτηριστικών (όπως η σκληρότητα) μέσω της απτικής αλληλεπίδρασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Μοντελοποίηση Παραμόρφωσης

Η εκτεταμένη χρήση του υπολογιστή ως εργαλείο μοντελοποίησης και προσομοίωσης οδηγεί στην ανάγκη όλο και αυξανόμενου ρεαλισμού στις εφαρμογές αυτές. Πολύ σημαντικό μέρος των εφαρμογών αυτών είναι το γραφικό κομμάτι όπου η ανάγκη για απεικόνιση πολύπλοκων δομών και αντικειμένων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη διάφορων μοντέλων παραμόρφωσης (deformation models). Τα αντικείμενα που μοντελοποιούνται με αυτά πρέπει να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον με όσο πιο φυσικό τρόπο γίνεται και σε ορισμένες εφαρμογές να επιτρέπουν το δυναμικό χειρισμό τους από το χρήστη.

Όσον αφορά στο εκάστοτε μοντέλο παραμόρφωσης, αυτό που φαίνεται να μας απασχολεί περισσότερο είναι η απαίτηση για ακρίβεια-ρεαλισμό, αλλά παράλληλα και η μικρή πολυπλοκότητα ώστε να είναι υπολογιστικά υλοποιήσιμο με τους τρέχοντες επεξεργαστές (ειδικότερα στις εφαρμογές που απαιτείται οι υπολογισμοί του μοντέλου να γίνονται σε πραγματικό χρόνο, όπως π.χ. σε εφαρμογές αλληλεπίδρασης με το χρήστη), απαιτήσεις οι οποίες είναι προφανώς αντικρουόμενες. Έτσι, για κάποια συγκεκριμένη εφαρμογή πρέπει κανείς να λάβει υπ' όψιν του το "trade-off" ακρίβειας-υπολογιστικής πολυπλοκότητας και να επιλέξει το μοντέλο που θα χρησιμοποιήσει βάσει των απαιτήσεων που έχει.

Θα παρουσιαστούν στο κεφάλαιο αυτό συνοπτικά κάποια από τα κυριότερα μοντέλα παραμόρφωσης που χρησιμοποιούνται, και θα παρουσιαστεί η υλοποίηση του μοντέλου δικτυώματος μάζας ελατηρίου που επιλέξαμε για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

2.1 Μοντέλα Παραμόρφωσης

Διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: μη φυσικά και φυσικά μοντέλα, ανάλογα με την προσέγγιση που χρησιμοποιούν για την μοντελοποίηση της παραμόρφωσης (Gibson, Mirtich 1997). Τα μη φυσικά μοντέλα χρησιμοποιούν καθαρά γεωμετρικές τεχνικές και ο ρεαλισμός τους επαφίεται κυρίως στις ικανότητες του σχεδιαστή, ενώ τα φυσικά βασίζονται σε φυσικές αρχές μηχανικής, γεγονός που τα κάνει πολύ πιο ρεαλιστικά από τα πρώτα (και καταλληλότερα για εφαρμογές προσομοίωσης πραγματικού κόσμου).

2.1.1 Μη φυσικά μοντέλα

A. «Splines and patches»

Με αυτή τη μέθοδο η εκάστοτε καμπύλη ή επιφάνεια αναπαρίσταται από ένα σύνολο σημείων έλεγχου και ο σχεδιαστής μπορεί να επεξεργαστεί το σχήμα της επεξεργαζόμενος τα σημεία έλεγχου (αλλάζοντας θέση σε αυτά, προσθέτοντας νέα σημεία έλεγχου, αφαιρώντας κάποια σημεία, ή ακόμα και με αλλαγή των βαρών τους).

Η μέθοδος παρέχει δυνατότητα αναπαράστασης 2D και 3D καμπυλών, μάλιστα έχει το προτέρημα ότι είναι υπολογιστικά αποδοτική και υποστηρίζει αλληλεπίδραση με το χρήστη. Επίσης, με τη χρήση πολλών σημείων έλεγχου για την αναπαράσταση γίνεται δυνατός ακόμα και λεπτομερής έλεγχος του σχήματος του αντικειμένου. Βέβαια, σε μία τέτοια περίπτωση αυξάνεται η δυσκολία σχεδίασης, διότι ακόμα και η πιο μικρή αλλαγή θα απαιτήσει την τροποποίηση πολλών σημείων έλεγχου.

B. «Free-form» Παραμόρφωση

Η Free-form παραμόρφωση παρέχει μεγαλύτερη δυνατότητα έλεγχου του σχήματος αντικειμένων από ότι η τροποποίηση σημείων έλεγχου, και το επιτυγχάνει με την παραμόρφωση του χώρου στον οποίο βρίσκεται το αντικείμενο. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί πίνακες $f: R^3 \rightarrow R^3$ που προκαλούν κάποιες βασικές παραμορφώσεις όπως στροφή, συμπαγή κίνηση, λύγισμα του αντικειμένου κ.τ.λ. και με συνδυασμό τέτοιων πινάκων μπορούν να δημιουργηθούν και πιο πολύπλοκοι μετασχηματισμοί.

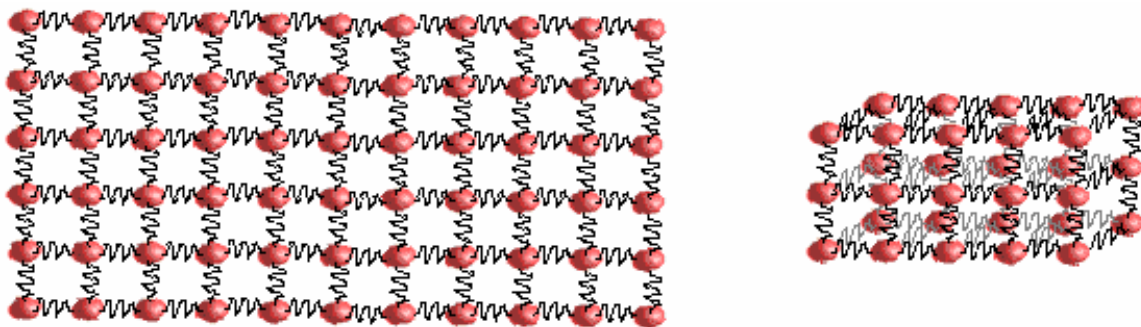
Η βασική Free-form μέθοδος έχει επεκταθεί από πολλούς και αποτελεί ένα δυνατό σχεδιαστικό εργαλείο. Υστερεί, όμως, στην ποικιλία των παραμορφώσεων που μπορούν να πραγματοποιηθούν με αυτόν τον τρόπο και στο γεγονός ότι ο έλεγχος της παραμόρφωσης από το χρήστη δε γίνεται πολύ διαισθητικά.

2.1.2 Φυσικά μοντέλα

Τα μη φυσικά μοντέλα παραμόρφωσης εκτός του ότι παρέχουν ρεαλισμό που επαφίεται στην εμπειρία και την ικανότητα του χρήστη έχουν και το μεγάλο μειονέκτημα ότι οι παραμορφώσεις πρέπει να αναλύονται-διευκρινίζονται αναλυτικά και εκτός αυτού, το σύστημα δεν έχει καμία γνώση των φυσικών ιδιοτήτων του εκάστοτε αντικειμένου που υφίσταται παραμόρφωση. Επίσης η μοντελοποίηση πολύπλοκων αντικειμένων (όπως π.χ. το ανθρώπινο πρόσωπο) είναι πάρα πολύ δύσκολη. Για τους παραπάνω λόγους άρχισε από τη δεκαετία του '80 (συνοδευόμενη από την ανάπτυξη ικανοποιητικής υπολογιστικής ισχύος και δυνατοτήτων γραφικών) η έρευνα και ανάπτυξη φυσικών μοντέλων που βασίζονται σε φυσικές αρχές και προσομοιώνουν αρκετά ρεαλιστικά φυσικές διεργασίες που θα ήταν πολύ δύσκολο ή ακατόρθωτο να αναπαρασταθούν με αμιγώς γεωμετρικά μοντέλα.

A. Μοντέλο δικτυώματος μάζας-ελατηρίου (Mass-spring model)

Το φυσικό μοντέλο μάζας-ελατηρίου χρησιμοποιείται ευρέως και με αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα για τη μοντελοποίηση των περισσότερων παραμορφώσιμων αντικειμένων. Κατά τη μέθοδο αυτή, κάθε αντικείμενο μοντελοποιείται ως σύνολο σημειακών μαζών που ενώνονται μεταξύ τους με ελατήρια και σχηματίζουν ένα πλέγμα (δικτύωμα).



Σχήμα 2.1 Παράδειγμα απλής δομής δικτυώματος μάζας-ελατηρίου

Οι δυνάμεις των ελατηρίων που ασκούνται είναι συνήθως γραμμικές (ακολουθούν το νόμο του Hook), αλλά υπάρχει και η δυνατότητα χρήσης μη γραμμικών ελατηρίων για τη μοντελοποίηση αντικειμένων που επιδεικνύουν ανελαστική συμπεριφορά.

Το σύστημα διέπεται από το 2ο Νόμο του Νεύτωνα :

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{f}$$

όπου -αν το σύστημα αποτελείται από N μάζες- \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} οι $N \times N$ πίνακες μαζών, απόσβεσης, και σκληρότητας ελατηρίων αντίστοιχα, \mathbf{f} το $3N$ διάνυσμα των εξωτερικών δυνάμεων και \mathbf{x} το $3N$ διάνυσμα θέσης των μαζών. Παρ' ότι το μέγεθος του συστήματος είναι αρκετά μεγάλο οι πίνακες αυτοί είναι σχετικά αραιοί. Επίσης, έχουν αναπτυχθεί αρκετές αριθμητικές μέθοδοι που καθιστούν δυνατή την επίλυση τέτοιων συστημάτων.

Το μοντέλο μάζας-ελατηρίου χρησιμοποιείται ευρέως για την προσομοίωση του ανθρώπινου προσώπου. Το τελευταίο μοντελοποιείται ως πλέγμα κόμβων που ενώνονται μεταξύ τους με γραμμικά ελατήρια και η δράση των μυών του προσομοιώνεται με εφαρμογή εξωτερικής δύναμης σε ορισμένες περιοχές κόμβων.

Τα συστήματα μαζών-ελατηρίων αποτελούν ένα απλό φυσικό μοντέλο με δυναμική που γίνεται εύκολα κατανοητή. Κατασκευάζονται εύκολα και το κυριότερο, καθιστούν δυνατή την αλληλεπίδραση με το χρήστη σε αρκετά γρήγορους ρυθμούς και την προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο με τη σημερινή υπολογιστική ισχύ, κάτι που δεν είναι εύκολα εφικτό από αρκετά από τα συνεχή φυσικά μοντέλα που θα αναφερθούν στη συνέχεια.

Παρ' όλα αυτά, πρόκειται για ένα μοντέλο που ουσιαστικά προσεγγίζει την πραγματική φυσική παραμόρφωση ενός συνεχούς αντικειμένου, επειδή διακριτοποιεί τη δομή του. Επίσης, έχει το μειονέκτημα ότι η παραμόρφωση του πλέγματος ρυθμίζεται εκτός των άλλων από τις σταθερές των ελατηρίων και η κατάλληλη τιμή για τις παραμέτρους αυτές δεν είναι πάντα

εύκολο να βρεθεί με βάσει τις ιδιότητες του υλικού. Ένα άλλο μειονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι η αδυναμία να αποδώσει κάποιους φυσικούς περιορισμούς, όπως π.χ. τη μη συμπιεστότητα ή την αντίσταση σε λύγισμα (για να λύσει αυτό το πρόβλημα, μπορεί βέβαια κάποιος να προσθέσει καινούρια ελατήρια στη δομή με παράλληλη αύξηση σε πολυπλοκότητα όμως). Τέλος, ένα από τα κυριότερα προβλήματα της τεχνικής αυτής αφορά στην ιδιότητα της σκληρότητας (stiffness), μεγάλες τιμές της οποίας προκαλούν αστάθεια στο σύστημα, αλλά χρειάζονται ορισμένες φορές για να μοντελοποιηθούν αντικείμενα σχεδόν άκαμπτα ή για να διαφυλάξουμε κάποιους φυσικούς περιορισμούς όπως τη μη διαπερατότητα ενός παραμορφώσιμου από ένα άλλο άκαμπτο αντικείμενο, που έρχονται σε επαφή.

B. Μοντέλα συνεχούς μέσου – Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων (finite element methods)

Το μοντέλο μάζας-ελατηρίου, όπως προαναφέρθηκε, είναι διακριτό γιατί προσεγγίζει τη δομή ενός συνεχούς αντικειμένου με πλέγμα μαζών, και άρα προσεγγίζει μόνο τη συμπεριφορά του πραγματικού αντικειμένου. Υπάρχουν άλλα φυσικά μοντέλα που προσδίδουν μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός συνεχούς υλικού, επειδή αντιμετωπίζουν τα αντικείμενα ως συνεχή, ακέραια σώματα των οποίων η μάζα και η ενέργεια κατανέμονται σε όλο τον όγκο και χρησιμοποιούν, σε αντίθεση με το μοντέλο μάζας-ελατηρίου, εξισώσεις συνεχούς μηχανικής.

Το συνεχές μοντέλο παραμόρφωσης θεωρεί την ισορροπία ενός σώματος στο οποίο ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις. Η παραμόρφωση του σώματος εξαρτάται τόσο από τις εξωτερικές δυνάμεις όσο και από τις ιδιότητες του υλικού του και το σώμα επανέρχεται σε κατάσταση ισορροπίας όταν η δυναμική του ενέργεια γίνει ελάχιστη. Η συνολική δυναμική ενέργεια ενός σώματος είναι :

$$\Pi = \Lambda - W$$

όπου, Λ η συνολική ενέργεια παραμόρφωσης του αντικειμένου (ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο αντικείμενο ως παραμόρφωση) και W το έργο των ασκούμενων εξωτερικών δυνάμεων (δυνάμεις που ασκούνται σε συγκεκριμένα σημεία του σώματος, δυνάμεις που κατανέμονται στο σώμα-όπως δυνάμεις βαρύτητας-, και δυνάμεις ασκούμενες στην επιφάνεια του σώματος όπως δυνάμεις πίεσης). Οι όροι Λ και W εκφράζονται ως $\Lambda(\underline{x})$ και $W(\underline{x})$, όπου \underline{x} η μετατόπιση του υλικού σε όλο τον όγκο του αντικειμένου, και αναζητούμε την παραμόρφωση \underline{x} που μηδενίζει την παράγωγο $\frac{\partial \Pi(\underline{x})}{\partial \underline{x}}$ (ώστε να έχουμε ελάχιστη δυναμική ενέργεια).

Για την επίλυση των εξισώσεων που προκύπτουν με τη μέθοδο αυτή, έχουν αναπτυχθεί κάποιες αριθμητικοί μέθοδοι προσέγγισης της λύσης, επειδή δεν είναι πάντα εύκολο να βρεθεί λύση σε κλειστή μορφή.

Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινίσουμε ότι η διαφορά διακριτού και συνεχούς μοντέλου έγκειται στο μοντέλο καθεαυτό και στις εξισώσεις που το διέπουν, κι όχι στον τρόπο επίλυσης των εξισώσεών του, ο οποίος σε προσομοιώσεις σε υπολογιστή είναι πάντα διακριτός (αριθμητικές μέθοδοι και προσέγγιση σε διακριτά χρονικά βήματα).

Έτσι, ενώ το μοντέλο μάζας-ελατηρίου προσεγγίζει το αντικείμενο με διακριτό πλέγμα μαζών κι έτσι διακριτοποιεί τις εξισώσεις ισορροπίας που το διέπουν (μία εξίσωση για κάθε μάζα), οι μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων (Finite element methods FEM) διαιρούν το

αντικείμενο σε σύνολο στοιχείων και προσεγγίζουν την συνεχή εξίσωση ισορροπίας σε όλα τα στοιχεία.

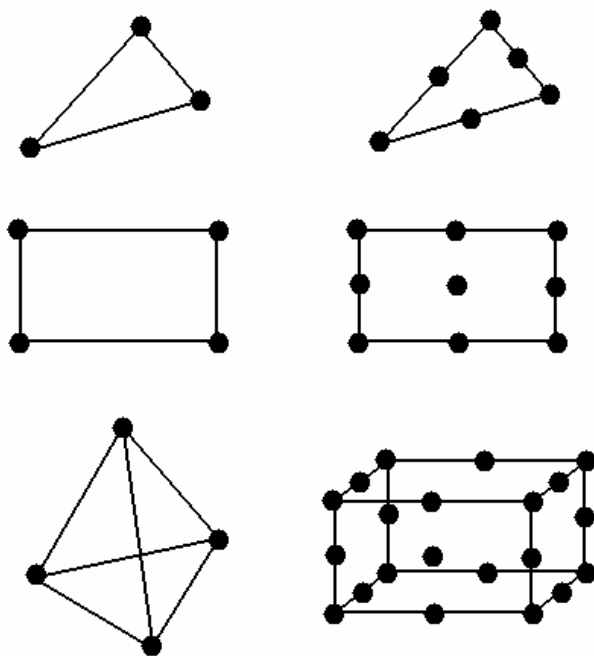
Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος FEM διαιρεί το αντικείμενο σε στοιχεία που ενώνονται μεταξύ τους σε διακριτό αριθμό κόμβων και στη συνέχεια για κάθε στοιχείο βρίσκει μία συνάρτηση που λύνει την εξίσωση ισορροπίας, η οποία όμως υπόκειται σε περιορισμούς στους κόμβους του κάθε στοιχείου, ώστε να είναι συνεχής στα όρια που ενώνονται γειτονικά στοιχεία.

Για παράδειγμα, αν $\Phi(x,y,z)$ μία βαθμωτή τέτοια συνάρτηση, ισχύει :

$$\Phi(x, y, z) \approx \sum_i h_i(x, y, z)\Phi_i$$

όπου h είναι η συνάρτηση παρεμβολής για το συγκεκριμένο στοιχείο και Φ_i οι τιμές της συνάρτησης για τους κόμβους του συγκεκριμένου στοιχείου. Άρα για να προσεγγίσει τη λύση της εξίσωσης ισορροπίας αρκεί κανείς να προσδιορίσει το πεπερασμένο σύνολο των τιμών Φ_i για όλους τους κόμβους ώστε να ελαχιστοποιείται η δυναμική ενέργεια σε όλο το αντικείμενο.

Σημαντικό για τον βέλτιστο ρεαλισμό του μοντέλου, είναι η επιλογή της μορφής του στοιχείου και της συνάρτησης παρεμβολής, ανάλογα με το σχήμα του αντικειμένου και του πόσο μεγάλη ακρίβεια θέλουμε (εις βάρους της πολυπλοκότητας).



Σχήμα 2.2 Παραδείγματα απλών στοιχείων που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Παρατηρούμε 2D και 3D στοιχεία, με διάφορους αριθμούς κόμβων.

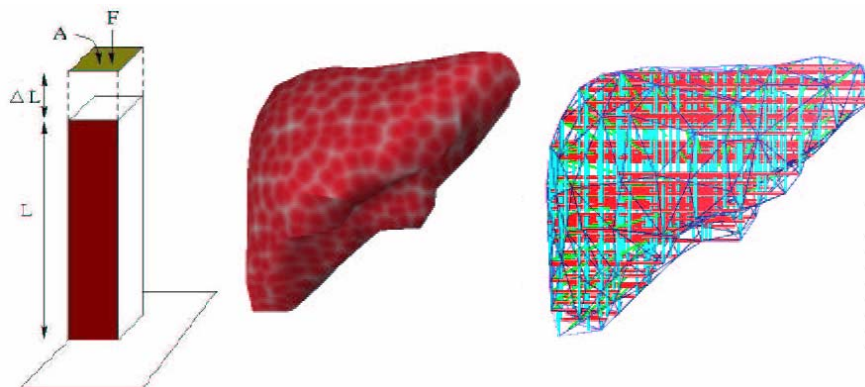
Γενικά, η επιλογή στοιχείων με μεγάλο αριθμό κόμβων και πολύπλοκη συνάρτηση παρεμβολής οδηγεί σε απαίτηση μικρότερου αριθμού στοιχείων, αλλά σε μεγαλύτερη υπολογιστική πολυπλοκότητα ανά στοιχείο. Η συνάρτηση παρεμβολής που χρησιμοποιείται

είναι συνήθως πολυωνυμική με το μικρότερο δυνατό βαθμό, που θα παρέχει όμως τον απαραίτητο αριθμό συντελεστών (πρέπει να ισούται με τον αριθμό των κόμβων). Το σύνολο των επιμέρους εξισώσεων που προκύπτουν για κάθε στοιχείο αποτελούν το συνολικό σύστημα, το οποίο είναι γραμμικό και μπορεί να λυθεί με αρκετές γνωστές αριθμητικές μεθόδους.

Παρ' όλο που η FEM παρέχει μια καλύτερη από πλευράς ρεαλισμού προσομοίωση απ'ότι π.χ. το μοντέλο μάζας-ελατηρίου και με μικρότερο αριθμό κόμβων (και άρα μικρότερο σύστημα προς επίλυση), η χρήση της σε εφαρμογές υπολογιστών είναι περιορισμένη, διότι στην πράξη είναι δύσκολο να εφαρμοστεί σε συστήματα που λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο, εξαιτίας της μεγάλης πολυπλοκότητας της μεθόδου (για κάθε παραμόρφωση που υφίσταται το αντικείμενο για να επαναυπολογισθούν τα περισσότερα μεγέθη -μάζα, σκληρότητα, δυνάμεις- πρέπει να ξαναγίνει ολοκλήρωση για όλο τον όγκο του αντικειμένου). Έτσι, η μέθοδος χρησιμοποιείται μόνο με την παραδοχή ότι έχουμε μικρές παραμορφώσεις και ότι δεν αλλάζει ιδιαίτερα η τοπολογία του αντικειμένου. Στην πράξη, χρησιμοποιείται για μοντελοποίηση αρκετά δύσκαμπτων υλικών, όπως μέταλλα, των οποίων η παραμόρφωση είναι πάρα πολύ μικρή.

Γ. «Long Element models»

Το μοντέλο «μακρών στοιχείων» (LEM) έχει επιδείξει πολύ καλή λειτουργικότητα σε προσομοιώσεις μαλακών ιστών, και είναι κατάλληλο για προσομοίωση μικρών και μεγάλων παραμορφώσεων (Mendoza, Sundaraj, Laugier, 2002). Συγκεκριμένα, διακριτοποιεί το αντικείμενο σε μακριά στοιχεία και διέπεται από δυο κυρίως αρχές, την αρχή του Pascal και την αρχή διατήρησης του όγκου. Ως μεταβλητές παράστασης του αντικειμένου χρησιμοποιούνται μεγέθη όπως πίεση, πυκνότητα, όγκος, παραμόρφωση κ.τ.λ.



Σχήμα 2.3 Παράδειγμα διακριτοποίησης LEM.Φαίνονται το απλό στοιχείο, το αντικείμενο προς μοντελοποίηση και πώς τελικά αυτό διακριτοποιείται σε πολλά στοιχεία LEM (Mendoza, Sundaraj, Laugier, 2002)

Οι εξισώσεις του μοντέλου αυτού απαιτούν η εξωτερική πίεση να ισούται με την εσωτερική. Στη διαμόρφωση της εξωτερικής πίεσης συμβάλουν η ατμοσφαιρική πίεση, η ένταση λόγω της επιμήκυνσης και επαφή από το περιβάλλον. Στο εσωτερικό του στοιχείου θεωρούμε υγρό συγκεκριμένης πυκνότητας η οποία μαζί με τη βαρύτητα διαμορφώνουν την

εσωτερική πίεση σε κάθε σημείο. Το σύστημά μας τελικά αποτελείται από τις εξισώσεις πίεσης για όλα τα στοιχεία LEM συνδυασμένες με τις αρχές του Pascal και διατήρησης του όγκου.

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει το πλεονέκτημα ρεαλιστικής και ευσταθούς προσομοίωσης χωρίς ιδιαίτερο υπολογιστικό κόστος (κατάλληλη για προσομοιώσεις πραγματικού χρόνου, αλληλεπίδραση με το χρήστη) και σε αντίθεση π.χ. με την FEM είναι κατάλληλη και για αντικείμενα που επιτρέπουν μεγάλες παραμορφώσεις (γι' αυτό ενδείκνυται για μοντελοποίηση μαλακών ιστών).

Δ. Προσεγγιστικά μοντέλα συνεχούς μέσου (Approximate continuum models)

Πρόκειται για μοντέλα στα οποία κάποια φυσικά μεγέθη - κυρίως η ενέργεια παραμόρφωσης-ορίζονται έτσι ώστε να προσδίδουν αποδοτικούς αλγορίθμους προσομοίωσης ή να επιτυγχάνουν συγκεκριμένα επιθυμητά αποτελέσματα. Ονομάζονται προσεγγιστικά συνεχή μοντέλα, επειδή η παραμόρφωση προκαλείται με φυσικό τρόπο, αλλά δεν ακολουθεί αυστηρά κάποιους φυσικούς νόμους όπως γίνεται στη FEM.

- Ελαστικές καμπύλες / επιφάνειες (Snakes)

Πρόκειται για μονοδιάστατες παραμορφώσιμες καμπύλες οι οποίες αντιστέκονται στο λύγισμα και το τέντωμα, και χρησιμοποιούνται κυρίως στην ανάλυση εικόνων και στη όραση υπολογιστών. Εάν $v(s)$ είναι η παραμετρική θέση της καμπύλης, η εσωτερική της ενέργεια παραμόρφωσης εκφράζεται ως :

$$V = \frac{1}{2} \int \left[a(s) \left\| \frac{dv}{ds}(s) \right\|^2 + b(s) \left\| \frac{d^2v}{ds^2}(s) \right\|^2 \right] ds$$

όπου, η πρώτη και η δεύτερη μερική παράγωγος αντιστοιχεί σε αξονική παραμόρφωση και παραμόρφωση-λύγισμα αντίστοιχα. Με τα βάρη $a(s)$ και $b(s)$ ρυθμίζει κανείς τις επιθυμητές ιδιότητες της καμπύλης, π.χ. θέτοντας $b(s_1)=0$ επιτρέπουμε λύγισμα στο s_1 , δηλαδή να σχηματίσει γωνία εκεί. Υπάρχει επίσης δυνατότητα προθήκης επιπλέον δύναμης από το χρήστη που να έλκει π.χ. την καμπύλη σε ένα σημείο $v(s_1)$. Τότε, αν π.χ. θέλουμε η δύναμη αυτή να έχει τη μορφή δύναμης ελατηρίου, θα προστεθεί ο όρος $k\|v(s_1) - v(s)\|^2$ στην εξίσωση δυναμικής ενέργειας.

Για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης η καμπύλη διακριτοποιείται και χρησιμοποιούνται τεχνικές ολοκλήρωσης Euler για την ελαχιστοποίηση της ολικής ενέργειας. Οι μερικοί παράγωγοι της εξίσωσης υπολογίζονται με μεθόδους πεπερασμένων διαφορών.

- Μέθοδος ενέργειας διακριτής παραμόρφωσης (Discretized deformation energy)

Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιείται συνεχές μοντέλο για τη δυναμική ενέργεια. Αν $r(s)$ είναι συνάρτηση θέσης κάθε σημείου του αντικειμένου $s=(s_1, s_2, s_3)$, s_0 ένα σημείο πάνω σε αυτό και $s_1=s_0+ds$ η διακριτή μετατόπιση του σημείου, τότε η Ευκλείδεια απόσταση είναι:

$$\|r(s_0) - r(s_1)\|^2 = ds^T G(s) ds$$

όπου

$$G_{ij}(s_0) = \frac{\partial r}{\partial s_i}(s_0) \cdot \frac{\partial r}{\partial s_j}(s_0)$$

καλείται πρώτη βασική μορφή (ή metric tensor) του αντικειμένου.

Εάν G^0 ο metric tensor της αρχικής, μη παραμορφωμένης δομής, η δυναμική ενέργεια παραμόρφωσης μπορεί να οριστεί ως :

$$V(r) = \int \int \int_a \|G - G^0\|_a^2 ds_1 ds_2 ds_3$$

όπου a το βάρος της νόρμας. Η ολοκλήρωση γίνεται για όλο το αντικείμενο.

Για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης, το αντικείμενο διακριτοποιείται σε πλέγμα σημείων και για κάθε σημείο υπολογίζεται προσεγγιστικά η πρώτη βασική μορφή με πεπερασμένες διαφορές και η δυναμική ενέργεια υπολογίζεται ως πεπερασμένο άθροισμα.

Ο ορισμός αυτός της δυναμικής ενέργειας δεν προέρχεται από κάποια φυσική αρχή, αλλά αποτελεί εύλογο μέτρο το οποίο ελαχιστοποιείται όταν το αντικείμενο είναι σε κατάσταση μη παραμόρφωσης. Η τεχνική αυτή μοιάζει με το μοντέλο μάζας-ελατηρίου αλλά διαφέρει στον τρόπο υπολογισμού των δυνάμεων παραμόρφωσης. Επίσης, για αρκετά άκαμπτα αντικείμενα ο υπολογισμός της δυναμικής ενέργειας με αυτόν τον τρόπο γίνεται προβληματικός, κάτι αντίστοιχο με το πρόβλημα για μεγάλη σκληρότητα ελατηρίων στο μοντέλο μάζας-ελατηρίου.

- Υβριδικά μοντέλα (Hybrid models)

Το πρόβλημα που προαναφέρθηκε ότι προκύπτει σε κάποια μοντέλα κατά την μοντελοποίηση άκαμπτων ή απλά με μεγάλη σκληρότητα αντικειμένων, όπως επίσης και το πρόβλημα που προκύπτει για τα πολύ παραμορφώσιμα αντικείμενα επειδή χρειάζονται πολύ μεγάλο διάνυσμα κατάστασης, έρχονται να λύσουν τα υβριδικά μοντέλα, τα οποία διαχωρίζουν ένα παραμορφώσιμο αντικείμενο σε δύο συνιστώσες, μία άκαμπτη, και μία παραμορφώσιμη.

E. Μοντέλα λίγων βαθμών ελευθερίας (Low degree freedom models)

Τα φυσικά μοντέλα που συζητήθηκαν προηγουμένως οδηγούν σε συστήματα με πολλούς βαθμούς ελευθερίας αφού η κατάσταση του αντικειμένου χαρακτηρίζεται από θέσεις και ταχύτητες για ένα αρκετά μεγάλο αριθμό κόμβων (που προκύπτει από τη διακριτοποίηση). Οι πολλοί βαθμοί ελευθερίας δίνουν μεν δυνατότητα αναπαράστασης μεγάλης ποικιλίας παραμορφώσεων, αλλά αποτελούν μεγάλο υπολογιστικό φόρτο και μειώνουν τις ταχύτητες προσομοίωσης και περιορίζεται έτσι η χρήση τους για λειτουργίες πραγματικού χρόνου. Γι' αυτό το λόγο, έχουν προταθεί κάποια προσεγγιστικά συνεχή μοντέλα με λιγότερους βαθμούς ελευθερίας, τα οποία προορίζονται για εφαρμογές που μπορεί να θυσιαστεί η ακρίβεια προς όφελος της ταχύτητας.

- «Modal analysis» (ανάλυση σε «ιδιοτρόπους»)

Η τεχνική αυτή βασίζεται στο μετασχηματισμό των εξισώσεων του συστήματος, έτσι ώστε να μπορούμε να το διαχωρίσουμε σε συνιστώσες. Συγκεκριμένα, υπάρχει πίνακας φ και διαγώνιος λ :

$$\phi \lambda = M^{-1} K \phi$$

όπου M, K οι πίνακες μαζών και σκληρότητας του συστήματος.
τότε μετασχηματίζοντας :

$$\phi^T M \phi = \tilde{M}$$

$$\phi^T K \phi = \tilde{K}$$

$$\phi^T C \phi = \tilde{C}$$

$$\phi x = \tilde{x}$$

$$\phi^T f = \tilde{f}$$

το σύστημα παίρνει τη μορφή :

$$\tilde{M} \ddot{\tilde{x}} + \tilde{C} \dot{\tilde{x}} + \tilde{K} \tilde{x} = \tilde{f}$$

κατά την οποία οι εξισώσεις είναι γραμμικά ανεξάρτητες και κάθε εξίσωση περιγράφει μία συνιστώσα ταλάντωσης του αντικειμένου.

Έτσι, μπορούμε να μειώσουμε τον βαθμό ελευθερίας του συστήματος αγνοώντας συνιστώσες μεγάλης συχνότητας για να έχουμε ως αποτέλεσμα γρηγορότερη προσομοίωση. Γενικότερα, με αυτήν την τεχνική δίνεται η δυνατότητα να διατάξουμε τις συνιστώσες παραμόρφωσης του αντικειμένου, έτσι ώστε ανάλογα με την περίπτωση να διαλέγουμε πόσες από αυτές θα αγνοήσουμε - αν θέλουμε ταχύτητα προσομοίωσης- ή πόσες θα λάβουμε υπ' όψιν μας -όταν θέλουμε λεπτομέρεια. Ουσιαστικά, άρα, αυτή η τεχνική έχει το προτέρημα ότι μπορεί κανείς να ρυθμίσει το "trade-off" λεπτομέρειας-ταχύτητας στην προσομοίωση.

- «Dynamic global deformations»

Η τεχνική αυτή μοιάζει με αυτήν της Free-form deformation διότι χρησιμοποιεί κι αυτή έναν πίνακα μετασχηματισμού χώρου $R^3 \rightarrow R^3$. Η διαφορά τους έγκειται στο ότι η τελευταία προσθέτει και χρονική εξάρτηση για να απεικονίσει την παραμόρφωση του αντικειμένου.

Συγκεκριμένα, αν x οι συντεταγμένες ενός σημείου στο αρχικό αντικείμενο (πριν την παραμόρφωση) η νέα θέση του σημείου δίνεται από τη σχέση :

$$f(x, t) = R(t) p(x)$$

όπου η $p(x)$ είναι συνάρτηση ανεξάρτητη του χρόνου, ενώ ο πίνακας R μετασχηματίζει τις συντεταγμένες ανάλογα με τα στοιχεία του, τα οποία αλλάζουν στο χρόνο και προκαλούν έτσι την κίνηση του αντικειμένου στο χρόνο.

Η δυναμική ενέργεια του αντικειμένου ορίζεται σε κάθε περίπτωση διαφορετικά, ανάλογα με την συμπεριφορά του αντικειμένου που θέλουμε να προωθήσουμε. Για συγκεκριμένες μορφές παραμόρφωσης υπάρχει δυνατότητα προϋπολογισμού κάποιων μεγεθών κατά την προσομοίωση. Επίσης, προσφέρεται η δυνατότητα ενσωμάτωσης επιθυμητών περιορισμών, πράγμα που προσφέρει το πλεονέκτημα μεγάλου βαθμού ελέγχου χειρισμού των αντικειμένων.

- Επιφάνειες ελαχιστοποίησης ενέργειας (Minimal Energy surfaces)

Πρόκειται για μία τεχνική απόδοσης "φυσικότητας" στην παραμόρφωση που προκαλούν τα γεωμετρικά μοντέλα και πραγματοποιείται με ελαχιστοποίηση κάποιας συνάρτησης ενέργειας που ορίζεται για την επιφάνεια.

Συγκεκριμένα, εάν $w(u,v)$ είναι η συνάρτηση μίας παραμετρικής επιφάνειας στο χώρο Γ , μία λογική μορφή που θα μπορούσε να έχει η ενέργεια (που βασίζεται σε τοπικό τέντωμα και λύγισμα), είναι :

$$E = \int_{\Gamma} (a_{11} \|w_u\|^2 + 2a_{12} w_u w_v + a_{22} \|w_v\|^2 + b_{11} \|w_{uu}\|^2 + 2b_{22} \|w_{vv}\|^2 - 2f \cdot w) dudv$$

όπου a_{ij} και b_{ij} συντελεστές βαρών, και f δυνάμεις παραμόρφωσης που επιδρούν στην επιφάνεια του αντικειμένου και ορίζονται από το χρήστη. Μάλιστα παρέχεται η δυνατότητα ενσωμάτωσης επιπλέον περιορισμών.

Γενικά, όταν οι περιορισμοί είναι γραμμικοί ως προς το διάλυσμα κατάστασης υπάρχουν κάποια υπολογιστικά οφέλη. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα ενσωμάτωσης δυναμικών χαρακτηριστικών με την πρόσθεση όρων μάζας και απόσβεσης.

2.2 Υλοποίηση μοντέλου δικτυώματος μάζας-ελατηρίου

2.2.1 Δομή προς παραμόρφωση

Σκοπός μας είναι η προσομοίωση του ανθρωπίνου δέρματος αλλά και γενικότερα μαλακών ιστών του ανθρώπινου συστήματος για την μελέτη των ιδιοτήτων τους ως προς την παραμόρφωση. Όπως είδαμε στην αντίστοιχη ενότητα που περιγράφονται τα μοντέλα παραμόρφωσης, για την προσομοίωση της παραμόρφωσης ενός αντικειμένου μάς ενδιαφέρουν δύο παράγοντες: η ακρίβεια (δηλαδή η αληθοφάνεια του αποτελέσματος) και η μικρή υπολογιστική πολυπλοκότητα ώστε να υπάρχει δυνατότητα αλληλεπίδρασης της δομής με το χρήστη, σε προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο.

Για την καλύτερη αληθοφάνεια της προσομοίωσης επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε κάποιο φυσικό μοντέλο –όπως συνηθίζεται σε όλες τις εφαρμογές βιοιατρικής. Επίσης, η περιορισμένη υπολογιστική δυνατότητα που μας παρέχεται επιβάλλει την επιλογή μοντέλου με μικρή σχετικά πολυπλοκότητα. Έτσι, οδηγηθήκαμε στο μοντέλο μάζας-ελατηρίου, το οποίο είναι και η συνηθέστερη επιλογή για προσομοίωση των ιδιοτήτων του ανθρωπίνου δέρματος.

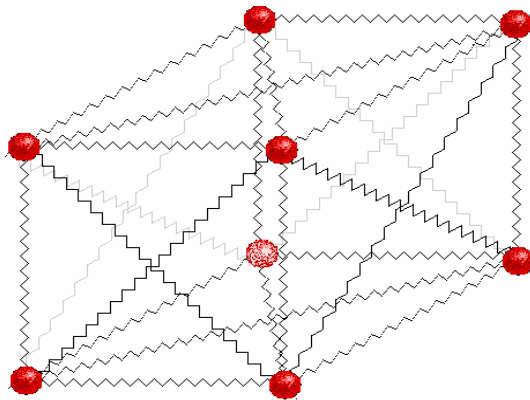
Η εξίσωση που διέπει το σύστημα είναι :

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f$$

όπου -αν το σύστημα αποτελείται από N μάζες- M , C , K οι $N \times N$ πίνακες μαζών, απόσβεσης, και σκληρότητας ελατηρίων αντίστοιχα, f το $3N$ διάνυσμα των εξωτερικών δυνάμεων και x το $3N$ διάνυσμα θέσης των μαζών.

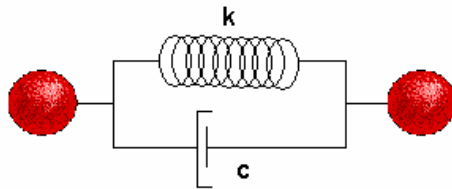
Ο πίνακας M είναι διαγώνιος και περιέχει τις μάζες όλων των στοιχείων . Οι πίνακες C και K περιέχουν στην κάθε θέση $[i][j]$ την τιμή απόσβεσης και σκληρότητας του ελατηρίου που συνδέει τα στοιχεία i, j μεταξύ τους. Οι πίνακες C και K κατασκευάζονται ανάλογα με τη μορφή του πλέγματος που έχουμε διαλέξει.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέξαμε πλέγμα και με διαγώνιες συνδέσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί :



Σχήμα 2.4 Δομή δικτύωματος μαζών ελατηρίων

και η σύνδεση μεταξύ των μαζών θεωρείται όπως στο σχήμα 2.5:



Σχήμα 2.5 Σύνδεση μαζών στο μοντέλο δικτύωματος μαζών-ελατηρίων

Η επίλυση του μοντέλου αυτού γίνεται ως εξής :

Για κάθε χρονικό βήμα Δt :

Για κάθε κόμβο i , πρέπει να λυθεί η εξίσωση : $m_i \cdot \ddot{x}_i + c_i \cdot \dot{x}_i + k \cdot x_i = f_i$

Χρησιμοποιώντας τις τιμές από το προηγούμενο χρονικό βήμα, επιλύουμε ως εξής :

$$v_i(t) = a_i(t)Dt =$$

$$= \frac{1}{m_i} [f_{ei}(t) - \underbrace{\sum_j \{c[i][j](v_i(t-Dt) - v_j(t-Dt))\}}_A - \underbrace{\sum_j \{k[i][j](x_i(t-Dt) - x_j(t-Dt))\}}_B] \cdot Dt$$

όπου A, B οι όροι απόσβεσης και σκληρότητας ελατηρίου αντίστοιχα.

$$Dx_i(t) = v_i(t)Dt$$

$$x_i(t) = x_i(t-Dt) + Dx_i(t)$$

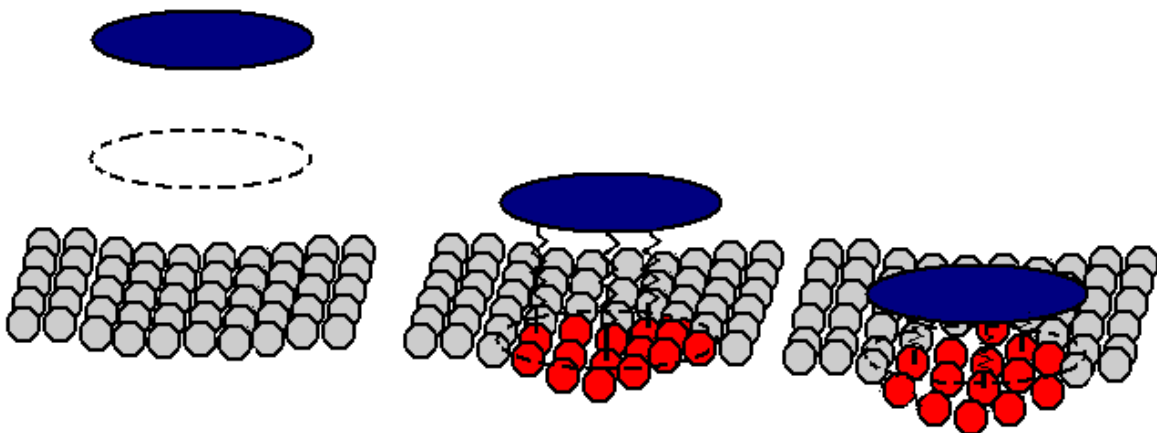
Κι έτσι, με είσοδο μόνο την εξωτερική δύναμη που ασκείται σε κάθε κόμβο κάθε χρονικό βήμα και με γνώση της προηγούμενης θέσης και ταχύτητας του κόμβου, υπολογίζουμε σε κάθε βήμα τη θέση και την ταχύτητα κάθε μάζας.

Άρα, γίνεται φανερό από τα παραπάνω ότι η πολυπλοκότητα εξαρτάται από τον αριθμό των κόμβων που χρησιμοποιούμε για τη μοντελοποίηση.

2.2.2 Μοντέλο χεριού

Εκτός από τη δομή που παραμορφώνεται, χρησιμοποιείται και μοντέλο για το εικονικό «χέρι» (ουσιαστικά πρόκειται για ένα εικονικό χειριστήριο (probe) του οποίου η κίνηση ελέγχεται από τη ρομποτική συσκευή και το οποίο αλληλεπιδρά με το εικονικό περιβάλλον).

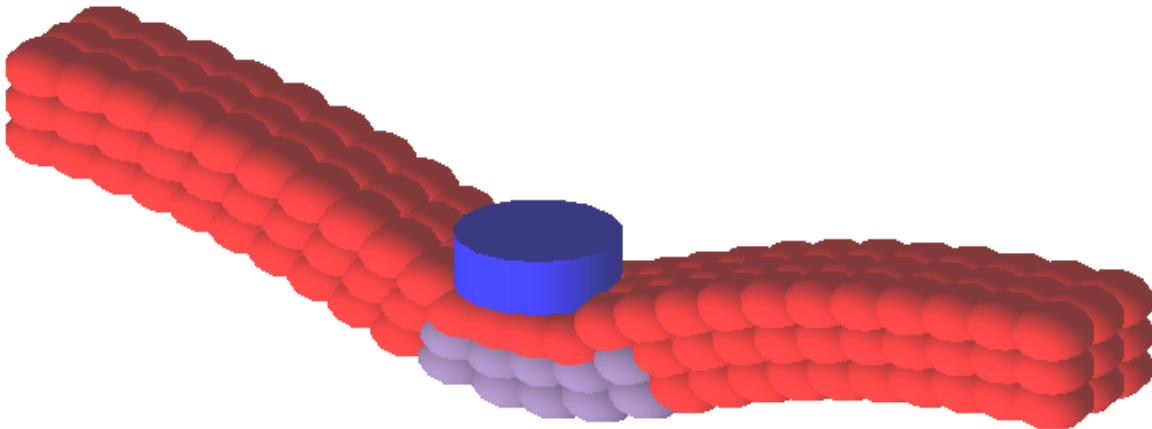
Το μοντέλο αποτελείται από ένα σταθερό (πάνω) επίπεδο (το οποίο συνδέεται άμεσα με την κίνηση του χρήστη) και ένα δεύτερο κατώτερο επίπεδο που έρχεται σε επαφή με τη δομή. Το πάνω επίπεδο ασκεί δυνάμεις ελατηρίου στις μάζες που πλησιάζει και η αλληλεπίδραση αυτή καθορίζει τη θέση του κάτω επιπέδου. Ουσιαστικά πρόκειται για την υλοποίηση μίας βασικής ιδέας εικονικής σύζευξης (virtual coupling) για εφαρμογές απτικής αλληλεπίδρασης σε περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας. Το θέμα αυτό θα συζητηθεί και στο επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 2.6 Υλοποίηση τεχνικής εικονικής σύζευξης

Η κάθε μάζα που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια που καλύπτει το χειριστήριο ασκεί σε αυτό δύναμη $f_i = kh \cdot \Delta x_i$ όπου kh η σταθερά του ελατηρίου του «χειριού» και Δx_i η παραμόρφωση του συγκεκριμένου ελατηρίου που αντιστοιχεί στη μάζα i . Ο μέσος όρος των δυνάμεων που ασκούνται στο δίσκο από όλες τις μάζες που βρίσκονται σε αλληλεπίδραση με αυτόν αποτελεί τη δύναμη που ασκεί η δομή στο χειριστήριο, και η μέση αυτή δύναμη ορίζει κατά μοναδικό τρόπο την παραμόρφωση Dx που θα υποστεί το «χέρι» από την επαφή με τη δομή ($Dx = F/kh$).

Έτσι, κατασκευάσαμε το μοντέλο του χεριού να δέχεται ως είσοδο την παραμόρφωση Δx_i για μία συγκεκριμένη μάζα i και να υπολογίζει τη δύναμη που ασκείται σε αυτή τη μάζα (και τη νέα θέση του κάτω επιπέδου του χεριού), με δεδομένα τη θέση της μάζας, και την πάνω θέση του δίσκου.



Σχήμα 2.7 Στιγμιότυπο από την προσομοίωση της παραμόρφωσης

Στην αναπαράσταση, το μοντέλο του χεριού παρουσιάζεται ως κύλινδρος (Σχήμα 2.7).

2.2.3 Επαφή

Συγκεντρώνοντας τα παραπάνω, έχουμε δημιουργήσει στην πράξη το μοντέλο της δομής «*msmodel*» και μία διεργασία αυτού «*void deform(F[N])*» (όπου N ο αριθμός των κόμβων), η οποία με είσοδο τον πίνακα F των εξωτερικών δυνάμεων σε κάθε μάζα, υπολογίζει με τον τρόπο που αναφέρθηκε τη νέα θέση της δομής. Επίσης, έχουμε δημιουργήσει το μοντέλο του χεριού «*handmodel*» και τη συνάρτηση αυτού «*touchforce(dx)*» που δέχεται ως είσοδο την παραμόρφωση του ελατηρίου που συνδέει μία μάζα με το «χέρι» και δίνει ως έξοδο την δύναμη αλληλεπίδρασης χεριού και μάζας.

Με βάση αυτά, η ροή του προγράμματος προσομοίωσης ακολουθεί τα εξής βήματα :

Για κάθε χρονικό βήμα Dt :

- Για κάθε μάζα i :
ΑΝ βρίσκεται σε αλληλεπίδραση με το χέρι : $f_i = \text{handmodel} \rightarrow \text{touchforce}(\Delta x_i)$
Αλλιώς $f_i = 0$
Δημιουργία του πίνακα εξωτερικών δυνάμεων F $F[i] = f_i$
- $\text{msmodel} \rightarrow \text{deform}(F)$
- $F_{\text{δομής_σε_χέρι}} =$ - μέσος όρος των f_i
 $Dx = F_{\text{δομής_σε_χέρι}} / kh$ προσδιορισμός κάτω επιπέδου χεριού

2.2.4 Παρατηρήσεις για το μοντέλο

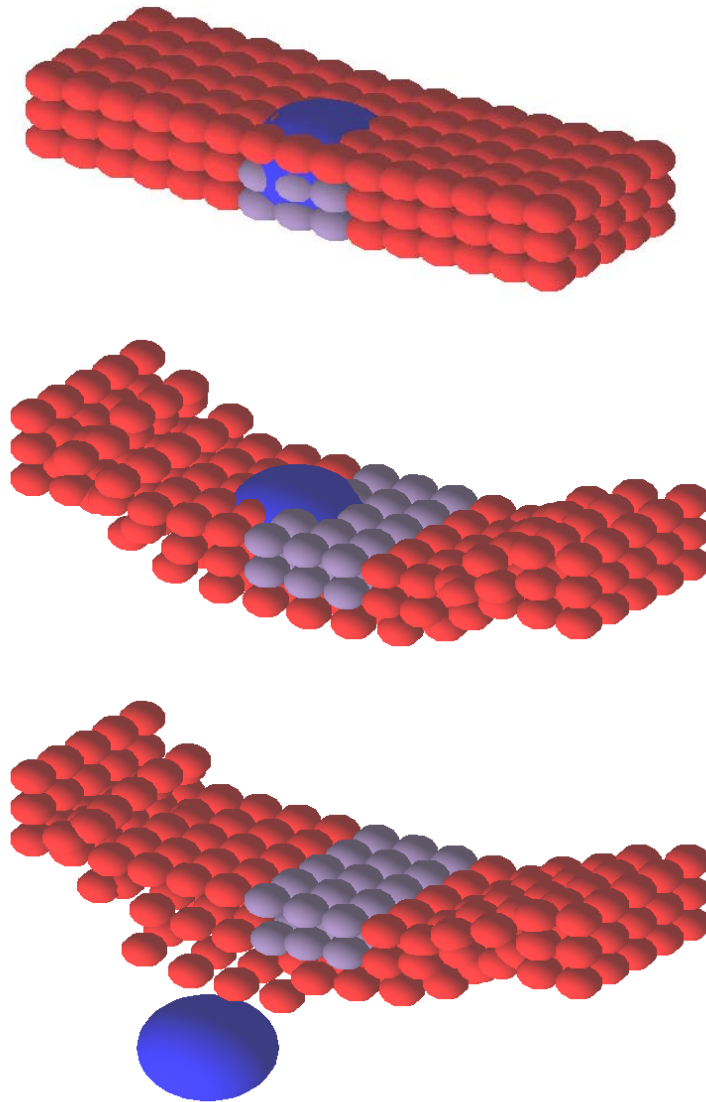
Η χρήση του μοντέλου δικτύματος μάζας-ελατηρίου για προσομοίωση παραμόρφωσης μαλακών ιστών παρουσιάζει – όπως ειπώθηκε ήδη – το προτέρημα, ότι με τα δεδομένα υπολογιστικά εργαλεία μπορούμε να έχουμε μία αρκετά ρεαλιστική και συγχρόνως εφικτή σε πραγματικό χρόνο προσομοίωση. Βέβαια, όπως και σε όλα σχεδόν τα μοντέλα παραμόρφωσης, πρέπει να επιλέξουμε που θα δώσουμε το βάρος στην εφαρμογή που μας ενδιαφέρει, γιατί και σε αυτό το μοντέλο εμφανίζεται το trade-off λεπτομέρειας-πολυπλοκότητας ανάλογα με τον αριθμό των κόμβων (πόσο πυκνό είναι το πλέγμα) που χρησιμοποιούμε.

Το μοντέλο αυτό παρουσιάζει βέβαια και κάποια προβλήματα που έγκεινται κυρίως στη διακριτή φύση του καθώς και στον παράγοντα «σκληρότητα». Όσον αφορά τα προβλήματα ευστάθειας (για αυξανόμενο k των ελατηρίων) και για το πρόβλημα ταλαντώσεων που δημιουργούνται στη δύναμη εξόδου λόγω της ασυνέχειας των μαζών θα συζητήσουμε αναλυτικότερα στο αντίστοιχο κεφάλαιο που θα μελετηθεί η δύναμη εξόδου. Εδώ το μόνο που μπορούμε να παρατηρήσουμε επιπρόσθετα είναι το φυσικό πρόβλημα που δημιουργείται από την ασυνέχεια της δομής, από το γεγονός δηλαδή ότι οι μάζες είναι διακριτές και επιτρέπουν διαπερατότητα στη δομή. Συγκεκριμένα, εμφανίζονται δύο ειδών προβλήματα και τα φαινόμενα που τα προκαλούν είναι μεν συμβατά με τους φυσικούς νόμους κίνησης διακριτών μαζών, αλλά είναι ανεπιθύμητα για εμάς επειδή προσπαθούμε να προσομοιώσουμε συνεχή δομή. Αυτά είναι η ανακατανομή των μαζών στο πλέγμα, και η διαπερατότητα της δομής από το χέρι.

Όσον αφορά την ανακατανομή των μαζών στο πλέγμα, προκαλείται όταν η δύναμη που ασκείται σε κάποιους κόμβους είναι αρκετά μεγάλη ώστε να τους προκαλέσει μεγάλη μετακίνηση σχετικά με τη θέση τους στο πλέγμα (και με δεδομένο ότι βρίσκουν «τρύπες» στη δομή να καταλάβουν). Το πρόβλημα ρεαλιστικότητας που δημιουργείται μπορούμε να το αποφύγουμε θεωρώντας ότι η δομή δε θα έπρεπε να δέχεται τέτοια παραμόρφωση (αντίστοιχο πραγματικό παράδειγμα, μία δύναμη που τρυπάει την επιφάνεια την οποία παραμορφώνει) και άρα δε μας ενδιαφέρει. Για το λόγο αυτό περιορίζουμε τη μελέτη μας στην παραμόρφωση που δημιουργείται στο αντικείμενο όσο η δομή του πλέγματος διατηρείται ακέραια .

Όσον αφορά τη διαπερατότητα της δομής, παρουσιάστηκε πρόβλημα όταν π.χ. έγινε προσπάθεια να προσομοιώσουμε το χέρι με σφαίρα (και να έχουμε σημειακή επαφή), αλλά το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας επιφάνεια για επαφή (εμβαδού που δεν χωράει μέσα στις «τρύπες» του πλέγματος) και γενικά πυκνότερη δομή.

Τα προβλήματα που προαναφέρθηκαν φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8 Στιγμιότυπα από την προσομοίωση της παραμόρφωσης με χειριστήριο σφαίρα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Απτική ανάδραση

Η απτική ανάδραση από το εικονικό περιβάλλον στον άνθρωπο δεν καθορίζεται με απλό τρόπο, αλλά αποτελεί τη δράση (την έξοδο) ολόκληρου συστήματος. Το σύστημα αυτό στη γενική μορφή του αποτελείται από τρία μέρη-υποσυστήματα: τον άνθρωπο χειριστή, την απτική διάταξη και το εικονικό περιβάλλον. Έτσι, οι ιδιότητες και η απόδοση του συστήματος απτικής ανάδρασης εξαρτώνται από τις ιδιότητες των επιμέρους αυτών συστημάτων, αλλά και από τον τρόπο σύνδεσής των.

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε τα υποσυστήματα που αποτελούν το απτικό σύστημα που χρησιμοποιήσαμε στην εργασία αυτή. Θα επικεντρωθούμε δε σε κάποια συνήθη προβλήματα που προκύπτουν κατά την σύζευξή τους και στο πώς επιλύθηκαν για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

3.1 Έλεγχος απτικής συσκευής

Στους μέχρι τώρα τρόπους επικοινωνίας με τον υπολογιστή υπάρχει ροή ενέργειας μόνο προς μία κατεύθυνση. Παραδείγματος χάριν, με το «ποντίκι» και το πληκτρολόγιο μεταφέρεται πληροφορία από το χρήστη στον υπολογιστή και ο υπολογιστής στέλνει ξεχωριστά οπτικές και ακουστικές πληροφορίες προς το χρήστη. Η αλληλεπίδραση με το εικονικό περιβάλλον μέσω απτικής συσκευής διαφέρει από τις μέχρι τώρα εφαρμογές στο ότι υπάρχει ροή ενέργειας προς δύο κατευθύνσεις, από και προς το χρήστη. Η ανάδραση δύναμης προς το χρήστη είναι η έξοδος ενός συστήματος ελέγχου που περιλαμβάνει και τον ίδιο το χρήστη και άρα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του (ταχύτητα απόκρισης, έλεγχος κίνησης του χεριού του κ.τ.λ.) αλλά και από τα χαρακτηριστικά της σύζευξης του χεριού του με τη συσκευή. Μάλιστα, επειδή οι απτικές συσκευές διοχετεύουν δύναμη προς το χρήστη, ο εύρωστος και ευσταθής σχεδιασμός του συστήματος προβάλλεται ως επιτακτική ανάγκη, επειδή οποιαδήποτε αστάθεια μπορεί να προκαλέσει εκτός από βλάβη στη συσκευή και τραυματισμό του χρήστη.

Σε μελέτες που έχουν προηγηθεί, ένα από τα κύρια προβλήματα που παρατηρείται, είναι ότι δε γίνεται διαχωρισμός του εικονικού περιβάλλοντος και του νόμου ελέγχου της δύναμης.

Ουσιαστικά δηλαδή, από μόνο του το εικονικό περιβάλλον, εκτός από τον υπολογισμό των δυνάμεων πρέπει να φροντίζει να διατηρείται και η ευστάθεια της συσκευής. Από αυτή την παρατήρηση προέκυψε ένας βασικός τρόπος διατήρησης της ευστάθειας του συστήματος με τεχνικές εισαγωγής τεχνητής σύζευξης (virtual coupling) μεταξύ του εικονικού περιβάλλοντος και της συσκευής (Adams, Hannaford, 1999). Συνήθως χρησιμοποιείται για σύζευξη το απλό μοντέλο ελατηρίου-απόσβεσης.

Επίσης, για τη μελέτη της ευστάθειας του συστήματος αλληλεπίδρασης ανθρώπου – συσκευής, συνηθίζεται η θεώρηση των επιμέρους συστημάτων (άνθρωπος, συσκευή, εικονικό περιβάλλον) ως δίθυρων τα οποία ανταλλάσσουν δύο βασικά μεγέθη, προσπάθεια (δύναμη) και ροή (ταχύτητα) (Adams, Hannaford, 1999) . Από εκεί και πέρα χρησιμοποιούνται στοιχεία θεωρίας γραμμικών δικτύων για να διατυπωθούν οι σχέσεις ευστάθειας που προκύπτουν από τις μήτρες που συνδέουν τα μεγέθη αυτά για κάθε δίθυρο (σύνθετων αντιστάσεων, αγωγιμοτήτων, μεταφοράς και υβριδική).



α) ολικό σύστημα σύμφωνα με τη θεώρηση υποσυστημάτων δίθυρων.



β) εισαγωγή τεχνητής σύζευξης στο σύστημα

Σχήμα 3.1 Διάγραμμα συστήματος σύμφωνα με τη θεώρηση δίθυρων

Στο σχήμα 3.1 φαίνεται ένα χοντρικό διάγραμμα του συστήματος σύμφωνα με τη θεώρηση αυτή α) χωρίς και β) με τεχνητή σύζευξη.

Επιπρόσθετα, κατά τη σύζευξη της απτικής διάταξης με το εικονικό περιβάλλον, παρατηρείται συνήθως πρόβλημα λόγω της αριθμητικής ολοκλήρωσης που λαμβάνει χώρα στο υπολογιστικό μέρος του εικονικού περιβάλλοντος. Το πρόβλημα αυτό οφείλεται στη διαφορά συχνότητας επανάληψης του βρόχου λειτουργίας που παρουσιάζουν το υπολογιστικό μέρος του εικονικού περιβάλλοντος και η διάταξη (η τελευταία έχει πολύ μεγαλύτερη συχνότητα λειτουργίας). Για την επίλυση του προβλήματος αυτού έχει προταθεί η χρήση τοπικών μοντέλων παρεμβολής, τα οποία υπολογίζουν – κατά τη διάρκεια του βρόχου υπολογισμών του μοντέλου – μία προσέγγιση της εξόδου την οποία και τροφοδοτούν στη διάταξη. Η εύρεση κατάλληλου τοπικού μοντέλου για της ανάγκες κάθε εφαρμογής και η παρεμβολή αυτού στο σύστημα αποτελούν πεδίο έρευνας που έχει απασχολήσει τα τελευταία χρόνια τους επιστημονικούς κύκλους που ασχολούνται με εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας (Constantinescu D.,

Salcudean S. E., Croft E.A, 2003; Otaduy, Lin, 2005; Park, Niemeyer, 2004). Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού (ενότητα 3.3) θα μιλήσουμε αναλυτικότερα για το πρόβλημα αυτό και θα αναφέρουμε ένα απλό παράδειγμα τοπικού μοντέλου.

3.2 Απτική διάταξη

Η συσκευή που χρησιμοποιήσαμε είναι το PHANTOM Omni (SensAble Technologies), ένας επιτραπέζιος «pen-based hand master» με 6 βαθμούς ελευθερίας. Ωστόσο, μόνο 3 από αυτούς είναι ενεργοί (επιτρέπουν άσκηση δύναμης ή ροπής ανάδρασης). Οι υπόλοιποι συμβάλλουν μόνο στην κάλυψη μεγαλύτερου χώρου εργασίας της συσκευής (Σχήμα 3.3 α) και β)). Έχει ειδική θέση για το άκρο σε μορφή στυλό που επιτρέπει αυτόματη βαθμονόμηση (calibration), και το μοντέλο αυτό (Omni) είναι μία από τις πιο αποδοτικές ως προς το κόστος απτικές συσκευές σήμερα.



Σχήμα 3.2 Απτική διάταξη : Phantom Omni

Συνοδεύεται από αντίστοιχο λογισμικό API ο πυρήνας του οποίου είναι γραμμένος σε C και C++ (SensAble Technologies, 2004). Στον πίνακα που ακολουθεί (ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1) δίνονται οι προδιαγραφές της συγκεκριμένης συσκευής (SensAble Technologies, 2004).

Για τη σύνδεση εικονικού περιβάλλοντος και συσκευής γράφηκε κώδικας σε C++ και για τα γραφικά χρησιμοποιήθηκε OpenGL.



α) κινήσεις του βραχίονα της διάταξης (ενεργοί βαθμοί ελευθερίας)



β) κινήσεις του «στυλό» (μη ενεργοί βαθμοί ελευθερίας)

Σχήμα 3.3 Βαθμοί ελευθερίας της διάταξης Phantom Omni (SensAble Technologies, 2004)

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1 : Προδιαγραφές της συσκευής PHANTOM Omni (SensAble Technologies)

Nominal Position Resolution	> 450 dpi	~0.055 mm
Workspace	~6.4 w x 4.8 h x 2.8 d in	> 160 w x 120 h x 70 d mm
Backdrive Friction	< 1 oz	< 0.26 N
Maximum Exertable Force	0.75 lbf	3.3 N
Continuous Exertable Force (24 hrs)	> 0.2 lbf	> 0.88 N
Stiffness	X axis > 7.3 lbs./in Y axis > 13.4 lbs./in Z axis > 5.9 lbs./in	X axis > 1.26 N/mm Y axis > 2.31 N/mm Z axis > 1.02 N/mm
Inertia (apparent mass at tip)	~ 0.101 lbm	~ 45 g
Footprint	~ 6 5/8 w x 8 d in	~ 168 w x 203 d mm
Weight*	3 lbs 15 oz	~1.47 kg
Operating Temperature	50° to 95°F	10° to 35°C
Storage Temperature	-40° to 149°F	-40° to 65°C
Relative Humidity	20% to 80% (noncondensing)	
Force Feedback	3 degrees of freedom (x, y, z)	
Position Sensing	x, y, z (digital encoders)	
	Pitch, roll, yaw (\pm 3% linearity potentiometers)	Pitch, roll, yaw (\pm 5% linearity potentiometers)
Interface	IEEE-1394 FireWire® port	
Input Voltage	100-240 VAC (Use supplied power supply only AD-740-1180)	
Input Frequency	50-60 Hz	
Input Current	1 A	
Warranty	Three months	

3.3 Δύναμη ανάδρασης προς την απτική διάταξη

Το μοντέλο που έχουμε κατασκευάσει παράγει στο τέλος κάθε βρόχου (κάθε χρονικής βαθμίδας Δt) μία έξοδο, τη δύναμη που ασκεί η δομή στο «χέρι» του χρήστη όπως αυτή έχει υπολογιστεί σύμφωνα με τους νόμους που διέπουν το μοντέλο. Η δύναμη αυτή, όπως και η δύναμη που ασκεί ο χρήστης στη δομή –όπως έχει ήδη σημειωθεί– είναι μόνο κατά τη διεύθυνση y (διεύθυνση κάθετη στη δομή) επειδή μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε την ιδιότητα της σκληρότητας της δομής κι όχι τις δυνάμεις που προκαλεί στις άλλες κατευθύνσεις οι οποίες δίνουν πληροφορίες για την υφή της. Στην ενότητα αυτή, θα συζητήσουμε κάποια από τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν κατά το πέρασμα της δύναμης ως έξοδο στην απτική

συσκευή, δηλαδή για να κάνουμε την εφαρμογή να παρέχει δυνατότητα αλληλεπίδρασης της δομής με το χρήστη σε επίπεδο δυνάμεων.

3.3.1 Πρόβλημα συγχρονισμού

Ένα από τα συνήθη προβλήματα που παρουσιάζονται σε εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας όπου απαιτείται αλληλεπίδραση του χρήστη με τα αντικείμενα σε μία οθόνη είναι ο συγχρονισμός της συσκευής με αυτό που διαδραματίζεται στην οθόνη και βλέπει ο χρήστης. Και στη συγκεκριμένη εφαρμογή αντιμετωπίσαμε αυτό το πρόβλημα καθώς η συχνότητα επανάληψης του βρόχου που γίνονται υπολογισμοί για τη συσκευή (haptic loop ή servo loop) είναι πολύ μεγαλύτερη από τη συχνότητα επανάληψης του βρόχου γραφικών (graphic loop). Πιο συγκεκριμένα, ο βρόχος ελέγχου που υπολογίζει και στέλνει δυνάμεις στη συσκευή εκτελείται ξεχωριστά, με υψηλότερη προτεραιότητα και με συχνότητα περίπου 1000 frames ανά δευτερόλεπτο. Ο βρόχος γραφικών όμως έχει ρυθμό ανανέωσης της εικόνας μόνο 20 ή 30 frames ανά δευτερόλεπτο και στον ίδιο βρόχο εκτελείται και η δυναμική προσομοίωση, πράγμα που δημιουργεί μεγάλες ασυνέχειες στη δύναμη εξόδου και λάθη στον υπολογισμό της σε ορισμένες περιπτώσεις, γιατί ουσιαστικά ο βρόχος ελέγχου παράγει περίπου 33 frames για κάθε 1 frame που παράγει ο βρόχος γραφικών (SensAble Technologies,2004).

Το πρόβλημα αυτό πρέπει να το λάβει υπ' όψιν του κανείς κατά τον σχεδιασμό της εφαρμογής και να χρησιμοποιήσει συγκεκριμένους προγραμματιστικούς τρόπους για να το αντιμετωπίσει. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήσαμε Callbacks (δηλαδή ανάδρομες κλήσεις), εφόσον ο προγραμματισμός της συγκεκριμένης απτικής συσκευής (Phantom OMNI) παρέχει τη δυνατότητα αυτή. Με τη χρήση των callbacks επιτυγχάνουμε να διαχωρίσουμε τους βρόχους γραφικών και ελέγχου ως εξής : δημιουργούμε το μοντέλο στο κυρίως πρόγραμμα το οποίο και απεικονίζουμε, και κάθε φορά που γίνεται κλήση της διεργασίας που υπολογίζει την παραμόρφωση κατά την επαφή οι υπολογισμοί για τη συσκευή γίνονται σε ένα εικονικό αντίγραφο του μοντέλου από το οποίο ανανεώνεται κάθε φορά το πραγματικό μοντέλο. Έτσι, με τη χρήση εικονικού μοντέλου, αποφεύγεται ο κίνδυνος αναφοράς από τον βρόχο γραφικών σε μεταβλητές του μοντέλου το οποίο μεταβάλλεται παράλληλα κατά το βρόχο ελέγχου.

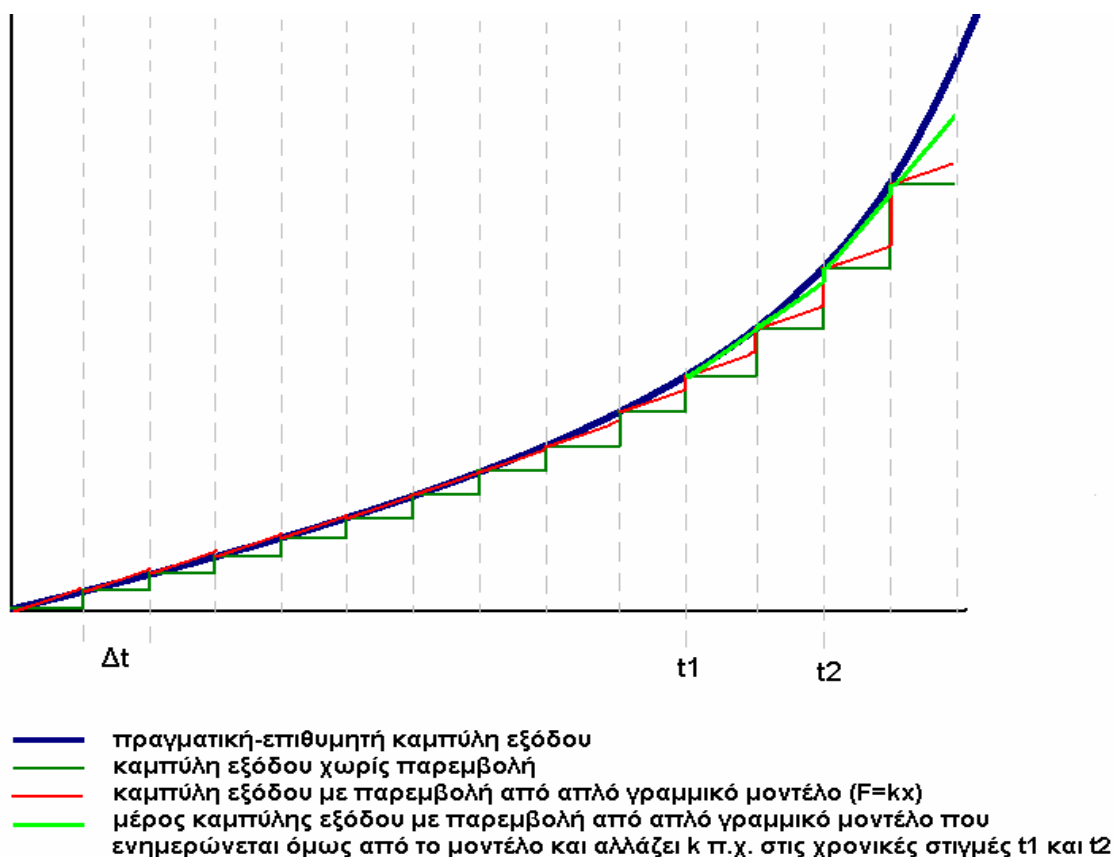
3.3.2 Πρόβλημα αριθμητικής ολοκλήρωσης

Εκτός από το πρόβλημα που προαναφέρθηκε που οφείλεται σε περιορισμούς που προέρχονται από τη συσκευή, μπορούμε να σημειώσουμε άλλο ένα πρόβλημα που οφείλεται στην εκτέλεση της προσομοίωσης και αυτό είναι η ασυνέχεια που προκαλείται στη δύναμη εξόδου λόγω δειγματοληψίας.

Αναλυτικότερα, η κίνηση που κάνει ο χρήστης και η οποία προκαλεί παραμόρφωση στο αντικείμενο, είναι συνεχής και θα έπρεπε (στη συγκεκριμένη εφαρμογή τουλάχιστον) να παράγει και συνεχή δύναμη. Όμως από τη φύση τους, τα προγράμματα που χρησιμοποιούμε στον υπολογιστή χρησιμοποιούν στιγμιαίες τιμές των μεγεθών για κάθε βήμα Δt (που γίνεται κατά την επανάληψη βρόχου) και άρα η θέση του χρήστη δειγματοληπτείται ανά Δt και υπολογίζεται η αντίστοιχη δύναμη που αναμενόμενα θα παρουσιάσει ανάλογη ασυνέχεια. Μάλιστα το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται αρκετά έντονο στις εφαρμογές με ανάδραση δύναμης, εξαιτίας της μικρής (σε σχέση με το βρόχο της συσκευής) συχνότητας επανάληψης του βρόχου

υπολογισμών. Το πρόβλημα αυτό γίνεται πιο έντονο σε δύο περιπτώσεις: όταν η δειγματοληψία αδυνατεί να ακολουθήσει το χρήστη –αυτό παρουσιάζεται στην περίπτωση που ο χρήστης, με δεδομένο ρυθμό δειγματοληψίας, κινεί το «χέρι» με μεγάλη ταχύτητα σε σχέση με το ρυθμό αυτό–, και όταν η πολυπλοκότητα του μοντέλου αυξάνεται τόσο που πέφτει ο ρυθμός επανάληψης των βρόχων και άρα με δεδομένη ταχύτητα κίνησης του «χεριού» η δειγματοληψία γίνεται πιο αραιή.

Το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα ανεπιθύμητες αναπηδήσεις της δύναμης εξόδου, και συνήθως αντιμετωπίζεται με την τεχνική της παρεμβολής από τοπικό μοντέλο (Constantinescu D., Salcudean S. E., Croft E.A, 2003; Otaduy, Lin, 2005; Park, Niemeyer, 2004). Συγκεκριμένα, ενώ μία κλασική εφαρμογή κρατάει την έξοδο σταθερή κατά τη διάρκεια του Δt που διαρκεί ο βρόχος επαναυπολογισμών και επαναπροσδιορισμού της θέσης του μοντέλου, η εφαρμογή που θα χρησιμοποιεί παρεμβολή θα χρησιμοποιεί κατά το χρονικό αυτό διάστημα ένα τοπικό μαθηματικό μοντέλο που θα προσεγγίζει την παραμόρφωση της δομής και θα υπολογίζει με αυτό τιμές εξόδου με αποτέλεσμα να έχουμε πιο ομαλή έξοδο. Η εξομαλυντική λειτουργία της μεθόδου αυτής φαίνεται στο επόμενο σχήμα για ένα απλό παράδειγμα γραμμικού τοπικού μοντέλου.



Σχήμα 3.4 Ομαλοποίηση της εξόδου με χρήση τοπικού μοντέλου παρεμβολής

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή δεν χρησιμοποιήσαμε τη μέθοδο της παρεμβολής από τοπικό μοντέλο, απλά την αναφέρουμε εδώ ως πεδίο παροντικής και μελλοντικής ερευνητικής κατεύθυνσης για εφαρμογές αλληλεπίδρασης με το χρήστη όπου παρατηρείται το συγκεκριμένο πρόβλημα που αναλύσαμε παραπάνω.

3.3.3 Πρόβλημα σύζευξης

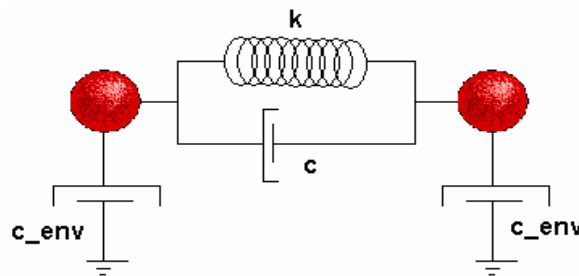
Το πρόβλημα αυτό («virtual coupling») εντοπίζεται στον τρόπο αλληλεπίδρασης της συσκευής με το εικονικό αντικείμενο, ο οποίος πρέπει να είναι κατά το δυνατόν ευσταθής. Συνήθης τεχνική είναι να παρεμβάλλεται ανάμεσα στο εικονικό άκρο της συσκευής και στη δομή ένα ελαστικό μοντέλο σύζευξης (ελατήριο και απόσβεση), έτσι ώστε να μην δίνεται άμεσα δύναμη ως είσοδος στο μοντέλο, αλλά να υπολογίζεται με βάση το μοντέλο αυτό (ελατηρίου-απόσβεσης). Αυτός είναι ένας πιο ευσταθής τρόπος ανταλλαγής δυνάμεων μεταξύ εικονικού περιβάλλοντος και συσκευής, ο οποίος συν τοις άλλοις, παρέχει και τη δυνατότητα ρύθμισης της κλίμακας των δυνάμεων αλληλεπίδρασης μέσω επιλογής της σταθεράς του ελατηρίου.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήσαμε μοντελοποίηση επαφής μόνο με ελατήριο, όπως περιγράφεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο περιγραφής του μοντέλου.

3.3.4 Προβλήματα οφειλόμενα στο μοντέλο παραμόρφωσης

Ένα άλλο πρόβλημα που αντιμετωπίσαμε ήταν η επιλογή των παραμέτρων του μοντέλου και οι επιδράσεις αυτών κατά την προσομοίωση. Έχει γίνει ήδη λόγος σε άλλες ενότητες για την επίδραση της σκληρότητας k του μοντέλου μάζας-ελατηρίων, μεγάλες τιμές της οποίας οδηγούν σε ταλαντώσεις των μαζών της δομής και σε αστάθεια. Το πρόβλημα όμως είναι ότι παράλληλα για το k απαιτούνται μεγάλες σχετικά τιμές ώστε η δομή να επιστρέφει μη αμελητέες τιμές δύναμης αλλά και για να επιτευχθεί πιο ρεαλιστική επαφή (μη διαπερατότητα) μεταξύ δομής και εικονικού χειριστηρίου.

Για να αντιμετωπίσουμε το φαινόμενο αυτό, επιλέγουμε κάποια τιμή k που να ικανοποιεί σχετικά και τις δύο απαιτήσεις μας και ρυθμίζουμε ανάλογα την τιμή c απόσβεσης μεταξύ των μαζών ώστε να αποσβένονται οι περισσότερες ταλαντώσεις της δομής. Επίσης, προσθέτουμε και απόσβεση ως προς το περιβάλλον c_{env} για αυτό το λόγο (όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5).

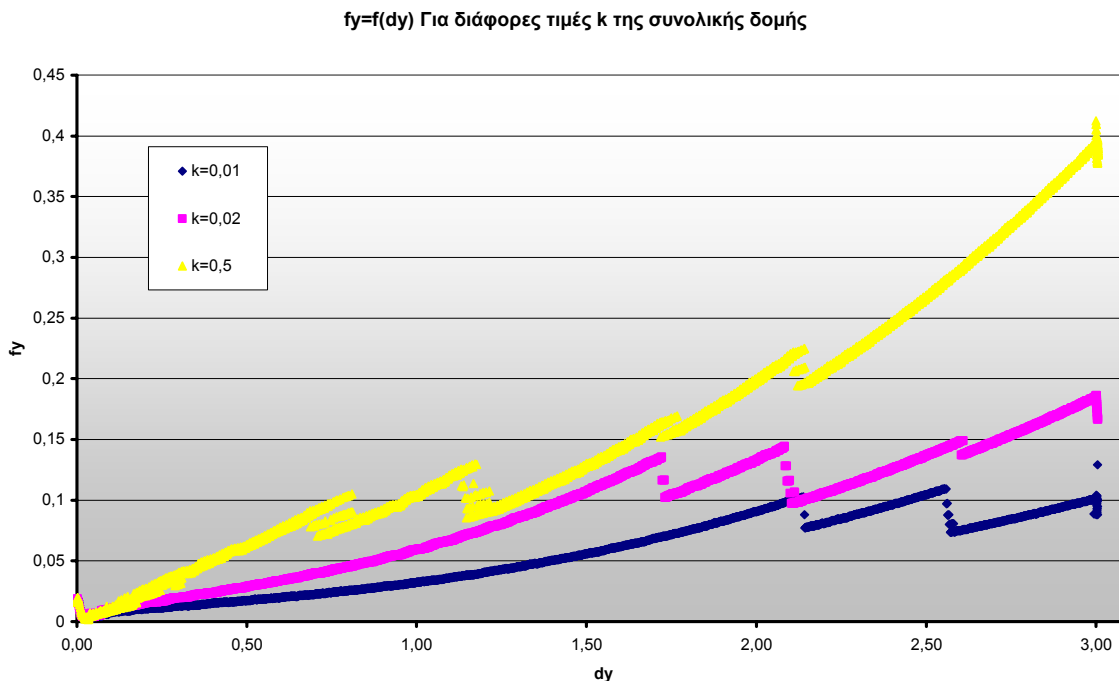


Σχήμα 3.5 Εισαγωγή όρου απόσβεσης ως προς το περιβάλλον στις μάζες του μοντέλου

Για να μελετήσουμε την έξοδο και τις επιδράσεις των παραμέτρων, με τις οποίες πειραματιζόμαστε, ελήφθησαν κάποια σύνολα μετρήσεων (η δύναμη εξόδου F_y συναρτήσει της κάθετης στην επιφάνεια του υλικού μετατόπισης dy –πόσο έχει εισχωρήσει το «χέρι» στη δομή), τις οποίες και αναπαραστήσαμε στα διαγράμματα που ακολουθούν.

Αρχικά, και για να παρατηρήσουμε σαφέστερα πώς επηρεάζει η κάθε παράμετρος την καμπύλη ανεξαρτητως άλλων παραγόντων, ελήφθησαν μετρήσεις με σταθερή ταχύτητα v_y και κίνηση μόνο στον άξονα y (σταθεροποιούμε δηλαδή τις συντεταγμένες x, z).

Η αρχική έξοδος για διάφορες τιμές της παραμέτρου k των ελατηρίων της δομής φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί (Διάγραμμα 1).

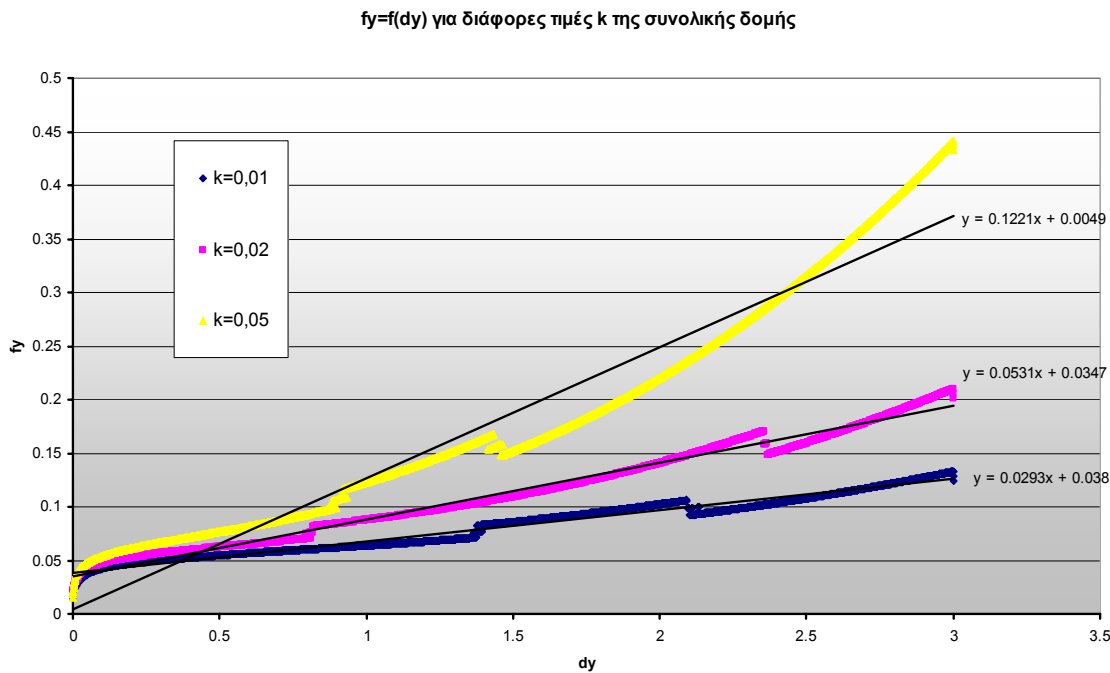


Διάγραμμα 3.1 Μετρήσεις δύναμης εξόδου (ληφθείσες με σταθερή ταχύτητα) όπου παρατηρούνται φαινόμενα ταλαντώσεων

Στη συνέχεια προσθέτουμε και τον παράγοντα c_{env} (απόσβεση ως προς το περιβάλλον) και ξαναπαίρνουμε τις ίδιες μετρήσεις οι οποίες, όπως φαίνονται στο Διάγραμμα 2, δείχνουν ότι η έξοδος είναι πιο ομαλή, και άρα όντως η απόσβεση που προσθέσαμε κατάφερε να μειώσει κάποιες από τις ταλαντώσεις.

Παρ' όλα αυτά, η προσθήκη του όρου απόσβεσης $c_{env} \cdot dv$ στον υπολογισμό της δύναμης κάνει την δύναμη εξαρτώμενη (ακόμα περισσότερο) από την ταχύτητα και αυτό είναι ανεπιθύμητη συνέπεια, διότι θέλουμε να μελετήσουμε ανάλογα με τη δύναμη που επιστρέφει η δομή στο χρήστη την σκληρότητα της δομής, και επειδή ο χρήστης δεν μπορεί να διατηρεί σταθερή ταχύτητα, θα εκλαμβάνει και αλλαγές στην δύναμη που θα οφείλονται στην ταχύτητα του «χεριού».

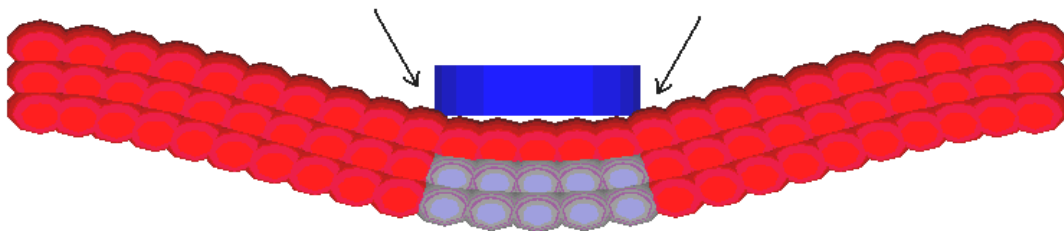
Επιπρόσθετα, μεγάλες τιμές απόσβεσης, κάνουν τη δομή μεν πιο ευσταθή, αλλά της στερούν την ελαστικότητα που απαιτείται για την φυσικότητα της προσομοίωσης. Η προσθήκη μάλιστα του όρου απόσβεσης c_{env} αυξάνει το «ιξώδες» (viscosity) του περιβάλλοντος. Οι μάζες αποκτούν «visco-elastic» συμπεριφορά που προκαλεί φαινόμενα υστέρησης – οι μάζες αργούν να επανέλθουν στην αρχική τους θέση.



Διάγραμμα 3.2 Βελτίωση των μετρήσεων δύναμης εξόδου (ληφθείσες με σταθερή ταχύτητα) με την προσθήκη του όρου απόσβεσης

Παρατηρούμε από τα παραπάνω διαγράμματα ότι ο όρος απόσβεσης από μόνος του, δεν κατάφερε να εξαλείψει όλες τις ταλαντώσεις που εμφανίζονται στην έξοδο. Αυτό ισχύει διότι υπάρχουν κι άλλοι παράγοντες που προκαλούν πρόβλημα και ένας από τους σημαντικότερους είναι η διακριτή φύση της δομής.

Το γεγονός ότι η δομή δεν είναι συνεχής, αλλά αποτελείται από πεπερασμένο αριθμό κόμβων – ο καθένας από τους οποίους αλληλεπιδρά με το «χέρι» αφού ανιχνευτεί η επαφή τους – προκαλεί ασυνέχεια στη δύναμη εξόδου, επειδή η απόφαση αν η κάθε μάζα βρίσκεται ή όχι σε επαφή με το χέρι είναι απόλυτη (δεν θεωρούμε «μερική» επαφή) και άρα αν η σχετική τους θέση αλλάξει λίγο προκαλούνται σε μερικές περιπτώσεις απότομες αλλαγές.

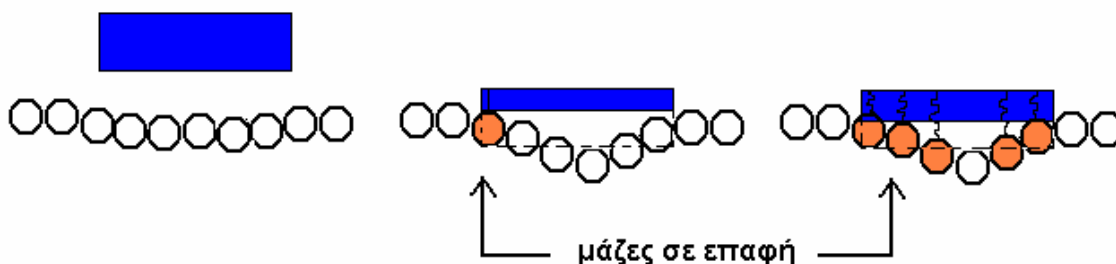


Σχήμα 3.6 Στιγμιότυπο από την προσομοίωση : Επαφή δομής – εικονικού χειριστήριου

Στο Σχήμα 3 για παράδειγμα, φαίνεται ότι κάποιες μάζες βρίσκονται οριακά σε επαφή με το εικονικό χειριστήριο και με την παραμικρή κίνηση του χρήστη ίσως αλλάξει η απόφαση

αν βρίσκονται ή όχι σε επαφή. Επίσης, και οι μάζες κάτω από την επιφάνεια του χεριού ανάλογα με την κίνηση που κάνουν εισέρχονται και εξέρχονται αρκετά ξαφνικά στο πεδίο επαφής του χεριού.

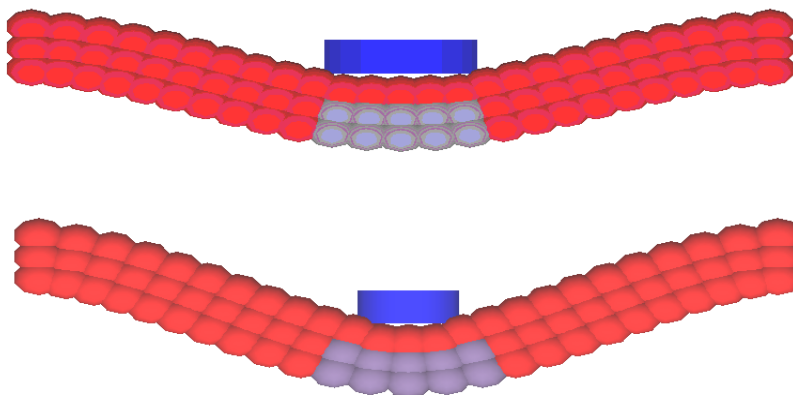
Για να βελτιώσουμε την απόδοση του μοντέλου ως προς το συγκεκριμένο πρόβλημα υιοθετήσαμε εξ' αρχής τη θεώρηση ότι το κάτω επίπεδο του χεριού είναι εικονικό, κι ότι οι κόμβοι κάτω από την επιφάνεια του χεριού βρίσκονται σε επαφή ο καθένας ξεχωριστά ανάλογα με την απόσταση που τους χωρίζει από το πάνω επίπεδο. Επίσης, παίρνουμε το μέσο όρο των δυνάμεων όλων των κόμβων που βρίσκονται σε επαφή κι όχι το άθροισμά τους. Στο Σχήμα 4 φαίνεται η διαφορά στη θεώρηση της επαφής από τον φυσικό-οπτικό τρόπο (σε επαφή βρίσκεται όποια μάζα ακουμπάει στο κάτω επίπεδο) και από τον τρόπο που χρησιμοποιήσαμε εμείς.



Σχήμα 3.7 Θεώρηση επαφής με φυσικό-οπτικό τρόπο και με τον τρόπο που χρησιμοποιήσαμε

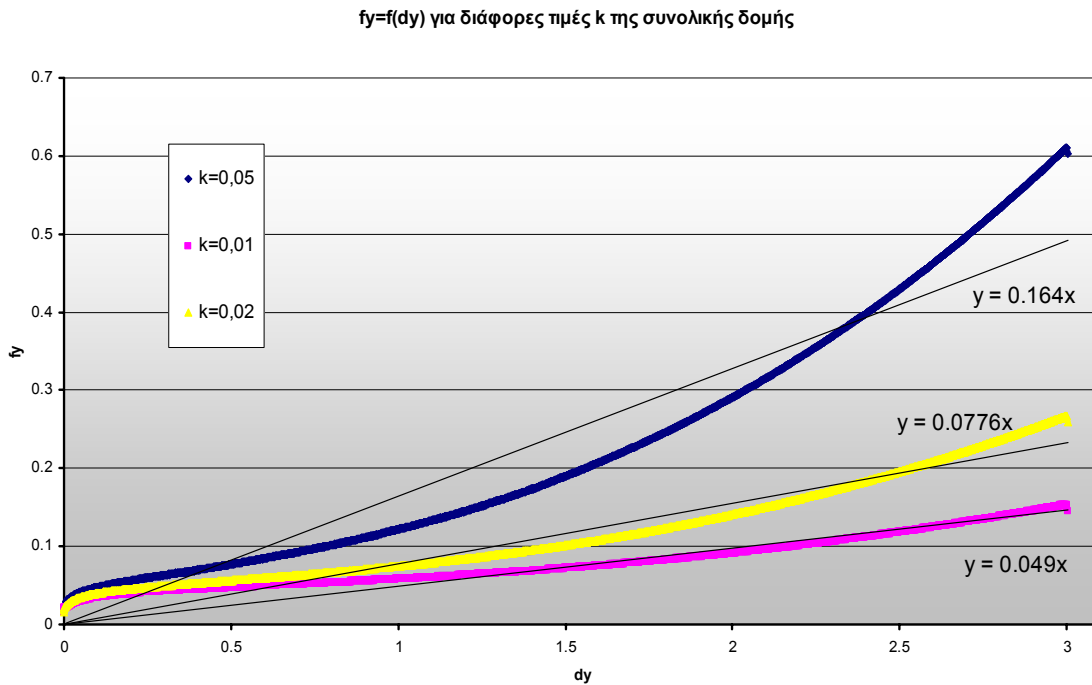
Επιπρόσθετα, για να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα της διακριτότητας της δομής, θα μπορούσαμε να αυξήσουμε την πυκνότητα των κόμβων (είναι προφανές ότι όσο περισσότερους κόμβους χρησιμοποιήσουμε για να καλύψουμε συγκεκριμένο εμβαδόν τόσο πιο πολύ το μοντέλο πλησιάζει στις ιδιότητες τη συνεχή δομή), αλλά στην περίπτωση αυτή αυξάνεται αρκετά η πολυπλοκότητα της υλοποίησης και δημιουργούνται άλλα επιπρόσθετα προβλήματα. Έτσι, χρησιμοποιούμε το μέγιστο αριθμό μαζών που μπορούμε για να καλύψουμε συγκεκριμένο όγκο υλικού ο οποίος παράλληλα εγγυάται και καλή ταχύτητα προσομοίωσης.

Μια περαιτέρω, τροποποίηση που μπορούμε να κάνουμε είναι να αλλάξουμε την ακτίνα του δίσκου του εικονικού χειριστηρίου (όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί).



Σχήμα 3.8 Στιγμιότυπα από την προσομοίωση: Χειριστήρια με διαφορετική επιφάνεια δίσκου

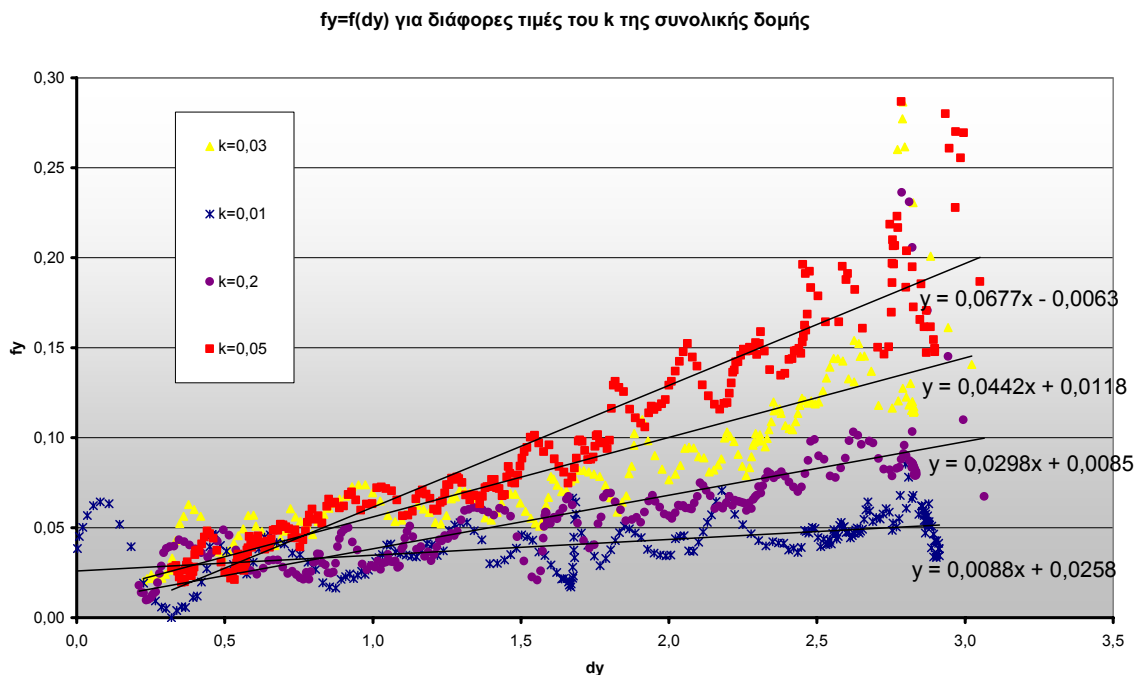
Αν λάβουμε μετρήσεις με προσθήκη $c_{εν}$ (απόσβεσης ως προς το περιβάλλον) και μειώνοντας την ακτίνα του δίσκου του χεριού, το αποτέλεσμα φαίνεται στο Διάγραμμα 3.



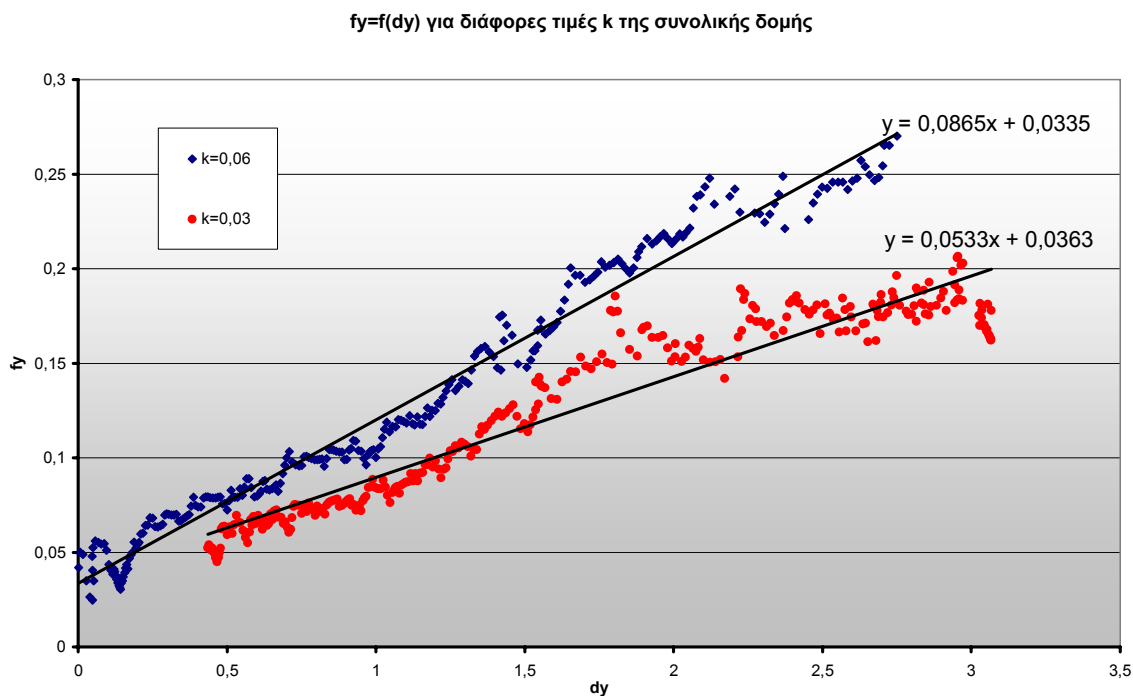
Διάγραμμα 3.3 Ικανοποιητικές μετρήσεις δύναμης εξόδου (ληφθείσες με σταθερή ταχύτητα) μετά από ρύθμιση παραμέτρων

Παρατηρούμε, λοιπόν ότι με τις συγκεκριμένες τιμές παραμέτρων παίρνουμε (τουλάχιστον με σταθερή ταχύτητα) ικανοποιητικό αποτέλεσμα στην έξοδο, δύναμη χωρίς ταλαντώσεις.

Παραθέτουμε στη συνέχεια και τις πραγματικές μετρήσεις που παίρνουμε με το χέρι, δηλαδή όταν ένας άνθρωπος χειρίζεται την κίνηση του εικονικού χειριστηρίου.



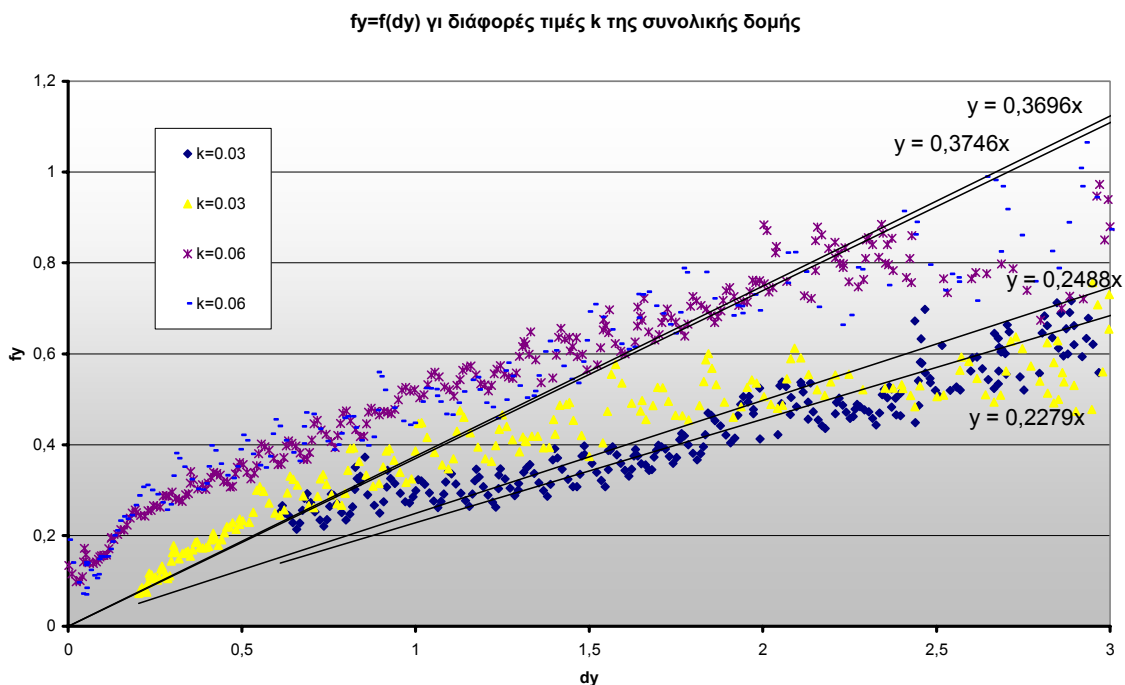
Διάγραμμα 3.4 Μετρήσεις ληφθείσες με το χέρι, με αρχικές ρυθμίσεις



Διάγραμμα 3.5 Μετρήσεις ληφθείσες με το χέρι μετά από τροποποίηση κάποιων παραμέτρων

Παρατηρούμε από τα παραπάνω διαγράμματα ότι παρ' ότου οι ρυθμίσεις που κάναμε μετρίασαν τις ταλαντώσεις (στις μετρήσεις με σταθερή ταχύτητα «έκοψαν» όλες τις ταλαντώσεις) στις μετρήσεις με το χέρι παραμένουν αρκετές ταλαντώσεις, οι οποίες οφείλονται στο ότι ο χρήστης δε μπορεί να διατηρήσει ούτε σταθερή ταχύτητα, ούτε θέση (x,z).

Στο πείραμα που θα σχεδιάσουμε στη συνέχεια, όπου ο χρήστης θα ελέγχει την κίνηση του εικονικού χειριστηρίου, για να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα εν μέρει τουλάχιστον, σταθεροποιούμε τη θέση (x,z) και αφήνουμε το χρήστη να κινείται ελεύθερα μόνο κατά τη διεύθυνση y. Και πάλι, όμως, παραμένει το πρόβλημα των ταλαντώσεων που οφείλονται στην μεταβαλλόμενη ταχύτητα κίνησης και μάλιστα προκύπτει επιπλέον και το πρόβλημα της κλίμακας. Αν παρατηρήσουμε τις μετρήσεις στα διαγράμματα που έχουν προηγηθεί, οι τιμές εξόδου της δύναμης είναι πολύ μικρές για να αισθανθεί κανείς οποιαδήποτε διαφοροποίηση, άρα για να επιτευχθεί ο σκοπός μας (από τη δύναμη που ασκείται να βγάλουμε συμπεράσματα για τη σκληρότητα της δομής) θα πρέπει να εφαρμόσουμε κλίμακα στη δύναμη εξόδου και να τη φέρουμε σε επιθυμητές τιμές. Η κλιμάκωση όμως αυτή παράλληλα εντείνει τις όποιες ταλαντώσεις και ασυνέχειες έχει η δύναμη εξόδου, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στο επόμενο διάγραμμα



Διάγραμμα 3.6 : Μετρήσεις ληφθείσες με το χέρι, η δύναμη εξόδου έχει υποστεί κλιμάκωση³⁰

3.3.5 Φίλτρο

Παρατηρήσαμε ότι ακόμα και μετά τις ρυθμίσεις που κάναμε για να αντιμετωπίσουμε τα προαναφερθέντα προβλήματα, παραμένουν αρκετές ταλαντώσεις που με την κλίμακα που εφαρμόζουμε εντείνονται και δίνουν ως αποτέλεσμα μη ικανοποιητική έξοδο. Για να το λύσουμε το πρόβλημα αυτό θα εφαρμόσουμε φίλτρο στην έξοδο που να την ομαλοποιεί και μετά θα εφαρμόσουμε κλίμακα.

Για εξομάλυνση θα χρησιμοποιήσουμε ένα απλό βαθυπερατό φίλτρο με κέρδος 1, που θα κόβει τις μεγάλες συχνότητες (δηλαδή τις απότομες μεταβολές) στην έξοδο.

$$H(s) = \frac{\omega}{s + \omega}$$

όπου ω η συχνότητα αποκοπής .

Η τελική δύναμη εξόδου δηλαδή θα είναι :

$$F_filtered(s) = F(s) \cdot H(s) = F(s) \cdot \frac{\omega}{s + \omega}$$

και στο πεδίο του διακριτού χρόνου :

$$f_filtered(n) = f(n) * h(n) = \sum_{k=0}^{\infty} f(k) \cdot h(n-k)$$

Άρα θα υλοποιήσουμε ολοκλήρωση στο διακριτό χρόνο και θα υπολογίσουμε τη δύναμη με τον τύπο :

$$f_filtered(n) = \sum_{k=0}^{\infty} f(k) \cdot e^{-\omega(n-k)}$$

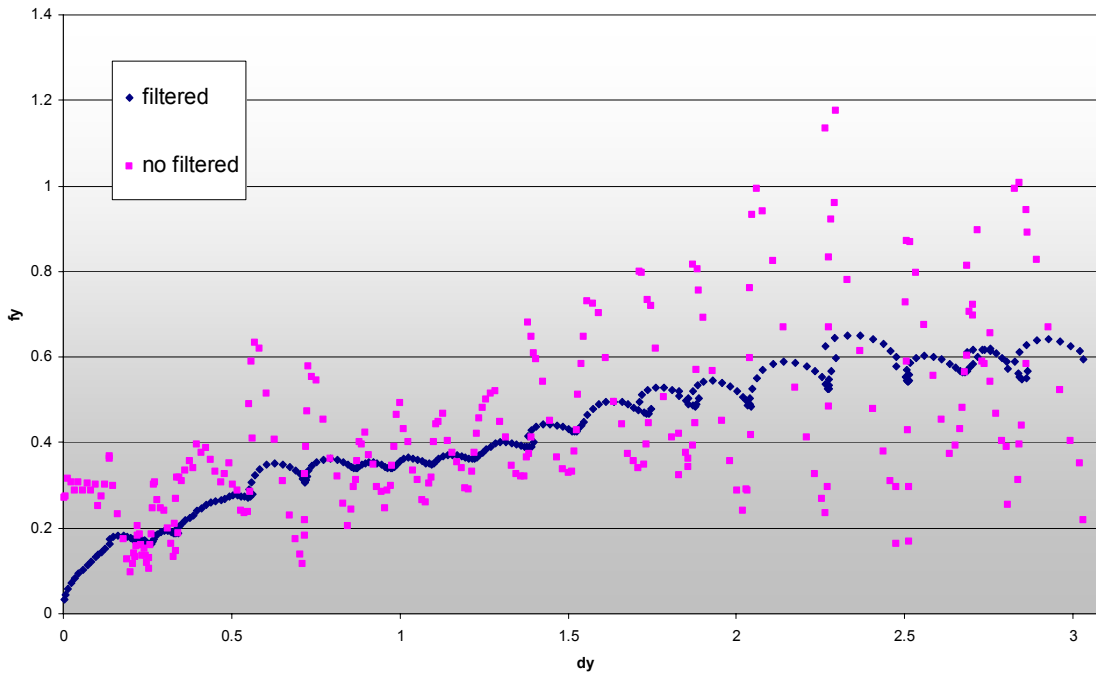
Έτσι, επιλέγουμε το μέγεθος του παραθύρου που θα εφαρμοστεί το φίλτρο έστω m και τη συχνότητα αποκοπής ω και κατασκευάζουμε τις m τιμές της συνάρτησης $h(n)$:

για $i=0 \dots m$ $h[i] = e^{-\omega i}$

ύστερα, σε κάθε βήμα Δt , υλοποιούμε τη συνέλιξη ως εξής :

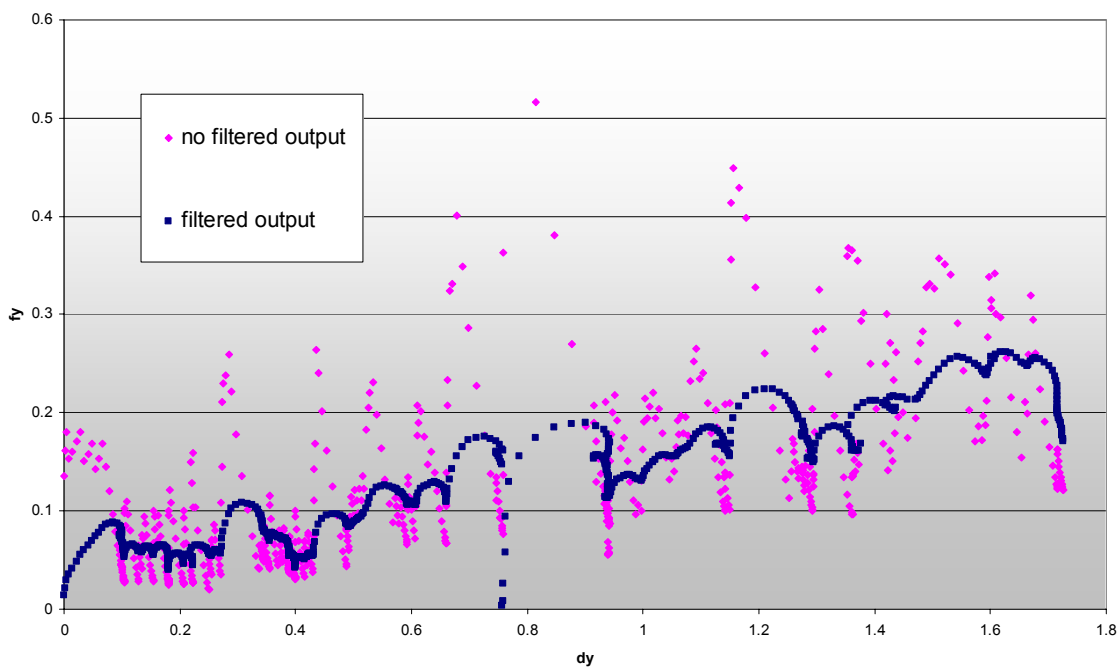
- ...υπολογισμοί που μας δίνουν την δύναμη εξόδου $f_{out} \dots$
- μετρητής χρόνου $n = n + 1$, $n \leq m$ μετά μηδενίζεται και ξαναρχίζει
- σώζουμε σε πίνακα $fsave[n] = f_{out}$ επειδή η συνέλιξη χρειάζεται και τις προηγούμενες τιμές.
- φιλτράρισμα : $f_filtered(n) = \sum_{k=0}^n fsave[k] \cdot h[n-k]$
- κλίμακα : $f_filtered(n) = f_filtered(n) * x$ (όπου x η κλίμακα)
- τελικά : $f_{out}(n) = f_filtered(n)$

Παραθέτουμε ένα παράδειγμα εξόδου όπου μπορούμε να δούμε ότι τα αποτελέσματα της χρήσης φίλτρου (και μετά κλίμακας) ήταν αρκετά ικανοποιητικά.



Διάγραμμα 3.7 Μετρήσεις ληφθείσες με το χέρι, παράδειγμα για να φανεί η δράση του φίλτρου

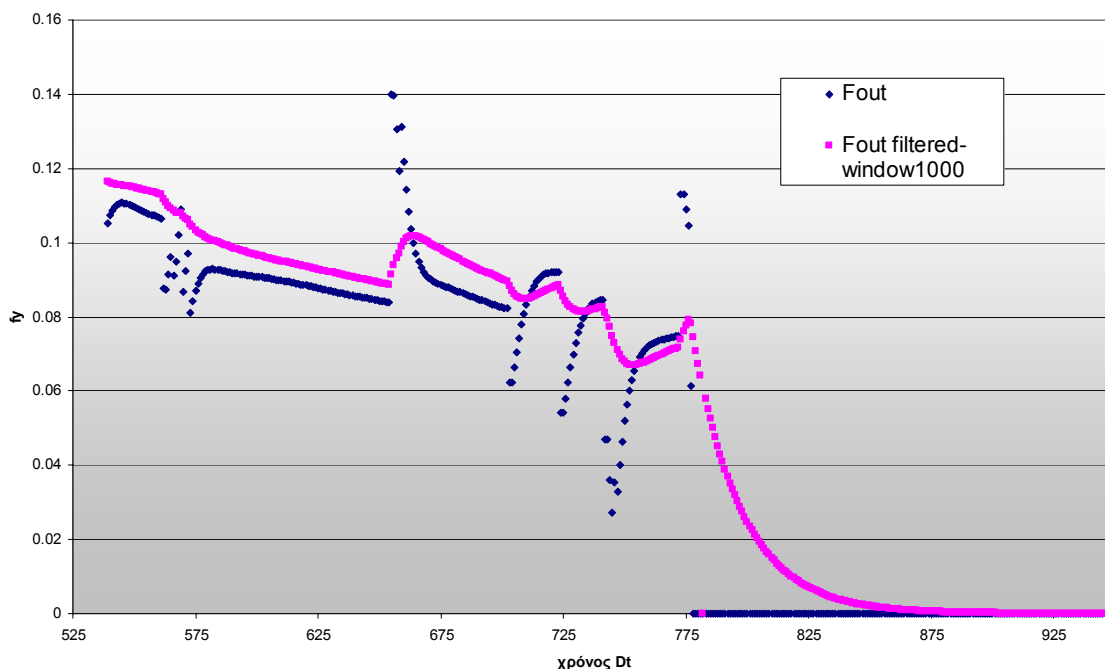
Η χρήση φίλτρου προκαλεί όμως δύο προβλήματα. Το πρώτο από αυτά είναι η ασυνέχεια που προκαλείται κατά την αλλαγή του παραθύρου, όπως φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί :



Διάγραμμα 3.8 Μετρήσεις ληφθείσες με το χέρι, παράδειγμα για να φανεί η ασυνέχεια του παραθύρου

Το πρόβλημα όμως αυτό λύνεται εύκολα με το να επιβάλλουμε εμείς τη συνέχεια κατά την αλλαγή παραθύρου, και αυτό γίνεται με το να αποθηκεύουμε την τελευταία τιμή του προηγούμενου παραθύρου και να τη συνυπολογίζουμε με την αρχική τιμή του επόμενου.

Το δεύτερο πρόβλημα που προκαλεί το φίλτρο είναι η καθυστερημένη ανάδραση δύναμης προς το χρήστη. Αν δηλαδή συμβεί μία απότομη μεταβολή που πρέπει να συμβεί, όπως π.χ όταν ο χρήστης καθώς ασκεί δύναμη στη δομή σηκώνει ξαφνικά το χέρι του (η δύναμη πρέπει να μηδενιστεί απότομα) η φιλτραρισμένη έξοδος θα αργήσει να αντιληφθεί την αλλαγή –χαρακτηριστικά παρατίθεται το Διάγραμμα 9. Το πρόβλημα αυτό εντείνεται μάλιστα όσο μεγαλύτερο είναι το παράθυρο.

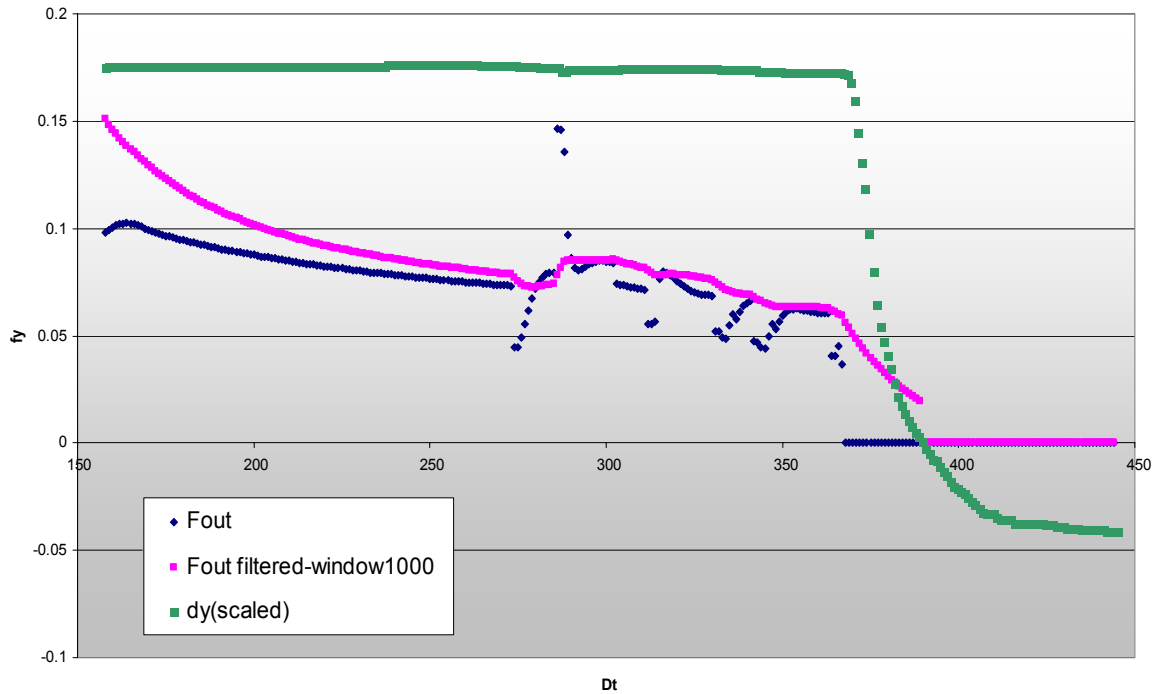


Διάγραμμα 3.9 : Μετρήσεις δύναμης εξόδου ως προς χρόνο, παράδειγμα απότομου μηδενισμού της δύναμης επαφής με αντίστοιχη καθυστέρηση του φίλτρου

Για να λύσουμε το συγκεκριμένο πρόβλημα επιλέγουμε κατάλληλες τιμές συχνότητας αποκοπής ω και μεγέθους παραθύρου ώστε να ομαλοποιείται αρκετά η έξοδος, αλλά παράλληλα να διατηρεί κάποια χαρακτηριστικά της (μπορούμε παραδείγματος χάριν να επιλέξουμε μικρή συχνότητα αποκοπής, αλλά και μικρό παράθυρο φίλτρου).

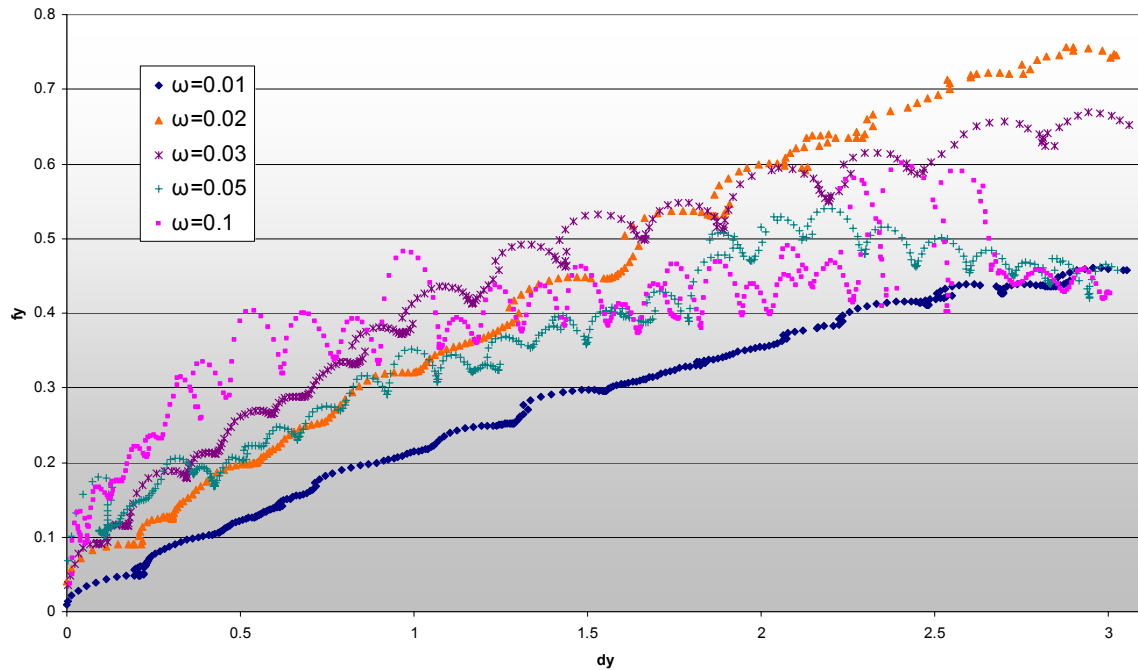
Επίσης, ειδικά για την περίπτωση «εξόδου» του «χεριού» από το αντικείμενο, επειδή μας ενδιαφέρει να μην διατηρείται δύναμη όταν το «χέρι» είναι έξω από το υλικό, για να φιλτράρουμε την f ελέγχουμε αν το «χέρι» βρίσκεται μέσα στο υλικό και τότε $f_{out}=f_{filtered}$, αλλιώς $f_{out}=0$. Η τροποποίηση αυτή βελτιώνει το αποτέλεσμα διότι φροντίζει τον μηδενισμό της δύναμης εξόδου όταν το χέρι είναι πάνω από την επιφάνεια του υλικού

Τα προαναφερθέντα παρουσιάζονται στο διάγραμμα που ακολουθεί (Διάγραμμα 3.10).



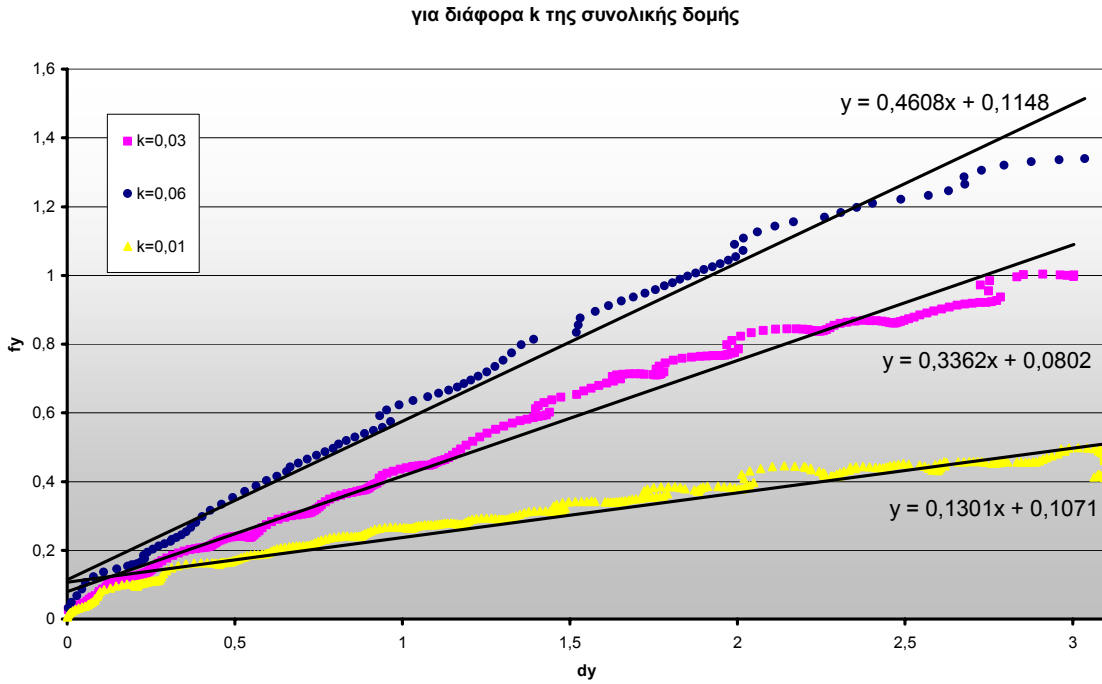
Διάγραμμα 3.10 Μετρήσεις δύναμης εξόδου ως προς χρόνο, παράδειγμα απότομου μηδενισμού της δύναμης επαφής και τροποποίηση του φίλτρου να ακολουθεί

Στη συνέχεια, διαλέγουμε μία συχνότητα αποκοπής που να ομαλοποιεί αρκετά την έξοδο, αλλά και να μην προκαλεί μεγάλη καθυστέρηση στην έξοδο (π.χ. όπως φαίνεται από το διάγραμμα $\omega=0,01$).



Διάγραμμα 3.11 Παράδειγμα μετρήσεων για διάφορες συχνότητες αποκοπής ω

και τελικά μετά την προσθήκη φίλτρου τα αποτελέσματα των μετρήσεων που παίρνουμε με το χέρι φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί, και είναι σαφώς καλύτερα από αυτά χωρίς φίλτρο.



Διάγραμμα 3.12 Μετρήσεις (ληφθείσες με το χέρι) μετά από την προσθήκη φίλτρου, ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

Πειραματική αξιολόγηση – Απτική αντίληψη

Έως αυτό το σημείο μελετήσαμε τα επιμέρους βήματα για τη σχεδίαση και υλοποίηση ενός συστήματος ανάδρασης δύναμης για την προσομοίωση παραμόρφωσης μαλακών ιστών. Χρησιμοποιήσαμε την απτική διάταξη Phantom Omni (SensAble Technologies) και για την εικονική δομή το μοντέλο δικτύματος μάζας-ελατηρίου. Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε κάποια στοιχεία ψυχοφυσικής που δίνουν πληροφορίες για την δυνατότητα απτικής αντίληψης του ανθρώπου στον πραγματικό κόσμο και θα τα χρησιμοποιήσουμε για να αξιολογήσουμε την επίδοση του συστήματος που υλοποιήσαμε ως προς την απτική αντίληψη της σκληρότητας.

4.1 Στοιχεία ψυχοφυσικής – απτική αντίληψη

Ως επαφή (touch) μπορούμε να ορίσουμε το απτικό αίσθημα που προκαλείται όταν το δέρμα υφίσταται μηχανικό, θερμικό, χημικό ή ηλεκτρικό ερέθισμα (Cholewiak and Collins, 1991). Γενικά, δεν υπάρχει κάποιος γνωστός κανόνας που να αφορά την απτική ικανότητα του ανθρώπου (όσον αφορά παραδείγματος χάριν τα επίπεδα δυνάμεων που γίνονται αντιληπτά, την χωρική διακριτική ικανότητα κ.τ.λ), παρά μόνο ένας αριθμός δοκιμών με μηχανήματα και υπολογιστές που παράγουν πειραματικά αποτελέσματα επί αυτών των ιδιοτήτων της αφής, τα οποία παραμένουν ανεπίσημα λόγω του ότι λαμβάνουν χώρα στα πλαίσια μικρών ομάδων, και άρα δεν είναι απόλυτα χαρακτηριστικά (Burdea, 1996).

Παρ' όλες αυτές τις δυσκολίες η μελέτη των απτικών ιδιοτήτων αποκτά μεγάλο ενδιαφέρον αν σκεφτούμε ότι οι πληροφορίες αυτές εφαρμόζονται κατά τη σχεδίαση μηχανών που προσομοιώνουν αλληλεπίδραση (επαφή) ανθρώπου με εικονικό περιβάλλον και άρα αποτελούν απαραίτητη γνώση για την ανάπτυξη εφαρμογών εικονικής πραγματικότητας που απαιτούν ρεαλισμό στην αλληλεπίδραση με το χρήστη. Μάλιστα, το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας έχει επικεντρωθεί στη μελέτη του ανθρώπινου χεριού (των απτικών ιδιοτήτων του) και στην ανάδραση δύναμης προς αυτό, διότι έχει τη μεγαλύτερη πυκνότητα αισθητήρων αφής από όλα τα μέρη του ανθρώπινου σώματος και γι' αυτό το λόγο και τα περισσότερα υπάρχοντα συστήματα ανάδρασης δύναμης είναι σχεδιασμένα να αλληλεπιδρούν με αυτό. Έτσι, για το βέλτιστο και πιο ρεαλιστικό σχεδιασμό των συστημάτων αυτών, προβάλλεται η ανάγκη μελέτης στοιχείων ψυχοφυσικής του ανθρώπινου χεριού (Tzafestas C. ,1998).

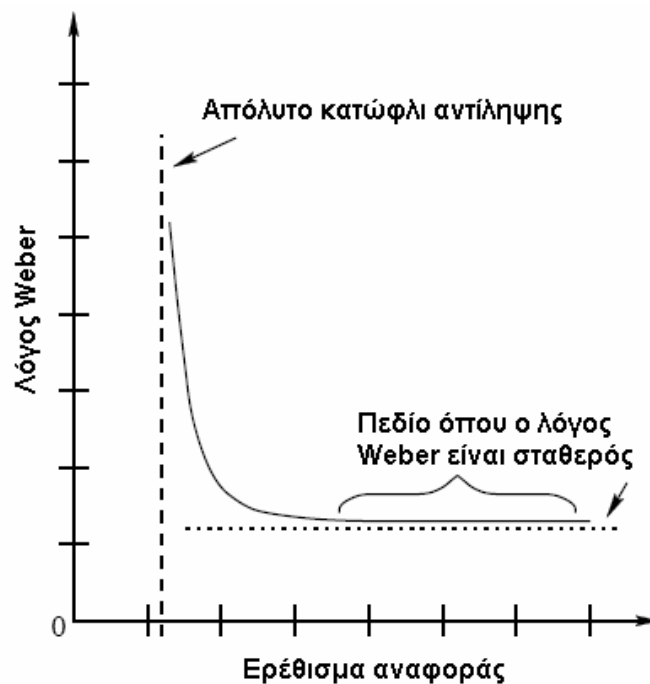
Οι περισσότερες μελέτες τέτοιου είδους, επικεντρώνονται στην αναζήτηση της ελάχιστης διαφοροποίησης ενός μεγέθους την οποία ο άνθρωπος μπορεί να αντιληφθεί μέσω της αφής. Τα περισσότερα πειράματα γίνονται με σύγκριση ενός βασικού μεγέθους (μέγεθος

αναφοράς) και αρκετών μεταβολών αυτού. Ο γερμανός φυσιολόγος Weber, ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί πατέρας της συστηματικής μελέτης της ευαισθησίας του ανθρώπινου χεριού, ανακάλυψε μετά από πειράματα ότι η δυνατότητα διάκρισης ανάμεσα σε ένα μέγεθος-ερέθισμα αναφοράς και ένα άλλο, είναι συνάρτηση του μεγέθους αναφοράς. Μάλιστα ο λόγος της ελάχιστης αντιλαμβανόμενης διαφοράς τιμής προς την τιμή αναφοράς είναι σταθερός και ονομάζεται λόγος του Weber (Weber fraction). Ο νόμος του Weber μπορεί να γραφεί :

$$\frac{\Delta f}{f_{ref}} = W$$

όπου W ο λόγος Weber, f_{ref} η τιμή αναφοράς του μετρούμενου μεγέθους και Δf η ελάχιστη μεταβολή της τιμής του μεγέθους που γίνεται αντιληπτή σε σύγκριση με την τιμή αναφοράς f_{ref} . Η τιμή Δf ονομάζεται και JND (just noticeable difference)

Ωστόσο, η τιμή του λόγου Weber είναι σταθερή μόνο για ένα εύρος τιμών του ερεθίσματος αναφοράς. Συνήθως, για πολύ μικρές τιμές ερεθίσματος αναφοράς (και όσο πλησιάζουν την περιοχή του απολύτου ορίου αντιληπτότητας του μεγέθους) η τιμή του λόγου Weber αυξάνεται (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Η επιρροή του ερεθίσματος αναφοράς στο λόγο Weber (Tzafestas C.,1998)

Έχουν γίνει αρκετά πειράματα για τη μέτρηση της JND, αλλά όπως προαναφέρθηκε έχουν γίνει σε μικρούς κύκλους και με διαφορετικές μεθόδους, έτσι που η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους είναι δύσκολη. Τα αποτελέσματά τους έχουν περισσότερο εμπειρική ισχύ, θα αναφέρουμε όμως κάποια από αυτά γιατί βοηθούν στην εξαγωγή κάποιων βασικών συμπερασμάτων.

Συγκεκριμένα, η ελάχιστη αντιλαμβανόμενη διαφορά για τη δύναμη εκτιμήθηκε από ορισμένες ομάδες ~7% της δύναμης αναφοράς (Pang, Tan, Durlach, 1991) για δυνάμεις αναφοράς της τάξης 2.5-10N. Η JND για την ελαστικότητα (ή σκληρότητα) εκτιμήθηκε ~22% (Tan, Durlach, Beauregard, Srinivasan, 1995) συνοδευόμενη όμως από ορισμένες παρατηρήσεις (αποδείχθηκε εμπειρικά ότι οι άνθρωποι τείνουν να χρησιμοποιούν το ολικό έργο που καταναλίσκουν και την τελική δύναμη που αισθάνονται κατά την παραμόρφωση, ως στοιχεία αντίληψης της σκληρότητας). Για την απόσβεση και τη μάζα έχουν γίνει επίσης μετρήσεις, που δίνουν JND 13.6% για απόσβεση αναφοράς 120 Ns/m και 21% για μάζα αναφοράς 12kg (Beaugard, Srinivasan, Durlach, 1995). Μάλιστα, στις σημειώσεις της παραπάνω ομάδας, αναφέρονται και τα αποτελέσματα μίας άλλης ομάδας (Jones, 1989, Jones&Hunter 1990,1992,1993) οι οποίοι εκτίμησαν για δύναμη, θέση και μετακίνηση JND ~7%-8% , για σκληρότητα 23% και απόσβεση 34%.

Για τα παραπάνω αποτελέσματα, μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής:

α) Παρ' ότι έχουν εξαχθεί με διαφορετικές μεθόδους και υπό διαφορετικές συνθήκες (πράγμα που καθιστά δύσκολη οποιαδήποτε σύγκριση) κάποιες τιμές είναι παραπλήσιες και άρα αλληλοεπιβεβαιώνονται ως προς την ισχύ. Επίσης, μπορεί κανείς να εξάγει κάποια κοινά συμπεράσματα όπως το επόμενο.

β) Παρατηρούμε ότι γενικά η απόσβεση έχει πολύ μεγαλύτερη JND από τη σκληρότητα, και η σκληρότητα πολύ μεγαλύτερη JND από τη δύναμη. Περί αυτού του θέματος έχει εκφραστεί η υπόθεση ότι η διακριτική ικανότητα του ανθρώπου αυξάνεται (χειροτερεύει) όταν υπεισέρχονται άλλα μεγέθη ως παράμετροι στην κρίση (π.χ. για την αντίληψη της απόσβεσης παίζει ρόλο η αντίληπτότητα της δύναμης και της ταχύτητας παράλληλα).

γ) Μάλιστα, μίας και μας ενδιαφέρει η αντίληψη της σκληρότητας συγκεκριμένα, πρέπει να σημειώσουμε ότι αναφερόμαστε σε περιπτώσεις παραμορφώσιμων αντικειμένων. Για μη παραμορφώσιμα υλικά., απλή απτική πληροφορία μπορεί να δώσει συμπέρασμα για τη σκληρότητα. Για τα παραμορφώσιμα, όμως, η πληροφορία αυτή απαιτεί κίνηση (Tan, Durlach, Beauregard, Srinivasan, 1995).

δ) Λαμβάνοντας υπ' όψιν το παραπάνω σχόλιο, εύκολα υποθέτουμε ότι η αντίληπτότητα της σκληρότητας επηρεάζεται πολύ κι από άλλα μεγέθη, όπως η δύναμη, η θέση κ.τ.λ. ή από συνδυασμό αυτών, όπως το έργο. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε πειραματικά ότι οι άνθρωποι τείνουν να χρησιμοποιούν την αίσθηση του καταναλισκόμενου έργου και της τελικής (μέγιστης) δύναμης κατά την παραμόρφωση για να κρίνουν τη σκληρότητα ενός παραμορφώσιμου αντικειμένου(Tan, Durlach, Beauregard, Srinivasan, 1995).

Για τις πειραματικές διεργασίες διάκρισης μεταξύ ερεθισμάτων, χρησιμοποιούνται συνήθως δύο μέθοδοι (Tzafestas C., 1998): αυτή της εξαναγκασμένης επιλογής (forced-choice procedure) και αυτή της διαδικασίας ταιριάσματος (matching procedure).

Σύμφωνα με την πρώτη μέθοδο παρουσιάζονται διαδοχικά, ή την ίδια χρονική στιγμή, δύο ερεθίσματα, το ένα είναι το ερέθισμα αναφοράς και το άλλο ισούται με το ερέθισμα αναφοράς συν κάποια μεταβολή. Το υποκείμενο πρέπει να επιλέξει αναγκαστικά μεταξύ των δύο (π.χ. ποιο έχει τη μεγαλύτερη ένταση). Τέλος, τα ποσοστά επιτυχίας για κάθε μεταβολή (hit ratio) συγκεντρώνονται σε έναν πίνακα απ' όπου μπορεί κανείς να εκτιμήσει την ελάχιστη μεταβολή που είναι αντιληπτή για τον άνθρωπο. Συνήθως θεωρείται το 75% ως ελάχιστο ποσοστό επιτυχίας αντιληπτής μεταβολής.

Σύμφωνα με τη δεύτερη μέθοδο, το εκάστοτε υποκείμενο ελέγχει από μόνο του την ένταση ενός μεγέθους σύγκρισης και προσπαθεί να το φέρει στο ίδιο επίπεδο έντασης με το μέγεθος αναφοράς. Τα δύο ερεθίσματα παρουσιάζονται συνήθως ταυτόχρονα, αλλά μπορούν και διαδοχικά. Η κατανομή των ερεθισμάτων σύγκρισης γύρω από το ερέθισμα αναφοράς είναι συνήθως κανονική. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο μέτρο της διασποράς ως μέτρο JND.

4.2 Πειραματική αξιολόγηση – απτική αντίληψη σκληρότητας εικονικής δομής

4.2.1 Πειραματικό πρωτόκολλο - Αποτελέσματα

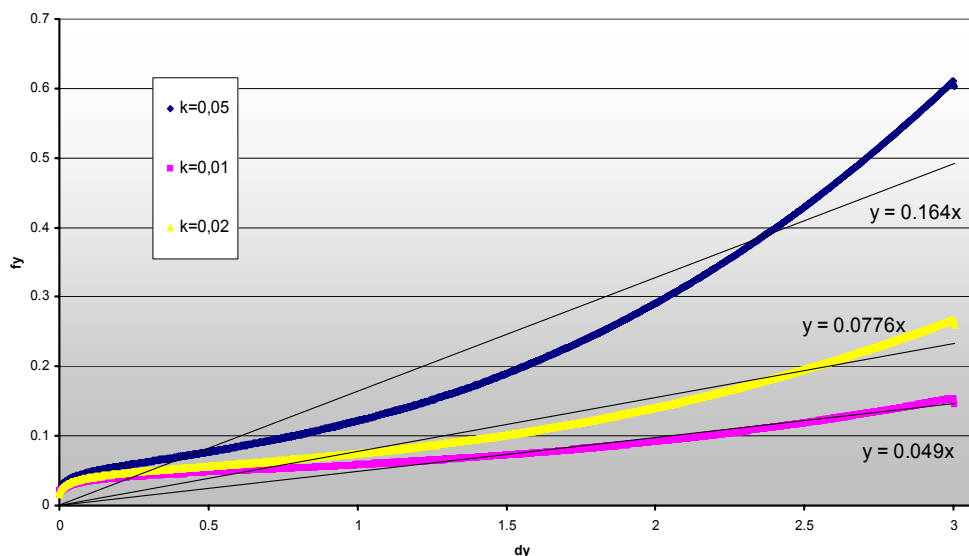
Για την αξιολόγηση του απτικού συστήματος σχεδιάσαμε και εκτελέσαμε ένα πείραμα για τη μέτρηση της JND (ελάχιστης αντιληπτής διαφοράς) της σκληρότητας της εικονικής δομής μέσω της συγκεκριμένης διάταξης (PHANTOM Omni).

Ακολουθήθηκε η πρώτη μέθοδος, της εξαναγκασμένης επιλογής μεταξύ δύο διαφορετικών διαδοχικών ερεθισμάτων (αναφοράς και σύγκρισης) ως πιο εύκολα υλοποιήσιμη και επειδή η υπολογιστική ισχύς των μηχανημάτων με τα οποία δουλέψαμε δεν επέτρεπε ταυτόχρονη προβολή και αλληλεπίδραση με δύο δομές.

Πιο συγκεκριμένα, ύστερα από κάποιες πρόχειρες πειραματικές παρατηρήσεις και βάσει των μέχρι τώρα πειραματικών αποτελεσμάτων που συζητήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, επιλέχθηκε ένα σύνολο μεταβολών Δk μέσα στο οποίο εκτιμήσαμε ότι μπορεί να βρίσκεται η JND. Η σκληρότητα αναφοράς είναι $k_{base}=0,025Nt/cm$ και οι μεταβολές $\Delta k=\{10\%,15\%,20\%,30\%,40\%,50\%\}$ (εφόσον η JND για την πραγματική αντίληψη της σκληρότητας είναι $\sim 22\%$ όπως αναφέρεται στην προηγούμενη ενότητα).

Ο χρήστης έχει ελευθερία κινήσεων x,y στο περιβάλλον της δομής (το επίπεδο z περιορίστηκε για να μην ξεφεύγει εκτός των ορίων της δομής) και γενικά η κίνηση που προτείνεται για βέλτιστη δυνατότητα αντίληψης είναι η κίνηση του εικονικού χειριστηρίου κατά τον y άξονα περίπου στο κέντρο της δομής (όπου η παραμόρφωση είναι μέγιστη) και μέχρι να επιτευχθεί μέγιστη παραμόρφωση. Ο λόγος φαίνεται στο διάγραμμα 3.3 της ενότητας 3.3 στο οποίο φαίνεται η σχέση δύναμης εξόδου της δομής και παραμόρφωσης Δy και το οποίο παραθέτουμε και εδώ για ευκολία.

fy=f(dy) για διάφορες τιμές k της συνολικής δομής



Διάγραμμα 4.1 Μορφή δύναμης εξόδου συναρτήσει της παραμόρφωσης

Από το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρούμε ότι η ελαστικότητα της συνολικής δομής (το K δηλαδή, αν θέλαμε να γράψουμε μία σχέση $F_{ολικό_εξόδο} = K \cdot dy$) δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από την παραμόρφωση ($K = K(dy)$). Παρατηρούμε επιπλέον, ότι ναι μεν προσεγγιστικά η σχέση διαφορετικών τιμών της σταθεράς ελατηρίου των ελατηρίων όλης της δομής αποτυπώνεται και στη σχέση των ολικών K (π.χ. από το διάγραμμα, όταν η σταθερά όλων των ελατηρίων της δομής πολλαπλασιαστεί με κάποιον αριθμό, οι καμπύλες εξόδου προσεγγίζονται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων με ευθείες, και οι κλίσεις των δίνουν

ένα προσεγγιστικό σταθερό K^* που διατηρεί προσεγγιστικά τη σχέση: $\frac{0.05}{0.02} = 2.5 \sim$

$\frac{0.164}{0.0776} = 2.1$ και $\frac{0.02}{0.01} = 2 \sim \frac{0.0776}{0.049} = 1.6$), αλλά για μικρές τιμές παραμόρφωσης οι καμπύλες

για διάφορες τιμές σκληρότητας των ελατηρίων βρίσκονται πολύ κοντά.

Μία ολοκληρωμένη συνεδρία του πειράματος αποτελείται από 6 δοκιμές ζευγαριών δομών με σκληρότητες $[k_{base}, k_{base} \cdot (1 + \Delta k)]$. Η σειρά με την οποία τα ζευγάρια θα εμφανιστούν είναι τυχαία. Σε κάθε δοκιμή εμφανίζονται με τυχαία σειρά η δομή αναφοράς και η δομή σύγκρισης και ο χρήστης έχει δικαίωμα να δοκιμάσει (πιέζοντας) την κάθε δομή μέχρι 5 φορές και τελικά να αποφανθεί ποια από τις δύο έχει μεγαλύτερη σκληρότητα (αναγκαστικά 1 ή 2). Οι σωστές απαντήσεις του χρήστη για κάθε ζευγάρι βαθμολογούνται με «1», ενώ οι λάθος με «0». Έτσι, στο τέλος της συνεδρίας ως έξοδο λαμβάνουμε έναν πίνακα των Δk όπου σημειώνεται ποια από αυτά διάκρινε ο χρήστης και ποια όχι.

Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα πολλών επαναλήψεων της συνεδρίας για κάθε χρήστη και στο τέλος δίνει ως έξοδο έναν τελικό πίνακα με στοιχεία πόσες φορές διέκρινε σωστά ανάμεσα στο κάθε Δk και τη σκληρότητα αναφοράς (δηλαδή, ένα προσωπικό ποσοστό επιτυχίας). Συμμετείχαν 14 άτομα και κάθε ένα από αυτά πήρε μέρος σε τουλάχιστον τρεις συνεδρίες. Γενικά για τα περισσότερα άτομα περιοριστήκαμε στις 3 συνεχόμενες συνεδρίες (συνολική χρονική διάρκεια περίπου 10') επειδή παρατηρήθηκε ότι μετά την επανάληψη το χέρι των περισσότερων κουραζόταν και δυσκολεύονταν να διακρίνουν καθαρά περαιτέρω.

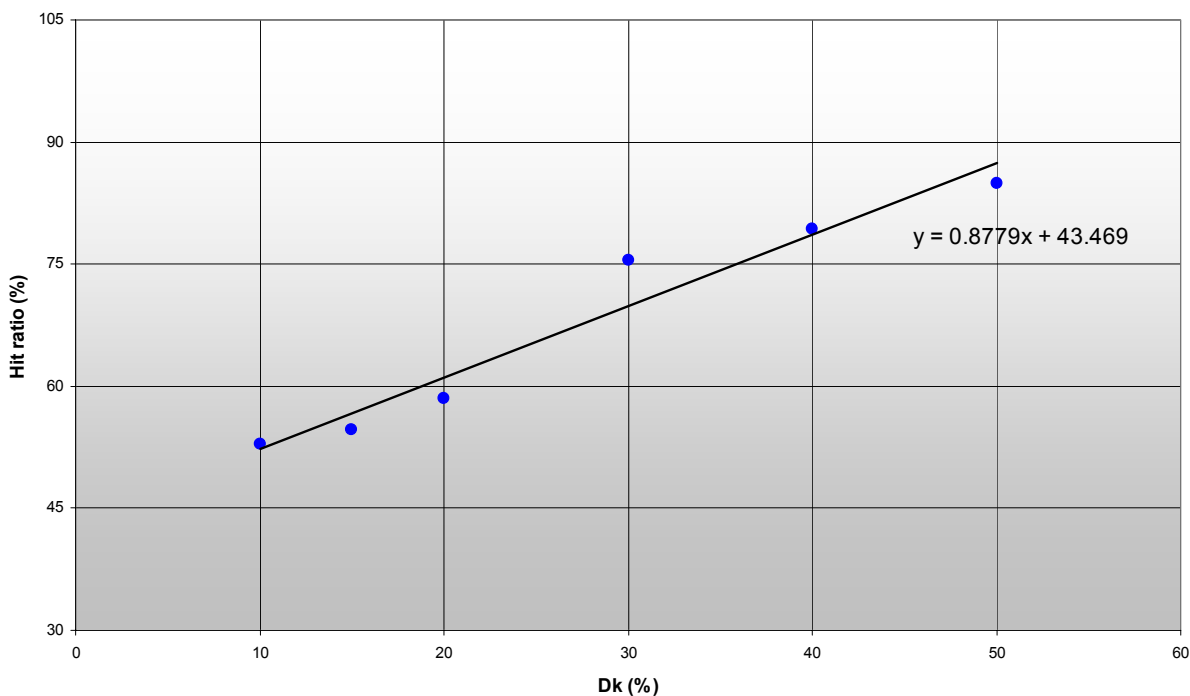
Τα αποτελέσματα του πειράματος φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί :

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 Συνολικά αποτελέσματα του πειράματος

Dk	Επιτυχημένες απαντήσεις	Ποσοστό επιτυχίας %
	σύνολο δοκιμών: 53	
10%	28	52.83019
15%	29	54.71698
20%	31	58.49057
30%	40	75.47170
40%	42	79.24528
50%	45	84.90566

και από αυτά προκύπτει το διάγραμμα 2. Από την ευθεία των ελαχίστων τετραγώνων και το σημείο όπου αυτή τέμνει τη γραμμή του hit ratio=75%, μπορούμε να εκτιμήσουμε την JND για τη σκληρότητα μέσω του συγκεκριμένου συστήματος ως εξής:

$$75 = 0,8779 \cdot \text{JND} + 43,469 \Rightarrow \boxed{\text{JND} \cong 35,92 \%}$$



Διάγραμμα 4.2 Εκτίμηση της JND για τη σκληρότητα με την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων

4.2.2 Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα

Από την προηγούμενη ενότητα είδαμε ότι η JND για τη σκληρότητα, με μέσο αντίληψης το χέρι του ανθρώπου, είναι περίπου 22%. Εμείς κάναμε το πείραμα μέτρησης της JND για τη σκληρότητα, αλλά μεταξύ ανθρώπου και (εικονικής) δομής παρεμβάλλεται αυτή τη φορά ολόκληρο σύστημα. Οπότε είναι λογικό να δυσχεραίνεται λίγο η ικανότητα αντίληψης του ανθρώπου λόγω της παρεμβολής ατελειών του συστήματος. Αυτό είναι εξάλλου που θέλουμε να αξιολογήσουμε στο ολικό σύστημα, τη λειτουργία του οποίου σχεδιάσαμε, πόσο ρεαλιστική αλληλεπίδραση άνθρωπου-εικονικού περιβάλλοντος παρέχει.

Η τιμή JND για τη σκληρότητα που βρήκαμε (~36%) είναι αρκετά κοντά στην εκτιμώμενη για πραγματική αλληλεπίδραση (22%), αν σκεφτούμε ότι μέρος της δυσχέρειας αντίληψης της σκληρότητας που προκύπτει οφείλεται σε συγκεκριμένους παράγοντες του μοντέλου. Ειδικότερα, η μοντελοποίηση της δομής – όπως περιγράφεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο – περιέχει και απόσβεση μεταξύ των μαζών και μάλιστα τον συντελεστή απόσβεσης δε μπορούμε να τον ελαττώσουμε κάτω από κάποιο όριο γιατί συνεισφέρει στην ευστάθεια της δομής (αποσβένει τις ταλαντώσεις που δημιουργούν οι μεγάλες τιμές ελατηρίων). Έτσι, η αίσθηση αντίδρασης που νοιώθει ο χρήστης όταν συμπιέζει τη δομή γίνεται συνάρτηση της ταχύτητας, με την οποία κινείται, και περιέχει συνιστώσα που οφείλεται στην απόσβεση. Αυτή μάλιστα, παρουσιάζει μεγαλύτερη JND από ότι η σκληρότητα (~34%) και άρα είναι λογικό να δυσχεραίνει την δυνατότητα αντίληψης της τελευταίας. Επιπλέον, μπορούμε να αναφέρουμε ότι η ίδια η δομή παρουσίαζε το ελάττωμα μικρής σχετικά παραμόρφωσης (πριν «χαλάσει», για λόγους που συζητήθηκαν ήδη στο αντίστοιχο κεφάλαιο) και άρα δεν έδινε περιθώριο μεγάλης κίνησης μέσα στο υλικό στο χρήστη ώστε να συνειδητοποιήσει καλύτερα τη σκληρότητά της. Για τους λόγους αυτούς, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η εκτίμηση της JND ~36% είναι αρκετά ικανοποιητική.

Συμπεράσματα – Μελλοντική Έρευνα

Στόχος μας ήταν η ανάπτυξη και υλοποίηση μίας εφαρμογής εικονικής πραγματικότητας με ανάδραση δύναμης για την προσομοίωση ψηλαφητικής διάγνωσης μαλακών ιστών. Είχαμε στη διάθεσή μας την απτική διάταξη Phantom Omni (SensAble Technologies) με δυνατότητα ανάδρασης δύναμης προς τις κατευθύνσεις (x,y,z). Επιλέξαμε το μοντέλο δικτύματος μάζας-ελατηρίου για την μοντελοποίηση της δομής προς παραμόρφωση και υλοποιήσαμε το εικονικό περιβάλλον. Για τη σύζευξη του εικονικού περιβάλλοντος με την απτική διάταξη, χρησιμοποιήσαμε ένα ελαστικό μοντέλο ως τεχνική εικονικής σύζευξης. Επίσης, ρυθμίσαμε τις παραμέτρους του μοντέλου και κάναμε τις απαραίτητες τροποποιήσεις ώστε η μορφή της δύναμης ανάδρασης να είναι ικανοποιητική. Το τελικό σύστημα, αξιολογήθηκε βάσει μίας πειραματικής διαδικασίας "εξαναγκασμένης επιλογής", με την οποία εκτιμήθηκε η ελάχιστη αντιληπτή διαφοροποίηση (JND) για τη σκληρότητα μέσω του απτικού συστήματος που σχεδιάσαμε. Η τιμή JND που βρήκαμε ήταν ~36%, ενώ η τιμή JND για τη σκληρότητα σε πραγματικό κόσμο εκτιμάται ~22%. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις παραμέτρους και τις ατέλειες του μοντέλου που χρησιμοποιήσαμε το αποτέλεσμα μπορεί να θεωρηθεί αρκετά ικανοποιητικό. Σε γενικές γραμμές, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το μοντέλο δικτύματος μάζας ελατηρίου δημιούργησε κάποια προβλήματα οφειλόμενα κυρίως στη διακριτή φύση του και τον παράγοντα σκληρότητα. Για να επιδείξει καλύτερη συμπεριφορά, θα χρειαζόταν πυκνότερο δίκτυωμα το οποίο όμως αυξάνει την πολυπλοκότητα και άρα περιορίζεται από την υπολογιστική ισχύ που διαθέτουμε. Ως μέρος, όμως, της εργασίας αυτής όπου μας ενδιαφέρει η συνολική σχεδίαση του απτικού συστήματος και δεν επικεντρωνόμαστε μόνο στο μοντέλο παραμόρφωσης, λειτουργεί αποδεκτά.

Περαιτέρω στόχος μας, ήταν η πραγματοποίηση ενός δεύτερου πειράματος για την αντίληψη διαφοροποιήσεων της σκληρότητας μίας κρυμμένης δομής, ενώ η σκληρότητα της συνολικής δομής θα παραμένει σταθερή. Θα ήταν επίσης ενδιαφέρον ένα μοντέλο με δυναμική κρυμμένη δομή, η θέση της οποίας αλλάζει μέσα στη συνολική δομή. Οι περιορισμοί που επέβαλε το μοντέλο, όμως, δεν επέτρεψαν ικανοποιητική σχεδίαση τέτοιου πειράματος, και αφήνεται ως μελλοντική κατεύθυνση.

Η εργασία αυτή χαράζει ένα βασικό σχεδιάγραμμα για την μελέτη και την υλοποίηση μίας εφαρμογής ανάδρασης δύναμης σε εικονικό περιβάλλον. Λύνονται κάποια από τα προβλήματα που συναντώνται συχνά στις εφαρμογές αυτές και προτείνονται λύσεις για κάποια άλλα. Το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας, αλλά όπως είδαμε επιδέχεται διορθώσεις αν κανείς θέλει να ασχοληθεί με πιο απαιτητικές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα, για την πιο ευσταθή λειτουργία του συστήματος προτείνεται η ανάπτυξη και χρήση τοπικού μοντέλου παρεμβολής. Αν ήθελε κανείς να επεκτείνει τη συγκεκριμένη εφαρμογή, θα μπορούσε, για παράδειγμα, να εκτιμήσει μία συνολική σκληρότητα δομής (K) και να χρησιμοποιήσει γραμμική παρεμβολή ($F=K \cdot x$) για υπολογισμό της δύναμης ανάδρασης

μέχρι ο βρόχος υπολογισμών να επιστρέψει τη νέα τιμή δύναμης ανάδρασης στη συσκευή. Ακόμα καλύτερα, για μεγαλύτερη ακρίβεια, θα μπορούσε κανείς να χρησιμοποιήσει ένα τοπικό μοντέλο παρεμβολής που να προσαρμόζεται κάθε φορά στα νέα δεδομένα της εκτέλεσης. Τέλος, για να επεκτείνει κάποιος την εφαρμογή αυτή, θα μπορούσε να εστιάσει στο μοντέλο, και να χρησιμοποιήσει για να το βελτιώσει ένα υβριδικό μοντέλο συνεχούς – διακριτού μέσου, (παραδείγματος χάριν το μοντέλο δικτυώματος μάζας ελατηρίων μαζί με μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων) ώστε να έχει ως αποτέλεσμα αρκετά καλή προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο, αλλά παράλληλα να αποφεύγει και τα προβλήματα λόγω της διακριτότητας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Τμήμα Κώδικα C/C++

ΟΙ ΚΛΑΣΣΕΙΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (ο κώδικας είναι γραμμένος σε C++)

- Κλάση για το μοντέλο δικτυώματος μάζας – ελατηρίου

```
//msm_hap.h
//header file for mass-spring model class
//
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <iostream.h>

#define nol 3 //number of lines
#define noc 20 //number of columnes
#define nod 3 //depth

#define EPS 0.0001
#define MEPS (-0.0001)

const float m=(float)0.5; //mass of each element
const float c=(float)0.04; //damping of each element
const float c_env=(float) 0.00; //damping between each element and the environment

//-----Variables for experiment-----
const float basek=(float) 0.025;

const float k10=float (1.1*basek); //10%
const float k15=float (1.15*basek); //15%
const float k20=float (1.2*basek); //20%
const float k30=float (1.3*basek); //30%
const float k40=float (1.4*basek); //40%
const float k50=float (1.5*basek); //50%

//-----
const float massradius=(float) 0.5;
const int strwidth=5;
```

```

struct pos
{
    float x;
    float y;
    float z;
};

class msm1
{
public:
    msm1();
    void deform(pos F[nol*noc*nod]); //input:float Disp[noc] (for every mass on the surface)

    pos NP[nol*noc*nod]; //Node position matrix

private:
    float M[nol*noc*nod][nol*noc*nod]; //Mass (diagonal)
    float C[nol*noc*nod][nol*noc*nod]; //damping (banded)
    float K[nol*noc*nod][nol*noc*nod]; //Stifness matrix (banded)
    pos Fext[nol*noc*nod]; //external forces (Fext.x,Fext.y,Fext.z)
    pos F[nol*noc*nod]; //Total Forces on each node (F.x,F.y,F.z)
    pos V[nol*noc*nod]; //velocity of each node (V.x,V.y,V.z)
    pos Def[nol*noc*nod]; //deformation on each node (Def.x, Def.y,Def.z)
};

```

```

//msm.cpp

#include "msm_hap.h"
#include <time.h>

#define maxwidth 15
#define maxheigh 16

clock_t t1,t2;
float L=(float)maxwidth/(float)noc; //lenght of springs
float Ld=L* (float)sqrt(2); //length of diagonal springs

extern float k;

msm1::msm1()
{
    int i,j,l,temp,iline,jline,icol,jcol,idepth,jdepth;
    float x,y,z;
    //bool p;

    //creation of initial position matrix

    int inx=-5;

```



```

int iny=2;
int    inz=8;

x=(float) inx;
y=(float) iny;
z=(float) inz;

for(j=0;j<noc;j++)
{
    for(i=0;i<nol;i++)
    {
        for(l=0;l<nod;l++)
        {
            temp=(l*noc*nol)+(i*noc)+j;
            NP[temp].x=x;
            NP[temp].y=y;
            NP[temp].z=z;
            z-=L;
        }
        y-=L;
        z=(float)inz;
    }
    x+=L;
    y=(float)iny;
}

```

//creation of mass, stiffness and damping matrices
//and initialisation of F,V,Def

```

for (i=0;i<nol*noc*nod;i++)
{
    for (j=0;j<nol*noc*nod;j++)
        if (i==j)
        {
            //Mass matrix M
            M[i][i]=m;
            //Damping matrix C
            C[i][i]=0;
            //Stiffness matrix K
            K[i][i]=0;
        }
        else
        {
            M[i][j]=0;
        }
};

V[i].x=0;
V[i].y=0;
V[i].z=0;
F[i].x=0;
F[i].y=0;
F[i].z=0;
Def[i].x=0;
Def[i].y=0;

```

```

        Def[i].z=0;
        Fext[i].x=0;    //initialisation of Fext
        Fext[i].y=0;
        Fext[i].z=0;
    }
/*
    //
    //Stifness matrix (8-connectivity -o- at each dimension)
    //
*/
    for (i=0;i<nol*noc*nod;i++)
        for (j=i+1;j<nol*noc*nod;j++)
        {
            idepth=i/(nol*noc);
            temp=i%(nol*noc);
            iline=temp/noc;
            icol=temp%noc;

            jdepth=j/(nol*noc);
            temp=j%(nol*noc);
            jline=temp/noc;
            jcol=temp%noc;

            if ((abs(iline-jline)<=1)&&(abs(icol-jcol)<=1)&&(abs(idepth-jdepth)<=1))
                temp=abs(iline-jline)+abs(icol-jcol)+abs(idepth-jdepth);
            else
                temp=0;

            // area of different stifness defined
/*
            midcol=(int)floor(noc/2);
            if (nol==1) p=0;
            else if (nol>3)
            {
                midlin=(int)floor(nol/2);
                p=((abs(iline-jline)<=1)&&((iline==midlin)||(jcol==midlin)))&&((abs(icol-
jcol)<=1)&&((icol==midcol)||(jcol==midcol)));
            }
            else
                p=(abs(iline-jline)<=1)&&((iline==nol-1)||(jline==nol-1))&&((abs(icol-
jcol)<=(strwidth/2))&&((icol==midcol)||(jcol==midcol)));
*/
            if (temp==1)
            {
                K[i][j]=1;    //k;
                K[j][i]=1;    //k;
                //for different stifness in last layer
                //if (p) K[i][j]=K[j][i]=ks;
                C[i][j]=c;
                C[j][i]=c;
            }
            else if (temp==2)
            {
                K[i][j]=1;    //k2;
                K[j][i]=1;    //k2;
                //for different stifness in last layer
                //if (p) K[i][j]=K[j][i]=ks;

```

```

        C[i][j]=c;
        C[j][i]=c;
    }
    else
    {
        K[i][j]=0;
        K[j][i]=0;
        C[i][j]=0;
        C[j][i]=0;
    }
}
}

```

```

void msm1::deform(pos Fe[nol*nod*noc])
{
    int i,j,idepth,jdepth,iline,jline,icol,jcol,temp1;
    int moved=0;
    float Dt,temp,Lt,dv;

    Dt=(float) 1;

    for(i=0;i<nol*noc*nod;i++)
    {
        Fext[i].y=Fe[i].y;
    }

    for(i=0;i<noc*nol*nod;i++) //for each node
    {
        for(j=0;j<noc*nol*nod;j++)
        {
            if (i!=j)
            {
                idepth=i/(nol*noc);
                temp1=i%(nol*noc);
                iline=temp1/noc;
                icol=temp1%noc;

                jdepth=j/(nol*noc);
                temp1=j%(nol*noc);
                jline=temp1/noc;
                jcol=temp1%noc;

                if ((abs(iline-jline)<=1)&&(abs(icol-jcol)<=1)&&(abs(idepth-jdepth)<=1))
                    temp1=abs(iline-jline)+abs(icol-jcol)+abs(idepth-jdepth);
                else
                    temp1=0;

                temp1=abs(iline-jline)+abs(icol-jcol)+abs(idepth-jdepth);
                //temp=1=>L,temp=2=>Lt,temp=3=>unattached

                if (temp1==1) //then L is the springs natural lenght

```

```

        Lt=L;
    else
        Lt=Ld;

        temp=(float)      (sqrt((NP[j].y-NP[i].y)*(NP[j].y-NP[i].y)+(NP[j].x-
NP[i].x)*(NP[j].x-NP[i].x)+(NP[j].z-NP[i].z)*(NP[j].z-NP[i].z))-Lt);
        if ((temp>EPS)||((temp<MEPS)))
        {
            F[i].x+=K[i][j]*k*temp*(NP[j].x-NP[i].x)/(temp+Lt);
            F[i].y+=K[i][j]*k*temp*(NP[j].y-NP[i].y)/(temp+Lt);
            F[i].z+=K[i][j]*k*temp*(NP[j].z-NP[i].z)/(temp+Lt);
        }

        //damping between connected nodes
        dv=(float) (V[i].x-V[j].x);
        if ((dv>EPS)||((dv<MEPS)))
            F[i].x=-C[i][j]*dv;
        dv=(float) (V[i].y-V[j].y);
        if ((dv>EPS)||((dv<MEPS)))
            F[i].y=-C[i][j]*dv;
        dv=(float) (V[i].z-V[j].z);
        if ((dv>EPS)||((dv<MEPS)))
            F[i].z=-C[i][j]*dv;

    }

}

//damping between nodes and environment
if((V[i].x>EPS)||((V[i].x<MEPS)))
    F[i].x=-c_env*V[i].x;
if((V[i].y>EPS)||((V[i].y<MEPS)))
    F[i].y=-c_env*V[i].y;
if((V[i].z>EPS)||((V[i].z<MEPS)))
    F[i].z=-c_env*V[i].z;

iline=(i%(noc*nol))/noc;
icol=(i%(noc*nol))%noc;
idepth=i/(noc*nol);

if (iline==0)    //first line
{
    F[i].x+=Fext[i].x;
    F[i].y+=Fext[i].y;
    F[i].z+=Fext[i].z;
}

if      ((icol!=0)&&(icol!=noc-1))*&&(((idepth!=0)&&(idepth!=nod-
1))||((nod==1))*&&((iline!=nol-1)||((nol==1))*/)    //side nodes don't move ->v=0
{
    V[i].x+=(F[i].x/M[i][i])*Dt;
    V[i].y+=(F[i].y/M[i][i])*Dt;
    V[i].z+=(F[i].z/M[i][i])*Dt;
}
}

```

```

    }

    temp=0;

    for(i=0;i<noc*nol*nod;i++)
    {
        iline=(i%(noc*nol))/noc;
        icol=(i%(noc*nol))%noc;
        idepth=i/(noc*nol);

        if ((icol!=0)&&(icol!=noc-1)*&&(((idepth!=0)&&(idepth!=nod-
1))||(nod==1))*&&((iline!=nol-1)||(nol==1))*/) //side nodes do not move
        {
            NP[i].x+=Def[i].x;
            NP[i].y+=Def[i].y;
            NP[i].z+=Def[i].z;

            Def[i].x=V[i].x*Dt;
            Def[i].y=V[i].y*Dt;
            Def[i].z=V[i].z*Dt;

        }

        F[i].x=0;
        F[i].y=0;
        F[i].z=0;
    }
}

```

- Κλάση για το μοντέλο του εικονικού χειριστηρίου

```

//hand.h
//header file for "hand" class

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <iostream.h>

#define EPS 0.0001
#define MEPS (-0.0001)

const float xdimension=(float) 5;
const float zdimension=(float) 3;

```

```

const float khand=(float) 0.02;
const float Lhand=(float) 1;
const float rad=(float) 1;

class hand1
{
public:
    hand1();
    float touchforce(float dy);

    float up_pos[3];
    float down_pos;
    float Lh;
    float kh;
    float xdim;
    float zdim;
    double currentforce [3];
    float radius;

private:
};

```

```

//hand_hap.cpp

#include "hand_hap.h"

hand1::hand1()
{
    kh=khand;
    Lh=Lhand;
    up_pos[0]=0;
    up_pos[1]=6;
    up_pos[2]=0;
    down_pos=up_pos[1]-Lhand;
    xdim=xdimension;
    zdim=zdimension;
    currentforce[0]=0;
    currentforce[1]=0;
    currentforce[2]=0;
    radius=rad;

    cout<<"Lhand="<<Lh<<"\n";
    cout<<"Rhand="<<radius<<"\n";
    cout<<"Khand="<<kh<<"\n";
}

float hand1::touchforce(float dy)
{
    float f;

```

```
f=0;  
  
if (dy>0)f=-kh*dy;  
  
return (f);  
}
```


Βιβλιογραφία - Αναφορές

Adams R.J., Hannaford Blake. “Stable Haptic Interaction with Virtual Environments”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 15, no. 3, June 1999.

Beauregard Lee G., Srinivasan Mandayam A., Durlach Nathaniel I. "The Manual Resolution Of Viscosity And Mass", *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, ASME, DSC-vol.57-2, 1995.

Burdea Grigore. *Force and touch feedback for Virtual Reality*, John Wiley & Sons, Inc., 1996.

Burdea Grigore, Coiffet Philippe. *Virtual Reality Technology*, John Wiley & Sons, Inc., June 1994.

Constantinescu D., Salcudean S.E., Croft E.A., “Haptic Feedback using Local Models of Interaction”, *Proceedings of the 11th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 416-421, Los Angeles CA, 2003.

Gibson S., Mirtich B. “A Survey of Deformable Modeling in Computer Graphics”, *Technical Report No: TR97-19*, Mitsubishi Electric Research Laboratories (MERL), Cambridge, MA. November 1997. [<http://www.merl.com/reports/index.html>]

Massie T.H., Salisbury J.K., “The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects”, *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Dynamic Systems and Control, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, Chicago, vol. 55-, DSC, pp. 295-301, November 1994.

Mendoza C., Sundaraj K., and Laugier C. “Faithfull Haptic Feedback in Medical Simulators”, *In Proc. of the Int. Symp. on Experimental Robotics (ISER'02)*, Ischia (I), July 2002.

Otaduy Miguel A., Lin Ming C. “Stable and Responsive Six-Degree-of-freedom Haptic Manipulaton Using Implicit Integration”, *in Proc. of the World Haptics Conference*. Pisa, Italy, 2005

Pang X.D., Tan H. Z., Durlach N. I., “Manual discrimination of force using active finger motion”, *Perception & Psychopysics*, vol.49 , no.6 , pp.531-540, 1991.

Park J.G., Niemeyer G. “Haptic Rendering with Predictive Representation of Local Geometry”, *12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'04)* , vol. 00, no. , pp. 331-338, 12th 2004.

SensAble Technologies, “API Reference”, *3D Touch™ SDK Openhaptics™ Toolkit Version 1.02*, December 2004.

SensAble Technologies, “PHANTOM® OMNI™ User Guide ”, March 2004

SensAble Technologies, “Programmer’s Guide”, *3D Touch™ SDK Openhaptics™ Toolkit Version 1.02*, December 2004.

Tan Hong Z., Durlach Nathaniel I. , Beauregard Lee G. , Srinivasan Mandayam A. .”Manual Discrimination of compliance using active pinch grasp: The roles of force and work cues”, *Perception & Psychophysics*, vol.57, no.4, pp.495-510, 1995.

Tzafestas C.S. . “Whole-Hand Kinesthetic Feedback and Haptic Perception in Dextrous Virtual Manipulation”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics (Part A: Systems and Humans)*, Vol.33, No.1, pp.100-113, January 2003.

Tzafestas C.S. . “Synthese de retour kinesthesique et perception haptique lors de taches de manipulation virtuelle”, Ph.D. Thesis (These de Doctorat), Universite Pierre et Marie Curie (Paris 6), July 1998 (in french).