



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Το ρομποτικό σύστημα da Vinci στη χειρουργική διαμέσου φυσικών οπών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μπαγλατζή Αλεξάνδρα
Παπαχαρτοφύλη Ορθοδοξία

Επιβλέπων: Δημήτριος Κουτσούρης
Καθηγητής

Αθήνα, Νοέμβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Το ρομποτικό σύστημα da Vinci στη χειρουργική διαμέσου φυσικών οπών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μπαγλατζή Αλεξάνδρα
Παπαχαρτοφύλη Ορθοδοξία

Επιβλέπων: Δημήτριος Κουτσούρης
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21^η Νοεμβρίου 2011.

.....
Δημήτριος Κουτσούρης
Καθηγητής

.....
Κωνσταντίνα Νικήτα
Καθηγήτρια

.....
Γιώργος Ματσόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, Νοέμβριος 2011

.....
Μπαγλατζή Αλεξάνδρα – Παπαχαρτοφύλη Ορθοδοξία
Διπλωματούχοι Ηλεκτρολόγοι Μηχανικοί και Μηχανικοί Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Μπαγλατζή Αλεξάνδρα – Παπαχαρτοφύλη Ορθοδοξία

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 τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Τα τελευταία 20 χρόνια, πολλές επεμβάσεις προσαρμόστηκαν από την συμβατική ανοικτή χειρουργική στην ελάχιστη επεμβατική τεχνική. Οι συντομότερες παραμονές στο νοσοκομείο, ο μειωμένος μετεγχειρητικός πόνος, τα λιγότερα περιστατικά μολύνσεων από τραύμα και τα καλύτερα αισθητικά αποτελέσματα έχουν καταστήσει την ελάχιστη επεμβατική χειρουργική ως την καθιερωμένη μέθοδο θεραπείας για έναν αριθμό ασθενειών. Με την εμφάνιση καινούριων τεχνολογικών δυνατοτήτων, κατέστη εφικτή η περαιτέρω μετάβαση από την ελάχιστη επεμβατική χειρουργική στη ρομποτική χειρουργική.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναλύεται η δομή και λειτουργία του ρομποτικού συστήματος χειρουργικής da Vinci, μέσα από μια ανασκόπηση της μετάβασης αυτής. Μελετώνται οι προοπτικές βελτίωσης της ρομποτικής χειρουργικής μέσω του προεγχειρητικού σχεδιασμού και της επαυξημένης πραγματικότητας, των απεικονιστικών δηλαδή τεχνικών που ενισχύουν το σύνολο των πληροφοριών τις οποίες έχει στη διάθεση του ο χειρουργός κατά τη διάρκεια της επέμβασης.

Επίσης, παρουσιάζονται εκτενώς οι μέθοδοι και η υποδομή της χειρουργική διαμέσου φυσικών οπών (NOTES) που είναι ίσως το πιο ενδιαφέρον επίτευγμα της χειρουργικής από πλευράς τεχνικής και που σε συνδυασμό με την ταχεία εξέλιξη της μικρο-ρομποτικής, θα μπορέσει να οδηγήσει στην ελάχιστη δυνατή επεμβατικότητα.

Λέξεις – Κλειδιά

Ρομπότ, Ρομποτική χειρουργική, da Vinci, Προεγχειρητικός σχεδιασμός, Επαυξημένη πραγματικότητα, Ευθυγράμμιση, Χειρουργική διαμέσου φυσικών οπών, Μικρο-ρομπότ, MAGS

Abstract

During the last 20 years, many procedures have evolved from the concept of conventional open surgery to minimally invasive techniques. Quicker recovery, shorter stay in the hospital, smaller chance of post-operational infection, reduced post-operational trauma and better cosmetic results have established minimally invasive surgery (MIS) as the standard procedure for several conditions which require surgical treatment. The development of new technological abilities, enabled the transition from MIS to robotic surgery.

An example of this transition is the da Vinci robotic surgical system, whose structure and function are analyzed in this thesis. We also present the prospect of improvement in robotic surgery through pre-operative planning and augmented reality. These are the imaging tools that enhance the amount of data the surgeon has at his disposal during the procedure.

Finally, we extensively describe the methods and infrastructure of natural orifice transluminal endoscopic surgery (NOTES), which is probably the most interesting achievement of surgery due to its unique techniques. NOTES, combined with the rapid progress in the field of micro-robotics, might lead surgical invasion to its very minimal.

Key Words

Robot, Robotic surgery, da Vinci, Preoperative Planning, Augmented Reality, Registration, NOTES, micro-robots, MAGS

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή μας, κ. Δημήτριο Κουτσούρη, για τη βοήθεια του, και τον κ. Απόλλωνα Ζυγομαλά για την καθοδήγηση του.

Στις οικογένειες μας, στους φίλους μας και συνεπώς, η μία στην άλλη.

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	12
-----------------------------------	----

Κεφάλαιο 2 : Ρομποτική Χειρουργική

2.1. Η έννοια του ρομπότ.....	14
2.2 Το ρομποτικό σύστημα	14
2.2.1 Το μηχανικό μέρος	14
2.2.2 Ο ελεγκτής	15
2.2.3 Βαθμοί ελευθερίας.....	16
2.3 Το χειρουργικό ρομπότ	17
2.4 Ελάχιστα Επεμβατική Χειρουργική	18
2.4.1 Υποβοηθούμενη από υπολογιστή χειρουργική	19
2.4.2 Ρομποτική χειρουργική.....	20
2.5 Ιστορική αναδρομή	21
2.6 Πλεονεκτήματα της ρομποτικής χειρουργικής.....	28
2.7 Μειονεκτήματα της ρομποτικής χειρουργικής.....	30
2.8 Τομείς εφαρμογής της ρομποτικής χειρουργικής	31
2.9 Σύστημα da Vinci.....	33
2.9.1 Επισκόπηση του συστήματος.....	34
2.9.2 Η κονσόλα του χειρουργού	34
2.9.3 Το καρότσι δίπλα στον ασθενή.....	35
2.9.4 Τρισδιάστατο σύστημα απεικόνισης	36
2.9.5 Όργανα Endowrist	37
2.10 Το σύστημα da Vinci S HD	41
2.11 Το σύστημα da Vinci SiHD	42
2.12 Μηχανισμοί ασφαλείας σε περίπτωση βλάβης	43

Κεφάλαιο 3: Χειρουργική διαμέσου φυσικών οπών

3.1 Εισαγωγή.....	44
3.2 Πρόσβαση και συρραφή	45
3.2.1 Πρόσβαση στην περιτοναϊκή κοιλότητα	45
3.2.2 Συρραφή των χειρουργικών τομών.....	47
3.3 Ενδοπεριτοναϊκές επιπλοκές κι εκπαίδευση	48
3.4 Η τεχνολογία στην NOTES	49

3.5 Πλατφόρμα πολλαπλών διεργασιών.....	50
3.6 MAGS : Magnetic Anchoring and Guidance System	55
3.7 Ρομποτικά συστήματα στη χειρουργική NOTES.....	58
3.8 Μικρο-ρομπότ στη χειρουργική NOTES.....	61
3.9 Ιατρική Απεικόνιση κι Επαυξημένη Πραγματικότητα στη NOTES.....	66

Κεφάλαιο 4: Προεγχειρητικός Σχεδιασμός και Επαυξημένη Πραγματικότητα

4.1 Εισαγωγή.....	68
4.2 Η έννοια του προεγχειρητικού σχεδιασμού.....	68
4.3 Από τις 2D ιατρικές εικόνες στο 3D ομοίωμα.....	70
4.3.1 Κατηγορίες 3D ομοιωμάτων.....	70
4.3.2 Απόδοση όγκου	70
4.3.3 Απόδοση επιφάνειας	71
4.4 Συνοπτική παρουσίαση αλγορίθμων για κατασκευή 3D ομοιώματος	72
4.5 Πακέτα λογισμικού για ανάλυση κι επεξεργασία ιατρικών δεδομένων	73
4.6 Ενδοεγχειρητική Υλοποίηση	75
4.7 Περιορισμοί.....	77
4.8 Η έννοια της Επαυξημένης Πραγματικότητας.....	78
4.9 Συστήματα AR στη Ρομποτική Χειρουργική	78
4.10 Απεικονιστική Τεχνολογία των AR συστημάτων	79
4.11 Πεδία εφαρμογών.....	80
4.12 Ανάδραση αφής.....	82
4.13 Επαυξημένη Πραγματικότητα για καθοδήγηση αφής	84
4.14 Πρόσφατη πρόοδος στον τομέα της AR	86
4.14.1 Εντοπισμός των χειρουργικών εργαλείων μέσω βίντεο	86
4.14.2 Καθοδήγηση για βελόνες αφαίρεσης όγκων	88
4.14.3 Σύστημα τοποθέτησης ενδολαβίδας στην καρδιοχειρουργική	89
4.14.4 Καθοδήγηση για ηπατεκτομές μέσω του Χάρτη Εκτομής	93
4.15 Εφαρμογές της AR στο σύστημα da Vinci.....	94
4.15.1 Βαθμονόμηση.....	94
4.15.2 Βαθμονόμηση της κάμερας.....	94
4.15.3 Βαθμονόμηση των ρομποτικών βραχιόνων.....	95
4.16 Ευθυγράμμιση της 2D εικόνας με το 3D γεωμετρικό μοντέλο	96

Κεφάλαιο 5: Μελλοντικές προοπτικές, περιορισμοί και συμπεράσματα.....

Βιβλιογραφία.....

Ευρετήριο σχημάτων

Εικόνα 2.2.3-1 : Οι βασικοί έξι βαθμοί ελευθερίας ενός ρομπότ συστήματος

Εικόνα 2.4.1-1: Η είσοδος των συστημάτων υπολογιστών στη χειρουργική αίθουσα

Εικόνα 2.5-1 : Ρομπότ Puma 560

Εικόνα 2.5-2: Το σύστημα τηλεπαρουσίας των Rosen και Fischer

Εικόνα 2.5-3 : Σύστημα Probot

Εικόνα 2.5-4 : Παροχή ανάδρασης δύναμης με τη βοήθεια του Phantom

Εικόνα 2.5-5: Σύστημα AESOP, ο προάγγελος του da Vinci

Εικόνα 2.5-6 : Σύστημα Zeus

Εικόνα 2.9-1: Το χειρουργικό σύστημα da Vinci

Εικόνα 2.9.5-1: Βαθμοί ελευθερίας κίνησης σε ένα ρομποτικό εργαλείο

Εικόνα 2.9.5-2: Energy Instruments

Εικόνα 2.9.5-3: Χειρουργικές λαβίδες (Forceps)

Εικόνα 2.9.5-4: Needle drivers

Εικόνα 2.9.5-5: Retractors

Εικόνα 2.9.5-6: Άλλα ειδικά εργαλεία

Εικόνα 3.2.2-1: Το σύστημα Eagle Claw

Εικόνα 3.2.2-2: Το σύστημα T-tags

Εικόνα 3.2.2-3: Το σύστημα g-prox

Εικόνα 3.5-1: (αριστερά)Το R-score,(δεξιά)Η διεπιφάνεια του χρήστη

Εικόνα 3.5-2: Το σύστημα TransPort™ [33]

Εικόνα 3.5-3: Το σύστημα Cobra

Εικόνα 3.5-4: Το σύστημα EndoSAMURAI

Εικόνα 3.5-5: Το ενδοσκοπικό σύστημα άμεσης οδήγησης

Εικόνα 3.6-1: Σχηματική αναπαράσταση μίας πλατφόρμας MAGS (A) τοποθέτηση του τροκάρ, (B) Κάμερα, (C)Χειρουργικά εργαλεία,(D) Εξωτερικοί μαγνήτες

Εικόνα 3.7-1: Το στέλεχος του ρομποτικού συστήματος ViaCath

Εικόνα 3.7-2: Το ρομποτικό σύστημα MASTER

Εικόνα 3.8-1: (a) Η κάψουλα PillCam ,(b) εικόνα από τον γαστρεντερικό σωλήνα, (c) οπτικοποίηση του γαστρεντερικού σωλήνα σε πραγματικό χρόνο

Εικόνα 3.8-2: Μικρο-ρομπότ που εισέρχονται στη στομαχική κοιλότητα κατά τη διάρκεια μίας επέμβασης

Εικόνα 3.8-3: Η νέα γενιά των μικρο-ρομπότ που χρησιμοποιεί την τεχνολογία MAGS

Εικόνα 4.3.2-1: Μοντέλο απόδοσης όγκου

Εικόνα 4.3.3-1: Απόδοση επιφάνειας

Εικόνα 4.6-1: Συσκευή DLR 3D-Modeller

Εικόνα 4.10-1. Συνδυασμός οπτικής πληροφορίας. Video See Through και δίπλα, Optical See Through.

Εικόνα 4.11-1 : AR στη χειρουργική αίθουσα

Εικόνα 4.12-1 : Αισθητήρας αφής με πιεζο-ανθεκτικό λάστιχο

Εικόνα 4.12-2: Αισθητήρας παρεμβολής δεδομένων

Εικόνα 4.13-1: Συνοπτικό διάγραμμα απτικής καθοδήγησης στη χειρουργική αίθουσα

Εικόνα 4.14.1-1 : Εντοπισμός εργαλείων μέσω βίντεο – Τμηματοποίηση περιγραμμάτων

Εικόνα 4.14.2-1: Σύστημα ARIS*ER RF. (α),(β),(γ) Οπτικοποιήσεις δεδομένων (δ) Υπέρθυση υπερήχου και 3D μοντέλου

Εικόνα 4.14.3-1: Το συνολικό περιβάλλον εργασίας του χρήστη, με δύο όψεις των ανατομικών δεδομένων και τη θέση του μπαλονιού

Εικόνα 4.14.3-2: Μπαλόκι και καθετήρας οδήγησης

Εικόνα 4.14.3-3: (α), (β) Δοκιμές σε ομοίωμα σιλικόνης (γ),(δ) Δοκιμές σε ζώα

Εικόνα 4.14.4-1: Χάρτης Εκτομής

Εικόνα 4.16-1: Αντιστοίχιση των δεδομένων με χρήση οπισθοανακλαστικών σφαιρών

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Οι παραδοσιακές τεχνικές της ανοιχτής χειρουργικής, με όλα τα γνωστά μειονεκτήματα της, έχουν αρχίσει να αντικαθίστανται σε μεγάλο βαθμό από ελάχιστα επεμβατικές διεργασίες, αφού η λαπαροσκοπική και η ρομποτική χειρουργική έχουν πλέον εδραιωθεί και χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση πλήθους επεμβάσεων ρουτίνας αλλά και ιδιαίτερα υψηλής πολυπλοκότητας. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αναλυτική παρουσίαση του da Vinci, του κύριου εμπορικού συστήματος ρομποτικής χειρουργικής, της δυνατότητας ενίσχυσης του οπτικού πεδίου του χειρουργού με μέσα εικονικής πραγματικότητας και η εκτενής παρουσίαση της πολλά υποσχόμενης και αναπτυσσόμενης τεχνικής NOTES. Αρχικά, στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται αναλυτικά η έννοια και υποδομή ενός ρομποτικού χειρουργικού συστήματος, και η ιστορία της μετάβασης από τη χρήση του πρώτου ιατρικού ρομπότ (Puma 560) το 1985 μέχρι και την ανάπτυξη του da Vinci. Στο ίδιο κεφάλαιο παραθέτουμε εκτενώς την πλήρη διάταξη του συστήματος da Vinci, καθώς και τα πιθανά οφέλη αλλά και τους κινδύνους από τη χρήση ρομπότ στη χειρουργική αίθουσα.

Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 3 γίνεται πλήρης επισκόπηση της ανάπτυξης της επαναστατικής για την ελάχιστα επεμβατική χειρουργική τεχνικής NOTES. Περιγράφεται το μείζον για την ασφάλεια του ασθενούς ζήτημα της πρόσβασης στην περιτοναϊκή κοιλότητα, και παρατίθεται όλη η διαθέσιμη τεχνογνωσία και υποδομή της τεχνικής, από τα είδη των χειρουργικών εργαλείων μέχρι και την ανάγκη για ανάπτυξη μικρο-ρομπότ για να επιτευχθεί η ελάχιστη δυνατή επεμβατικότητα. Τέλος, γίνεται αναφορά των ρομποτικών χειρουργικών συστημάτων με τα οποία γίνονται κλινικές δοκιμές χρήσης της NOTES, καθώς και η δυνητική βελτίωση της τεχνικής από υπάρχουσες απεικονιστικές μεθόδους.

Στο Κεφάλαιο 4, θίγονται οι έννοιες του προεγχειρητικού σχεδιασμού, τα οφέλη που μπορεί να προσφέρει αλλά και οι τρέχοντες περιορισμοί του. Περιγράφεται γενικά ο τρόπος κατασκευής ενός τρισδιάστατου ομοιώματος από τις αντίστοιχες δισδιάστατες ιατρικές εικόνες, καθώς και τα διαθέσιμα πακέτα λογισμικού για την κατασκευή αυτή. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο όρος της επαυξημένης πραγματικότητας, η διαθέσιμη απεικονιστική τεχνολογία της, τα πεδία εφαρμογής της, καθώς και οι πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα αυτό. Αναφέρεται η χρήση των εφαρμογών της επαυξημένης πραγματικότητας στο σύστημα da Vinci, αλλά και το ιδιαίτερα σημαντικό θέμα της

ευθυγράμμισης (αντιστοίχισης) των δεδομένων της 2D οθόνης του ενδοσκοπίου με εκείνα του 3D ομοιώματος του ιστού ενδιαφέροντος, που ανακτήθηκε προεγχειρητικά.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5, γίνεται μια επισκόπηση των προοπτικών ανάπτυξης της ρομποτικής χειρουργικής, της τεχνικής NOTES καθώς και των επιμέρους τεχνολογικών και απεικονιστικών εργαλείων όπως είναι η AR και τα μικρο-ρομπότ, ενώ γίνεται έμφαση στα προβλήματα που καλούνται οι τρέχουσες έρευνες να αντιμετωπίσουν για την μελλοντική πρόοδο της ελάχιστα επεμβατικής χειρουργικής.

Κεφάλαιο 2 : Ρομποτική Χειρουργική

2.1 Η έννοια του ρομπότ

Δεν μπορούμε να αναφερθούμε με ακρίβεια σε κάποιον συγκεκριμένο ορισμό καθώς υπάρχει πληθώρα διαφορετικών, με την εγκυκλοπαίδεια Britannica να αναφέρει για παράδειγμα πως robot είναι “μια οποιαδήποτε αυτόματα χειριζόμενη μηχανή που υποκαθιστά την ανθρώπινη εργασία, που πιθανόν να μην προσομοιάζει εμφανισιακά στα ανθρώπινα όντα ή να μην εκτελεί διεργασίες με ανθρωπόμορφο τρόπο”.

Πλέον τα ρομπότ χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε επιστημονικές και βιομηχανικές εφαρμογές με ρόλο επικουρικό ή και πλήρως υποκαθιστώντας την ανθρώπινη εργασία, από τις ακριβείς, επαναλαμβανόμενες εργασίες στην βιομηχανία (κατασκευή μικροεπεξεργαστών, αυτοκινητοβιομηχανίες κλπ.) και την εξερεύνηση του βυθού και του διαστήματος, μέχρι και την εκτέλεση λεπτών χειρουργικών επεμβάσεων στα νοσοκομεία. [1]

2.2 Το ρομποτικό σύστημα

Στη γενική του μορφή, ένα ρομποτικό σύστημα αποτελείται από το μηχανικό μέρος και τον ελεγκτή του. Βασική έννοια ενός ρομποτικού συστήματος αποτελεί επίσης και η έννοια των βαθμών ελευθερίας ενός ρομπότ. Παρακάτω αναλύονται συνοπτικά τα στοιχεία αυτά. [1]

2.2.1 Το μηχανικό μέρος

Στη γενική του μορφή, το μηχανικό μέρος ενός ρομποτικού συστήματος αποτελείται από:

- **Βραχίονες:** Ανάλογα με το είδος της εργασίας που εκτελείται, έχουμε έναν ή περισσότερους βραχίονες.
- **Βάση:** Στην απαραίτητη βάση που βρίσκεται στο περιβάλλον εργασίας μας, στερεώνεται ένα πλήθος αρθρώσεων και συνδέσμων που καταλήγουν στο εργαλείο δράσης.
- **Σύνδεσμοι:** Στερεοί, συνήθως μεταλλικοί, συγκροτούν το σκελετό του ρομποτικού συστήματος.

- **Αρθρώσεις:** Επιτρέπουν τις σχετικές κινήσεις μεταξύ των συνδέσμων. Οι κυριότερες κατηγορίες αρθρώσεων είναι οι πρισματικές και οι στροφικές, όπου στις πρισματικές επιτρέπεται η σχετική μετατόπιση σε ευθεία γραμμή μεταξύ δύο γειτονικών συνδέσμων, και αναλόγως στις στροφικές επιτρέπεται η σχετική στροφή μεταξύ δύο συνδέσμων.

- **Κινητήρας:** Όπως συμπεραίνεται λογικά, κάθε άρθρωση τροφοδοτείται από κάποιον κινητήρα, ηλεκτρικό, υδραυλικό ή πνευματικό.

- **Αισθητήρες:** Απαραίτητη για τον συνεχή έλεγχο της θέσης του ρομπότ είναι η συλλογή πληροφοριών για τη θέση και την ταχύτητα κάθε άρθρωσης ξεχωριστά. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται αισθητήρες διαφόρων βαθμών πολυπλοκότητας, όπως ποτενσιόμετρα και ταχύμετρα, αλλά και ψηφιακοί οπτικοί κωδικοποιητές θέσης.

- **Εργαλείο δράσης:** Ανάλογα με την εργασία την οποία προγραμματίστηκε να εκτελεί το εκάστοτε ρομποτικό σύστημα, κάθε βραχίονας έχει στο τελικό του άκρο προσαρμοσμένο και το αντίστοιχο εργαλείο δράσης, από βιομηχανικό συγκολλητή μετάλλων μέχρι και λεπτό χειρουργικό εργαλείο. [1][2]

2.2.2 Ο ελεγκτής

Ο ελεγκτής είναι η ηλεκτρονική μονάδα με τη βοήθεια της οποίας προγραμματίζεται αρχικά η ακριβής εργασία που θα επιτελέσει το ρομποτικό σύστημα, και στη συνέχεια ελέγχει την κίνηση του καθ'όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του. Τα μέρη του είναι τα εξής:

- **Hardware (Ηλεκτρονικά)**

Συνήθως έχουμε έναν υπολογιστή στον οποίο βρίσκεται εγκαταστημένο το πρόγραμμα που θα εκτελεστεί, τα απαραίτητα ηλεκτρονικά συστήματα για την επικοινωνία του ελεγκτή με το μηχανικό μέρος, το εξωτερικό περιβάλλον του ρομποτικού συστήματος, καθώς και με τους ενισχυτές ισχύος που ενισχύουν τα σήματα ελέγχου στο επίπεδο που απαιτούνται για τη λειτουργία των κινητήρων.

- **Software (Λογισμικό)**

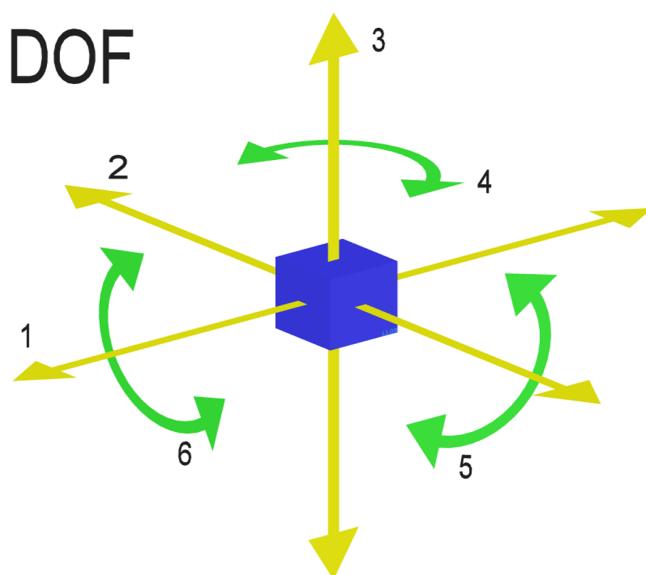
Το λογισμικό, με βάση κάποιον αναδρομικό αλγόριθμο, δημιουργεί τα απαραίτητα σήματα ελέγχου, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες παραμέτρους όπως τη θέση και την ταχύτητα του ρομπότ. Το λογισμικό μπορεί να περιλαμβάνει επιπρόσθετα βοηθητικά προγράμματα για τον

προγραμματισμό, την παραμετροποίηση και τον έλεγχο λειτουργίας του συστήματος καθώς και ενημέρωση του χρήστη με διαγνωστικά μηνύματα. [2]

2.2.3 Βαθμοί ελευθερίας του ρομπότ

Σε γενικές γραμμές, οι βαθμοί ελευθερίας δηλώνουν πόσο ευκίνητο είναι ένα ρομπότ στο χώρο. Σύμφωνα με τον ορισμό, βαθμός ελευθερίας είναι ο αριθμός των ανεξάρτητων παραμέτρων που προσδιορίζουν τη θέση ενός σώματος στο χώρο. Κάθε ανεξάρτητη κινούμενη άρθρωση προσθέτει στο ρομπότ έναν βαθμό ελευθερίας.

Για την ακριβή περιγραφή ενός στερεού σώματος στο χώρο, χρειάζονται έξι μεταβλητές, τρεις για τη θέση του και τρεις για τον προσανατολισμό του, και συνεπώς για την κίνηση ενός ρομποτικού συστήματος οπουδήποτε στο χώρο και με οποιονδήποτε προσανατολισμό, πρέπει αυτό να διαθέτει τουλάχιστον έξι βαθμούς ελευθερίας. Βέβαια, στην πράξη, στα βιομηχανικά ρομπότ σπάνια συναντάμε περισσότερους από έξι βαθμούς ελευθερίας, καθώς έτσι αφενός θα βελτιωνόταν η ευελιξία τους, όμως αφετέρου θα αυξανόταν η πολυπλοκότητα του απαραίτητου λογισμικού ελέγχου χωρίς έκταση του χώρου δράσης. Ο ανθρώπινος βραχίονας υπολογίζεται ότι διαθέτει επτά βαθμούς ελευθερίας. [2]



Εικόνα 2.2.3-1 : Οι βασικοί έξι βαθμοί ελευθερίας ενός ρομπότ συστήματος

2.3 Το χειρουργικό ρομπότ

Με βάση τα παραπάνω, το ρομπότ συνεπώς είναι μία σύνθετη μηχανική κατασκευή που εκτελεί κινήσεις αλληλεπιδρώντας σε πραγματικό χρόνο με το περιβάλλον, όντας εφοδιασμένο με αισθητήρες που συλλέγουν πληροφορίες σχετικά με τη θέση του και την κατάσταση του περιβάλλοντος χώρου, ώστε στη συνέχεια να μπορεί να υπολογίζει με τη βοήθεια του υπολογιστή τις νέες του κινήσεις. Από θεωρητική άποψη, εφόσον αυτό εφοδιαστεί με το κατάλληλο λογισμικό, έχει τη δυνατότητα να εκτελέσει ακόμα και μία χειρουργική επέμβαση.

Το χειρουργικό ρομπότ λοιπόν, αποτελεί μία αυτοτροφοδοτούμενη και ελεγχόμενη από υπολογιστή συσκευή, ειδικά προγραμματισμένη να βοηθάει στην εστίαση και τον χειρισμό των χειρουργικών εργαλείων, επιτρέποντας έτσι στο χειρουργό να εκτελεί πιο περίπλοκες επεμβάσεις, χωρίς όμως να δρα ανεξάρτητα από αυτόν και χωρίς να τον υποκαθιστά. [3]

Εφόσον τα ρομποτικά χειρουργικά συστήματα αποτελούν επέκταση των χειρουργών και είναι απόλυτα καθοδηγούμενα από αυτούς, μπορούμε να περιγράψουμε τη σχέση χειρουργού-ρομπότ ως μία σχέση τύπου αφέντη-σκλάβου (master-slave). Κάθε σύστημα αφέντη-σκλάβου αποτελείται από δύο βασικά μέρη, την κονσόλα του χειρουργού και τους ρομποτικούς βραχίονες, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με τη βοήθεια καλωδίων δεδομένων κι ενός υπολογιστή.

Η κονσόλα αποτελεί ουσιαστικά τη διασύνδεση του χειρουργού με το ρομποτικό σύστημα, ενώ ο ηλεκτρονικός υπολογιστής υπεισέρχεται ανάμεσα στον ασθενή και το χειρουργό προσφέροντας ακριβέστατη τρισδιάστατη και μεγεθυμένη εικόνα στο χειρουργό μέσω ψηφιακής ανάλυσης διευκολύνοντας σημαντικά το έργο του, κάτι το οποίο αποσκοπεί στο μέγιστο όφελος του ασθενούς.

Οι εντολές που δίνει ο χειρουργός μέσω των μοχλών μεταφέρονται ταυτόχρονα ψηφιακά, και με ακρίβεια, στους αρθρωτούς χειρουργικούς βραχίονες του ρομπότ οι οποίοι εκτελούν τις κινήσεις στο πεδίο της εγχείρησης. Οι κινήσεις αυτές ελέγχονται εξολοκλήρου από τον χειρουργό, ο οποίος πρέπει να είναι ειδικά εκπαιδευμένος στη χρήση του ρομποτικού συστήματος. [3][4]

2.4 Ελάχιστα Επεμβατική Χειρουργική

Από την αρχή της ανάπτυξης της τα τελευταία είκοσι χρόνια, η ελάχιστα επεμβατική χειρουργική στοχεύει στην εκτέλεση χειρουργικών επεμβάσεων όσο το δυνατόν “μη επεμβατικών”, δηλαδή με το ελάχιστο δυνατό τραύμα και με μικρό χρόνο ανάρρωσης των ασθενών. Κατά την εφαρμογή αυτής της τεχνικής, μικροσκοπικές κάμερες προσαρμοσμένες σε όργανα που καλούνται ενδοσκόπια ή λαπαροσκόπια εισέρχονται στο σώμα του ασθενούς μέσα από μικρές τομές μήκους περίπου 1cm και καθοδηγούνται με τη βοήθεια μίας βιντεο-οθόνης.[5]

Έτσι εισήχθη στον τομέα της χειρουργικής μία καινούργια ειδικότητα, αυτή της λαπαροσκοπικής χειρουργικής, η οποία βελτίωσε σημαντικά τις συνθήκες νοσηλείας και φροντίδας του χειρουργημένου ασθενούς. Με τη μέθοδο αυτή οι κοιλιοτομές αποτέλεσαν παρελθόν, με αποτέλεσμα ο μετεγχειρητικός πόνος, η απώλεια αίματος, οι μολύνσεις και οι επιπλοκές σχεδόν να εκμηδενιστούν. Επεμβάσεις που στο παρελθόν απαιτούσαν πολυήμερη νοσηλεία, γίνονται πλέον με παραμονή μίας το πολύ ημέρας μέσα στην κλινική με ανάλογα μικρότερο κόστος για τον νοσηλευόμενο ασθενή. Η λαπαροσκοπική χειρουργική αποτέλεσε μία τεχνολογική και ιατρική καινοτομία τεράστιας σημασίας, αλλά όταν η χρήση της άρχισε να εφαρμόζεται σε πιο μαζικό επίπεδο, εμφανίστηκαν ορισμένες ουσιώδεις αδυναμίες της.

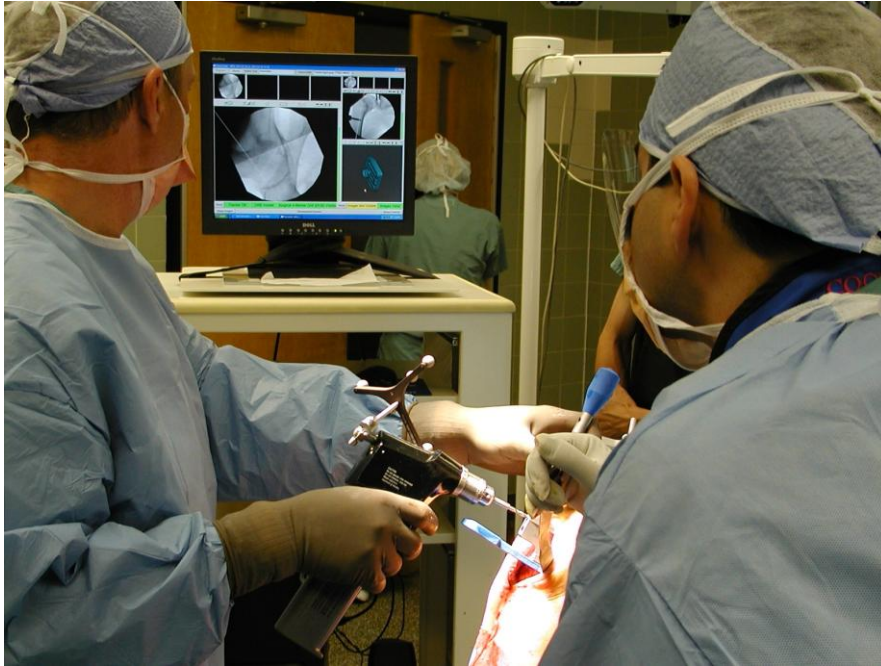
Στη λαπαροσκοπική χειρουργική, ο χειρουργός καλείται να εκτελέσει επεμβάσεις με καθοδήγηση βίντεο χωρίς την άμεση επαφή με τον ασθενή. Χειρουργεί σε έναν εικονικά δισδιάστατο χώρο με απώλεια αίσθησης βάθους του χειρουργικού πεδίου. Αδυνατεί να “ψηλαφίσει” τους ιστούς και χρησιμοποιεί μακριά και άκαμπτα εργαλεία που περιορίζουν την ευελιξία και τη δυνατότητα σύνθετων χειρισμών, ενώ για πρώτη φορά ο έλεγχος του χειρουργικού πεδίου περνάει σε κάποιον άλλο, τον άνθρωπο που κρατά και χειρίζεται το λαπαροσκόπιο σύμφωνα με τις οδηγίες του χειρουργού. Μερικοί χειρουργοί προτιμούν να κρατούν οι ίδιοι το λαπαροσκόπιο θέλοντας να έχουν έτσι τον πλήρη έλεγχο του οπτικού πεδίου, με αποτέλεσμα όμως την μονόχειρη εκτέλεση της επέμβασης από την πλευρά του χειρουργού. Σημαντική παράμετρος της ποιότητας της λαπαροσκοπικής εικόνας είναι η προσήλωση του εικονολήπτη στο χειρουργικό πεδίο και η αποφυγή κάθε άσκοπης κίνησης, αν και είναι αναπόφευκτη η αλλοίωση της εικόνας αυτής από το φυσικού τρόμο του ανθρώπινου χεριού.

Επιπροσθέτως, ο μικρός χώρος εργασίας, το περιορισμένο οπτικό πεδίο και η υποβάθμιση των φυσικών αισθήσεων του χειρουργού αποτελούσαν σημαντικό εμπόδιο και συνεπώς ενώ ορισμένες απλές λαπαροσκοπικές επεμβάσεις όπως είναι π.χ. η λαπαροσκοπική χολοκυστεκτομή διαδόθηκαν εύκολα και γρήγορα, δε συνέβη το ίδιο με τις πιο απαιτητικές από αυτές (σπληνεκτομή, εντερεκτομές, γαστρεκτομές, προστατεκτομή, αποκατάσταση μιτροειδούς βαλβίδας κλπ.).

Για να αντιμετωπίσουμε αυτά τα προβλήματα, μπορούμε είτε να βοηθήσουμε τεχνολογικά το χειρουργό για να βελτιώσει τις ικανότητές του είτε να τον αντικαταστήσουμε με κάποια αυτόματη μηχανή απαλλαγμένη από ανθρώπινες αδυναμίες. [5]

2.4.1 Υποβοηθούμενη από υπολογιστή χειρουργική

Εδώ συναντάμε εκτεταμένη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών, με τον χειρουργό όμως να παραμένει το κεντρικό πρόσωπο. Κύριος στόχος της υποβοηθούμενης από υπολογιστή χειρουργικής (computer-assisted surgery – CAS) είναι η ποιοτική αναβάθμιση των αισθήσεων και των ικανοτήτων του χειρουργού. Ο χειρουργός ενισχύεται τώρα στο χειρουργικό πεδίο με τεχνητές αισθήσεις, τρισδιάστατη όραση και αφή, και τρισδιάστατα διαγνωστικά και απεικονιστικά μηχανήματα, με αισθητή βελτίωση της απόδοσης του. Εκτός από το χειρουργείο, η τεχνολογία CAS βρίσκει επίσης εφαρμογές στην ιατρική απεικόνιση, την εκπαίδευση και το σχεδιασμό χειρουργικών επεμβάσεων (surgical planning).[5] [6]



Εικόνα 2.4.1-1: Η είσοδος των συστημάτων υπολογιστών στη χειρουργική αίθουσα

2.4.2 Ρομποτική χειρουργική

Η ρομποτική χειρουργική αποτελεί εξέλιξη της ενδοσκοπικής χειρουργικής, όντας μία ελάχιστα επεμβατική και ελάχιστα τραυματική χειρουργική μέθοδος που θέτει στη διάθεση του χειρουργού εξαιρετικά λεπτά και εύκαμπτα εργαλεία που εκτελούν τις χειρουργικές κινήσεις με πρωτοποριακή ακρίβεια μέσα από μικροσκοπικές τομές στο δέρμα του ασθενούς. Η μέθοδος αυτή ενσωματώνει πολλές από τις εφαρμογές της υποβοηθούμενης από υπολογιστή χειρουργικής, με μεγαλύτερη όμως υποβάθμιση του ρόλου του χειρουργού ως φυσικό πρόσωπο στο πλευρό του ασθενούς. Με τη χρήση του χειρουργικού ρομπότ, δηλαδή με τη χρήση ρομποτικών βραχιόνων ελεγχόμενων από υπολογιστή που συγκρατούν το λαπαροσκόπιο και υπακούουν πιστά στις εντολές του χειρουργού, προσφέρθηκε ικανοποιητική λύση στο πρόβλημα διαχείρισης της λαπαροενδοσκοπικής εικόνας, καθώς η λαπαροσκοπική κάμερα προσαρμόζεται πάνω στους βραχίονες και κινείται από αυτούς ανάλογα με τις οδηγίες που παρέχει ο χειρουργός.

Ανάλογα με το βαθμό εμπλοκής του τελευταίου στην επέμβαση, τα σύγχρονα ρομποτικά χειρουργικά συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

- **Συστήματα ελεγχόμενα από επόπτη (Supervisory-controlled systems)**

Η χειρουργική διαδικασία σχεδιάζεται από πριν καθώς ο χειρουργός προσδιορίζει εκ των προτέρων τις κινήσεις τις οποίες καλείται να εκτελέσει το ρομπότ. Το τελευταίο εκτελεί αυτόματα ακριβώς τις ίδιες κινήσεις κατά τη διάρκεια της επέμβασης, ενώ ο ρόλος του χειρουργού περιορίζεται στη γενικότερη επίβλεψη της επέμβασης για την αποφυγή σφαλμάτων.

- **Συστήματα τηλεχειρουργικής (Telesurgical systems)**

Οι επεμβάσεις εκτελούνται από απόσταση με τη βοήθεια των εξελιγμένων αισθητήρων του συστήματος και την παροχή τρισδιάστατης εικόνας από το χειρουργικό πεδίο σε πραγματικό χρόνο. Με τη βοήθεια ενός χειριστηρίου ελέγχου με ανάδραση δύναμης, ο χειρουργός εκτελεί κινήσεις τις οποίες αντιγράφει και αναπαράγει με απόλυτη ακρίβεια το ρομποτικό σύστημα. Αυτή η υβριδική τεχνολογία έχει ήδη αρκετές πρακτικές εφαρμογές, με κυριότερο εκπρόσωπο το χειρουργικό σύστημα da Vinci, στο οποίο θα αναφερθούμε εκτενώς στη συνέχεια.

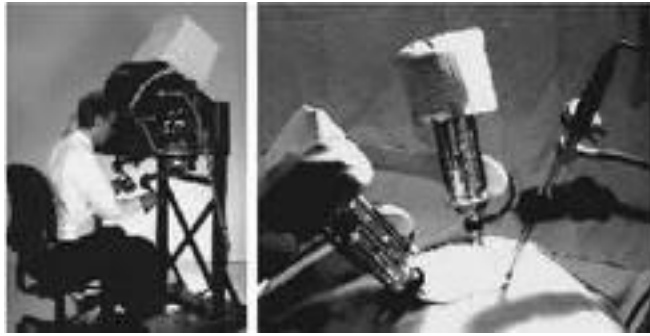
- **Συστήματα μοιραζόμενου ελέγχου (Shared-control systems)**

Η συγκεκριμένη τεχνολογία απαιτεί τη μεγαλύτερη συμμετοχή του χειρουργού. Η επέμβαση εκτελείται κατά κύριο λόγο από τον χειρουργό, ενώ ο ρόλος του ρομπότ περιορίζεται στην παροχή βοήθειας έτσι ώστε οι κινήσεις του χειρουργού να γίνονται πιο ακριβείς. Τα συστήματα αυτά βρίσκονται σε προχωρημένο στάδιο εξέλιξης.

Σε όλες βέβαια τις παραπάνω κατηγορίες, φαίνεται ότι όπως ήδη αναφέραμε, η φύση της σχέσης μεταξύ χειρουργού και ρομπότ είναι σχέση αφέντη-σκλάβου (master-slave), και όσο και να υποβαθμιστεί ο ρόλος του χειρουργού, δεν αντικαθίσταται από το ρομπότ, αλλά λαμβάνει βοήθεια από αυτό. [6][7]

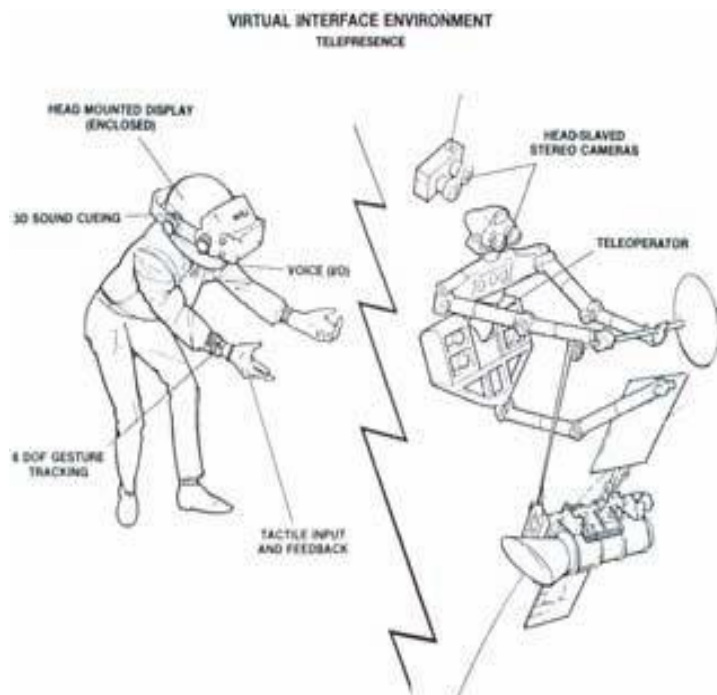
2.5 Ιστορική αναδρομή

Η ιστορία της ρομποτικής χειρουργικής αρχίζει ουσιαστικά με τη χρήση του Puma 560, ενός ρομπότ που χρησιμοποιήθηκε από τον Kwoh (1985) για την καθοδήγηση μίας βελόνας με μεγάλη ακρίβεια κατά τη διάρκεια νευροχειρουργικής βιοψίας με καθοδήγηση αξονικής τομογραφίας. [3]



Εικόνα 2.5-1 : Ρομπότ Puma 560

Πολλές από τις πρώτες ιδέες όμως γύρω από την εφαρμογή ρομποτικής τεχνολογίας στο πεδίο των χειρουργικών επεμβάσεων ανήκουν στον Dr. Scott Fisher, ερευνητή στο κέντρο ερευνών Ames της NASA, και τον Joseph Rosen, πλαστικό χειρουργό από το πανεπιστήμιο Stanford, από τα μέσα έως τα τέλη της δεκαετίας του '80. Την εποχή εκείνη, η ομάδα του κέντρου ερευνών Ames εργαζόταν πάνω σε εφαρμογές της εικονικής πραγματικότητας υπό την καθοδήγηση των Dr. Michael McGreevy και Steve Ellis. Οι Fisher και Rosen υιοθέτησαν τις νέες αυτές ιδέες της εικονικής πραγματικότητας με την εφαρμογή τους στη χειρουργική ρομποτική. Ανέπτυξαν έτσι τη λεγόμενη χειρουργική επέμβαση με τηλεπαρουσία (telepresence surgery). [8]



Εικόνα 2.5-2: Το σύστημα τηλεπαρουσίας των Rosen και Fischer

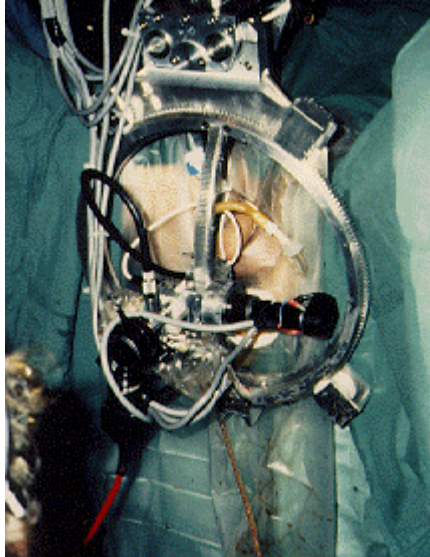
Εξαιτίας όμως της έλλειψης τεχνογνωσίας στον τομέα της ρομποτικής από την ερευνητική ομάδα του Ames, οι Fisher και Rosen απευθύνθηκαν στον Dr. Phil Green, επικεφαλή του τμήματος εμβιομηχανικής στο Ινστιτούτο Ερευνών του Stanford (Stanford Research Institute – SRI), ο οποίος εργαζόταν στον αναδυόμενο τομέα της εικονικής πραγματικότητας. Με την εισαγωγή των κλινικών δεδομένων από τον Rosen, αναπτύχθηκε ένας ιδιαίτερα επιδέξιος τηλεχειριστής (telemanipulator) με σκοπό την παροχή βοήθειας σε χειρουργικές επεμβάσεις αναστόμωσης αγγείων και νεύρων του χεριού. Ο σχεδιασμός του interface ήταν τέτοιος που έδινε στο χειρουργό την αίσθηση ότι δρούσε άμεσα πάνω σε ένα αντικείμενο το οποίο βρισκόταν μπροστά στα μάτια του, αλλά το οποίο στην πραγματικότητα βρισκόταν στην άλλη πλευρά του δωματίου. [8]

Το χρονικό διάστημα από το 1988 έως το 1989, παράλληλα με τα πρώτα βήματα της ρομποτικής χειρουργικής, αναπτυσσόταν η επαναστατική μέθοδος της λαπαροσκοπικής χολοκυστεκτομής, που αποτελούσε μία καινούργια προσέγγιση στην καθιερωμένη για πάνω από έναν αιώνα μέθοδο για τη θεραπεία της χολολιθίασης. Το τεχνολογικό επίτευγμα που απελευθέρωσε τη λαπαροσκόπηση από τα χέρια του ενός και επέτρεψε τη λειτουργία της χειρουργικής ομάδας ως σύνολο ήταν η εφεύρεση της βιντεοκάμερας λίγο νωρίτερα, το 1986. Έναν χρόνο αργότερα, ο Ph. Mouret ολοκληρώνει την πρώτη λαπαροσκοπική χολοκυστεκτομή κατά τη διάρκεια γυναικολογικής επέμβασης. Η επίδραση της λαπαροσκόπησης στα κύρια ρεύματα της χειρουργικής κοινότητας ήταν σημαντική, γεγονός που οδήγησε σε έκρηξη των επεμβάσεων χολοκυστεκτομής αλλά και άλλων επεμβάσεων με τη μέθοδο της λαπαροσκοπικής χειρουργικής σε όλη τη Δυτική Ευρώπη και την Αμερική. [9]

Στις αρχές της δεκαετίας του '90, η συνεργασία των Dr. Har Paul, DVM και του ορθοπεδικού χειρουργού William Barger, MD με τον Russell Taylor, ερευνητή του κέντρου ερευνών T. J. Watson της IBM, οδήγησε στην ανάπτυξη ενός ρομποτικού συστήματος, βασισμένου στο βραχίονα Puma, για τη χειρουργική επέμβαση αντικατάστασης ισχίων. Η ρομποτική συσκευή που αναπτύχθηκε ονομάστηκε Robodoc, παρείχε μεγαλύτερη ακρίβεια από την αντίστοιχη χειροκίνητη συσκευή και μετά τις κλινικές δοκιμές έγινε το πρώτο εμπορικό προϊόν.

Την ίδια χρονική περίοδο στην Ευρώπη, δύο διαφορετικές ομάδες προχωρούσαν στην ανάπτυξη των δικών τους πρωτότυπων χειρουργικών ρομποτικών συστημάτων. Ο ουρολόγος Sir John Wickham, MD και ο Brian Davies, PhD του Guy's Hospital του Λονδίνου σχεδίασαν ένα

σύστημα παρόμοιο με το Puma και το Robodoc, με ονομασία Probot για την παροχή βοήθειας σε επεμβάσεις διουρηθρικής προστατεκτομής. [3][8]



Εικόνα 2.5-3 : Σύστημα Probot

Μία δεύτερη προσπάθεια στην Ευρώπη εκείνη την περίοδο προήλθε από τη συνεργασία του Hermann Rinnsland, PhD από το Κέντρο Ερευνών της Καρlsruύης (Forschungszentrum Karlsruhe) με τον Gerhard Buess, MD του πανεπιστημίου του Tübingen στη Γερμανία. Η προσπάθειά τους κατέληξε στην ανάπτυξη του συστήματος ARTEMIS (Advanced Robot and Telem manipulator System for Minimally Invasive Surgery), ενός συστήματος παρόμοιου με εκείνο των Rosen, Fischer και Green. [8]

Τα επόμενα έτη, και έως το 1999, οι στρατιωτικοί της Υπηρεσίας Προηγμένων Προγραμμάτων Έρευνας για την Άμυνα των Η.Π.Α. (Defense Advanced Research Projects Agency - DARPA) άρχισαν να επιδεικνύουν μεγάλο ενδιαφέρον για το σύστημα χειρουργικής με τηλεπαρουσία των Fisher και Rosen. Ένας από τους πρωταρχικούς στόχους ήταν να εφαρμοστεί η μέθοδος των Fisher και Rosen στο πεδίο της μάχης, δηλαδή η δυνατότητα παροχής χειρουργικής φροντίδας σε έναν βαριά πληγωμένο στρατιώτη πριν καν ακόμη αυτός μεταφερθεί πίσω στην πλησιέστερη κινητή χειρουργική μονάδα (Mobile Advanced Surgical Hospital – MASH). [8]

Οι ρομποτικοί βραχίονες θα τοποθετούνταν πάνω σε ένα κινούμενο όχημα με την ονομασία MEDFAST (Medical Forward Advanced Surgical Treatment). Εάν ένας στρατιώτης πληγωνόταν βαριά ο βοηθός ιατρός θα τον τοποθετούσε στο MEDFAST και ο χειρουργός θα μπορούσε από την τηλεχειρουργική μονάδα πίσω στο MASH να προβεί στις κατάλληλες χειρουργικές ενέργειες ώστε να σταματήσει την αιμορραγία του, πριν χαθεί έτσι πολύτιμος χρόνος κατά τη μεταφορά του στρατιώτη εκεί.[8]

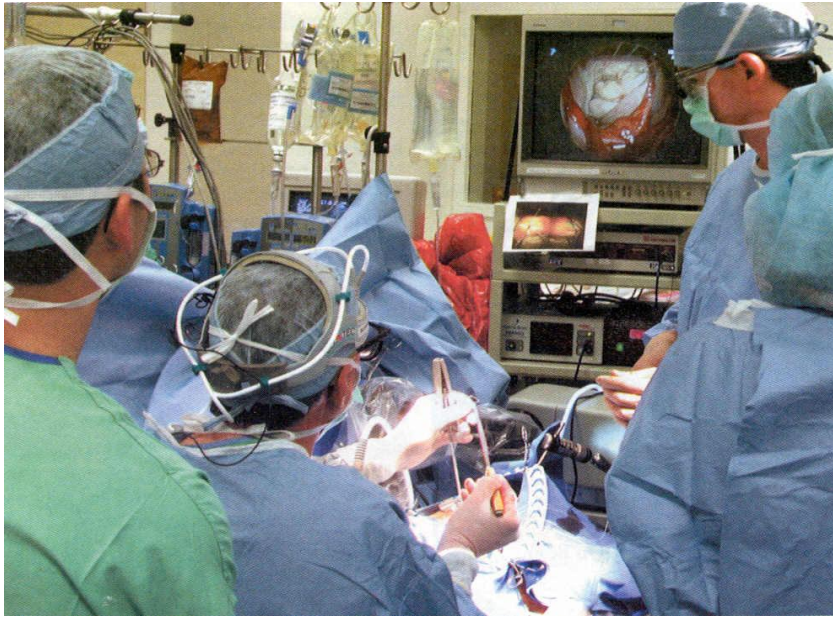
Μία στρατιωτική δοκιμή που διεξήχθη το 1996 υπό τη διεύθυνση του SRI απέδειξε ότι μία τέτοιου είδους επέμβαση θα μπορούσε να εκτελεστεί με επιτυχία ακόμη και σε απόσταση πέντε χιλιομέτρων μακριά, με τη βοήθεια μίας μικροκυματικής ζεύξης μεταξύ της μονάδας MASH και του MEDFAST. Ωστόσο, αν και η επίδειξη στέφθηκε με απόλυτη επιτυχία, το σύστημα δεν έχει τεθεί ακόμα σε εφαρμογή κυρίως λόγω της μεταμόρφωσης του πεδίου μάχης της δεκαετίας του '90 από συμβατικό, ανοικτό πεδίο σε πεδίο περιορισμένης έκτασης (π.χ. στα όρια μιας αστικής συνοικίας), το οποίο δεν ταιριάζει στη φιλοσοφία του MEDFAST.[8]

Ένας σημαντικός αριθμός από άλλες ρομποτικές χειρουργικές εφαρμογές αναπτυσσόταν την ίδια περίοδο από την DARPA για την εξεύρεση λύσεων σε δύσκολα τεχνικά θέματα, όπως ήταν για παράδειγμα το πρόβλημα της καθυστέρησης του ηλεκτρονικού σήματος ή η αίσθηση της αφής. Με την πάροδο του χρόνου εμφανίστηκαν διάφορες προτάσεις για τη βελτίωση της καθυστέρησης του χρόνου ανατροφοδότησης. Η ομάδα των Kenneth Salisbury, PhD, Mark Raibert, PhD και Robert Playter, PhD, ερευνητών στο εργαστήριο ρομποτικής και τεχνητής νοημοσύνης του MIT, εργαζόταν υπό την καθοδήγηση του Rodney Brooks, PhD πάνω σε ένα σύστημα απτικής (αίσθησης της αφής). Η συλλογική αυτή προσπάθεια κατέληξε στην ανάπτυξη ενός ακριβούς συστήματος ανατροφοδότησης δύναμης (force feedback) που κυκλοφόρησε με την εμπορική ονομασία The Phantom και το οποίο καθιερώθηκε τελικά ως βιομηχανικό πρότυπο για την παροχή αίσθησης της αφής σε εικονικά περιβάλλοντα. [3]



Εικόνα 2.5-4 : Παροχή ανάδρασης δύναμης με τη βοήθεια του Phantom

Σε επίπεδο όμως αξιοποίησης σε εμπορικό επίπεδο των διάφορων συστημάτων ρομποτικής χειρουργικής, επικρατούσε κυρίως το σύστημα Robodoc, όπως προαναφέραμε, για επεμβάσεις αντικατάστασης ισχίων. Ο Yulun Wang, PhD, αρχικά με χρηματοδότηση πόρων από τη DARPA, ξεκίνησε την ανάπτυξη του AESOP (Automated Endoscopic System for Optimal Positioning) στην τότε νεοϊδρυθείσα εταιρεία του, την Computer Motion Inc. (Καλιφόρνια). Το συγκεκριμένο σύστημα ήταν ένας ρομποτικός βραχίονας που ελεγχόταν μέσω φωνητικών εντολών του χειρουργού για τον χειρισμό της ενδοσκοπικής κάμερας, κα έλαβε την έγκριση της Διεύθυνσης Τροφίμων και Φαρμάκων των Η.Π.Α. (Food and Drug Administration – FDA). Ενώ το σύστημα AESOP γινόταν ολοένα και πιο αποδεκτό από τη χειρουργική κοινότητα, με τις πωλήσεις του να ανεβαίνουν κατακόρυφα, ο Fredrick Moll, MD προέβη στην αγορά των πνευματικών δικαιωμάτων του συστήματος Green Telepresence Surgery του SRI και μαζί με τους Robert Younge και John Freund, MD ίδρυσε στην Καλιφόρνια την εταιρεία Intuitive Surgical Inc.



Εικόνα 2.5-5: Σύστημα AESOP, ο προάγγελος του da Vinci

Αφού το σύστημα AESOP υποβλήθηκε σε προσεκτικό και εκτεταμένο επανασχεδιασμό, κυκλοφόρησε με την εμπορική ονομασία da Vinci Surgical System. Το σύστημα da Vinci χρησιμοποιεί στερεοσκοπικές εικόνες οι οποίες προβάλλονται ακριβώς πάνω από τα χέρια του χειρουργού, δίνοντάς του έτσι την εντύπωση ότι βρίσκεται επάνω ακριβώς από τον ασθενή. Το da Vinci έγινε το πρώτο ρομποτικό χειρουργικό σύστημα που μπορούσε να χρησιμοποιήσει εργαλεία με έναν επιπρόσθετο βαθμό ελευθερίας. Το σύστημα αυτό έχει λάβει την έγκριση της FDA από το 1997 ενώ η πρώτη χειρουργική επέμβαση με αυτό πραγματοποιήθηκε τον ίδιο χρόνο στις Βρυξέλλες από τους Jacques Himpens, MD και Guy Cardier, MD.

Μέσα σε έναν χρόνο η εταιρεία Computer Motion Inc. κυκλοφόρησε με τη σειρά της το ρομποτικό σύστημα Zeus. Το σύστημα αυτό είναι παρόμοιο με το da Vinci στο ότι ο χειρουργός χρησιμοποιεί ένα σύστημα τηλεχειριστηρίων για την εκτέλεση της επέμβασης τα οποία βρίσκονται σε έναν σταθμό εργασίας. Επιπλέον, και τα δύο συστήματα διακρίνονται για την εργονομική τους σχεδίαση. Τα όργανα ελέγχου βρίσκονται σε βολική θέση μπροστά από την καρέκλα του χειρουργού ενώ οι λαβές των οργάνων σε τέτοια θέση άξονα ώστε να επιτυγχάνεται ο καλύτερος συντονισμός μεταξύ των χεριών και των ματιών αυτού.[8][9]



Εικόνα 2.5-6 : Σύστημα Zeus

2.6 Πλεονεκτήματα της Ρομποτικής Χειρουργικής

Η ανάπτυξη της ρομποτικής χειρουργικής αλλάζει τα μέχρι σήμερα δεδομένα και μετατρέπει τις δύσκολες περιπτώσεις ανοιχτών επεμβάσεων σε εγχειρήσεις ρουτίνας. Αποτελεί σαφέστατα το μέλλον της χειρουργικής καθώς δίνει λύσεις στους περιορισμούς της λαπαροσκοπικής μεθόδου, προσφέροντας παράλληλα ασύγκριτα πλεονεκτήματα στους χειρουργούς[10]:

- Παρέχει στο χειρουργό μεγαλύτερη άνεση κατά τη διάρκεια της επέμβασης. Σε αντίθεση με τη συνηθισμένη χειρουργική πρακτική, η ρομποτική χειρουργική επιτρέπει στο χειρουργό να πραγματοποιεί τις επεμβάσεις καθιστός, μέσα σε ένα προσεκτικά σχεδιασμένο και εργονομικά άριστο περιβάλλον. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η φυσική κούραση του, το οποίο αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις δύσκολων και πολύωρων επεμβάσεων.

- Του εξασφαλίζει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί δύσκολους χειρουργικούς χειρισμούς.
- Τα χειρουργικά εργαλεία των ρομποτικών βραχιόνων μπορούν να εκτελέσουν όλες τις κινήσεις που πραγματοποιεί το ανθρώπινο χέρι (επτά βαθμοί ελευθερίας στην κίνηση) με μεγαλύτερη δεξιότητα και ακρίβεια, ενώ περιστρέφονται κατά σχεδόν 360° μέσα στο χειρουργικό πεδίο.

- Εξασφαλίζει μεγαλύτερη ακρίβεια στις χειρουργικές κινήσεις. Καθώς οι χειρισμοί του χειρουργού στην κονσόλα μετατρέπονται σε κινήσεις των ρομποτικών βραχιόνων μέσω κατάλληλων ηλεκτρονικών και λογισμικών φίλτρων, ελαχιστοποιείται ο φυσιολογικό τρόμος των χεριών με αποτέλεσμα μία πρωτοφανή χειρουργική δεξιότητα. Τα σύγχρονα ρομποτικά χειρουργικά συστήματα κλιμακώνουν την κίνηση, έτσι ώστε οι απότομες κινήσεις στις χειρολαβές ελέγχου να μετατρέπονται σε μικρο-κινήσεις μέσα στο χειρουργικό πεδίο.

- Επιτρέπει στο χειρουργό να έχει μία έγχρωμη, τρισδιάστατη εικόνα του χειρουργικού πεδίου σε πολύ μεγάλη μεγέθυνση, ακόμη και μεγαλύτερη από 15 φορές, δίνοντάς του έτσι την αίσθηση ότι τα μάτια και τα χέρια του βρίσκονται πάνω και μέσα στον ασθενή. Με τον τρόπο αυτό ο χειρουργός αποκτά αντίληψη του βάθους του χειρουργικού πεδίου, ενώ συντονίζει πολύ καλύτερα τα μάτια του και τα χέρια του.

- Ο χειρουργός βλέπει τώρα άριστα και σε σημεία στα οποία μέχρι σήμερα δεν είχε καμία οπτική πρόσβαση. Έτσι έχει τη δυνατότητα να χειρουργεί σε απρόσιτα σημεία με απόλυτη ασφάλεια και ακρίβεια (π.χ. εκτέλεση μικροαναστομών).

- Δίνει τη δυνατότητα στο χειρουργό να προετοιμάσει την επέμβαση στον ηλεκτρονικό υπολογιστή (preoperation planning) χρησιμοποιώντας τις εικόνες των εσωτερικών οργάνων του ασθενή, όπως αυτές προκύπτουν από τις εξετάσεις του (π.χ. τομογραφίες). Με τον τρόπο αυτό ο χειρουργός μπορεί κατά τη διάρκεια της επέμβασης να ανακαλέσει και να συμβουλευτεί χρήσιμες εικόνες της παθολογίας του ασθενούς στην οθόνη του.

- Ο χειρουργός εξακολουθεί να έχει τον πλήρη έλεγχο της επέμβασης, αφού το ρομποτικό σύστημα δρα συμπληρωματικά, ως συνεργάτης του.

- Η μέθοδος της ρομποτικής χειρουργικής απαιτεί σε επίπεδο εκπαίδευσης, λιγότερο χρόνο εκμάθησης από την αντίστοιχη λαπαροσκοπική μέθοδο.

Εκτός όμως από τα οφέλη που προκύπτουν για τους χειρουργούς, η ρομποτική χειρουργική προσφέρει σημαντικά οφέλη και για τους ίδιους τους ασθενείς έναντι των συμβατικών μεθόδων, όντας μία ελάχιστα επεμβατική και ελάχιστα τραυματική μέθοδος, εξαιτίας κυρίως της ακρίβειας με την οποία γίνονται οι κινήσεις του χειρουργού.[10]

- Ο ασθενής επιβαρύνεται με το ελάχιστο δυνατό τραύμα, καθώς τα όργανα εισέρχονται στο σώμα του ασθενούς μέσω μικροσκοπικών τομών.

- Λόγω των μικρών τομών, εξασφαλίζεται ελάχιστη απώλεια αίματος και μεγάλη ελάττωση του μετεγχειρητικού πόνου και της δυσφορίας του ασθενούς.

- Επιτρέπει μικρότερη διάρκεια αναισθησίας, καθώς οι επεμβάσεις είναι σημαντικά πιο σύντομες.
- Ελαχιστοποιεί την πιθανότητα ενδοεγχειρητικών και μετεγχειρητικών επιπλοκών που έχουν σχέση με το τραύμα (διαπύηση, χρόνιο άλγος, μετεγχειρητικές λοιμώξεις κλπ.) και των μετεγχειρητικών συμφύσεων και των συνεπειών τους.
 - Εξασφαλίζει λιγότερες αναπνευστικές και καρδιαγγειακές επιπλοκές.
 - Επιτρέπει την ταχύτερη ανάρρωση και επάνοδο του ασθενούς στις καθημερινές του δραστηριότητες.
 - Μειώνει σημαντικά το χρόνο παραμονής στο νοσοκομείο και κατ' επέκταση το κόστος νοσηλείας.
 - Προσφέρει άρτιο αισθητικό αποτέλεσμα.[10]

2.7 Μειονεκτήματα της ρομποτικής χειρουργικής

Παρόλο που η τεχνολογία της ρομποτικής χειρουργικής αναπτύσσεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια, υπάρχουν κάποιοι σημαντικοί περιορισμοί που τη χαρακτηρίζουν, οι οποίοι δεν έχουν ακόμα ξεπεραστεί. [11]

- Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα της ρομποτικής χειρουργικής είναι το κόστος της. Το αυξημένο κόστος των ρομποτικών επεμβάσεων σε σχέση με το αντίστοιχο των συμβατικών μεθόδων οφείλεται κυρίως στο αρχικό κόστος αγοράς των ρομποτικών συστημάτων και την ετήσια συντήρησή τους.
- Τόσο το σώμα του ρομπότ με τους βραχίονές του αλλά και η κεντρική κονσόλα του χειρουργού καταλαμβάνουν σημαντικό χώρο μέσα στη χειρουργική αίθουσα. Οι χειρουργοί δεν αισθάνονται ιδιαίτερα άνετα όταν εργάζονται δίπλα σε ρομποτικά συστήματα που ξεπερνούν συνήθως τα δύο μέτρα σε ύψος και ζυγίζουν αρκετές δεκάδες κιλά. Τα μεγαλύτερα σε μέγεθος ρομπότ όμως εξασκούν συνήθως και μεγαλύτερες δυνάμεις, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό σε περίπτωση λανθασμένης ενέργειας.
- Από άποψη αντίληψης και ελέγχου τα ρομπότ ελέγχονται από ηλεκτρονικούς υπολογιστές, με συνέπεια να μοιράζονται πολλές από τις αδυναμίες αυτών, ιδιαίτερα σε θέματα που αφορούν αυτόνομες λειτουργίες. Ακολουθούν κυριολεκτικά οδηγίες και αυτό τα καθιστά εντελώς ανίκανα στο να ενσωματώνουν διαφορετικές πηγές πληροφοριών και να επιδεικνύουν ανεπτυγμένη

συλλογιστική κρίση.

- Η έλλειψη συμβατού εξοπλισμού συγκαταλέγεται επίσης στα μειονεκτήματα της ρομποτικής χειρουργικής. Η έλλειψη κάποιων συμβατών με το ρομποτικό σύστημα χειρουργικών οργάνων αυξάνει την εξάρτηση από βοηθητικό προσωπικό δίπλα στο χειρουργικό τραπέζι. Ωστόσο αυτό φαίνεται να αποτελεί το λιγότερο σημαντικό μειονέκτημα καθώς νέες τεχνολογίες αναμένεται να δώσουν σύντομα λύσεις στο μέλλον.

- Ένα ακόμη μεγάλο πρόβλημα για τον χειρουργό αποτελεί η έλλειψη αίσθησης της αφής (tactile feedback). Η απτική (haptics), ο τεχνολογικός εκείνος κλάδος δηλαδή ο οποίος ασχολείται με την ανάπτυξη συστημάτων ικανών να “αναπαράγουν” την αίσθηση των ανθρώπινων ιστών μέσω της ανάδρασης αφής, υπόσχεται λύσεις οι οποίες προς το παρόν παραμένουν σε πειραματικό μόνο στάδιο.[11]

Είναι γεγονός πάντως ότι η ρομποτική χειρουργική αποτελεί μία νέα τεχνολογία της οποίας η αποτελεσματικότητα δεν έχει διασαφηνιστεί πλήρως. Τα περισσότερα από τα μειονεκτήματά της αναμένονται να ξεπεραστούν με την πάροδο του χρόνου λόγω των μελλοντικών επανασχεδιασμών και των τεχνολογικών βελτιώσεων που θα υποστούν αναπόφευκτα τα ρομποτικά χειρουργικά συστήματα. Μόνο ο χρόνος μένει για να δείξει αν η χρήση των συστημάτων αυτών θα υπερκεράσει το σημερινό υψηλό κόστος απόκτησης και συντήρησής τους.[10]

2.8 Εφαρμογές της ρομποτικής χειρουργικής

Η ρομποτική τεχνολογία έχει βρει μέχρι σήμερα εφαρμογή σε πολλές ειδικότητες της χειρουργικής, καλύπτοντας την πλειοψηφία των παθολογικών περιπτώσεων που πλήττουν τα ανθρώπινα όργανα. [4][8] Οι πιο συνηθισμένες λαπαροσκοπικές επεμβάσεις που γίνονται στις μέρες μας ρομποτικά, συνοψίζονται παρακάτω ταξινομημένες ανά χειρουργική ειδικότητα:

- **Γενική Χειρουργική**

Χολοκυστεκτομές, σπληνεκτομές, ηπατεκτομές, παγκρεατεκτομές, δεξιές και αριστερές κολεκτομές, σιγμοειδεκτομές, βουβωνοκήλες, κοιλιοκήλες, σκωληκοειδεκτομές, κοιλιοπερινεϊκές εκτομές, οισοφαγεκτομές, ολικές και μερικές γαστρεκτομές, διόρθωση διαφραγματοκήλης, αποκατάσταση της γαστροοισοφαγικής παλινδρόμησης (θολοπλαστική κατά Nissen), επεμβάσεις

κατά της νοσογόνου παχυσαρκίας (βαριατρική), κ.ά.

- **Ουρολογία**

Ριζικές και μερικές νεφρεκτομές, νεφρουρητηρεκτομές, ριζικές προστατεκτομές, πυελοπλαστικές, αποκατάσταση κισσοσκήλης, αφαίρεση κύστεων νεφρού, αφαίρεση λεμφαδένων και λίθων από τον ουρητήρα κ.ά

- **Γυναικολογία**

Μερικές και ολικές υστερεκτομές, αφαίρεση ινομυμάτων, αφαίρεση κακοήθων όγκων μήτρας και τραχήλου, σαλπινγγοθηκεκτομές, εγχειρήσεις μετάθεσης ωοθηκών και αναστόμωσης των σαλπίγγων, ουρογυναικολογικές επεμβάσεις, λεμφαδενικός καθαρισμός κ.ά

- **Καρδιοχειρουργική**

Αποκατάσταση μιτροειδούς βαλβίδας, αορτοστεφανιαία παράκαμψη (bypass), καρδιακός επανασυγχρονισμός, αποκατάσταση μεσοκολπικής επικοινωνίας, περικαρδιεκτομές, βαλβιδοπλαστικές.

- **Θωρακοχειρουργική**

Πνευμονεκτομές για πρωτοπαθές καρκίνωμα του πνεύμονα, λοβεκτομές, αφαίρεση θύμου αδένα.

- **Αγγειοχειρουργική**

Αποκατάσταση ανευρύσματος κοιλιακής αορτής.

- **Παιδιατρική**

Επεμβάσεις αποκατάστασης της γαστροοισοφαγικής παλινδρόμησης, χολοκυστεκτομές, σαλπινγγοθηκεκτομές, πυελοπλαστικές για την απόφραξη της ουρητηροπυελικής συμβολής σε παιδιά, παιδιατρικές καρδιοχειρουργικές επεμβάσεις όπως η αποκατάσταση βατού αρτηριακού πόρου κ.ά

- **Ορθοπαιδική**

Ολικές αρθροπλαστικές ισχύων, ολικές αντικαταστάσεις γονάτων.

- **Ογκολογία**

Αφαίρεση καρκίνου στο κόλον, όγκων του οισοφάγου, γαστρικού καρκίνου.

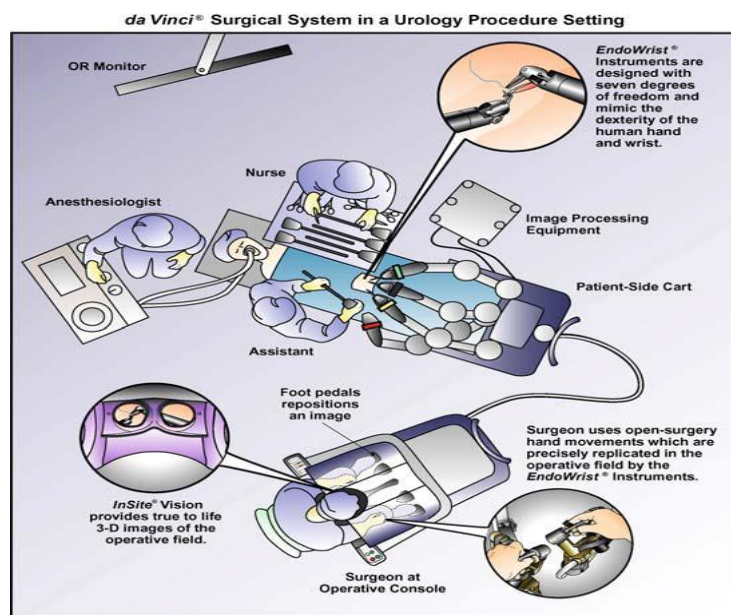
- **Νευροχειρουργική**

Νευροχειρουργικές επεμβάσεις αφαίρεσης ενδοκρανιακών όγκων, αποστημάτων και κύστεων, κρανιακή ακτινοθεραπεία, επεμβάσεις για την αντιμετώπιση της υδροκεφαλίας και της επιληψίας κ.ά. [4][8]

2.9 Το σύστημα da Vinci

Το 1995 η εταιρεία Intuitive Surgical σχηματίστηκε για να αναπτύξει την απαραίτητη τεχνολογία ώστε η χειρουργική ελάχιστης προσπέλασης (MIS) να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως και όχι μόνο για στρατιωτικούς σκοπούς. Χρησιμοποιώντας τεχνολογία που αναπτύχθηκε από το SRI, IBM (Yorktown Heights, NY) και το MIT (Cambridge, MA) οι μηχανικοί της Intuitive ανέπτυξαν ρομποτικούς βραχίονες και εργαλεία ώστε να πραγματοποιούνται πολύπλοκες επανορθωτικές εγχειρήσεις δια μέσου μικρών τομών. [12] Την ίδια στιγμή η ομάδα της Intuitive σχεδίαζε μια βίντεο κάμερα και ένα ενδοσκόπιο που να παρέχει στον χρήστη τρισδιάστατη εικόνα του ασθενή.

Με πάνω από 210 συσκευές σε χρήση στις ΗΠΑ, στην Ευρώπη και την Ιαπωνία, η Intuitive Surgical στην οποία ανήκει το χειρουργικό σύστημα da Vinci είναι μια πρωτοπόρα εταιρεία στο πεδίο της ψηφιακής χειρουργικής. Το da Vinci εγκρίθηκε τον Ιούλιο του 2000 για να εκτελεί προηγμένες χειρουργικές τεχνικές όπως να κάνει τομές και ραφές. Είναι το πρώτο λειτουργικό χειρουργικό ρομποτικό σύστημα που εγκρίθηκε από το FDA, δίνοντας του πλεονέκτημα έναντι των ανταγωνιστών του. Αν και η Intuitive Surgical χρειάστηκε να υπερνικήσει πολλά εμπόδια έτσι ώστε να κυριαρχήσει στο ψηφιακό χειρουργικό πεδίο, είναι πλέον μια επιχείρηση πολλών εκατομμυρίων δολαρίων που συνεχίζει να αναπτύσσεται. [13]



Εικόνα 2.9-1: Το χειρουργικό σύστημα da Vinci

2.9.1 Επισκόπηση του συστήματος:

Χρησιμοποιώντας την πιο σύγχρονη τεχνολογία που είναι διαθέσιμη σήμερα, το χειρουργικό σύστημα da Vinci προσφέρει στους χειρουργούς την δυνατότητα να εκτελούν ακριβείς και πολύπλοκες εγχειρήσεις μέσω μερικών οπών (1cm) με αυξημένη όραση, ακρίβεια, επιδεξιότητα και έλεγχο. Το χειρουργικό σύστημα da Vinci αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- Η κονσόλα του χειρουργού (surgeon' s console)
- Το καρότσι δίπλα στον ασθενή (patient-side cart)
- Τρισδιάστατο σύστημα απεικόνισης
- Όργανα Endowrist

Μέσω του χειρουργικού συστήματος da Vinci οι κινήσεις του χειρουργού αναγνωρίζονται, φιλτράρονται και μεταφράζονται σε κινήσεις των οργάνων Endowrist, που εργάζονται μέσα στο σώμα του ασθενούς. [14]

2.9.2 Η κονσόλα του χειρουργού (surgeon's console)

Χρησιμοποιώντας το χειρουργικό σύστημα da Vinci ο χειρουργός κάθεται άνετα σε μια κονσόλα απομακρυσμένος από τον ασθενή παρακολουθώντας μια τρισδιάστατη εικόνα υψηλής ευκρίνειας μέσα από το σώμα του ασθενούς. Η κονσόλα του χειρουργού περιλαμβάνει τον κύριο υπολογιστή, ειδικούς μοχλούς, ποδοδιακόπτες και μία κονσόλα ελέγχου.

Ο χειρουργός χειρίζεται με τα δάχτυλά του (τους δείκτες και τους αντίχειρες) τους ειδικούς μοχλούς που βρίσκονται κάτω από την οθόνη, ενώ τα χέρια του βρίσκονται τοποθετημένα σε φυσιολογική θέση σε σχέση με τα μάτια του. Οι μοχλοί αυτοί είναι συνδεδεμένοι σειριακά μεταξύ τους και λειτουργούν σαν υψηλής ανάλυσης συσκευές εισόδου, ερμηνεύοντας κάθε χρονική στιγμή την θέση, τον προσανατολισμό και τις εντολές που δίνει ο χειρουργός. Καθώς η επέμβαση προχωράει οι κινήσεις του χειρουργού δειγματοληπτούνται από τον κύριο υπολογιστή περισσότερες από 1300 φορές ανά δευτερόλεπτο.[12] Η ευθυγράμμιση των κινήσεων του χειρουργού στις κινήσεις των χειρουργικών εργαλείων είναι τόσο οπτική όσο και χωρική. Το σύστημα προεκβάλλει την εικόνα της χειρουργικής επέμβασης πάνω από τα χέρια του

χειρουργού αποκαθιστώντας τον συντονισμό χεριού-ματιού και παρέχοντας μια φυσική αντιστοιχία στις κινήσεις. Ο ελεγκτής τοποθετεί την χωρική κίνηση των εργαλείων στο πλαίσιο αναφοράς της κάμερας έτσι ώστε ο χειρουργός να νιώθει τα χέρια του μέσα στο σώμα του ασθενούς.[15] Επίσης, λειτουργούν και σαν οθόνες αφής μεταδίδοντας δυνάμεις και ροπές στον χειρουργό. Σε αυτό το στάδιο η ανάδραση αφής που λαμβάνει ο χειρουργός περιορίζεται προς το παρόν στην αλληλεπίδραση με άκαμπτες δομές, όπως είναι η σύγκρουση εργαλείου με εργαλείο, και όχι με μαλακούς ιστούς. Αυτό απαιτεί από τον χειρουργό να βασίζεται στην οπτική ανατροφοδότηση, κυρίως. Οι ελεγκτές των οργάνων επιτρέπουν στον χειρουργό να κινείται εντός του χώρου εργασίας ο οποίος έχει όγκο ένα κυβικό πόδι.

Η διεπιφάνεια του χρήστη στην κονσόλα του χειρουργού αποτελείται ακόμη από ποδοδιακόπτες και κουμπιά που επιτρέπουν στον χειρουργό να ελέγχει το σύστημα καθ' όλη τη διάρκεια της επέμβασης. Υπάρχουν, γενικά όλοι οι διακόπτες που αφορούν τις επιλογές λειτουργίας του συστήματος και την αρχικοποίηση του. Ορισμένες από τις εργασίες που επιτελούνται μέσω της διεπιφάνειας είναι ο φυσικός έλεγχος του ενδοσκοπίου από την κονσόλα του χειρουργού, η επανατοποθέτηση των χειρουργικών οργάνων στον χώρο εργασίας και η εστίαση του ενδοσκοπίου.

Χάρη στην τεχνολογία Intuitive Masters, το σύστημα έχει την δυνατότητα να φιλτράρει τον φυσικό τρόπο των χεριών του χειρουργού και να κλιμακώνει ανάλογα τις κινήσεις του. Υπάρχουν τρεις δυνατές επιλογές κλιμάκωσης της κίνησης στο χειρουργικό σύστημα da Vinci η 1:1, η 1:3 και η 1:5. [14] Οι επιλογές αυτές σημαίνουν ότι για κάθε 1cm ή 3cm ή 5cm κίνησης του χειρουργού-αφέντη τα ρομποτικά εργαλεία-σκλάβοι μετακινούνται κατά 1cm. Έτσι, οι κινήσεις του χειρουργού μετατρέπονται σε ακριβείς κινήσεις πραγματικού χρόνου των χειρουργικών εργαλείων μέσα στο σώμα του ασθενούς.

2.9.3 Το καρότσι δίπλα στον ασθενή (patient-side cart)

Εκεί τοποθετείται ο ασθενής κατά τη διάρκεια της επέμβασης. Αποτελείται από έναν κεντρικό πυλώνα όπου είναι τοποθετημένοι τρεις ή τέσσερις ρομποτικοί βραχίονες οι οποίοι εκτελούν τις εντολές του χειρουργού. Σε έναν από τους ρομποτικούς βραχίονες τοποθετείται το ενδοσκόπιο ενώ οι υπόλοιποι περιλαμβάνουν τα χειρουργικά εργαλεία για την ομαλή διεξαγωγή της επέμβασης. Οι ρομποτικοί βραχίονες μετακινούνται γύρω από συγκεκριμένα αξονικά σημεία

έτσι ώστε να ελαττώνεται το τραύμα στον ασθενή, να βελτιώνεται το κοσμητικό αποτέλεσμα και να αυξάνεται πάνω απ' όλα η ακρίβεια.

Η εγκατάσταση του καρτσιού δίπλα στον ασθενή από την τροφοδοσία μέχρι τα εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν στην εγχείρηση παίρνει συνήθως 15 λεπτά. Η απομάκρυνση των ρομποτικών βραχιόνων από το σώμα του ασθενούς παίρνει μόλις λίγα δευτερόλεπτα. [15]

2.9.4 Τρισδιάστατο σύστημα απεικόνισης

Το σύστημα αυτό παρέχει στον χειρουργό πραγματικές τρισδιάστατες εικόνες του χειρουργικού πεδίου και την απαραίτητη αντίληψη του βάθους για τον ακριβή χειρισμό των ιστών. Περιλαμβάνει ένα υψηλής ανάλυσης τρισδιάστατο ενδοσκόπιο – εύκαμπτος σωλήνας με κάμερα και μια πηγή φωτός στην άκρη του- και εξοπλισμό επεξεργασίας εικόνας που ο συνδυασμός τους δίνει εικόνες της ανατομίας του ασθενή πολύ κοντά στην πραγματικότητα.

Πιο συγκεκριμένα ο βραχίονας με το ενδοσκόπιο παρέχει ενισχυμένες στερεοσκοπικές εικόνες. Για να γίνει αυτό το ενδοσκόπιο χρησιμοποιεί δυο ανεξάρτητα οπτικά κανάλια που δειγματοληπτούνται από δυο ανεξάρτητες CCD κάμερες με τρία τσιπ.[15] Αυτή η υψηλής ανάλυσης και πραγματικού χρόνου μεγέθυνση που δείχνει το εσωτερικό του ασθενή προσφέρει στον χειρουργό ένα ιδιαίτερο πλεονέκτημα έναντι της κανονικής εγχείρησης. Το σύστημα παρέχει πάνω από χίλια φωτογραφικά καρέ ανά λεπτό της θέσης του οργάνου και φιλτράρει κάθε εικόνα μέσω ενός επεξεργαστή βίντεο που εξαλείφει τον θόρυβο του περιβάλλοντος. Το ενδοσκόπιο είναι προγραμματισμένο να ρυθμίζει την θερμοκρασία στην άκρη του για να αποτρέπεται η θόλωσή του κατά τη διάρκεια της επέμβασης. [13] Η θέση του ενδοσκοπίου μπορεί να ρυθμιστεί από τον χειρουργό για καλύτερη θέαση της χειρουργικής επέμβασης. Το ενδοσκόπιο έχει διάμετρο 12mm και ενδοσκόπια 0° και 30° είναι πλέον διαθέσιμα.

Η εικόνα της χειρουργικής επέμβασης μεταδίδεται στον χειρουργό από δύο οθόνες υψηλής ευκρίνειας (CRT), μια για κάθε μάτι. Ακριβής οπτικοποίηση είναι απαραίτητη καθώς οι οπτικές ενδείξεις χρησιμοποιούνται για να αντισταθμιστεί η απώλεια της απτικής ανάδρασης. Η μεγέθυνση είναι πιθανή (X2 έως X10) με αποτέλεσμα να αυξάνεται η χειρουργική ακρίβεια.

Οι βοηθοί μπορούν να παρακολουθούν την εγχείρηση μέσω μιας μεγάλης οθόνης που

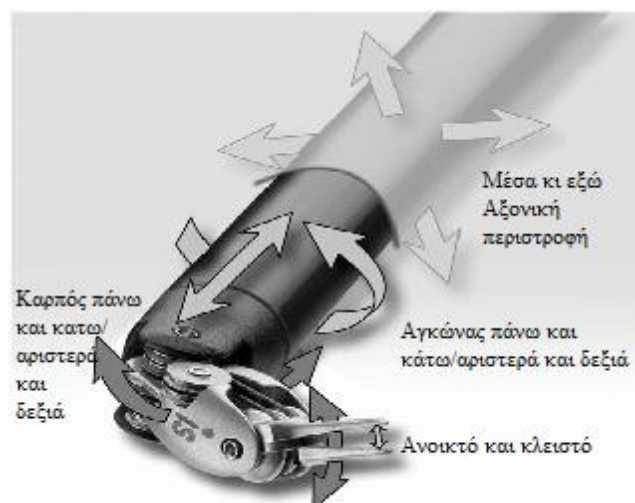
τοποθετείται μέσα στην χειρουργική αίθουσα. Επικοινωνούν αμφίδρομα με τον χειρουργό μέσω ενός στερεοφωνικού συστήματος ήχου που είναι τοποθετημένο επίσης μέσα στην χειρουργική αίθουσα.

2.9.5 Όργανα Endowrist

Η ολοκληρωμένη σειρά των αποκλειστικών εργαλείων Endowrist της Intuitive Surgical είναι ειδικά σχεδιασμένη για να παρέχει στους χειρουργούς την φυσική επιδεξιότητα και το φάσμα των κινήσεων που απαιτούνται για την πραγματοποίηση λεπτών χειρουργικών επεμβάσεων μέσα από μικρές τομές.

Ακολουθώντας το μοντέλο του ανθρώπινου χεριού τα εργαλεία αυτά έχουν σχεδιαστεί με επτά βαθμούς ελευθερίας και αρθρώσεις των 90 μοιρών. Αυτοί είναι οι παρακάτω:

1. Αγκώνας πάνω και κάτω
2. Αγκώνας αριστερά και δεξιά
3. Μέσα κι έξω
4. Αξονική περιστροφή
5. Καρπός πάνω και κάτω
6. Καρπός αριστερά και δεξιά
7. Ανοικτό και κλειστό



Εικόνα 2.9.5-1: Βαθμοί ελευθερίας κίνησης σε ένα ρομποτικό εργαλείο

Τα εσωτερικά καλώδια των εργαλείων Endowrist, παρόμοια με τους ανθρώπινους τένοντες διακρίνονται για την μέγιστη ανταποκρισιμότητα τους επιτρέποντας έτσι γρήγορες και ακριβείς τομές, συρραφές και χειρισμούς ιστών. Κάθε όργανο έχει τη δική του λειτουργία, ως σφιγκτήρας ή για ράμματα, και μπορεί να αλλάζει από το ένα στο άλλο με την χρήση μοχλών που υπάρχουν σε κάθε ρομποτικό βραχίονα. Η συσκευή απομνημονεύει την θέση των ρομποτικών βραχιόνων πριν την αντικατάσταση του εργαλείου έτσι ώστε το δεύτερο εργαλείο να μπορεί να επαναφερθεί στην ίδια ακριβώς θέση που ήταν το πρώτο. Επιπλέον, ο χειρουργός μπορεί να ελέγχει πόση δύναμη εφαρμόζεται στα εργαλεία, έτσι το σύστημα μπορεί να εφαρμόσει ελάχιστη δύναμη όταν πρόκειται για ένα ευαίσθητο ράμμα μέχρι αρκετά μεγάλη δύναμη όταν πρόκειται για την εξαγωγή μεγάλων δομικών ιστών.[12] Συνήθως αντλείται διοξείδιο του άνθρακα μέσα στην ανθρώπινη κοιλότητα ώστε να δημιουργηθεί περισσότερος χώρος για τους ελιγμούς των ρομποτικών βραχιόνων.

Η κίνηση των εργαλείων Endowrist ανιχνεύεται από τον υπολογιστή ώστε οι αλγόριθμοι ελέγχου να μπορούν να μετατρέψουν τις κινήσεις του χειρουργού σε κινήσεις του ρομποτικού εργαλείου. Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι πλήρως αποστειρωμένα σύμφωνα με τους κανονισμούς του FDA και του European regulatory bodies.

Η κίνηση των εργαλείων, που μοιάζει με εκείνη του ανθρώπινου καρπού, η ικανότητα άμεσης ανταπόκρισης και ο ρομποτικός έλεγχος του συστήματος da Vinci παρέχουν στους χειρουργούς μεγάλη επιδεξιότητα και απaráμιλλη ακρίβεια. Τα πλεονεκτήματα αυτά εξασφαλίζουν καλύτερα αποτελέσματα όταν πρόκειται για επεμβάσεις στο περιορισμένο περιβάλλον της ελάχιστα επεμβατικής χειρουργικής.

Οι κατηγορίες των οργάνων Endowrist είναι:

- *Energy instruments*: Χρησιμοποιούνται για να παρέχουν πήξη, κόψιμο και διαχωρισμό των ιστών. Αυτά περιλαμβάνουν τα μονοπολικά και διπολικά εργαλεία καυτηριασμού, το Harmonic ACE, το PK Dissecting Forceps και το λείζερ.



Εικόνα 2.9.5-2: Energy Instruments [16]

- *Χειρουργικές λαβίδες(Forceps)* : Είναι τα εργαλεία τα οποία χρησιμοποιούνται για το 'άρπαγμα' των ιστών. Δίνουν στον χειρουργό τη δυνατότητα να χειρίζεται ένα ευρύ φάσμα από ιστούς, από τους πιο λεπτούς ιστούς, όπως είναι το περιτόναιο, μέχρι και τους πιο 'σκληρούς' ινώδεις ιστούς, όπως είναι η μήτρα.



Εικόνα 2.9.5-3: Χειρουργικές λαβίδες (Forceps)[16]

- *Needle drivers*: Παρέχουν την δυνατότητα συρραφής των χειρουργικών τομών με μια μεγάλη ποικιλία από βελόνες συρραφής, οι οποίες διαφέρουν ανάλογα με το πάχος των ιστών προς συρραφή.



Εικόνα 2.9.5-4: Needle drivers[16]

- *Retractors*: Τα εργαλεία αυτά επιτρέπουν στον χειρουργό την δυναμική πλήρη έκθεση του χειρουργικού πεδίου, μετακινώντας τα όργανα και τους ιστούς που εμποδίζουν το χειρουργικό πεδίο.



Εικόνα 2.9.5-5: Retractors[16]

- Άλλα ειδικά εργαλεία : Χρησιμοποιούνται ώστε ο χειρουργός να εκτελεί ειδικές διαδικασίες.



Εικόνα 2.9.5-6: Άλλα ειδικά εργαλεία [16]

- *Εργαλεία 5mm*: Με αυτά τα εργαλεία ο χειρουργός χρησιμοποιεί μικρότερες θύρες εισόδου. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμα στη θωρακική, παιδιατρική, γυναικολογική και στη γενική χειρουργική.



Εικόνα 2.9.5-7: Εργαλεία 5mm[16]

2.10 Το σύστημα da Vinci SHD

Το σύστημα da Vinci S HD συνδυάζει το τρισδιάστατο υψηλής ανάλυσης ενδοσκόπιο με την μέχρι τότε ρομποτική τεχνολογία ώστε να επεκτείνονται εικονικά τα χέρια και τα μάτια του χειρουργού μέσα στο χειρουργικό πεδίο. Το da Vinci S HD αποτελεί μία αρκετά βελτιωμένη έκδοση του ρομποτικού συστήματος da Vinci. Τα νέα χαρακτηριστικά που αυτό υιοθετεί σε σχέση με την αρχική έκδοση του συστήματος περιλαμβάνουν:

- Σύστημα απaráμιλλης τρισδιάστατης οπτικής απεικόνισης υψηλής ευκρίνειας με διπλάσια ανάλυση, που παρέχει βελτιωμένη καθαρότητα και λεπτομερή απεικόνιση των επιπέδων των ιστών και της ανατομίας και λόγω πανοραμικής θέασης 16:9 προσφέρει 20% μεγαλύτερη περιοχή θέασης. Το σύστημα περιλαμβάνει επίσης δυνατότητα ψηφιακού zoom για την ελάττωση της παρεμβολής μεταξύ του ενδοσκοπίου και των εργαλείων. Εμπλουτίζεται με στερεοσκοπικά ενδοσκόπια 0° και 30° . Παρέχει δυνατότητα μεγέθυνσης του χειρουργικού πεδίου έως και 15 φορές, ενδεικτικά τα αγγεία με μέγεθος χιλιοστού εμφανίζονται στο μέγεθος ενός μολυβιού.
- Βελτιωμένη επιδεξιότητα και ακρίβεια, χάρη στην τεχνολογία Intuitive Movement, για πιο ακριβή έλεγχο των εργαλείων Endowrist με τις άκρες των δαχτύλων και λεπτότερους, τηλεσκοπικούς βραχίονες εργαλείων που εξασφαλίζουν καλύτερη πρόσβαση στον ασθενή μέσω

των μικροτομών στο σώμα του.

- Ανώτερη εργονομία για μεγαλύτερη άνεση στη στάση του χειρουργού και βέλτιστη ευθυγράμμιση των χεριών και των ματιών του.

- Γρήγορη και ασφαλής προετοιμασία του συστήματος πριν από την επέμβαση, με ταχύτερη και ελεγχόμενη πρόσβαση αυτού στον ασθενή και μηχανοκίνητο φορείο δίπλα στον ασθενή. Το σύστημα περιλαμβάνει επίσης σύνδεση οπτικής ίνας υψηλής ταχύτητας και αποστειρωμένους αντάπτορες μιας χρήσης.

- Υιοθέτηση τέταρτου ρομποτικού βραχίονα για απλούστευση της χειρουργικής επέμβασης (Solo Surgery)

- Νέα εξελιγμένη διεπιφάνεια χρήστη που περιλαμβάνει ολοκληρωμένη οθόνη με οθόνη αφής , οθόνη τεχνολογίας Tilepro πολλαπλών εισόδων για την παρουσίαση κρίσιμων πληροφοριών του ασθενούς, LED και εικονίδια κατάστασης, καθώς και εργαλεία ψηφιακής επισήμανσης (telestration) για βελτιωμένη εποπτεία και επικοινωνία της χειρουργικής ομάδας. Η οθόνη Tilepro επιτρέπει στον χειρουργό και την υπόλοιπη ομάδα να βλέπουν τρισδιάστατο βίντεο του χειρουργικού πεδίου μαζί με επιπρόσθετες πηγές βίντεο , όπως είναι για παράδειγμα οι υπέρηχοι και το ηλεκτροκαρδιογράφημα (EKG). [14]

2.11 Το σύστημα da Vinci SiHD

Τον Απρίλιο του 2009 πραγματοποιήθηκε η παρουσίαση του νέου βελτιωμένου ρομποτικού συστήματος da Vinci SiHD που αποτελεί την πιο πρόσφατη προσθήκη στην γραμμή προϊόντων της σειράς da Vinci. Η έκδοση αυτή υιοθετεί αρκετά νέα χαρακτηριστικά, διατηρώντας όμως παράλληλα τη βασική τεχνολογία των προηγούμενων εκδόσεων.

- Το σύστημα τρισδιάστατης απεικόνισης χρησιμοποιεί δυο ξεχωριστά οπτικά κανάλια υψηλής ευκρίνειας, τα οποία συγχωνεύονται μεταξύ τους για να αποδώσουν με ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια την αντίληψη του βάθους.

- Μία ολοκληρωμένη κονσόλα αφής δίνει στον χειρουργό την δυνατότητα να ελέγχει τις ρυθμίσεις του βίντεο, του ήχου και του συστήματος.

- Η κονσόλα του χειρουργού έχει αναβαθμιστεί εργονομικά, επιτρέποντάς του να ρυθμίζει κατά βούληση τέσσερις διαφορετικές παραμέτρους για επιπλέον άνεση κατά τη διάρκεια πολύωρων χειρουργικών επεμβάσεων.

- Υπάρχει πλέον η δυνατότητα να προσαρτηθεί στο σύστημα και δεύτερη κονσόλα

χειρουργού. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα σε δύο χειρουργούς να συνεργάζονται ή να επικοινωνούν κατά τη διάρκεια μίας επέμβασης, ή πρακτικής εξάσκησης ανταλλάσσοντας μεταξύ τους τον έλεγχο των ρομποτικών βραχιόνων.

- Στο σύστημα όρασης έχει ενσωματωθεί η δυνατότητα ανάρτησης οθόνης στο ταβάνι. [14]

2.12 Μηχανισμοί ασφαλείας σε περίπτωση βλάβης

Από την ίδρυση της εταιρείας μέχρι και σήμερα πρωταρχικός στόχος της είναι η ασφάλεια του συστήματος. Έτσι για την έναρξη της επέμβασης το κεφάλι του χειρουργού πρέπει να είναι τοποθετημένο μέσα στο σύστημα θέασης. Ειδικά το σύστημα κλειδώνει και παραμένει ακίνητο μέχρι να ανιχνεύσει ξανά την παρουσία του κεφαλιού του χειρουργού. Κατά τη διάρκεια της επέμβασης, ένα σύστημα κίνησης μηδενικού σημείου αποτρέπει τους ρομποτικούς βραχιόνες να περιστραφούν πάνω από ή ακριβώς στο σημείο της τομής, το οποίο αλλιώς θα μπορούσε ακούσια να σκιστεί. Στην τροφοδοσία περιλαμβάνεται μια εφεδρική μπαταρία που επιτρέπει στο σύστημα να λειτουργεί για 20 λεπτά, δίνοντας στο νοσοκομείο αρκετό χρόνο για να επαναφέρει το ρεύμα. Κάθε όργανο περιέχει ένα τσιπ που εμποδίζει την χρήση κάποιου οργάνου μη κατασκευασμένου από την Intuitive Surgical. Αυτά τα τσιπ επίσης αποθηκεύουν πληροφορίες σχετικές με κάθε όργανο για πιο ακριβή έλεγχο και καταγράφουν την χρήση των οργάνων για να καθορίζεται πότε πρέπει να αντικατασταθούν. [13]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΧΕΙΡΟΥΡΓΙΚΗ ΔΙΑ ΜΕΣΟΥ ΦΥΣΙΚΩΝ ΟΠΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Οι συνεχείς εξελίξεις στους τομείς της θεραπευτικής ενδοσκόπησης και της λαπαροσκοπικής χειρουργικής οδήγησαν στην ανάπτυξη μιας καινοτόμου χειρουργικής τεχνικής δια μέσου φυσικών οπών, ή αλλιώς Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery (NOTES). Η βασική ιδέα αυτής της τεχνικής είναι η πρόσβαση στην περιτοναϊκή κοιλότητα δια μέσου των φυσικών οπών του σώματος του ασθενή (στόμα, κόλπο, ουρήθρα και πρωκτό). Απαραίτητη, βέβαια, προϋπόθεση αποτελεί η διάτρηση του αυλού ενός κοίλου σπλάχνου όπως είναι το στομάχι, ο κόλπος, η ουροδόχος κύστη και το παχύ έντερο. Η NOTES είναι ο νεότερος κλάδος στον τομέα της ελάχιστα επεμβατικής χειρουργικής με κύριους στόχους της την αισθητή μείωση του μετεγχειρητικού πόνου, την μείωση του χρόνου ανάρρωσης του ασθενή και των χειρουργικών επιπλοκών όσο αυτό είναι δυνατό. Ακόμη προσφέρει και αισθητικό όφελος εξαιτίας των μη ορατών χειρουργικών ουλών. Το 2004 η ομάδα Hopkins με επικεφαλής τον A. Kalloo δημοσίευσε την πρώτη περιγραφή της τεχνικής αυτής σε πειραματόζωα (χοίρους). Από τότε υπάρχουν αρκετές αναφορές επιτυχημένης απολίνωσης σαλπίνγων, γαστρεντεροαναστόμωσης, σπληνεκτομής και ωοθηκεκτομής. Το 2007, αναφέρθηκε η πρώτη ανθρώπινη διακολπική χολεκυστεκτομή από μία ομάδα επιστημόνων με επικεφαλής τους Bessler και Marceaux. [17]

Πολλά ζητήματα προέκυψαν με την εμφάνιση αυτής της νέας τεχνικής, όπως η αναγκαιότητα κατάλληλων συσκευών για την εφαρμογή της και η κατοχή των απαραίτητων προσόντων και εκπαίδευσης από τη μεριά των χειρουργών. Για να επισημανθούν αυτά τα ζητήματα οι ενώσεις American Society of Gastrointestinal Endoscopy (ASGE) και Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons (SAGES) συναντήθηκαν το 2005 και μαζί προσδιόρισαν τις βασικές προκλήσεις που εμφανίζονται στην ασφαλή εισαγωγή της τεχνικής NOTES. Έδωσαν ιδιαίτερη έμφαση, για την εξέλιξη της NOTES, στην δημιουργία μίας ομάδας η οποία θα αποτελούνταν τόσο από χειρουργούς όσο και γαστρεντερολόγους. Τότε εκδόθηκε και η Λευκή Βίβλος από την ομάδα εργασίας της NOTES (Working Group on NOTES White Paper) η οποία αποτελεί έναν οδηγό για την ασφαλή εξέλιξη της NOTES. Ακόμη, ιδρύθηκε από τις ενώσεις ASGE και SAGE ένας οργανισμός γνωστός ως the Natural Orifice Surgery Consortium for Assessment and

Research (NOSCAR), ο οποίος είναι υπεύθυνος για την αρχειοθέτηση των χειρουργικών επεμβάσεων σε ανθρώπους και την οργάνωση διεθνών συνεδρίων με θέμα την NOTES. [18]

Παρόλα τα σημαντικά πλεονεκτήματα που μπορεί να προσφέρει η χειρουργική NOTES στους ασθενείς, σημαντικές είναι οι προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν ώστε η τεχνική αυτή να τεθεί σε ευρεία χρήση. Δύο από τις κυριότερες προκλήσεις είναι η ανάπτυξη τεχνικών για ασφαλή πρόσβαση στην περιτοναϊκή κοιλότητα και η ασφαλής συρραφή των χειρουργικών τομών. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο παίζουν η ανάπτυξη των κατάλληλων εργαλείων καθώς και μίας πλατφόρμας εργασίας, η οποία θα μπορεί να εκτελεί ταυτόχρονα πολλαπλές εργασίες, για την εκτέλεση μίας χειρουργικής επέμβασης με την τεχνική NOTES. Όπως και σε κάθε άλλη επέμβαση, έτσι και στις επεμβάσεις που γίνονται με την τεχνική NOTES θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη η αποφυγή των μολύνσεων καθώς επίσης θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα ώστε να αναγνωριστούν άμεσα και να αντιμετωπιστούν τυχόν ενδοπεριτοναϊκές επιπλοκές. Η εκπαίδευση των χειρουργών είναι ένα ακόμη σημαντικό ζήτημα, καθώς αυτοί θα πρέπει να είναι εξοικειωμένοι τόσο με λαπαροσκοπικές όσο και με ενδοσκοπικές τεχνικές.[19]

3.2 Πρόσβαση και συρραφή.

3.2.1 Πρόσβαση στην περιτοναϊκή κοιλότητα

Η είσοδος στην περιτοναϊκή κοιλότητα επιτυγχάνεται δια μέσου των φυσικών οπών του σώματος του ασθενή, δηλαδή του στόματος, του ορθού, του κόλπου και της ουροδόχου κύστης. Στη συνέχεια, η περιτοναϊκή κοιλότητα μπορεί να προσεγγιστεί μέσω οποιουδήποτε τμήματος της γαστρεντερικής (στομάχι και παχύ έντερο), ουρηθρικής (ουροδόχος κύστη) και γεννητικής οδού (κόλπος). [20] Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί κατά την πρόσβαση στην περιτοναϊκή κοιλότητα ανεξάρτητα από την διαδρομή που ακολουθείται, στον όσο το δυνατόν μικρότερο τραυματισμό των ιστών, στην αποφυγή αγγειακών και σπλαχνικών τραυματισμών, στην ασφάλεια που αφορά το κλείσιμο της οπής και τέλος στον σωστό χειρισμό των εργαλείων και στον εντοπισμό ασφαλούς σημείου πρόσβασης. Το πιο χρήσιμο εργαλείο για τον εντοπισμό ασφαλούς σημείου πρόσβασης είναι ο ενδοσκοπικός υπέρηχος.

Αφού έχει εντοπιστεί το κατάλληλο σημείο πρόσβασης για τη διαγαστρική προσπέλαση,

ένα γαστροσκόπιο περνάει στο στομάχι μέσω του στόματος. Στη συνέχεια, με έναν ενδοσκοπικό σφιγκτηροτόμο (needle knife) γίνεται η γαστροτομή. Ένας οδηγός-σύρμα περνάει από την τομή στην περιτοναϊκή κοιλότητα και ένα μπαλόνι διαστολής (dilation balloon) χρησιμοποιείται για περαιτέρω διάνοιξη της οπής. Το ενδοσκόπιο εισάγεται από αυτή την τομή και δημιουργείται το πνευμοπεριτόναιο με εισαγωγή αέρα. [21] Με την τεχνική αυτή αποκτούμε σχετικά εύκολη πρόσβαση στην περιτοναϊκή κοιλότητα αλλά η ορατότητα των οργάνων της άνω κοιλίας είναι περιορισμένη. Ακόμη, ένα μειονέκτημα της διαγαστρικής προσπέλασης είναι οι περιορισμένοι χειρισμοί του ενδοσκοπίου εξαιτίας της μεταβλητότητας της διαμέτρου του οισοφάγου. [18]

Η διακολπική πρόσβαση στην περιτοναϊκή κοιλότητα είναι ιδιαίτερη διαδεδομένη εξαιτίας της μεγάλης εμπειρίας που διαθέτουν οι γυναικολόγοι στις διακολπικές επεμβάσεις. Οι επιπλοκές που σχετίζονται με την πρόσβαση στην περιτοναϊκή κοιλότητα είναι μειωμένες σε σχέση με τις υπόλοιπες τρεις προτεινόμενες διαδρομές. Επίσης, η εύκολη σύγκλιση της κολπεκτομής με τις συνήθεις χειρουργικές μεθόδους αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του τρόπου προσέγγισης της περιτοναϊκής κοιλότητας. [22] Οι διακολπικές επεμβάσεις, βέβαια απευθύνονται στον γυναικείο πληθυσμό μόνο, κάτι που μπορεί να αποτελέσει μειονέκτημα για την ευρεία εφαρμογή αυτής της οδού προσπέλασης. Άλλα μειονεκτήματα, είναι ότι υπάρχει κίνδυνος τραυματισμού του ορθού και μετεγχειρητικής δυσπαρευνίας.

Άλλος ένας τρόπος πρόσβασης στην περιτοναϊκή κοιλότητα είναι δια μέσου του παχέος εντέρου στο ύψος του σιγμοειδούς ή ακόμη και της ηπατικής καμπής. Αυτός ο τρόπος δίνει το πλεονέκτημα ευκολότερης πρόσβασης σε όργανα της άνω κοιλιακής χώρας. Ενώ, κύριο μειονέκτημά του είναι η άριστη προετοιμασία του εντέρου για τη διεξαγωγή μίας επέμβασης. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί επίσης στην ασφαλή σύγκλιση του σημείου εισόδου για να μην έχουμε περαιτέρω επιπλοκές.

Τέλος, η πρόσβαση στην περιτοναϊκή κοιλότητα δια μέσου της ουροδόχου κύστεως παρέχει, επίσης, ικανοποιητική πρόσβαση στα όργανα της άνω κοιλίας. Χρησιμοποιώντας αυτήν την οδό μας δίνεται η δυνατότητα χρήσης άκαμπτων ενδοσκοπίων και η αντισηψία δεν είναι απαραίτητη. Ένα μειονέκτημα αυτού του τρόπου πρόσβασης είναι το σχετικά περιορισμένο μέγεθος της φυσικής οπής της ουρήθρας, γεγονός που δυσχεραίνει την διεξαγωγή της χειρουργικής διαδικασίας. Εάν είναι δύσκολη η σύγκλιση της οπής, χρησιμοποιείται ουροκαθετήρας για τουλάχιστον 72 ώρες. [9]

3.2.2 Συρραφή των χειρουργικών τομών

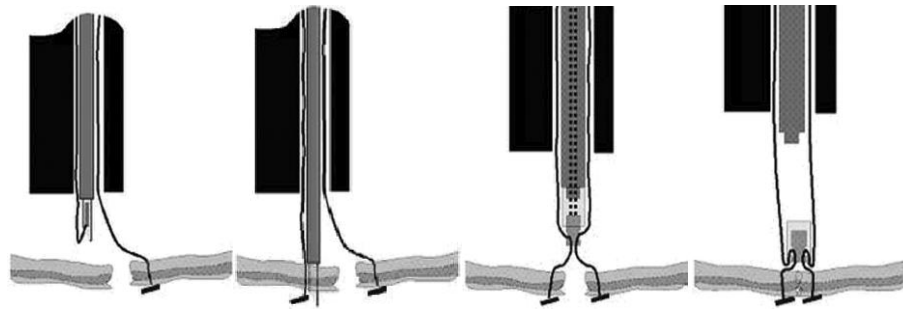
Η επιτυχής συρραφή των χειρουργικών τομών αποτελεί επίσης μία σημαντική πρόκληση που αφορά τις χειρουργικές επεμβάσεις που γίνονται με χρήση της τεχνικής NOTES. Δύο θέματα αξίζει να αναφερθούν που αφορούν την συρραφή στη NOTES. Πρώτο θέμα είναι η συρραφή του σημείου πρόσβασης έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι δε θα καταρρεύσει η αναστόμωση στο σημείο αυτό, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε πιθανή μετεγχειρητική διαρροή, η οποία σχετίζεται με νοσηρότητα και θνησιμότητα του ασθενούς. Δεύτερο θέμα που πρέπει να αναφερθεί είναι η αναγκαιότητα συρραφής και κατά τη διάρκεια της χειρουργικής επέμβασης ώστε να διασφαλιστεί η αιμόσταση ή να ολοκληρωθεί η επέμβαση. [17] Έχουν αναπτυχθεί αρκετά συστήματα συρραφής, όπως είναι το Eagle Claw (Olympus Medical Systems, Tokyo Japan), το σύστημα συρραφής με την ονομασία T-tags, και το σύστημα G-prox. [23]

Το σύστημα Eagle Claw είναι μία ενδοσκοπική συσκευή συρραφής, η οποία αναπτύχθηκε από την εταιρεία Olympus Medical Systems σε συνεργασία με την ομάδα Apollo. [24] Το πρώτο μοντέλο της συσκευής το Eagle Claw II χρησιμοποιήθηκε για τον ενδοσκοπικό έλεγχο της κύριας αρτηριακής αιμορραγίας. Το σύστημα Eagle Claw χρησιμοποιεί μεγάλες κυρτές βελόνες και επιτρέπει την συρραφή υπό άμεση όραση ενώ η συρραφή που επιτυγχάνεται είναι πλήρους πάχους. Η λειτουργία των λαβίδων αρπαγής επιτρέπουν μεγαλύτερη ακρίβεια στην τοποθέτηση των ραμμάτων. [23]



Εικόνα 3.2.2-1: Το σύστημα Eagle Claw

Το σύστημα συρραφής T-tag αναπτύχθηκε από μία βρετανική ομάδα με επικεφαλής τον Paul Swain. Συνδυάζει την τεχνολογία T-fasteners με μία συσκευή κλειδώματος επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο πλήρους πάχους ράμματα. Το πολύ μικρό πάχος της συσκευής, μόλις 1.8mm, της επιτρέπει να προσαρμόζεται κατάλληλα στα κανάλια εργασίας των κοινών ενδοσκοπίων. Κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος είναι η ευελιξία του και η αξιοπιστία του. [23]



Εικόνα 3.2.2-2: Το σύστημα T-tags

Η συσκευή g-Prox αναπτύχθηκε από την εταιρεία USGI Medical. Είναι αρκετά μικρή συσκευή με διάμετρο μόλις 4.0 mm, κατάλληλη για ενδοσκοπική χρήση. Αποτελείται από μία χειρουργική λαβίδα και έναν οδηγό-βελόνα για τα ράμματα. Κύριο χαρακτηριστικό της συσκευής είναι ότι επιτρέπει στον χειρουργό να αγκιστρώσει και να ανασηκώσει το κομμάτι του ιστού που θέλει να συρράψει δίνοντας του έτσι πλήρη έλεγχο χειρισμού των ιστών και βέλτιστη οπτικοποίηση. Στη συνέχεια, αφού έχει αγκιστρωθεί ο προς συρραφή ιστός, ο οδηγός-βελόνα περνάει μέσω του αγκιστρωμένου ιστού για να ξεκινήσει η συρραφή. [23]



Εικόνα 3.2.2-3: Το σύστημα g-prox[25]

3.3 Ενδοπεριτοναϊκές επιπλοκές και εκπαίδευση

Μία από τις προϋποθέσεις για την ασφαλή εφαρμογή της τεχνικής NOTES στην κλινική πράξη είναι η πρόληψη του ιατρογενούς τραύματος, που έχει σαν κίνδυνο την πρόκληση επιπλοκών κατά τη διάρκεια ή ακόμα και μετά το τέλος της επέμβασης. Αυτοί οι κίνδυνοι περιλαμβάνουν τη

μόλυνση, την αιμορραγία και το σπλαχνικό τραύμα. Η περιτοναϊκή κοιλότητα είναι ένα αποστειρωμένο περιβάλλον μέχρι να παραβιαστεί κατά τη διάρκεια της χειρουργικής επέμβασης. Η μέθοδος πρόσβασης της περιτοναϊκής κοιλότητας παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην επιπλοκές εξαιτίας της μόλυνσης. Για παράδειγμα, κατά τη διορθική προσπέλαση της NOTES εμφανίζεται υψηλότερος κίνδυνος μόλυνσης, εξαιτίας της εγγύτητας της με τη χλωρίδα του παχέως εντέρου, σε σχέση με την διαγαστρική και διακολπική προσπέλαση. [26] Το αγγειακό τραύμα κατά τη διάρκεια της πρόσβασης ή της επέμβασης είναι δύσκολο να ελεγχθεί εξαιτίας της θέσης και του προσανατολισμού του ενδοσκοπίου και της τρέχουσας αιμοστατικής τεχνολογίας. Ο τραυματισμός των σπλάχνων είναι επίσης ένας σημαντικός κίνδυνος και η ικανότητα να διαγνωστεί και να επιδιορθωθεί πρέπει να αξιολογηθεί πλήρως.

Ένα ακόμη σημαντικό ζήτημα που πρέπει να αναφερθεί είναι η εκπαίδευση των χειρουργών. Από τη Λευκή Βίβλο έχει προταθεί οι επεμβάσεις με την τεχνική NOTES να εκτελούνται, από μία ομάδα χειρουργών και γαστρεντερολόγων. Οι χειρουργοί είναι, πλέον, αρκετά εξοικειωμένοι με τις λαπαροσκοπικές ενώ οι γαστρεντερολόγοι με τις ενδοσκοπικές τεχνικές. Μία προσέγγιση στον τομέα της εκπαίδευσης είναι οι νέοι χειρουργοί μέσα από τις λαπαροσκοπικές διαδικασίες να προσπαθήσουν να διδαχθούν τα βασικά βήματα της τεχνικής NOTES. Αυτά περιλαμβάνουν την ασφαλή πρόσβαση στην περιτοναϊκή κοιλότητα, την ασφαλή σύγκλιση των χειρουργικών τομών και τέλος, τον χειρισμό των διαφόρων εργαλείων και συσκευών που έχουν σχεδιαστεί για την τεχνική NOTES[27]. Καθώς η τεχνολογία στη NOTES ολοένα και εξελίσσεται θα πρέπει οι χειρουργοί να δοκιμάζουν τα νέα εργαλεία σε πειραματικά μοντέλα πρώτα προτού μπούν στη χειρουργική αίθουσα. Ενώ στο μέλλον, υπάρχει η πιθανότητα ανάπτυξης ειδικών εξομοιωτών, οι οποίοι θα χρησιμοποιούνται στην εκπαίδευση της τεχνικής NOTES.

3.4 Η τεχνολογία στην NOTES

Η ανάπτυξη μίας σύγχρονης τεχνολογίας στην χειρουργική NOTES αποτελεί σημαντική προϋπόθεση για την χρήση της. Ο ειδικός εξοπλισμός και η τεχνολογία που απαιτείται υστερεί αρκετά σε σχέση με τα εξειδικευμένα λαπαροσκοπικά εργαλεία. Η σύγχρονη ενδοσκοπική τεχνολογία έχει ακόμη αρκετές ελλείψεις όταν χρησιμοποιείται για πιο περίπλοκες χειρουργικές επεμβάσεις. Οι σημαντικότερες ελλείψεις εμφανίζονται στα στοιχεία της βασικής πλατφόρμας εργασίας, και αναλύονται περαιτέρω στα χαρακτηριστικά του βασικού άξονα του ενδοσκοπίου, τον

χωρικό προσανατολισμό και τα απεικονιστικά χαρακτηριστικά.

Η ευελιξία του στελέχους του ενδοσκοπίου είναι ένα ιδιαίτερα επιθυμητό χαρακτηριστικό για την εύκολη και μη τραυματική προσέγγιση του χειρουργικού πεδίου μπορεί, μίας, να δημιουργήσει προβλήματα στην πραγματοποίηση ελιγμών και στην επιτυχημένη έλξη των ιστών. Επιπρόσθετα, η αυξημένη απόσταση μεταξύ του χειρουργού και των απολήξεων των χειρουργικών εργαλείων μειώνει δραστικά την απτική ανάδραση. Τα κανάλια εργασίας των κλασικών ενδοσκοπίων είναι μόνο δύο στον αριθμό, σε κοντινή απόσταση μεταξύ μίας, πολύ στενά και παράλληλα συνδεδεμένα.

Η δυσκολία του σωστού χωρικού προσανατολισμού με την τεχνική NOTES είναι συνυφασμένη με τη χρήση των σύγχρονων εύκαμπτων ενδοσκοπίων και υπάρχει ο κίνδυνος εμφάνισης επιπλοκών κατά τη διάρκεια μίας χειρουργικής επέμβασης. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα σύγχρονα ενδοσκόπια παρέχουν στον χειρουργό μία μεγεθυμένη και αντεστραμμένη εικόνα του χειρουργικού πεδίου. Σε αντίθεση με την λαπαροσκοπική οπτικοποίηση όπου έχουμε μία πιο απομακρυσμένη θέαση του χειρουργικού πεδίου η οποία είναι πιο χρήσιμη όταν πρόκειται για πολύπλοκες χειρουργικές επεμβάσεις. Οπότε ο χειρουργός, πρέπει να είναι σε θέση να μεταβάλλει την οπτικοποίηση από ενδοσκοπική σε λαπαροσκοπική τουλάχιστον για λίγο ώστε να επιλύει οποιαδήποτε σύγχυση προκύπτει σχετικά με την ανατομία του ασθενούς.[26] Σημαντικό ρόλο στην θέαση του χειρουργικού πεδίου παίζει και ο φωτισμός από τη μεριά των ενδοσκοπίων. Τα σύγχρονα ενδοσκόπια παρέχουν ελλιπή φωτισμό σε σχέση με τα λαπαροσκοπικά εργαλεία.

Η δημιουργία μίας πλατφόρμας, η οποία θα είναι σε θέση να εκτελεί πολλαπλές χειρουργικές επεμβάσεις με τη τεχνική NOTES συνεχίζει να είναι μέχρι και σήμερα ένα ζήτημα μέγιστης προτεραιότητας. Η πλατφόρμα αυτή θα πρέπει να συνδυάζει την ευελιξία και την ικανότητα των ελιγμών με τον ασφαλή χειρισμό των ιστών και της κινητικότητας των εργαλείων. Μία τεχνολογία που βασίζεται στη χρήση των μαγνητών για τη σύλληψη και τον χειρισμό των ιστών κατέχει ξεχωριστή θέση στη χειρουργική NOTES. Το σύστημα ονομάστηκε Magnetic Anchoric and Guidance System (MAGS) και με αυτό είναι εφικτοί τόσο οι χειρουργικοί χειρισμοί όσο και η απεικόνιση της περιτοναϊκής κοιλότητας. Σε πειραματικό στάδιο βρίσκεται η μελέτη για χρήση μικρο-ρομπότ στην χειρουργική NOTES τα οποία θα βοηθήσουν κυρίως στην καλύτερη οπτικοποίηση του χειρουργικού πεδίου.

3.5 Πλατφόρμα πολλαπλών διεργασιών

Η δεύτερη συνάντηση του οργανισμού NOSCAR περιελάμβανε και τη συμμετοχή βιομηχανιών, οι οποίες πρότειναν διάφορες λύσεις για τη δημιουργία μιας πλατφόρμας πολλαπλών διεργασιών. Αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο μεγάλα συστήματα: μία άκαμπτη πλατφόρμα, η οποία προσομοιάζει την τεχνική της λαπαροσκοπικής χειρουργικής μίας τομής (Single Incision Laparoscopic Surgery, SILS) και μία εύκαμπτη, μιμούμενη την τεχνική της ενδοσκόπησης. Η εύκαμπτη πλατφόρμα, μπορεί περαιτέρω να διαχωριστεί σε δύο υποσυστήματα: Ένα παραδοσιακό ενδοσκοπικό μοντέλο όπου ο χειρουργός ελέγχει την πλοήγηση και την τοποθέτηση των χειρουργικών εργαλείων ενώ ο βοηθός εναλλάσσει και ενεργοποιεί τα εργαλεία και ένα εύκαμπτο λαπαροσκοπικό μοντέλο όπου ο χειρουργός έχει τον πλήρη έλεγχο των χειρουργικών εργαλείων ενώ ο βοηθός του παρέχει την κατάλληλη οπτικοποίηση του χειρουργικού πεδίου. [28]

Η ανάπτυξη μίας πλατφόρμας κατά βάση ενδοσκοπικής και ευέλικτης κρίνεται απαραίτητη για την αναπαραγωγή πολύπλοκων λαπαροσκοπικών χειρουργικών χειρισμών. Ο κύριος στόχος αυτής είναι να προσφέρει ένα ευέλικτο, αλλά σταθερό, σύστημα μέσω του οποίου κάθε χειρουργική διαδικασία θα πραγματοποιείται με την τεχνική NOTES ανεξάρτητα από την ενδοαυλιακή προσέγγιση που έχουμε επιλέξει. Επιπλέον, αυτό το σύστημα θα πρέπει να παρέχει στον χειρουργό μία σταθερή εικόνα του χειρουργικού πεδίου συγκρινόμενη με αυτή που προσφέρεται στην λαπαροσκοπική χειρουργική και όσον είναι δυνατόν να είναι ανεξάρτητη από τα υπόλοιπα χειρουργικά εργαλεία. [29] Τέλος, μία εργονομική διεπιφάνεια χρήστη είναι απαραίτητη για τον ευκολότερο χειρισμό των χειρουργικών εργαλείων.

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά ορισμένες από τις πλατφόρμες που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί στην NOTES.

- *NOTES score*: Μία από τις πρώτες πλατφόρμες που αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν κυρίως σε μοντέλα ζώων είναι το “R-score” (XGIF-2TQ160R. Olympus, Tokyo, Japan) που αργότερα μετονομάστηκε σε NOTES score. Αυτή η συσκευή ακολουθεί το παραδοσιακό ενδοσκοπικό πρότυπο. Είναι ένα τροποποιημένο ενδοσκόπιο με δύο κανάλια και αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα, είναι σταθερό επιτρέποντας μία καλύτερη γωνία προσέγγισης και πιο ακριβή χειρισμό των ιστών ενώ το δεύτερο τμήμα είναι αυτό που μπορεί να καμφθεί . Τα δύο κανάλια εργασίας είναι κάθετα τοποθετημένα μεταξύ τους με αποτέλεσμα να επιτρέπεται τόσο η

κάθετη όσο και η οριζόντια κίνηση μέσα στο χειρουργικό πεδίο. Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζει αυτό το ενδοσκόπιο είναι ότι η εικόνα είναι άμεσα εξαρτημένα από τον άξονα του ενδοσκοπίου, οπότε έχουμε περιορισμένο πεδίο θέασης.[28]



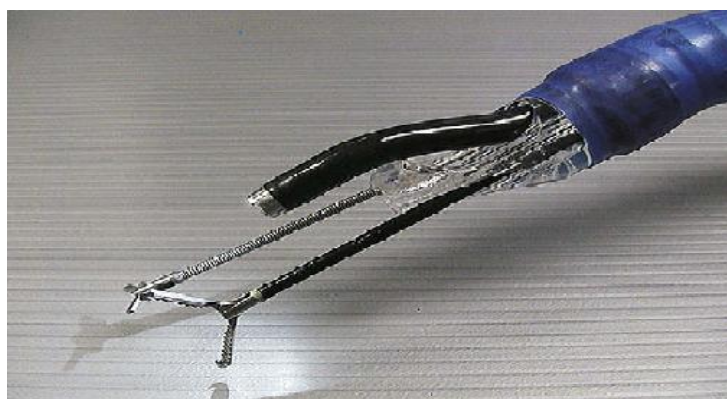
Εικόνα 3.5-1: (αριστερά) Το R-score, (δεξιά) Η διεπιφάνεια του χρήστη

- *TransPort™ Multi-lumen Operating Platform*(USGI Medical, USA): Πρόκειται για μία συσκευή, η οποία επιτρέπει το πέρασμα ενός ενδοσκοπίου στο ένα κανάλι εργασίας της και άλλα εύκαμπτα χειρουργικά εργαλεία στα υπόλοιπα κανάλια. Η λειτουργία αυτής της συσκευής στηρίζεται στην τεχνολογία Shapelock, η οποία επιτρέπει στο στέλεχος της να εισέρχεται μέσω μίας φυσικής οπής σε εύκαμπτη κατάσταση. Στη συνέχεια, το στέλεχος κλειδώνεται σε μία άκαμπτη διαμόρφωση, παρέχοντας στον χειρουργό μία σταθερή πλατφόρμα για να ξεκινήσει την επέμβαση [30,31]. Η συσκευή διαθέτει τέσσερα κανάλια εργασίας (δύο των 6mm και δύο των 4mm). Το ενδοσκόπιο μπορεί να περιστραφεί μέσα στον κανάλι έτσι ώστε να ρυθμίσει τον οπτικό ορίζοντα ανεξάρτητα από την τοποθεσία της συσκευής. Με αυτόν τρόπο μειώνεται ο αποπροσανατολισμός του χειρουργού. Το κύριο μειονέκτημα που παρουσιάζει η συσκευή αυτή είναι η αδυναμία τριγωνισμού της. Ακόμη, η πολυπλοκότητα της απαιτεί ειδικευμένους βοηθούς. Επίσης, ο χειροκίνητος έλεγχος του συστήματος δεν επιτρέπει ακριβείς κινήσεις τόσο του ενδοσκοπίου όσο και των χειρουργικών εργαλείων. [32]



Εικόνα 3.5-2: Το σύστημα TransPort™ [33]

- *Cobra*: Η συσκευή Cobra αναπτύχθηκε, ομοίως από την εταιρεία USGI (USGI Medical, USA) για να λύσει το πρόβλημα του τριγωνισμού. Προσέθεσαν, λοιπόν, τρεις ανεξάρτητους βραχίονες στην παλαιότερη συσκευή TransPort™. Τα πλεονεκτήματα του ενδοσκοπικού τριγωνισμού είναι ότι προσφέρεται στον χειρουργό η ικανότητα να ασκεί την επιθυμητή έλξη στους ιστούς και ότι παραμένει σταθερή η εικόνα του χειρουργικού πεδίου όταν τα υπόλοιπα εργαλεία κινούνται μέσα σε αυτό. Η συσκευή Cobra διαθέτει ένα εύκαμπτο ενδοσκόπιο μεγέθους 6mm. Αυτό εισάγεται στο μεσαίο κανάλι εργασίας της συσκευής. Είναι λιγότερο πολύπλοκη σε σχέση με την προηγούμενη έκδοση της αλλά και πάλι δεν ενδείκνυται για λεπτές χειρουργικές επεμβάσεις. Ένα άλλο μειονέκτημά της είναι ότι τα χειρουργικά εργαλεία είναι σταθερά τοποθετημένα στα κανάλια εργασίας, οπότε εάν χρειαστεί να γίνει κάποια αλλαγή κατά της διάρκεια της επέμβασης η συσκευή θα πρέπει να εξαχθεί από το σώμα του ασθενούς και να τοποθετηθεί εκ νέου. [32]



Εικόνα 3.5-3: Το σύστημα Cobra

- *EndoSAMURAI*: Το σύστημα EndoSAMURAI (Olympus Corp., Tokyo, Japan) έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με το εύκαμπτο-λαπαροσκοπικό πρότυπο. Αποτελείται από ένα εξειδικευμένο ενδοσκόπιο, έναν απομακρυσμένο σταθμό εργασίας και έναν προστατευτικό σωλήνα- overtube που μπορεί να παραμένει σταθερός. Η απόληξη του ενδοσκοπίου αποτελείται από δύο μικρού μήκους ανεξάρτητους βραχίονες , οι οποίοι κατά την είσοδο τους στο σώμα του ασθενούς παραμένουν παράλληλοι με τον άξονα του στελέχους του ενδοσκοπίου, ενώ ανοίγουν μόνο όταν βρεθούν στην κατάλληλη θέση για να ξεκινήσει η επέμβαση. Αυτοί χρησιμεύουν ως αγωγοί για την είσοδο των ενδοσκοπικών εργαλείων. Διαθέτουν πέντε βαθμούς ελευθερίας και ικανότητες τριγωνισμού γεγονός που τους επιτρέπει να εκτελούν πολύπλοκους χειρουργικούς χειρισμούς. Επιπλέον, διαθέτει ένα τρίτο κανάλι εργασίας το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για βοηθητικό εξοπλισμό. Και σε αυτό το σύστημα η οπτικοποίηση δεν είναι ανεξάρτητη από τους βραχίονες οπότε εμφανίζεται το ίδιο πρόβλημα με το περιορισμένο πεδίο θέασης. Η λειτουργία του είναι παρόμοια με αυτή της παραδοσιακής λαπαροσκόπησης. Ο χειρουργός, αρχικά, οδηγεί το στέλεχος στον επιθυμητό στόχο, “κλειδώνει” το σύστημα του προστατευτικού σωλήνα-overtube και του ενδοσκοπίου στην κατάλληλη τοποθεσία και στη συνέχεια μπορεί να ξεκινήσει τους χειρουργικούς χειρισμούς του από την διεπιφάνεια του χρήστη.



Εικόνα 3.5-4: Το σύστημα EndoSAMURAI

- *Ενδοσκοπικό σύστημα άμεσης οδήγησης*: Το ενδοσκοπικό σύστημα άμεσης οδήγησης (Direct Drive Endoscopic System, DDES, Boston Scientific, Natick, MA) αποτελείται από έναν κατευθυνόμενο οδηγό-θήκη μήκους 55cm στον οποίο μπορούν να προσαρτηθούν χειρουργικά εργαλεία διαμέτρου 4mm και μία πηγή φωτισμού. Η διεπιφάνεια του χρήστη αποτελείται από εργονομικές λαβές, οι οποίες έχουν επτά βαθμούς ελευθερίας. Με αποτέλεσμα να είναι δυνατόν να

επιτευχθούν πολύπλοκοι χειρουργικοί χειρισμοί, όπως είναι η δημιουργία και η συρραφή της χειρουργικής τομής, ο τριγωνισμός και ο χειρισμός των ιστών. Το κυριότερο χαρακτηριστικό αυτού του συστήματος είναι ότι η οπτικοποίηση του χειρουργικού πεδίου είναι ανεξάρτητη από τις χειρουργικές απολήξεις. Η οπτικοποίηση επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας συσκευής με το όνομα N-scope η οποία είναι πλήρως περιστρεφόμενη. Επίσης, ο χειρισμός του συστήματος αυτού μπορεί να γίνει από ένα μόνο άτομο. Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζει είναι ότι δε διαθέτει κανάλι εργασίας για βοηθητικές εργασίες, όπως είναι η αναρρόφηση γεγονός που δυσχεραίνει τις ενδοκοιλιακές διαδικασίες. [28]



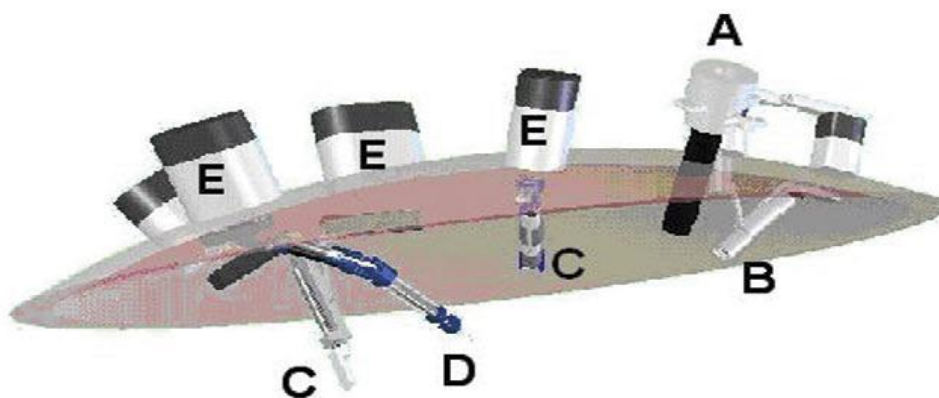
Εικόνα 3.5-5: Το ενδοσκοπικό σύστημα άμεσης οδήγησης

3.6 Χρήση μαγνητών στην τεχνική NOTES

Μία νέα τεχνολογία που βασίζεται στη χρήση μαγνητών για τη σύλληψη και τον χειρισμό των ιστών αναπτύχθηκε για να χρησιμοποιηθεί στη χειρουργική NOTES. Το σύστημα που αναπτύχθηκε ονομάζεται Magnetic Anchoring and Guidance System (MAGS). Τα όργανα του συστήματος MAGS έχουν σχεδιαστεί για να επιτρέπουν ελιγμούς των ενδοκοιλιακών εργαλείων με τη χρήση ενός εξωτερικού μαγνήτη χειρός, έτσι ώστε οι μαγνητικές δυνάμεις αλληλεπίδρασης να επιτρέπουν τη σύζευξη διαμέσου του κοιλιακού τοιχώματος των εσωτερικών και εξωτερικών εξαρτημάτων, χωρίς να εμφανίζεται η ανάγκη για τομές ή για χρήση τροκάρ. Η μαγνητική τεχνολογία περιλαμβάνει ένα εσωτερικό εξάρτημα, που αποτελείται από ένα χειρουργικό εργαλείο προσαρμοσμένο σε μία πλάκα με μόνιμους μαγνήτες, και ένα εξωτερικό εξάρτημα που αποτελείται από έναν φορητό μόνιμο μαγνήτη. Τα δύο εξαρτήματα συγκρατούνται μαζί με μαγνητική σύζευξη,

έτσι ώστε το εσωτερικό εξάρτημα να μπορεί να κατευθύνεται άμεσα από τη μετακίνηση του εξωτερικού μαγνήτη. Η πρώτη πλατφόρμα τέτοιας τεχνολογίας που δημιουργήθηκε χρησιμοποίησε μόνιμους μαγνήτες νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου, και δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε να παράγεται επαρκής σύζευξη των δυνάμεων για τον έλεγχο των εργαλείων βάρους 25 έως 45gr[34].

Η τεχνολογία MAGS έχει μέχρι στιγμής αναπτυχθεί ώστε να ενσωματώνει διάφορα χειρουργικά εργαλεία, όπως συσπειρωτήρες (retractors) και dissectors, και μία κάμερα για απεικόνιση. Ο χειρισμός του εξωτερικού μαγνήτη επιτρέπει στον χειρουργό την τοποθέτηση των χειρουργικών εργαλείων στην κατάλληλη τοποθεσία, καθώς επίσης και να εκτελέσει πολύπλοκες χειρουργικές κινήσεις, όπως είναι η ανύψωση των χειρουργικών εργαλείων μέσα στο χειρουργικό πεδίο και η συμπίεσή τους. Η κάμερα που χρησιμοποιείται για την τεχνολογία MAGS σχεδιάστηκε με την προσάρτηση μιας εμπορικά διαθέσιμης μινιατούρας φωτογραφικής μηχανής (QN42H, Elmo, Plainview, Νέα Υόρκη) μέσα σε ένα περίβλημα από αλουμίνιο που συνδέεται με ένα ζεύγος από εσωτερικές πλατφόρμες της τεχνολογίας MAGS[35]. Η κάμερα εισάγεται στο χειρουργικό πεδίο με τη βοήθεια ενός τροκάρ και να συνδεθεί με τους εξωτερικούς μαγνήτες. Με τον συνδυασμένο χειρισμό του ζεύγους των εξωτερικών μαγνητών επιτυγχάνεται ο οριζόντιος προσανατολισμός της κάμερας, ενώ πιέζοντας τους εξωτερικούς μαγνήτες μαζί ή χωριστά ο φακός της κάμερας εκτρέπεται είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω.



Εικόνα 3.6-1: Σχηματική αναπαράσταση μίας πλατφόρμας MAGS (A) τοποθέτηση του τροκάρ, (B) Κάμερα, (C)Χειρουργικά εργαλεία,(D) Εξωτερικοί μαγνήτες

Λόγω της προσχεδιασμένης μη ιατρικής χρήσης της η κάμερα που χρησιμοποιείται στην τεχνολογία MAGS έχει χαμηλότερη ανάλυση από εκείνη των συμβατικών λαπαροσκοπίων. Περαιτέρω, τρέχουσες προκλήσεις που αφορούν την απεικόνιση σε αυτήν την τεχνολογία είναι το θόλωμα του φακού, η σκίαση του φωτός και η μη παράλληλη προς την κάμερα διανομή του φωτός.

Τα χειρουργικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία MAGS έχουν δοκιμαστεί διάφορες παραλλαγές σχεδιασμού των εργαλείων μέχρι να καταλήξουμε στη βέλτιστη. Τα αρχικά εργαλεία καυτηριασμού είχαν σχεδιασθεί με ελατήρια γεγονός που δυσχέραινε την απόθεσή τους σε περιβάλλοντες ιστούς κατά την εισαγωγή και την αφαίρεσή τους. Μετά από κάποιες μηχανικές τροποποιήσεις που έγιναν τα όργανα μπορούν πλέον να αναπτυχθούν σε μία πιο συμπυκνόμενη δομή, όπου ο βραχίονας των εργαλείων μπορεί να κάμπτεται κατά 45 μοίρες κατά την προσέγγισή του στο κοιλιακό τοίχωμα. Επίσης, στους αρχικούς σχεδιασμούς χρησιμοποιήθηκε ένας μηχανισμός με τον οποίο ο βραχίονας καυτηρίασης συγκρατούνταν σε μία σταθερή θέση με τη βοήθεια ενός μαγνήτη και η λαβίδα βιοψίας ελεγχόταν μέσω του ενδοσκοπίου. Ένα μεταγενέστερο σχέδιο χρησιμοποιούσε ένα πνευματικό έμβολο για να ενεργοποιήσει τον βραχίονα μέσω πεπιεσμένου αέρα. Πιο πρόσφατα, ένας ρομποτικός βραχίονας πεπιεσμένου αέρα, που η χρήση του ελέγχεται από ένα τηλεχειριστήριο, σχεδιάστηκε για να υποστηρίξει τη σύνδεση ενός συμβατικού εργαλείου καυτηριασμού. Όλοι οι βραχίονες καυτηριασμού ελέγχονται με τη βοήθεια ενός εξωτερικού μαγνήτη.

Αρχικά, η τεχνολογία MAGS χρησιμοποιήθηκε στην λαπαροσκοπική χειρουργική για να μειωθεί ο αριθμός των τροκάρ σε δύο και στη συνέχεια σε ένα[35]. Για τη λαπαροσκοπική προσέγγιση, τα ηλεκτρικά και τα πνευματικά εργαλεία τροφοδοτούνται εξωτερικά για τη μεταφορά σήματος, για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και τον ρομποτικό τους έλεγχο. Η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας MAGS καταργεί δυνητικά την ανάγκη για λαπαροσκοπική βοήθεια και διευκολύνει την εφαρμογή της τεχνικής NOTES. Χρησιμοποιώντας τα όργανα της τεχνολογίας MAGS μαζί με ένα πρότυπο εύκαμπτο ενδοσκόπιο, οι ερευνητές πραγματοποίησαν με επιτυχία μία διακολπική χολοκυστεκτομή σε μοντέλα ζώων, εφαρμόζοντας πλήρως την τεχνική NOTES.

Πριν από την ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας MAGS, πρέπει να αντιμετωπιστούν τόσο οι κλινικοί όσο και οι μηχανικοί περιορισμοί της. Οι χειρουργοί θα πρέπει να εξοικειωθούν με τα εργαλεία της νέας τεχνολογίας αρχικά στο εργαστήριο και στη συνέχεια σε μοντέλα ζώων. Επιπλέον,

ο βέλτιστος αριθμός των εξωτερικών μαγνητών απομένει να προσδιοριστεί. Θεωρητικά, ο αριθμός αυτός εξαρτάται μόνο από τον μέρος του κοιλιακού τοιχώματος που χρησιμοποιείται από τον εξωτερικό μαγνήτη. Ωστόσο, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ο μεγαλύτερος αριθμός μαγνητών που οδηγεί σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους ενδέχεται να προκαλέσουν διαμαγνητικές παρεμβολές. Τέτοιες αλληλεπιδράσεις μπορεί να οδηγήσουν σε ακούσια μαγνητική σύζευξη των οργάνων, που θα έχει σαν άμεσο επακόλουθο την απορρύθμιση των χειρουργικών εργαλείων μέσα στο σώμα του ασθενούς. Ένα ακόμη ζήτημα που πρέπει να επιλυθεί είναι η εκθετική μείωση της δύναμης συγκράτησης των μαγνητών με την απόσταση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η τρέχουσα κλινική χρήση της τεχνολογίας MAGS να περιοριστεί σε λιπόσαρκους ασθενείς ή παιδιά. Συμπληρωματικές εργασίες θα πρέπει να γίνουν επίσης και για την ανάπτυξη μιας κάμερας ικανής να οπτικοποιεί με επιτυχία το χειρουργικό πεδίο χωρίς να χρειάζεται την παροχή για πηγές επιπλέον φωτισμού.[36]

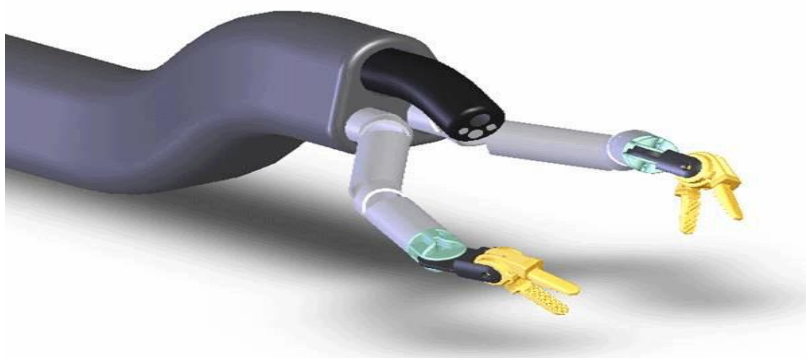
3.7 Χρήση ρομποτικών συστημάτων στην χειρουργική NOTES

Πολλές ομάδες έρευνας επενδύουν πολλή προσπάθεια στην ανάπτυξη νέων ενδοσκοπικών πλατφορμών που στόχο έχουν την εκτέλεση των διαδικασιών της χειρουργικής NOTES. Τα προβλήματα που φαίνεται να υπάρχουν είναι η φυσιολογία του σημείου εισόδου των χειρουργικών εργαλείων, η περιορισμένη δύναμη που μπορεί να ασκηθεί στους ιστούς όταν χρησιμοποιείται ένα εύκαμπτο ενδοσκόπιο και η ανάγκη τα οπτικά και τα χειρουργικά εργαλεία να είναι τοποθετημένα όλα μαζί. Η ρομποτική χρησιμοποιείται εδώ και αρκετά χρόνια στη λαπαροσκοπική χειρουργική προσφέροντάς της αρκετά πλεονεκτήματα. Τα ρομποτικά συστήματα βελτιώνουν τη χειρουργική ικανότητα μέσω της στερεοσκοπικής όρασης που προσφέρουν, των “έξυπνων” ρομποτικών εξαρτημάτων που διαχειρίζονται τους ιστούς και του φιλτραρίσματος του φυσικού τρόμου των χεριών. Στη χειρουργική NOTES έχουν αναπτυχθεί κάποιες ρομποτικές πλατφόρμες για την εκτέλεση χειρουργικών χειρισμών, όπως είναι το σύστημα Viacath και το σύστημα MASTER. Επίσης, έχει χρησιμοποιηθεί αρχικά σε πειραματικό στάδιο το υπάρχον ρομποτικό σύστημα da Vinci ώστε να μελετηθεί η μελλοντική προοπτική χρήσης του στη χειρουργική NOTES.

Το ρομποτικό σύστημα da Vinci έχει χρησιμοποιηθεί σε επεμβάσεις με τη μέθοδο NOTES σε πειραματικά μοντέλα. Η ομάδα του Geoffrey Box από το πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια πρώτη πραγματοποίησε με επιτυχία μία διακολπική NOTES νεφρεκτομή σε πειραματικό μοντέλο[37], ενώ ακολουθούσαν και άλλες ομάδες που μελέτησαν αυτήν την προοπτική. Το κύριο πλεονέκτημα που

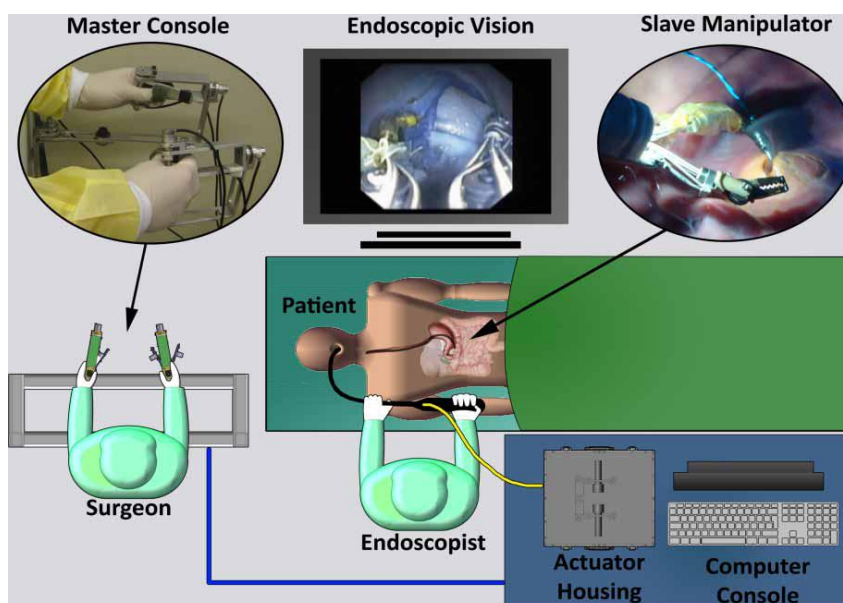
προσέφερε το ρομποτικό σύστημα da Vinci χάρη στα αρθρωτά εργαλεία του και την τρισδιάστατη όραση του είναι η βελτιωμένη συρραφή των τομών εντός του σώματος. Με τους δύο ρομποτικούς του βραχίονες η πρόσβαση στην περιτοναϊκή κοιλότητα φαίνεται να είναι πιο εύκολη σε σχέση με τις λαπαροσκοπικές προσεγγίσεις, όμως θα πρέπει να τροποποιηθεί το μέγεθος τους αισθητά ώστε να μπορούν να εισέρχονται από την ίδια φυσική οπή. Στα πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί έχει χρησιμοποιηθεί και ο ομφαλός σαν φυσική οπή σε συνδυασμό με τον κόλπο. Προβλήματα, όπως η φορητότητα του συστήματος da Vinci , το υψηλό κόστος του και ο περιορισμός του εύρους της κινητικότητας του λόγω της φυσικής διασύνδεσης της εξωτερικής με την εσωτερική μονάδα πεδίο θα πρέπει να αντιμετωπιστούν έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη χειρουργική NOTES.

Το σύστημα Viacath, που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Endo Via Medical (Norwood, MA, USA), είναι μίας πρώτης γενιάς τηλεχειριζόμενο ρομπότ τύπου αφέντη-σκλάβου. Το σύστημα περιλαμβάνει μία κονσόλα-αφέντη με διεπιφάνειες αφής, ένα σύστημα οδήγησης-σκλάβο και ένα εύκαμπτο στέλεχος μήκους 90cm που περιλαμβάνει το ενδοσκόπιο και δύο ρομποτικά εργαλεία. Τα δύο χειρουργικά εργαλεία τοποθετούνται μπροστά από το ενδοσκόπιο ώστε να επιτρέπονται οι χειρουργικοί χειρισμοί υπό πλήρη οπτικό έλεγχο. Το στέλεχος του συστήματος έχει επτά βαθμούς ελευθερίας κίνησης. Σε αυτήν την πρώτη συσκευή, δύο σημαντικά ζητήματα προέκυψαν. Το πρώτο αφορούσε τη δυσκολία εισαγωγής του στελέχους μέσα στον ασθενή και την τοποθέτηση των εργαλείων στο χειρουργικό πεδίο. Αυτό οφειλόταν κυρίως στο γεγονός της περιορισμένης ικανότητας ελιγμών του ενδοσκοπίου από το στέλεχος του συστήματος. Το δεύτερο πρόβλημα που παρουσιάστηκε είναι ότι τα εργαλεία μπορούσαν να παράγουν δύναμη μόλις 0.5N, που είναι ένα μέγεθος ανεπαρκές για τον επιτυχημένο χειρισμό των ιστών. Σε μία βελτιωμένη έκδοση αυτής της συσκευής το στέλεχος αντικαταστάθηκε από έναν σωλήνα τύπου overtube ώστε να επιτευχθεί πιο εύκολη πρόσβαση στην περιτοναϊκή κοιλότητα. Περαιτέρω μελέτη πρέπει να γίνει ώστε να μειωθεί η τριβή μεταξύ των εργαλείων που μειώνει την δύναμη που μπορούν να αναπτύξουν.[32,38]



Εικόνα 3.7-1: Το στέλεχος του ρομποτικού συστήματος ViaCath

Το ρομποτικό σύστημα MASTER (master and slave transluminal endoscopic robot) αναπτύχθηκε για να παρέχει στον χειρουργό υψηλή επιδεξιότητα και ανάδραση δύναμης ώστε να εκτελεί επιτυχημένα τις επεμβάσεις με την τεχνική NOTES. Το σύστημα αυτό αποτελείται από μία κονσόλα-αφέντη έναν τηλεχειρουργικό σταθμό εργασίας και έναν χειριστή-σκλάβο, όπου είναι τοποθετημένα τα χειρουργικά εργαλεία και το ενδοσκόπιο. Η κονσόλα του συστήματος είναι μία εργονομική διεπιφάνεια ανθρώπου-μηχανής, η οποία επιτρέπει στον χειρουργό να ελέγχει τους χειρουργικά εργαλεία. Σε αυτή περιέχονται κωδικοποιητές, οι οποίοι καταγράφουν τις κινήσεις του χειρουργού. Ακόμη, περιλαμβάνει και ενεργοποιητές, οι οποίοι παρέχουν στον χειρουργό την κατάλληλη ανάδραση δύναμης. Στον σταθμό εργασίας περιλαμβάνεται ένας υπολογιστής, ο οποίος επεξεργάζεται τα δεδομένα που έρχονται από την κονσόλα-αφέντη, τα κωδικοποιεί και τα μεταφράζει σε κινήσεις των χειριστών-σκλάβων. Ακόμη περιλαμβάνονται σε αυτόν διάφορες μηχανές συνεχούς ρεύματος, οι οποίες ενεργοποιούν τους χειριστές-σκλάβους. Τα χειρουργικά εργαλεία είναι αρκετά μικρά και εύκαμπτα ώστε να μπορούν να εισέλθουν στα δύο κανάλια ενός θεραπευτικού ενδοσκοπίου το οποίο είναι συνδεδεμένο με ένα σύστημα ενδοσκοπικής απεικόνισης. Για τον χειρισμό του συστήματος θα πρέπει να υπάρχει και ένας βοηθός ο οποίος θα κινεί το ενδοσκόπιο ενώ ο χειρουργός θα ελέγχει τους σκλάβους-χειριστές. Το συγκεκριμένο σύστημα αυξάνει τους βαθμούς ελευθερίας ενός ενδοσκοπικού συστήματος σε εννιά, αριθμός που είναι επαρκής ώστε να πραγματοποιούνται οι χειρουργικές εργασίες αποτελεσματικά. Περαιτέρω μείωση του μεγέθους των χειριστών-σκλάβων, στο μέλλον, θα δώσει την ικανότητα στον χειρουργό να αλλάζει τα χειρουργικά εργαλεία μέσα στο χειρουργικό πεδίο. [32, 39]



Εικόνα 3.7-2: Το ρομποτικό σύστημα MASTER

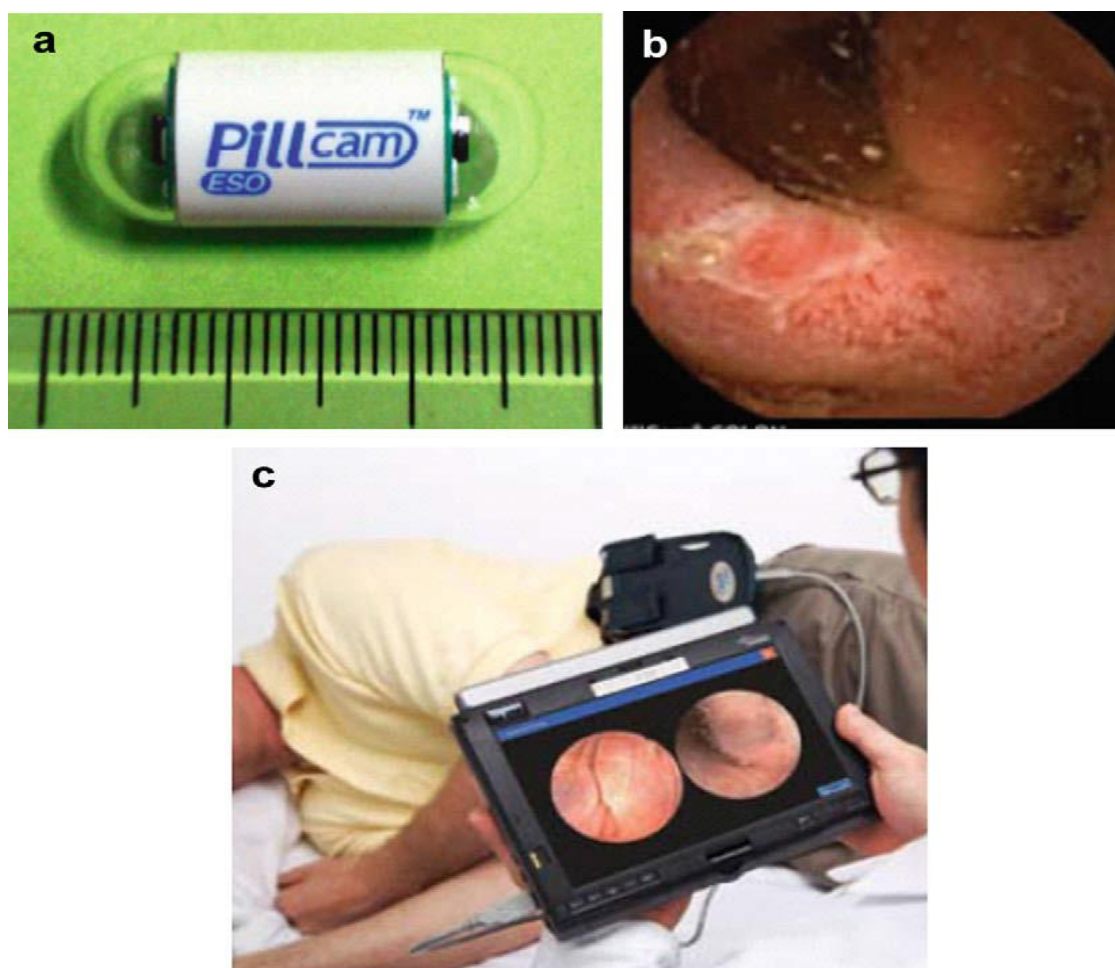
3.8 Χρήση μικρο-ρομπότ στη NOTES

Οι μοναδικές προκλήσεις που παρουσιάζονται από την καινούργια αυτή τεχνική επιζητούν ένα εντελώς καινούριο μοντέλο στην ανάπτυξη νέων εργαλείων. Αυτά τα χρόνια, έχει γίνει αρκετή έρευνα ώστε να αναπτυχθούν ιατρικοί μηχανισμοί και ρομπότ που ως επί το πλείστον εισέρχονται ολόκληρα στο σώμα του ασθενούς. Αυτά τα συστήματα αντιπροσωπεύουν τα αποτελέσματα των ερευνών που έγιναν στα πεδία της ρομποτικής, στα δίκτυα αισθητήρων, των μικρο-ενσωματωμένων ελεγκτών, της ιατρικής και της νανοτεχνολογίας. Το ζητούμενο, λοιπόν, είναι να αναπτυχθεί ένα εντελώς in vivo μικρορομποτικό σύστημα ώστε να εφαρμοστεί στη χειρουργική δια μέσου φυσικών οπών.

Με τον όρο μικρο-ρομπότ αναφερόμαστε σε μικροσκοπικά ρομπότ με μέγεθος μικρότερο από 1cm. Τα πρώτα μικρο-ρομπότ στον τομέα της ιατρικής, αναπτύχθηκαν για να βελτιώσουν τις ενδοσκοπικές διαδικασίες του γαστρεντερικού σωλήνα. Τυπικά, το ενδοσκόπιο αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος είναι η κεφαλή, η οποία περιλαμβάνει την κάμερα και τις πηγές φωτισμού και το δεύτερο μέρος είναι το στέλεχος του ενδοσκοπίου με το οποίο εισάγεται η κεφαλή στο προς εξέταση πεδίο. Η κύρια προέλευση του πόνου κατά τη διάρκεια της ενδοσκοπικής εξέτασης προκαλείται από την κίνηση του στελέχους μέσα στον γαστρεντερικό σωλήνα, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα να τεντώνεται το έντερο. Μία πρώτη προσπάθεια ελαχιστοποίησης του στομαχικού πόνου έγινε διαχωρίζοντας το σύστημα του ενδοσκοπίου. Έτσι η κεφαλή του ενδοσκοπίου κινείται αυτόνομα μέσα στον γαστρεντερικό σωλήνα ενώ ο εξοπλισμός παροχής ενέργειας και ελέγχου βρίσκονται έξω από το σώμα του ασθενούς.

Ένα εξελιγμένο ρομποτικό σύστημα για την εξέταση του γαστρεντερικού σωλήνα είναι ένα αυτόνομο χάπι- κάμερα, το οποίο είναι εύκολο προς κατάποση και μπορεί να κινηθεί φυσικά δια μέσου του γαστρεντερικού σωλήνα. Η συσκευή αυτή ονομάζεται PillCam SB (Given Imaging Ltd, Yoqneam, Israel) και είναι μία βίντεο κάψουλα, η οποία έχει διαστάσεις 11mmX26mm και ζυγίζει λιγότερο από 4gr. Περιλαμβάνει μία συσκευή απεικόνισης και μία πηγή φωτός, ενώ ο ρυθμός μετάδοσης των εικόνων είναι περίπου 2 εικόνες ανά δευτερόλεπτο. Οι εικόνες εκπέμπονται ασύρματα από την κάψουλα προς μία μικρή φορητή συσκευή καταγραφής δεδομένων, που είναι τοποθετημένη σε μία ζώνη την οποία φοράει ο ασθενής καθ' όλη τη διάρκεια της εξέτασης. Οι εικόνες του γαστρεντερικού σωλήνα μπορούν να αναλυθούν είτε σε πραγματικό χρόνο για άμεσο

εντοπισμό της συσκευής είτε σε μεταγενέστερο χρόνο για μία λεπτομερή διάγνωση [40]. Η συσκευή αυτή φαίνεται να είναι αποτελεσματική στη διάγνωση πολλών συνηθισμένων γαστρεντερικών διαταραχών, ειδικότερα στη διάγνωση της προέλευσης μίας λανθάνουσας αιμορραγίας [41]. Οι κύριοι περιορισμοί του συστήματος αυτού είναι η ανικανότητά του να κατευθυνθεί ενεργά εναντίον συγκεκριμένων στόχων και η έλλειψη τηλεχειρισμού ή βιοψίας της εντερικής βλέννας.



Εικόνα 3.8-1: (α) Η κάψουλα PillCam, (β) εικόνα από τον γαστρεντερικό σωλήνα, (γ) οπτικοποίηση του γαστρεντερικού σωλήνα σε πραγματικό χρόνο

Στο επόμενο στάδιο της έρευνας αναπτύχθηκαν μικρο-ρομπότ τα οποία μπορούν να εισέλθουν στη στομαχική κοιλότητα κατά τη διάρκεια της χειρουργικής επέμβασης. Η κύρια ομάδα που δουλεύει πάνω σε αυτό το μοντέλο των μικρο-ρομπότ είναι αυτή του καθηγητή Dimitry Olegnikov από το πανεπιστήμιο της Nebraska. Αυτοί ήταν οι πρώτοι που ανέπτυξαν ένα μικρο-ρομπότ πάνω σε μία αναδιπλούμενη τρίποδη βάση. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτού του μικρο-ρομπότ είναι ότι διαθέτει ένα βαθμό ελευθερίας, οι διαστάσεις του είναι 15mm διάμετρος και 60mm ύψος, και είναι το εξωτερικό του περίβλημα είναι μία θήκη αλουμινίου. Το σύστημα αυτό

περιλαμβάνει, ακόμη, έναν μόνιμο μαγνήτη, που είναι ένας συνεχούς ρεύματος κινητήρας, ο οποίος χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση του μηχανισμού κλίσης του ρομπότ και ελέγχεται από τον χειρουργό εξωτερικά μέσω ενός διακόπτη. Το ρομπότ μπορεί να περιστρέφεται κατά 360 μοίρες ενώ μπορεί να κλίνει κατά 45 μοίρες. Αυτό επιτρέπει στον χειρουργό περισσότερη οπτικοποίηση σε βάθος της στομαχικής κοιλότητας για πιο εύκολο χειρουργικό σχεδιασμό και εκτέλεση των χειρουργικών κινήσεων. Η αναδιπλούμενη τρίποδη βάση επιτρέπει στο ρομπότ να εισέρχεται και να αφαιρείται εύκολα από τη στομαχική κοιλότητα μέσω ενός τροκάρ. Ενώ, ο φωτισμός του χειρουργικού πεδίου παρέχεται με τη βοήθεια διόδων εκπομπής φωτός (LED).

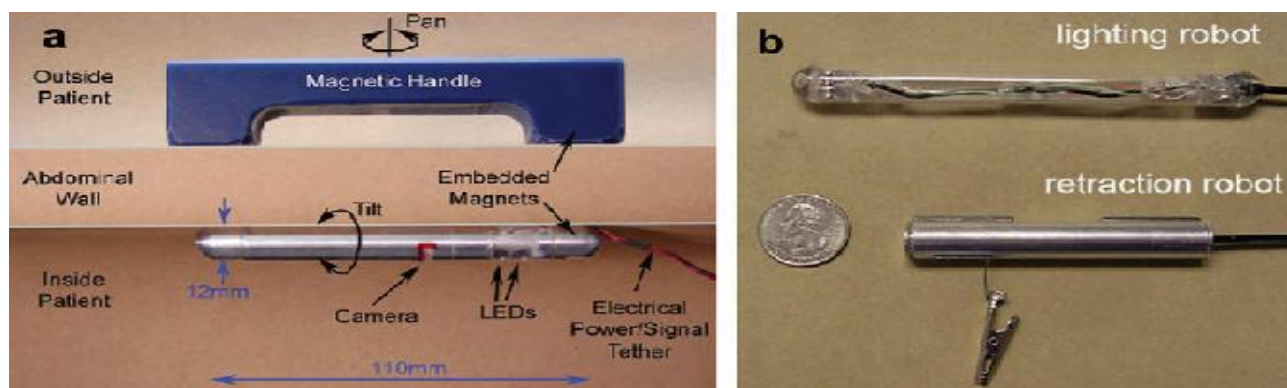


Εικόνα 3.8-2: Μικρο-ρομπότ που εισέρχονται στη στομαχική κοιλότητα κατά τη διάρκεια μίας επέμβασης

Η ίδια ομάδα έχει αναπτύξει μία έκδοση ενός κινητού ρομπότ με ρόδες, το οποίο έχει την ικανότητα να κινείται μέσα στην περιτοναϊκή κοιλότητα μετακινώντας προσεκτικά τα διάφορα στομαχικά όργανα. Το ρομπότ αυτό έχει διάμετρο 15-20mm και μήκος 75-100mm. Αποτελείται από δύο ελικοειδείς τροχούς, οι οποίοι οδηγούνται ανεξάρτητα από κινητήρες συνεχούς ρεύματος, και έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να μετακινούν το ρομπότ χωρίς να προκαλούν τραυματισμούς στους ιστούς. Μία “ουρά” εμποδίζει το ρομπότ να περιστρέφεται ανεξέλεγκτα, ενώ μπορεί να περιστραφεί όταν πρόκειται να αλλάξει κατεύθυνση. Το βάρος του είναι 25-30gr και είναι ικανό να παράγει δυνάμεις ζεύξης ίσες με το βάρος του. Αυτό του επιτρέπει να σκαρφαλώνει σε ένα λοφώδες και παραμορφωμένο περιβάλλον, όπως είναι η στομαχική κοιλότητα. Στο σώμα του ρομπότ είναι τοποθετημένος ένας κύριος μικροεπεξεργαστής και ένα σύστημα ελέγχου τηλεμετρίας. Ακόμη, διαθέτει έναν ρυθμιζόμενο αισθητήρα εστίασης της εικόνας ώστε να παρέχει στον χειρουργό μία πραγματικού χρόνου βίντεο ανάδραση και έχει την ικανότητα να εκτελεί μικρούς χειρισμούς όπως η λήψη βιοψιών. Αυτό το σύστημα έχει χρησιμοποιηθεί σαν την κεντρική πηγή της οπτικής ανάδρασης

ώστε να εκτελεστούν συνηθισμένες λαπαροσκοπικές διαδικασίες και πιο πρόσφατα χρησιμοποιήθηκε για την εξερεύνηση της περιτοναϊκής κοιλότητας στην οποία έχουμε πρόσβαση μέσω της διαγαστρικής προσέγγισης της NOTES [42]. Οι τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις έχουν φέρει μία εντελώς ασύρματη έκδοση του ίδιου συστήματος η οποία φαίνεται να δουλεύει κανονικά σε πειραματικές ρυθμίσεις. Με αυτόν τον τρόπο ανοίγει ο δρόμος για την ανάπτυξη ενός εντελώς αυτόνομου in vivo συστήματος[43].

Το ολοένα και μικρότερο μέγεθος των ρομπότ και η δυνατότητα να εισέλθουν πολλά τέτοια ρομπότ μέσα στην περιτοναϊκή κοιλότητα μέσω μίας φυσικής οπής εισάγει μία εντελώς καινούρια έννοια στην ανάπτυξη των χειρουργικών εργαλείων. Το κάθε μικρο-ρομπότ μπορεί να εξειδικευθεί σε τέτοιο βαθμό για μία μόνο εργασία αλλά όλα εργάζονται για το ίδιο επιθυμητό αποτέλεσμα. Σε αντίθεση, οι τρέχουσες τεχνολογικές πλατφόρμες για τη NOTES κατασκευάζονται ώστε να εκτελούνται πολλαπλές λειτουργίες μέσα από την ίδια συσκευή. Ο Lehman και οι συνεργάτες του έχουν αναπτύξει μία ομάδα από συνεργαζόμενα μικρο-ρομπότ τα οποία μπορούν να εισέλθουν στην περιτοναϊκή κοιλότητα είτε μέσω μίας τομής στο κοιλιακό τοίχωμα είτε μέσω των φυσικών οπών. Η ομάδα αυτή των μικρο-ρομπότ μπορεί να προσφέρει βοήθεια στον χειρουργό κατά της διάρκεια μίας ελάχιστα επεμβατικής διαδικασίας. Τα συγκεκριμένα ρομπότ έχουν δοκιμαστεί με επιτυχία σε πειραματικά μοντέλα. Το σύστημα αυτό αποτελείται από έναν εξωτερικό σταθερό σωλήνα με έναν περιστρεφόμενο σωλήνα στο εσωτερικό του. Ο εσωτερικός σωλήνας διαθέτει είτε μία κάμερα και πολλαπλά λευκά LED είτε κάποιο χειρουργικό εργαλείο. Για να διασφαλιστεί η σταθερότητα του συστήματος όταν αυτό βρίσκεται στην περιτοναϊκή κοιλότητα, ενώ ταυτόχρονα το κάθε μικρο-ρομπότ να μπορεί να κινείται ανεξάρτητα χρησιμοποιούνται δύο ενσωματωμένοι μαγνήτες. Κάθε ένας από αυτούς τους μαγνήτες τοποθετείται στην κάθε άκρη του ρομπότ έτσι ώστε ο χειρισμός του να γίνεται από μία μαγνητική λαβή η οποία τοποθετείται στο εξωτερικό στομαχικό τοίχωμα σύμφωνα με την τεχνολογία MAGS που έχουμε αναπτύξει παραπάνω.



Εικόνα 3.8-3: Η νέα γενιά των μικρο-ρομπότ που χρησιμοποιεί την τεχνολογία MAGS

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που πρέπει να διαθέτει ένα μικρο-ρομπότ ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια στον τομέα της ιατρικής είναι το μικρό τους μέγεθος έτσι ώστε να μπορούν να εισέλθουν στο ανθρώπινο σώμα μέσω των φυσικών οπών του, να είναι βιοσυμβατά με τον ανθρώπινο οργανισμό ώστε να μην προκαλούν περαιτέρω παθολογίες στον ασθενή και να είναι βιοδιασπώμενα ή να μπορούν να αφαιρεθούν εύκολα από τον ασθενή μετά το πέρας της χειρουργικής διαδικασίας. Απαραίτητη επίσης κρίνεται η δυνατότητα χειρισμού και κίνησης τους μέσα στο σώμα του ασθενούς.

Οι προοπτικές που εμφανίζονται από την εξέλιξη της τεχνολογίας των μικρο-ρομπότ φαίνεται να είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες για τον τομέα της ελάχιστα επεμβατικής χειρουργικής και ειδικότερα για τη χειρουργική NOTES. Η δυνατότητα να εξοπλιστούν τα μικρο-ρομπότ με πολλαπλούς αισθητήρες, οι οποίοι έχουν την ικανότητα να καταγράφουν ασύρματα φυσιολογικές παραμέτρους του σώματος του ασθενή όπως είναι η θερμοκρασία και η πίεση του μέσα στην στομαχική κοιλότητα, έχει ήδη αρχίσει να ερευνάται. Αυτό θα έδινε τη δυνατότητα στον χειρουργό να εντοπίζει οποιαδήποτε επιπλοκή κατά τη διάρκεια της επέμβασης παρατηρώντας τις φυσιολογικές παραμέτρους του ασθενή. Ένα άλλο όραμα για αυτού του είδους τις ρομποτικές συσκευές είναι ότι θα μπορούσαν εύκολα να μεταφερθούν και να χρησιμοποιηθούν από μη ιατρικό προσωπικό όταν υπάρχει τέτοια ανάγκη και στη συνέχεια ο ασθενής να χειρουργείται από έναν απομακρυσμένο χειρουργό ώστε να παρέχονται στον ασθενή διαγνωστικές και χειρουργικές ικανότητες αμέσως μετά το τραύμα του. Μειώνοντας, έτσι, αισθητά τη θνησιμότητα των ασθενών που οφείλεται στην καθυστερημένη μεταφορά του ασθενή σε κάποιο νοσοκομείο. Μία άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή η οποία είναι υπό έρευνα παρουσιάζεται από την ανάπτυξη έξυπνων μικρο-ρομπότ για στοχευμένη διανομή φαρμακευτικών ουσιών στο σώμα του ασθενούς. Η ολλανδική ομάδα Philips έχει αναπτύξει ένα “έξυπνο χάπι”, το οποίο περιέχει έναν μικροεπεξεργαστή, μία μπαταρία, έναν ασύρματο εκπομπό, μία αντλία και μία δεξαμενή με φάρμακο, το οποίο απελευθερώνεται σε μία συγκεκριμένη περιοχή του σώματος. Η κάψουλα “iPill” μετράει την οξύτητα με έναν αισθητήρα ώστε να αποφασίσει την κατάλληλη τοποθεσία στο έντερο που θα πρέπει να απελευθερώσει το φάρμακο. Η κατευθυνόμενη διανομή των φαρμάκων στην ακριβή τοποθεσία της ασθένειας στοχεύει σε δόσεις οι οποίες μπορεί να είναι μικρότερες, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τις παρενέργειες.

Ενώ τα συνεργαζόμενα μικρο-ρομπότ, εξοπλισμένα ή μη με αισθητήρες θα προσφέρουν πιθανότατα αρκετά πλεονεκτήματα στην ελάχιστα επεμβατική χειρουργική και ειδικότερα στη χειρουργική NOTES, θα εισάγουν ωστόσο μοναδικές προκλήσεις για τους χειρουργούς εξαιτίας του ανθρώπινου περιορισμού να συγχρονίζει πολλαπλά αντικείμενα και επεξεργάζεται γρήγορα μεγάλη ποσότητα πληροφοριών. Για αυτό το λόγο υπάρχει μία κυρίαρχη τάση προς την κατεύθυνση τα μικρο-ρομποτικά συστήματα να εξοπλιστούν με τεχνητή νοημοσύνη για αυτόνομο συγχρονισμό και αντίδραση σε εναλλασσόμενα περιβάλλοντα εργασίας. [44]

3.9 Ιατρική Απεικόνιση κι Επαυξημένη Πραγματικότητα στη χειρουργική NOTES

Η οργάνωση NOSCAR προσδιόρισε πολλούς πιθανούς προσδιορισμούς για την ασφαλή εφαρμογή της τεχνικής NOTES στην κλινική πράξη. Οι διαθέσιμες τεχνολογίες της ιατρικής απεικόνισης ανεξάρτητα από την ανάπτυξη καινούριων εργαλείων έρχονται να βοηθήσουν στην επίλυση των προβλημάτων αυτών. Το πρώτο και κύριο πρόβλημα που διατυπώθηκε ήταν η ασφαλής πρόσβαση στην περιτοναϊκή κοιλότητα. Η διαθέσιμη προεγχειρητική απεικόνιση με τρισδιάστατη ανακατασκευή των οργάνων και η ενδοεγχειρητική απεικόνιση, όπως είναι η υπερηχογραφία, θα βοηθήσουν προς αυτήν την κατεύθυνση. Το πρόβλημα του χωρικού προσανατολισμού μπορεί επίσης να επιλυθεί με τη βοήθεια της προεγχειρητικής απεικόνισης σε συνδυασμό με την τρισδιάστατη ανακατασκευή των οργάνων. Οι επιπλοκές που μπορεί να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια της επέμβασης μπορούν να αντιμετωπιστούν με τη βοήθεια της ενδοεγχειρητικής απεικόνισης για έγκαιρη διάγνωσή τους. Τέλος, η ανάπτυξη εξομοιωτών εικονικής πραγματικότητας βασισμένων σε πραγματικές μελέτες ασθενών θα είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την εκπαίδευση των χειρουργών της τεχνικής NOTES.

Οι εξελίξεις στον τομέα της ενισχυμένης πραγματικότητας μπορούν επίσης να προσφέρουν λύσεις στα θέματα του χωρικού προσανατολισμού, στην ανάπτυξη μίας πλατφόρμας πολλαπλών διεργασιών και του ελέγχου της αιμορραγίας κατά τη διάρκεια της επέμβασης. Η αντιστοίχιση της εικόνας ενός τρισδιάστατου μοντέλου, στο οποίο έχει τοποθετηθεί το ενδοσκοπιο ιδεατά, με την πραγματική εικόνα του ασθενή παρέχει στον χειρουργό πολύτιμη βοήθεια στην σωστή τοποθέτηση του ενδοσκοπίου μέσα στην περιτοναϊκή κοιλότητα και στην ακόμη καλύτερη κατανόηση των εικόνων υπερήχων που του παρέχονται. Ακόμη, η τεχνική της αντιστοίχισης των εικόνων θα βοηθήσει στην απεικόνιση των ανατομικών δομών που βρίσκονται περιφερειακά του ενδοσκοπίου

και τη σχετική τους θέση με τα υπόλοιπα εργαλεία. Η σχεδίαση τρισδιάστατης διαδρομής θα μπορούσε να φανεί ένα πολύτιμο εργαλείο στη σύγκριση των δομών που βλέπει ο χειρουργός διαμέσω του ενδοσκοπίου και των δομών που δημιουργούνται από ένα μοντέλο του οπτικού πεδίου χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της αξονικής τομογραφίας, ενσωματώνοντας τις οπτικές στρεβλώσεις των οπτικών του ενδοσκοπίου. [45]

Κεφάλαιο 4: Προεγχειρητικός σχεδιασμός

4.1 Εισαγωγή

Παρά τα όσα οφέλη αναφέραμε ότι προσφέρει η ρομποτική σε σχέση με τη συμβατική χειρουργική, οι επεμβάσεις μέσω μικρών τομών εισήγαγαν νέες προκλήσεις για τους χειρουργούς: Τα χειρουργικά εργαλεία πρέπει να καθοδηγούνται γύρω από ένα σημείο εισόδου, το οποίο οδηγεί στην απώλεια του διαισθητικού συντονισμού μεταξύ χεριών και ματιών. Επιπλέον, το σημείο εισόδου περιορίζει κατά δύο τους βαθμούς ελευθερίας, αφήνοντας στο χειρουργό τέσσερις ανά εργαλείο για να εργαστεί. Αυτό καθιστά περίπλοκες διεργασίες όπως η συρραφή των τομών ακόμα πιο χρονοβόρες. [46] Τα χειρουργικά εργαλεία πρέπει να στηριχτούν στα τροκάρ και να εισαχθούν μέσω αυτών, καθιστώντας δύσκολο για το χειρουργό να αισθάνεται τις δυνάμεις εξ' επαφής.

Εκτός από τις δυσκολίες που αφορούν τους χειρουργούς, σε αυτές τις διαδικασίες μπορούν ενδεχομένως να αυξηθούν η πολυπλοκότητα, ο χρόνος προετοιμασίας της χειρουργικής αίθουσας και ο αριθμός των πιθανών σφαλμάτων. Επιπλέον, ο περιορισμένος χώρος εργασίας στο εσωτερικό του σώματος του ασθενούς, οι ανεπιθύμητες “συγκρούσεις” των εργαλείων με γειτονικούς ιστούς κι όργανα όπως επίσης και οι περιορισμοί των αρθρώσεων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.[47]

4.2 Η έννοια του προεγχειρητικού σχεδιασμού

Στο πλαίσιο της περαιτέρω ανάπτυξης των πλεονεκτημάτων της ρομποτικής χειρουργικής, είναι απαραίτητη και η εφαρμογή κατάλληλου προεγχειρητικού σχεδιασμού και προσομοιώσεων. Η ανάδραση από το πλάνο προετοιμασίας της εκάστοτε επέμβασης σε συνδυασμό με τις πληροφορίες που αφορούν στη “γεωμετρία” των ιστών κι οργάνων του κάθε ασθενούς οι οποίες παρέχονται από τις ακτινογραφίες, τις αξονικές και μαγνητικές τομογραφίες, κατέχουν κύριο ρόλο στην υποβοηθούμενη από υπολογιστή ρομποτική χειρουργική. Η ακριβής επέμβαση όπως θα πραγματοποιηθεί από το χειρουργικό ρομπότ, προσομοιώνεται και “προβάρεται” με κινηματικούς περιορισμούς στη χρήση των τροκάρ, ενώ η έκβαση των προσομοιώσεων αυτών όπως προέκυψαν με βάση τα κλινικά δεδομένα του ασθενούς, μπορούν να επιβεβαιώσουν την αποτελεσματικότητα

του προτεινόμενου πλάνου επέμβασης. [48]

Όπως και στη λαπαροσκοπική χειρουργική, οι χειρουργοί πρέπει να αποφανθούν σε ποιο σημείο θα τοποθετηθούν τα τροκάρ για την προσέγγιση της κοιλιακής κοιλότητας και να εισάγουν τα χειρουργικά εργαλεία μέσω μιας οπής διαμέτρου περίπου 1 cm. Γενικά, επιλέγονται δύο θέσεις για τα τροκάρ από όπου θα εισαχθούν οι χειρουργικές λαβίδες, μία για το ενδοσκόπιο και μία θέση για τη βοηθητική θύρα. Η βέλτιστη επιλογή των θέσεων αυτών ποικίλει ανάλογα με το είδος της επέμβασης και με τον εξοπλισμό που θα χρησιμοποιηθεί. Η ανάπτυξη ενός προεγχειρητικού πλάνου για τη ρομποτική χειρουργική φέρει τα ακόλουθα οφέλη:

Επιπρόσθετα από το συμβατικό προεγχειρητικό σχεδιασμό όπου οι γιατροί πρέπει να αποφανθούν για τα βήματα που θα ακολουθήσουν στην επέμβαση παρατηρώντας τις ιατρικές εικόνες του ασθενούς, προσφέρεται η ακριβής τοποθέτηση του χειρουργικού ρομπότ και η διαδικασία, για παράδειγμα, προσέγγισης ενός όγκου με βάση γεωμετρικές πληροφορίες.[49] Εάν η γεωμετρική δομή των ιστών κι οργάνων του κάθε ασθενούς συνδυαστεί κατάλληλα με τη θέση και παραμετροποίηση του ρομπότ σε εικονικό χώρο, η χειρουργική ομάδα μπορεί να εγκρίνει τις ρομποτικές κινήσεις της προτεινόμενης διεργασίας.[50]

Κατάλληλη τοποθέτηση των θυρών για τα τροκάρ μεγιστοποιεί το εύρος κίνησης του ρομπότ και βελτιώνει σημαντικά την επιτυχία της επέμβασης. Επιπλέον, η περιοχή στην οποία έχει πρόσβαση το ρομπότ και μέσα στην οποία θα καθοδηγηθεί, περιορίζεται από τις σταθερές, προκαθορισμένες θέσεις των τροκάρ. Συνεπώς, σε κάθε περίπτωση, αυτές οι θέσεις πρέπει να επιλεγθούν για τον κάθε ασθενή. Με την ύπαρξη προεγχειρητικού σχεδιασμού, εξασφαλίζεται η τοποθέτηση του ρομπότ κατά τρόπο ο οποίος παρέχει μία επαρκή απόσταση από όλα τα εμπόδια του περιβάλλοντα χώρου και αποφεύγεται η επιβάρυνση του ασθενούς με το να πρέπει να γίνουν νέες οπές για την τοποθέτηση των τροκάρ.[51]

Εάν οι χειρουργοί, οι βοηθοί και το νοσηλευτικό προσωπικό μπορούν να εξασκηθούν πριν την επέμβαση με χρήση ενός εκπαιδευτικού εικονικού συστήματος, μπορούν και να αναπτύξουν μία διαισθητική αντίληψη της τοποθέτησης των μηχανημάτων και του ρομπότ και να εξοικονομήσουν χρόνο κατά τη διάρκεια της πραγματικής επέμβασης.

Ο προεγχειρητικός σχεδιασμός μπορεί να είναι εξίσου αποτελεσματικός με ένα πρόγραμμα εκπαίδευσης για προσωπικό ανειδίκευτο στον τομέα της ρομποτικής χειρουργικής.[50][51]

4.3 Από 2D ιατρικές εικόνες στο 3D ομοίωμα

Όπως εύκολα συμπεραίνουμε, το σημείο-κλειδί για την ύπαρξη προεγχειρητικού σχεδιασμού είναι το να παρέχεται στο χειρουργό ένα τρισδιάστατο (3D) ομοίωμα (μοντέλο) των οργάνων του ασθενούς που τον ενδιαφέρουν σε κάθε περίπτωση, το οποίο ομοίωμα θα προκύψει από τα ιατρικά δεδομένα που διατίθενται σε μορφή X-ray (ακτινογραφίες), CT εικόνων (αξονική τομογραφία), MRI/MRA εικόνων (μαγνητική τομογραφία και αγγειογραφία) και 3D υπερήχων. Η ανακατασκευή μιας τριγωνικής 3D επιφάνειας από αυτές τις εικόνες (τομές) έχει μελετηθεί εκτενώς καθώς πληθώρα βιοιατρικών αναλύσεων βασίζεται σε αυτήν. Συνήθως, πρέπει να εξαχθεί από το 2D περίγραμμα του ιστού που μας ενδιαφέρει από κάθε διαθέσιμη τομή (CT, MRI, X-Ray), και μετά να χρησιμοποιηθεί ένας αλγόριθμος για την μετατροπή στο 3D μοντέλο. Ωστόσο, δεδομένου του ότι η κατανομή της πυκνότητας και των οριοθετήσεων των ιστών μπορεί να ποικίλλουν σημαντικά, η ακρίβεια και η πληρότητα των 3D μοντέλων μελετάται συνέχεια, και νέοι αλγόριθμοι που συνοδεύονται από την αντίστοιχη πλατφόρμα λογισμικού, εμφανίζονται διαρκώς.[51][52]

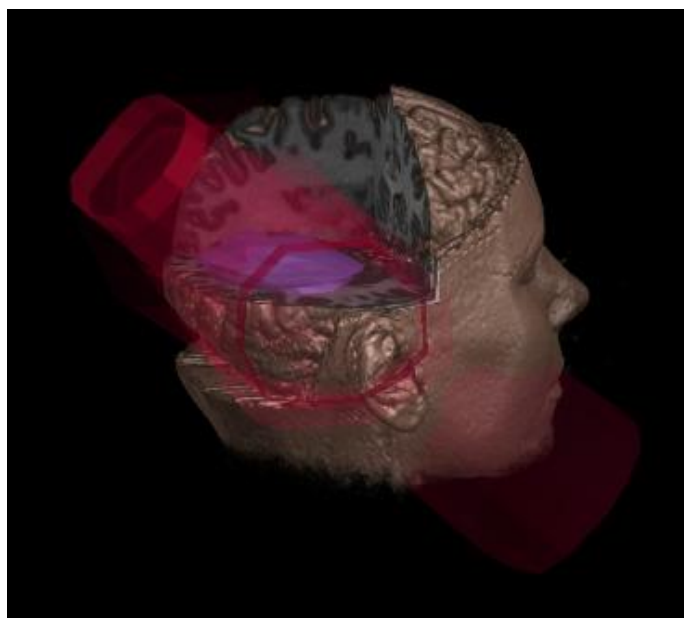
4.3.1 Κατηγορίες 3D ομοιωμάτων

Όλα τα 3D μοντέλα μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες, τα *συμπαγή* (απόδοση όγκου) και τα μοντέλα *κελύφους* ή αλλιώς, απόδοσης επιφανειών. Τα συμπαγή ορίζουν ρεαλιστικά τον όγκο του απεικονιζόμενου αντικειμένου, και χρησιμοποιούνται κυρίως για μη εικονικές προσομοιώσεις όπως είναι οι ιατρικές ενώ με τα μοντέλα κελύφους απεικονίζεται κυρίως η επιφάνεια και τα όρια του αντικειμένου, αγνοώντας τον εσωτερικό όγκο.[53]

4.3.2 Απόδοση Όγκου

Οι 2D τομές-εικόνες απεικονίζονται μέσω ενός 3D πίνακα με στοιχεία τα voxels, τα μικρά κυβοειδή στοιχεία όγκου στα οποία χωρίζουμε νοητά την περιοχή που θέλουμε να ανακατασκευάσουμε. Διάφοροι αλγόριθμοι ανίχνευσης επιφάνειας χρησιμοποιούνται για να εντοπιστούν τα όρια των όψεων του κάθε voxel, και στη συνέχεια για να “ενώσουν” τις όψεις κατάλληλα σε μορφή τριγωνικών πλεγμάτων τα οποία και θα προβληθούν μετά, επιτρέποντας μας την εμφάνιση λεπτών ή θολών επιφανειών. Αναλυτικότερα, διαμορφώνεται ένα σύνολο όγκου

δεδομένων, του οποίου κάθε στοιχείο-voxel χαρακτηρίζεται από τρεις συνιστώσες χρώματος (κόκκινο, πράσινο, μπλε) και μια τέταρτη που μας διευκρινίζει εάν έχουμε διαφάνεια ή αδιαφάνεια στο συγκεκριμένο σημείο. Στη συνέχεια, ανακατασκευάζουμε μια συνεχή συνάρτηση από το προαναφερόμενο σύνολο των voxels και τέλος η συνάρτηση αυτή προβάλλεται σε 2D οπτικό πεδίο, όπως είναι η οθόνη του υπολογιστή.[53][54]

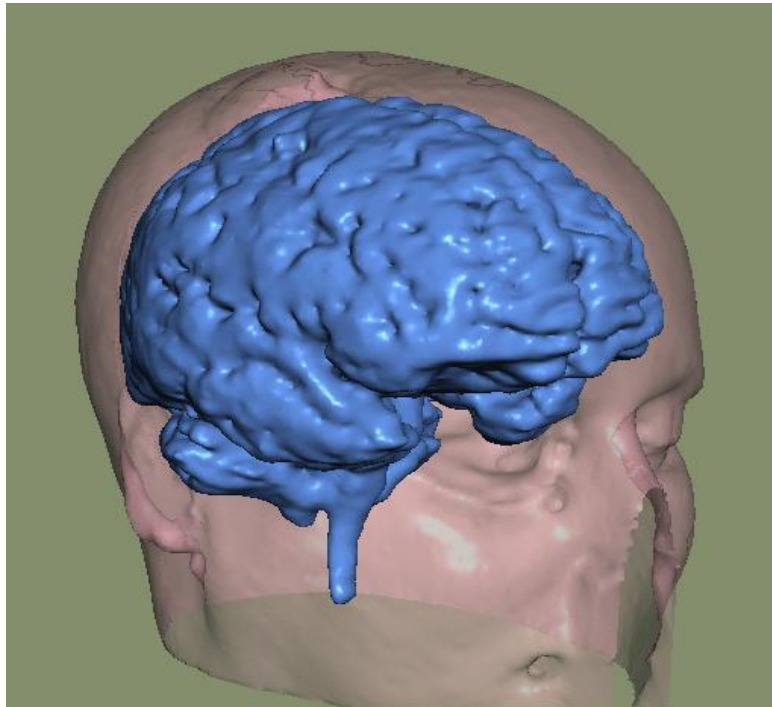


Εικόνα 4.3.2-1: Μοντέλο απόδοσης όγκου

4.3.3 Απόδοση Επιφάνειας

Στην περίπτωση των μοντέλων κελύφους, μετατρέπονται οι όγκοι σε γεωμετρικές δομές, με χρήση μιας μορφής ισο-περιγραμμάτων. Κάθε τομή, αν θεωρήσουμε ότι οι τομές έχουν ληφθεί για παράδειγμα, διαδοχικά κάθετα στον εγκάρσιο άξονα ενός οστού, επεξεργάζεται ξεχωριστά ώστε να ανιχνευθεί το συνολικό περίγραμμα του οργάνου ή του ιστού, και στη συνέχεια με κατάλληλο αλγόριθμο προχωράμε στην 3D απεικόνιση. Αυτή η εύχρηστη προσέγγιση είναι κατάλληλη σε απλές γεωμετρίες όπως αυτές των περισσότερων οστών, απεικονίζονται και τυχόν σκιάσεις ή παραμορφώσεις, ενώ έχουμε βελτιωμένη απόδοση αφού αγνοούνται τα δεδομένα στο εσωτερικό των δομών ενδιαφέροντος. Διαδοχικά, έχουμε κατάτμηση της εικόνας και στη συνέχεια απομόνωσης της, παρεμβολή και τέλος πολυγωνοποίηση επιφανειών. Αναλυτικότερα, με τη βοήθεια των αρχικών πολυγώνων ή τριγώνων που τοποθετούνται μεταξύ των περιγραμμάτων των δομών στις διαδοχικές τομές-εικόνες, παράγεται μια γεωμετρική αναπαράσταση των επιθυμητών δομών, ενώ με την εφαρμογή ενός αλγορίθμου κατάτμησης αποφασίζεται το αν ένα voxel ανήκει

στην επιφάνεια ενδιαφέροντος.[53][54]



Εικόνα 4.3.3-1: Απόδοση επιφάνειας

4.4 Συνοπτική παρουσίαση αλγορίθμων για κατασκευή 3D ομοιώματος

Η ομάδα του **Artzy et al.** (1981) περιέγραψε μια διαδικασία όπου εξέταζε την τοπολογική θεώρηση των δομικών δεδομένων για να ανιχνεύσει τις οριακές όψεις για όλα τα voxels ενώ επισήμανε και την αποδοτικότητα της μεθόδου αυτής σε όρους CPU μνήμης και χρόνου ολοκλήρωσης από τον υπολογιστή.[54]

Ο αλγόριθμος MC (Marching Cubes), που προτάθηκε το 1987 από τον **Lorensen**, δημιούργησε ένα 3D μοντέλο από επιφάνειες συνεχούς πυκνότητας από έναν 3D πίνακα σημείων. Ένας λογικός κύβος σχηματίστηκε από 8 pixels που βρίσκονται σε δύο διαδοχικές τομές. Μέσω της συνδεσιμότητας που υπήρχε στο ενδιάμεσο των δύο τομών, βοηθήθηκε η παραγωγή της τοπολογίας των τριγωνικών πλεγμάτων. Ο **Cline** ανέπτυξε επιπλέον δύο αλγόριθμους για κατασκευή 3D επιφάνειας από πολλαπλές 2D τομές ιατρικών εικόνων. Ο πρώτος αλγόριθμος ήταν ο MC αλγόριθμος για την παραγωγή ενός 3D πολυγωνικού μοντέλου, ενώ ο δεύτερος ήταν ο αλγόριθμος Dividing

Cubes για την παραγωγή των συντεταγμένων των επιφανειακών σημείων και κανονικών διανυσμάτων. Αμφότεροι οι αλγόριθμοι αποσκοπούσαν στην παραγωγή εικόνων υψηλής ποιότητας.[55]

Η ομάδα των **Payne et al.**, προσπαθώντας να αντιμετωπίσει τα προβλήματα του MC αλγορίθμου, παρουσίασε ένα γραφικό σύστημα για την απεικόνιση λειτουργικών και ανατομικών δεδομένων σχετικών με αυθαίρετες επιλογές εξωτερικών ή εσωτερικών επιφανειών του εγκεφάλου, στο οποίο σύστημα περιλαμβανόταν και μια παραλλαγή του MC αλγορίθμου για μείωση της ανάλυσης πεδίων ελάχιστης απόστασης και επίσης για εξάλειψη φαινομένων όπως οι “τρύπες” που άφηνε η κάλυψη των γειτονικών κύβων.

Ο **Montani** εργάστηκε πάνω σε μια διαδικασία μετά την κύρια επεξεργασία για να μειωθεί ο αριθμός των τριγώνων, ενώ οι **Delibasis et al.** πρότειναν νέα και αποδοτική παραλλαγή του κλασικού MC αλγορίθμου για ανακατασκευή 3D επιφάνειας από 3D ιατρικές εικόνες.

Ο **Rajon** πρότεινε τρεις νέους αλγόριθμους, τον ευθύ MC αλγόριθμο και τον ανάστροφο, οι οποίοι λύσανε το πρόβλημα της ασάφειας στα όρια των περιοχών, ενώ ο τρίτος αλγόριθμος αποσκοπούσε στην όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση του μεγέθους των δεδομένων και στη βελτίωση της ποιότητας των τριγώνων. Οι **Antonelli et al.** παρουσίασαν μια μέθοδο για αυτοματοποιημένη αναγνώριση του πνευμονικού παρεγχύματος στις CT εικόνες, εξάγοντας τις πνευμονικές περιοχές σε κάθε τομή με χρήση τμηματοποίησης με βάση το κατώφλι και με χρήση ανακατασκευής ορίων. Επίσης, τεχνική κατωφλίου απομόνωσε το εσωτερικό των πνευμόνων και τελικά η 3D ανακατασκευή του πνεύμονα έγινε με ογκομετρική προσέγγιση.[54][55]

4.5 Διαθέσιμα πακέτα λογισμικού για ανάλυση κι επεξεργασία ιατρικών δεδομένων

Όπως είναι προφανές, τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μια πληθώρα πακέτων λογισμικού για τη μετάβαση από τις 2D ιατρικές εικόνες στο 3D ομοίωμα της δομής που μας ενδιαφέρει. Μπορούμε να αναφερθούμε επιγραμματικά σε μερικές από αυτές τις πλατφόρμες λογισμικού:[56]

OsiriX: Για επεξεργασία ιατρικών εικόνων MRI, CT, PET, υπερήχων που αποθηκεύονται σε

μορφή DICOM, πολυεπίπεδες ανακατασκευές, και ενοποίηση διαφορετικών πληροφοριών που παρέχονται από παραδείγματος χάρη εικόνες MRI και CT του ίδιου ιστού.

3D Slicer: Κυρίως για εφαρμογές που αφορούν σε περιπτώσεις αυτισμού, σκλήρυνσης κατά πλάκας, ερυθματώδους λύκου, καρκίνου του προστάτη, σχιζοφρένειας, ορθοπεδικής, καρδιοαγγειακών ασθενειών και νευροχειρουργικής.

Seg 3D: Αυτόματη ενοποίηση διαφορετικών πληροφοριών στην ίδια εικόνα, απόδοση όγκου και επιφανειών σε θέματα που αφορούν κυρίως νευροχειρουργική και μελέτη του εγκεφάλου.

Vulture: Το 3D μοντέλο μπορεί να θεαθεί και να διασταυρωθεί από οποιαδήποτε κατεύθυνση, επικουρώντας σημαντικά επεμβάσεις για την αντιμετώπιση της σκολίωσης, όπου η τοποθέτηση των μεταλλικών ράβδων στην σπονδυλική στήλη του ασθενούς στις βέλτιστες θέσεις, είναι ιδιαίτερα σημαντική.

BrainView: Αποκλειστικά για θέματα που αφορούν στην απεικόνιση και προσομοίωση του εγκεφάλου, επιτρέπεται η ταυτόχρονη προβολή και των τριών ορθογωνικών τμηματικών επιπέδων και η διαδραστική “κίνηση” μέσα στο ομοίωμα για βέλτιστη προσέγγιση όλων των δεδομένων.

ITK: Για την ανάπτυξη προγραμμάτων που διευκολύνουν την τμηματοποίηση ιατρικών εικόνων και την αντιστοίχιση όλων των πληροφοριών που προκύπτουν από τα διάφορα είδη των εικόνων αυτών στο τελικό 3D ομοίωμα.

FreeSurfer: Ένα σύνολο από αυτοματοποιημένα εργαλεία για την ανακατασκευή της επιφάνειας του εγκεφαλικού φλοιού από δομικά δεδομένα MRI τομών, και επικάλυψη λειτουργικών δεδομένων MRI τομών στην τελική επιφάνεια.

AMIDE: Εκτός από την απόδοση όγκου και την αντιστοίχιση πληροφοριών, παρέχεται μεγάλη ποικιλία χρωμάτων και δυνατότητα διάκρισης κάθε τομής ξεχωριστά μέσα στο ομοίωμα, ενώ είναι δυνατή και η ταυτόχρονη προβολή πολλών 3D ομοιωμάτων.

Amira: Με επεξεργασία θωρακικών CT εικόνων, παράγεται ένα μοντέλο για το σχεδιασμό καρδιοαγγειακών επεμβάσεων, στο οποίο μοντέλο μπορούμε να επιλέξουμε ημιδιαφανή ή πλήρως

διαφανή απεικόνιση, αγνοώντας το δέρμα ή τον αριστερό πνεύμονα του ασθενούς.

3D-DOCTOR: Σε πραγματικό χρόνο, είτε μέσω όγκου είτε επιφάνειας, απόδοση των επιθυμητών ομοιωμάτων, με δυνατότητα προβολής τομών ακόμα και ως προς κάποιον αυθαίρετο άξονα που δεν περιλαμβανόταν στους άξονες ως προς τους οποίους ελήφθησαν οι αρχικές εικόνες. Επίσης, επιτυγχάνεται και αυτόματη ευθυγράμμιση μη ευθυγραμμισμένων τομών.

Mimics: Στους τομείς της καρδιοαγγειακής, ορθοπεδικής, πνευμονολογικής χειρουργικής και κρανιογναθοχειρουργικής, εκτός από τη δυνατότητα δημιουργίας και οποιαδήποτε επεξεργασίας του 3D ομοιώματος, διατίθενται και εργαλεία για τον εξατομικευμένο προεγχειρητικό σχεδιασμό κάθε ασθενούς, καθώς και εκπαιδευτικές πλατφόρμες για την κατάρτιση φοιτητών χειρουργικής και του λοιπού προσωπικού στην χειρουργική αίθουσα.

HepaVision2: Στις μεταμοσχεύσεις συκωτιού και σε άλλες χειρουργικές επεμβάσεις που σχετίζονται με το όργανο αυτό, εκτός από την 3D απόδοση του, παρέχεται και δυνατότητα για αναλυτικό σχεδιασμό της επέμβασης με βάση τα προσωπικά ιατρικά δεδομένα του ασθενούς.

4.6 Μεταφορά των αποτελεσμάτων του σχεδιασμού στη χειρουργική αίθουσα

Αφότου ολοκληρωθεί η διαδικασία της εξαγωγής του 3D ομοιώματος το οποίο περιέχει ενσωματωμένες όλες τις πληροφορίες, δομικές και λειτουργικές, όπως αυτές απεικονίζονταν στο σύνολο των ιατρικών δεδομένων του ασθενούς, ο χειρουργός καλείται να αποφανθεί για το σε ποια όργανα πρέπει να έχουν πρόσβαση τα χειρουργικά εργαλεία και οπτική επαφή το ενδοσκόπιο. Αυτό ακολουθείται από τη βέλτιστη τοποθέτηση των θυρών και των εργαλείων, όπως αυτή προκύπτει από τον κατάλληλο αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου παρουσιάζονται στο χειρουργό ο οποίος εξετάζει την εγκυρότητα τους, προσομοιώνοντας στο εικονικό περιβάλλον στο οποίο αναπτύχθηκε και το 3D ομοίωμα όλα τα στάδια της επέμβασης. Εάν η έκβαση της προσομοίωσης δεν είναι η επιθυμητή, η διαδικασία της βελτιστοποίησης επαναλαμβάνεται, όπως και η προσομοίωση της επέμβασης. Στη συνέχεια, κατά την τελική προετοιμασία της επέμβασης, τα δεδομένα του προεγχειρητικού σχεδιασμού εισάγονται στη χειρουργική αίθουσα. Το πρώτο βήμα σε αυτή τη διαδικασία είναι η αντιστοίχιση των δεδομένων αυτών με την ανατομία του ασθενούς, όχι εικονικού πλέον, μια διαδικασία που καλείται patient-registration(προσαρμογή του ασθενούς).[57]

Στην περίπτωση του χειρουργικού συστήματος da Vinci, εξαιτίας της δομής του σύμφωνα με την οποία όλοι οι βραχίονες είναι τοποθετημένοι σε κοινή βάση, η τοποθέτηση των θυρών και η συμμόρφωση σύμφωνα με τα ανατομικά δεδομένα του κάθε ασθενούς μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση των βραχιόνων ως αισθητήρων θέσης.

Σε άλλα ρομποτικά συστήματα, χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν χειροκίνητες συσκευές για τη σάρωση του σώματος του ασθενούς, όπως είναι το DLR 3D-Modeller, μια συσκευή εξοπλισμένη



Εικόνα 4.6-1: Συσκευή DLR 3D-Modeller

με πολλούς αισθητήρες, σαρωτές λέιζερ και στερεοσκοπικές κάμερες, και χρησιμοποιείται για εξαγωγή 3D δεδομένων ακριβείας κάθε αντικειμένου. Κατόπιν, ένας αλγόριθμος αντιστοιχίζει τα δεδομένα της επιφανειακής σάρωσης που προαναφέραμε με τα δεδομένα του προεγχειρητικού σχεδιασμού. Η θέση του ασθενούς σε σχέση με το χειρουργικό τραπέζι επίσης λαμβάνεται υπόψη και υπολογίζεται. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση του ίδιου οπτικού συστήματος εντοπισμού που φέρει ο 3D-Modeller, σε συνδυασμό με ένα αντίστοιχο σύστημα εντοπισμού προσαρμοσμένο στο χειρουργικό τραπέζι. Κατά συνέπεια, η προσαρμογή του ασθενούς και

τυχόν επανασχεδιασμός γίνονται πολύ σύντομα, εξοικονομώντας χρόνο. Αυτή είναι μία ιδιαίτερα σημαντική διαδικασία, αφού τυχόν χωρικές παρεκκλίσεις του εικονικού μοντέλου του ασθενούς σε σχέση με τον πραγματικό μπορεί να υπάρχουν λόγω για παράδειγμα τυχόν μετακινήσεων μαλακών ιστών.[58]

4.7 Περιορισμοί

Παρά τα πολλαπλά οφέλη από την εφαρμογή προεγχειρητικού σχεδιασμού, πολλοί τρέχοντες περιορισμοί υπάρχουν προς αντιμετώπιση, καθώς οι πληροφορίες που παρέχονται στους χειρουργούς βασίζονται σε δεδομένα από CT και MRI εικόνες, με αποτέλεσμα γνώση για τους λεπτούς ιστούς και τα σχήματα να χάνεται. Συγκεκριμένα, στην απόδοση όγκου, οι δομές με μέγεθος μικρότερο από την απόσταση των voxels, αγνοούνται τελείως. Επίσης, καθώς στις απεικονιστικές μεθόδους όπως είναι η αξονική και η μαγνητική τομογραφία δεν εμφανίζονται ικανοποιητικά οι βλεννογόνοι, χάνεται πολύτιμη πληροφορία σχετική με τη δομή, το χρώμα και τις αντανάκλασεις η οποία στη συνέχεια αγνοείται πλήρως στην ανακατασκευή του 3D ομοιώματος. Κατά την ανακατασκευή του 3D μοντέλου, πολύτιμη για το χειρουργικό προσωπικό πληροφορία μπορεί να χαθεί λόγω απόδοσης παρόμοιου χρωματικού τόνου σε γειτονικές ανατομικές δομές.[51]

Όσον αφορά το χειρουργό, δεν υπάρχει διαδραστική επαφή με τον αληθινό ιστό, κάτι το οποίο είναι απαραίτητο σε περίπτωση για παράδειγμα μελέτης κακοήθειας ή όχι ενός όγκου, ενώ ανάδραση αφής μπορεί να προστεθεί μόνο μέσω προσομοίωσης. Έτσι, τα οφέλη της εικονικής ενδοσκοπίας και των προσομοιώσεων σε ορισμένες περιπτώσεις όπως αφαίρεσης τμήματος ιστού (αδενώματα, πολύποδες στο κόλον κ.α.), δε μπορεί να υποκαταστήσει πλήρως τις συμβατικές μεθόδους ενδοσκοπίας.

Στο επίπεδο του ασθενούς, η συλλογή του πλήθους των απαραίτητων δεδομένων με τη μορφή CT εικόνων, τον εκθέτει σε αυξημένη ποσότητα βλαβερής για τον οργανισμό ακτινοβολίας. [58] Παρόλα αυτά, οι περιορισμοί αυτοί δεν υποβαθμίζουν τη σημασία της ύπαρξης προεγχειρητικού σχεδιασμού και αντιθέτως, παρακινούν συνεχή έρευνα και ανάπτυξη.

4.8 Η έννοια της Επαυξημένης Πραγματικότητας

Παρά τα όσα οφέλη προσφέρει στη χειρουργική ομάδα ένα σωστό προεγχειρητικό πλάνο, εξίσου σημαντική είναι και όση βοήθεια μπορεί να προσφερθεί κατά τη διάρκεια της επέμβασης αυτής καθεαυτής.

Ένα βήμα παραπέρα από την έννοια του προεγχειρητικού σχεδιασμού, βρίσκεται η έννοια της *επαυξημένης πραγματικότητας* (augmented reality – AR), που αναφέρεται στην αντίληψη του φυσικού, υπαρκτού κόσμου του οποίου τα συστατικά στοιχεία αναμιγνύονται (ή βελτιώνονται) με εικονικά, κατασκευασμένα από υπολογιστή ερεθίσματα, οπτικά ή απτικά, δημιουργώντας μια μικτή πραγματικότητα. Έχουμε δηλαδή ένα αμάλγαμα πραγματικών και εικονικών δεδομένων το οποίο εκτελείται σε πραγματικό χρόνο και τα εικονικά αντικείμενα καλούνται να ευθυγραμμιστούν στο μέγιστο με τις δομές του πραγματικού περιβάλλοντος, χωρίς αυτές να χάνουν τη δυναμική τους. [59]

4.9 Συστήματα AR στη Ρομποτική Χειρουργική

Τα συστήματα AR μπορούν όχι μόνο να υποστηρίξουν μια χειρουργική διαδικασία ενδοεγχειρητικά, αλλά και προεγχειρητικά καθώς και κατόπιν της επέμβασης, σε ζητήματα μετεγχειρητικά που μπορεί να προκύψουν. Επιτρέπεται στο χειρουργό να έχει οπτική πρόσβαση σε λεπτομέρειες που αλλιώς είναι μη διαθέσιμες τη στιγμή της επέμβασης και προέκυψαν μετεγχειρητικά, ταυτόχρονα με την τρέχουσα εικόνα της χειρουργικής κάμερας σε πραγματικό χρόνο.[59] Ένα σύστημα AR υποστήριξης ιατρικών διαδικασιών συνήθως χαρακτηρίζεται από τρεις βασικές παραμέτρους:

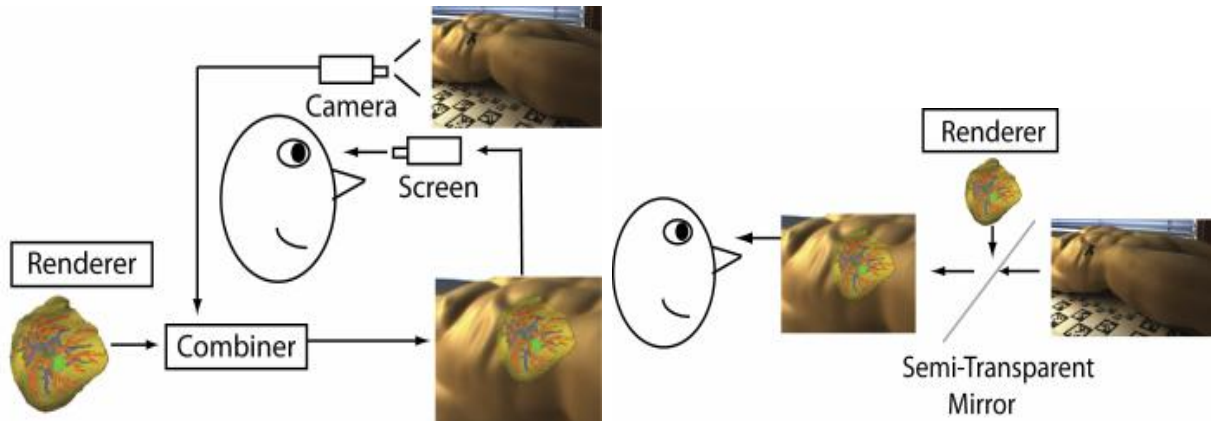
- Συνεπή μοντέλα δεδομένων: Οι απαιτήσεις του ενδοεγχειρητικού σχεδιασμού, πλοήγησης και προσομοιώσεων δεν περιορίζονται στην απλή προβολή των ογκομετρικών δεδομένων που προέκυψαν από προγενέστερες λήψεις CT ή MRI εικόνων. Ανατομικές και παθολογικές δομές πρέπει να απεικονιστούν σαφώς και να μπορεί να γίνει χειρισμός τους σε περίπτωση που χρειαστεί να επιτραπούν αυθαίρετες αλλαγές στα δεδομένα, χωρίς όμως να χάνεται η συνέπεια στη σταθερή

μορφή των απεικονίσεων αυτών.

- Λήψη δεδομένων πραγματικού χρόνου: Σε αντίθεση με τις CT ή MRI εικόνες που συνήθως δε λαμβάνονται σε πραγματικό χρόνο, οι εφαρμογές της AR απαιτούν τη διαχείριση εισερχόμενων δεδομένων συνεχούς ροής, όπως είναι οι υπέρηχοι, δεδομένα σε μορφή βίντεο, συντεταγμένες κ.α. Ο χειρισμός τέτοιων δεδομένων απαιτεί την ύπαρξη αλγορίθμων πραγματικού χρόνου και επιπλέον, προσεκτικό συγχρονισμό, ιδιαίτερα σε περίπτωση ταυτόχρονης λήψης δεδομένων από διαφορετικές πηγές.
- Οπτικοποίηση: Συγκριτικά με τη συμβατική πλοήγηση που βασίζεται στην χειρουργική οθόνη, νέες απαιτήσεις για οπτικοποίηση εγέρθηκαν από την AR, και πλέον πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα για ταυτόχρονη προβολή μοντέλων δεδομένων κάθε είδους σε πραγματικό χρόνο.

4.10 Απεικονιστική Τεχνολογία των AR συστημάτων

Ειδικές συσκευές που υιοθετούν πολλές διαφορετικές τεχνικές χρησιμοποιούνται από τα σημερινά AR συστήματα. Για να συνδυαστεί σε πραγματικό χρόνο οπτική πληροφορία, χρησιμοποιούνται τρεις κατηγορίες συσκευών απεικόνισης στα AR συστήματα. Οι συσκευές της πρώτης κατηγορίας, που ονομάζονται Οπτικής Αντίληψης (*Optical See Through*), προβάλλουν την απόδοση των εικονικών δεδομένων που έχουν ληφθεί προεγχειρητικά σε έναν ημιδιαφανή καθρέπτη, ο οποίος επιτρέπει στο χρήστη να αντιληφθεί και τον πραγματικό κόσμο ταυτόχρονα. Αντιθέτως, οι συσκευές *Αντίληψης μέσω Βίντεο (Video See Through)* αποδίδουν τις πληροφορίες του πραγματικού κόσμου με μία βιντεοκάμερα. Προτού το τελικό αποτέλεσμα προβληθεί στο χρήστη, το βίντεο που ελήφθη αναμειγνύεται από τη συσκευή με τα εικονικά δεδομένα που έχουν ήδη δημιουργηθεί προεγχειρητικά. Οι συσκευές *Άμεσων Αυξήσεων (Direct Augmentations)* χρησιμοποιούν προβολείς και τις επιφάνειες του υπαρκτού περιβάλλοντος για να παρουσιάσουν την εικονική πληροφορία απευθείας στον 3D πραγματικό κόσμο. [60]



Εικόνα 4.10-1. Συνδυασμός οπτικής πληροφορίας. Video See Through και δίπλα, Optical See Through.

4.11 Πεδία εφαρμογών

Η κύρια σκοπιμότητα της χρήσης της AR είναι η ικανότητα αντιμετώπισης δυσκολιών σχετικές με το συντονισμό των ματιών και των χεριών του χειρουργού παρουσιάζοντας, μέσω ευθυγράμμισης των εικονικών αντικειμένων με το πραγματικό περιβάλλον, την επιθυμητή πληροφορία εκεί ακριβώς όπου τα χέρια του χειρουργού πρέπει να δράσουν, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.[61]



Εικόνα 4.11-1 : AR στη χειρουργική αίθουσα

Στις μέρες μας, τα συστήματα επαυξημένης πραγματικότητας χρησιμοποιούνται ευρέως, με τις μεθοδολογίες τους να διαφέρουν ανάλογα με το είδος της επέμβασης, καθώς άλλη προσέγγιση απαιτείται όταν ο χειρουργός αντιμετωπίζει μια στέρεα δομή όπως ένα οστό και άλλη όταν πρόκειται για κάποια επέμβαση σε μαλακό ιστό. Στην περίπτωση που περιλαμβάνει τις κατηγορίες της νευροχειρουργική, κρανιογναθοχειρουργικής, ορθοπεδικών επεμβάσεων, οδοντικών εμφυτεύσεων, οστεοτομών, βιοψιών κ.α., μπορούμε να εργαστούμε με το εικονικό ανάλογο υψηλής ακρίβειας της δομής ενδιαφέροντος το οποίο παράχθηκε πριν την επέμβαση. Σημειώνουμε ότι η χρήση ενός 3D ομοιώματος που παρασκευάστηκε προεγχειρητικά, είναι δυνατή καθώς καμιά παραμόρφωση δεν τροποποίησε τη δομή από τη λήψη των CT ή MRI εικόνων που χρειάστηκαν κατά την κατασκευή του 3D ομοιώματος μέχρι και την επέμβαση. Αυτός είναι ο λόγος για την εκτεταμένη χρήση εφαρμογών AR σε επεμβάσεις που αφορούν στέρεες δομές, καθώς η ευθυγράμμιση του εικονικού και του πραγματικού περιβάλλοντος είναι πολύ ευκολότερη.[62]

Άλλο πεδίο εφαρμογής της AR, είναι αυτό της χειρουργικής επί μαλακών ιστών, όπως για παράδειγμα αφαίρεση όγκων από το ήπαρ, όπου υπάρχουν επιπρόσθετες προκλήσεις, όπως ενδοεγχειρητικές παραμορφώσεις, μετατοπίσεις και τοπολογικές μεταβολές των οργάνων. [63]

Εξαιτίας αυτών των επιπρόσθετων δυσκολιών, μόνο περιορισμένες έρευνες προσφέρουν ένα περιβάλλον πλοήγησης πραγματικού χρόνου σε μη στάσιμες ανατομικές δομές, προβάλλοντας την κατάλληλη θέση των εργαλείων σε προεγχειρητικές 3D εικόνες.[64] Για την παρουσίαση εικονικών ανάλογων των αληθινών οργάνων, το εικονικό μοντέλο πρέπει να μπορεί να υιοθετεί τις πραγματικές παραμορφώσεις ή μετατοπίσεις. Επίσης, στις επεμβατικές με καθετηριασμό εφαρμογές, όπου ο γιατρός εισάγει έναν καθετήρα σε κάποιο αγγείο, συνήθως για αντιμετώπιση ανευρυσμάτων ή στενώσεων, η καθοδήγηση γίνεται μέσω συμβατικών εικόνων (CT, MRI, υπέρηχοι). Οι τεχνολογίες της AR προσφέρουν μια εναλλακτική προσέγγιση, όπου μια συσκευή εντοπισμού συλλέγει πληροφορίες για τη θέση και τον προσανατολισμό του ιστού ενδιαφέροντος. Ο εντοπισμός αυτός μπορεί να γίνεται με χρήση ακουστικής, ηλεκτρικής, αδρανειακής ή ηλεκτρομαγνητικής τεχνολογίας. και στη συνέχεια οι πληροφορίες αυτές ενσωματώνονται σε ένα γεωμετρικό μοντέλο και τέλος, οπτικοποιούνται από κατάλληλη μονάδα.[65] Μπορούμε να αναφερθούμε ονομαστικά σε κάποια κύρια εμπορικά συστήματα, όπως τα EnSite NavX (St. Jude), Carto (Biosense Webster), Localisa (Medtronic).

4.12 Ανάδραση αφής

Όταν μια ελάχιστη επεμβατική διαδικασία πραγματοποιείται με ένα ρομποτικό σύστημα, ο χειρουργός, ως φυσική οντότητα είναι αποστασιοποιημένος από τον ασθενή και η αίσθηση της αφής (ανάδραση αφής) μπορεί να αποκατασταθεί μόνο με τεχνητούς τρόπους. Η ανάπτυξη τεχνικών που επιτρέπουν την ανάδραση αφής αυξάνει την ικανότητα του χειρουργού να αντιλαμβάνεται τις ιδιότητες του ιστού και να εκτελεί περίπλοκες χειρουργικές διαδικασίες. Σε συνδυασμό με τις εφαρμογές της AR, έχουμε εργαλεία καθοδήγησης μέσω αφής όπου εικονικές δυνάμεις δημιουργούνται για να βοηθήσουν το χειρουργό να δράσει σύμφωνα με το προεγχειρητικό πλάνο.

Υπάρχουν πολλά στάδια στις χειρουργικές διαδικασίες όπου απαιτείται ο χειρουργός να λαμβάνει ψηλαφώντας μέσω των χεριών του απτική (αφής) πληροφορία από το σώμα του ασθενούς. Μέσω της ψηλάφησης, ο χειρουργός μπορεί να διακρίνει τις υγιείς από τις παθολογικές δομές, καθώς οι παθολογικές είναι πιο δύσκαμπτες. Στον καρκίνο του παχέους εντέρου, η ψηλάφηση μπορεί να είναι καθοριστική στον εντοπισμό τυχόν μετάστασης, ενώ η ψηλάφηση των αγγείων και των νευρικών οδών αποτρέπει τυχαία εκτομή τους.[66]

Η ανάδραση αφής είναι επίσης πολύ σημαντική κατά τη διάρκεια μιας εκτομής, ώστε ο χειρουργός να αισθάνεται την αντίσταση ανάμεσα στο νυστέρι και τον ιστό, ή όταν τραβάει κάποιον ιστό με λαβίδα, όταν τοποθετεί σφιγκτήρα σε ένα αιμοφόρο αγγείο ή τέλος, όταν δένει ένα ράμμα. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, είναι πολύ πιθανό η δύναμη που ασκείται από τα εργαλεία να υπερβεί το επιτρεπτό όριο με συνέπεια κάποιο τραυματισμό και την επιβάρυνση του ασθενούς.[59]

Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη ανάδρασης αφής, η *κιναισθητική*, που περιγράφει τη δύναμη που ασκείται από ένα μέρος του σώματος στο περιβάλλον, και η *ψηλαφητή* (Rosenbaum, 1990), που περιγράφει τη διανομή πίεσης μεταξύ του σώματος και του περιβάλλοντος.[67]

Υπάρχουν διάφορες συσκευές τύπου αφέντη-σκλάβου διαθέσιμες στο εμπόριο για την κιναισθητική ανάδραση αφής. Ενώ στις πιο πολλές εφαρμογές, η τοποθέτηση αισθητήρων δύναμης είναι απλή, στο επίπεδο της ρομποτικής χειρουργικής αποτελεί πρόκληση προς αντιμετώπιση. Αυτό συμβαίνει καθώς για να λαμβάνονται ακριβείς μετρήσεις για τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις, ο αισθητήρας πρέπει να τοποθετηθεί κοντά στο πεδίο εμφάνισης τους, δηλαδή στην άκρη σχεδόν του

χειρουργικού εργαλείου. Επίσης, δεν υπάρχουν εμπορικοί αισθητήρες κίνησης με μέγεθος συγκρίσιμο με τη διάμετρο των 10 mm ενός τυπικού ρομποτικού χειρουργικού εργαλείου, ενώ η αναλωσιμότητα τους και η αδυναμία αποστείρωσης τους, αποτελούν επιπρόσθετα προβλήματα.

Συνεπώς, προκύπτει ένα ενδιαφέρον για τον υπολογισμό της δύναμης ανάμεσα στο ρομπότ και το περιβάλλον μέσα στο οποίο δρα. Η πιο συνηθισμένη προσέγγιση είναι να εκτιμηθούν οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης από τις γνώσεις της δυναμικής του ρομπότ και τη μέτρηση της θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης. Η επιτυχία αυτής της προσέγγισης εξαρτάται από την ικανότητα μας να αναγνωρίσουμε και να υπολογίσουμε με ακρίβεια τις δυναμικές παραμέτρους του ρομπότ. Μία διαφορετική προσέγγιση είναι το να εξετάσουμε τη συμπεριφορά του περιβάλλοντος του ρομπότ αντί το ίδιο το ρομπότ κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης. Σε αυτή την περίπτωση, απαιτείται γνώση της δυναμικής του περιβάλλοντος, μαζί με ένα σύστημα αισθητήρων που θα μετρά τις μετατοπίσεις. Για παράδειγμα, ένα σύστημα όρασης μπορεί να υπολογίσει την παραμόρφωση του περιβάλλοντος καθώς το ρομπότ ασκεί μία δύναμη σε αυτό, και η δύναμη αλληλεπίδρασης υπολογίζεται με τη βοήθεια μιας γνωστής σχέσης μεταξύ δύναμης και μετατόπισης. [68] Και πάλι λοιπόν, η απόδοση του υπολογισμού της δύναμης βασίζεται στην ακρίβεια του δυναμικού μοντέλου του περιβάλλοντος.

Διαφορετικά προσεγγίζεται το θέμα αυτό όταν γίνεται λόγος για την ψηλαφητή ανάδραση αφής, καθώς οι έρευνες είναι ακόμα στα πρωταρχικά τους στάδια, προσπαθώντας να αναπτύξουν το κατάλληλο hardware, αισθητήρες αφής και απεικονιστικές συσκευές που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ιατρικές εφαρμογές. Μία συγκεκριμένη εφαρμογή αναφέρεται σε αισθητήρα βασισμένο σε πιεζο-ανθεκτικό λάστιχο. [69]



Εικόνα 4.12-1 : Αισθητήρας αφής με πιεζο-ανθεκτικό λάστιχο

Μία άλλη ιδέα βασίζεται σε έναν αισθητήρα αφής βασισμένο σε παρεμβολή δεδομένων αφής από ενδοεγχειρητικές εικόνες υπερήχων, και βρίσκεται ακόμα σε ένα πρώιμο στάδιο. [70]

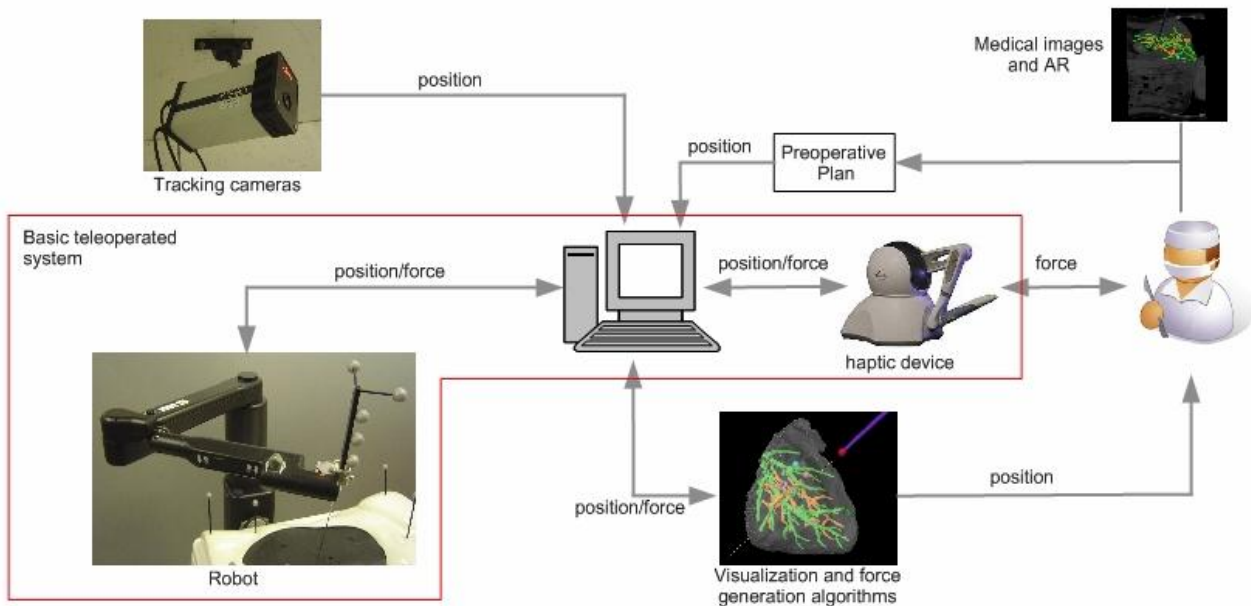


Εικόνα 4.12-2: Αισθητήρας παρεμβολής δεδομένων

4.13 Επαυξημένη Πραγματικότητα για καθοδήγηση αφής

Τηλεχειριζόμενα συστήματα με απτική ανάδραση επιτρέπουν στο χρήστη να αισθάνεται τις δυνάμεις επαφής που αναπτύσσονται ανάμεσα στους βραχίονες και τους ιστούς. Επιπρόσθετα, ο χρήστης ίσως αισθανθεί κάποιες εικονικές δυνάμεις παραγόμενες από ένα εικονικό μοντέλο με στόχο να καθοδηγηθούν οι κινήσεις του και να ολοκληρώσει τη διαδικασία επιτυχώς.

Η *καθοδήγηση αφής*, λοιπόν, όπως την ονομάζουμε, βοηθά στο να αυξηθεί η ακρίβεια και η ταχύτητα διεξαγωγής των επεμβάσεων, από επεμβάσεις τηλεχειρουργικής μέχρι επεμβάσεις ρομποτικής μικροχειρουργικής. Η καθοδήγηση αφής, είναι πιο συντηρητική από ένα αυτόνομο ρομπότ, καθώς ο χρήστης σε αυτή την περίπτωση έχει τον έλεγχο του ρομπότ, αλλά είναι ένα βήμα παραπέρα από την ανάδραση αφής, αφού οι κινήσεις του χρήστη ελέγχονται από το προεγχειρητικό πλάνο. Σε αυτή την περίπτωση, εικονικά περιβάλλοντα και εργαλεία AR χρησιμοποιούνται για να ανιχνεύονται οι παρεκκλίσεις ανάμεσα στην πραγματική κατάσταση και στο προεγχειρητικό πλάνο και για να παραχθούν οι δυνάμεις που θα καθοδηγήσουν το χρήστη. [71]



Εικόνα 4.13-1: Συνοπτικό διάγραμμα απτικής καθοδήγησης στη χειρουργική αίθουσα

Η καθοδήγηση αφής προσθέτει στο βασικό ρομποτικό χειρουργικό σύστημα αφέντη-σκλάβου κάποια επιπρόσθετα στοιχεία, όπως προεγχειρητικό σχεδιασμό βασισμένο σε ιατρικές εικόνες προς καθοδήγηση του χειρουργού, δεύτερον ένα σύστημα εντοπισμού για παρακολούθηση της θέσης του ρομπότ, και τέλος, αλγόριθμους παραγωγής δυνάμεων βασισμένους σε AR μοντέλα για υπολογισμό της κατάλληλης δύναμης σύμφωνα με το προεγχειρητικό πλάνο και την πραγματική θέση του ρομπότ. Τα AR μοντέλα μπορούν επίσης να παρέχουν στο χρήστη και οπτική ανάδραση για τις κινήσεις του ρομπότ στο εσωτερικό του σώματος του ασθενούς.

Οι περιορισμοί των κινήσεων του χρήστη μπορούν να προσδιοριστούν από διαφορετικές σκοπιές. Η πρώτη, να θεωρηθεί η καρτεσιανή θέση του χειριστή του σκλάβου και η διαδικασία που θέλουμε να ακολουθηθεί. [72] Σε αυτή την περίπτωση, η καθοδήγηση αφής μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως εξής: εάν οι κινήσεις του σκλάβου περιορίζονται με 3 βαθμούς ελευθερίας, τότε ο χειριστής πρέπει να παραμείνει σε μια σταθερή θέση. Επίσης, περιορίζοντας τους βαθμούς ελευθερίας σε δύο αντί για τρεις, τότε ο χειριστής μπορεί να κινείται κατά μήκος μια γραμμής, και τέλος, εάν διατηρηθεί μόνο ένας βαθμός ελευθερίας, τότε ο χειριστής μπορεί να κινηθεί σε μια επιφάνεια.

Επιπροσθέτως, οι δυνάμεις μπορεί να είναι είτε ελκτικές ή απωθητικές. Οι ελκτικές δυνάμεις οδηγούν το χειριστή προς τον περιορισμό, και μπορούν να αυξήσουν την ακρίβεια της διαδικασίας. Οι απωθητικές δυνάμεις περιορίζονται εκτός ορισμένων περιοχών, κάτι το οποίο μπορεί να αυξήσει την ασφάλεια της επέμβασης, ορίζοντας «απαγορευμένες» περιοχές όπου το ρομπότ δεν επιτρέπεται να κινηθεί.

4.14 Πρόσφατη πρόοδος στον τομέα της AR

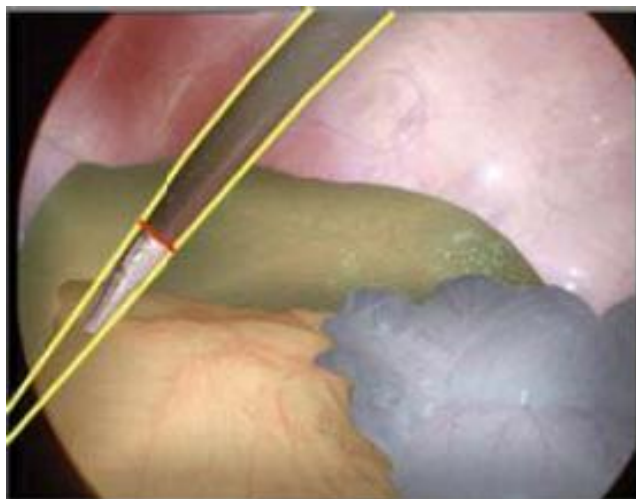
Οι εξελίξεις στον τομέα της AR κατευθύνονται σε πολλά μέτωπα. Μία βασική πτυχή είναι η μείωση του εξοπλισμού στη χειρουργική αίθουσα, με λύσεις όπως ο εντοπισμός των εργαλείων με βάση την εικόνα του βίντεο. Άλλα κύρια σημεία ενδιαφέροντος είναι να αναπτυχθεί η παροχή ανάδρασης αφής στα ρομποτικά συστήματα, και να αντιμετωπιστεί η παραμόρφωση και μετακίνηση μαλακών ιστών κατά τη διάρκεια του χειρουργείου.

Τέλος, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη και σωστός σχεδιασμός της ακριβούς δράσης του ανθρώπινου παράγοντα, όπου το χειρουργικό προσωπικό και οι μηχανικοί όλοι περιλαμβάνονται στα σωστά στάδια της διαδικασίας. Παρόλα αυτά όμως, δεν παύει να διαφαίνεται η σημασία ανάπτυξης του συγκεκριμένου κλάδου, που έχει ήδη αξιόλογες εφαρμογές στην κλινική πράξη να επιδείξει.

4.14.1 Εντοπισμός των χειρουργικών εργαλείων μέσω βίντεο

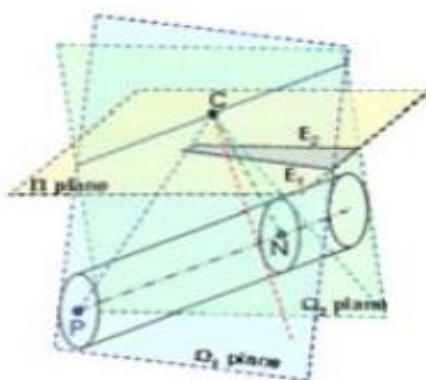
Η πρόκληση της προσέγγισης αυτής είναι να εξαχθεί η 3D θέση και ο προσανατολισμός ενός συμπαγούς κυλινδρικού εργαλείου μέσω της 2D πληροφορίας που παρέχεται από το ενδοσκόπιο κατά τη διάρκεια της επέμβασης.

Το πρώτο βήμα της διαδικασίας είναι η τμηματοποίηση των περιγραμμάτων των χειρουργικών εργαλείων με διάφορες τεχνικές επεξεργασίας εικόνας, και ο ακριβής εντοπισμός της κορυφής (άκρη) του εργαλείου στην εικόνα που παρέχεται από το ενδοσκόπιο.



Εικόνα 4.14.1-1 : Εντοπισμός εργαλείων μέσω βίντεο – Τμηματοποίηση περιγραμμάτων

Το δεύτερο βήμα είναι ο καθορισμός της 3D θέσης του εργαλείου μέσω γεωμετρικών εξισώσεων που εκπονήθηκαν από την ανάλυση της προβολής του εργαλείου στο επίπεδο της εικόνας. Οι τμηματοποιημένες άκρες του εργαλείου και το οπτικό πεδίο της κάμερας ορίζουν τον 3D προσανατολισμό της κάμερας, και η κορυφή της 3D θέσης υπολογίζεται από τις 2D συντεταγμένες της εικόνας του ενδοσκοπίου και τη φυσική διάμετρο του εργαλείου (συνήθως 5 ή 10 mm στα λαπαροσκοπικά εργαλεία).



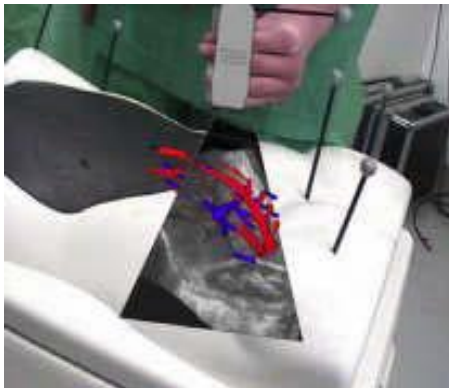
Εικόνα 4.14.1-2: Καθορισμός 3D θέσης του εργαλείου

Η απόδοση αυτής της μεθόδου έγκειται στην επάρκεια της για ανάλυση και εκτίμηση των κινήσεων του χειρουργού, με ακρίβεια περίπου 3 mm. [73] Το κύριο όφελος της μεθόδου αυτής είναι η έλλειψη επιπλέον συσκευών, κάτι που θα προκαλούσε δυσφορία στο χειρουργό και θα αύξανε την πολυπλοκότητα και το κόστος, στο επίπεδο των απαραίτητων υποδομών στη χειρουργική αίθουσα.

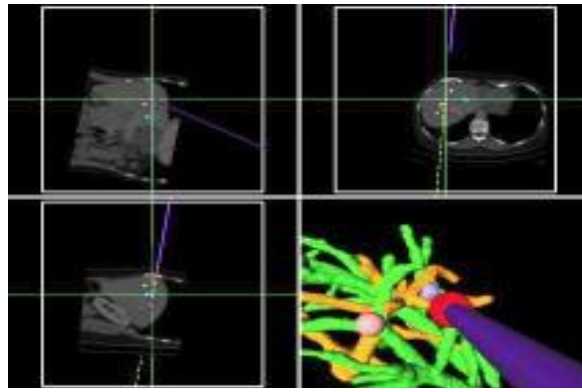
4.14.2 Καθοδήγηση για βελόνες αφαίρεσης όγκων

Η αφαίρεση όγκων με τη βοήθεια ραδιοσυχνοτήτων (Radiofrequency ablation - RFA) είναι πλέον μια σημαντική ελάχιστα επεμβατική θεραπεία για τον καρκίνο στο ήπαρ, που εφαρμόζεται σε μη εγχειρήσιμους όγκους που βρίσκονται είτε σε πρωταρχικό είτε σε μεταστατικό στάδιο. Η διαδικασία πραγματοποιείται υπό την καθοδήγηση εικόνων υπερήχων, αφήνοντας το χρήστη με την πρόκληση να συνδυάσει τα προεγχειρητικά ευρήματα από τα κλινικά δεδομένα του ασθενούς με τις ενδοεγχειρητικές εικόνες που λαμβάνονται, καθώς πλοηγεί την RFA βελόνα στον καρκινικό ιστό. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με ένα σύστημα χειρουργικής υποβοηθούμενο από υπολογιστή που ονομάζεται ARIS*ER RFA. [74]

Το σύστημα αυτό μπορεί να πραγματοποιήσει περίπλοκη οπτικοποίηση και μίξη δεδομένων από εικόνες, εικονική πλοήγηση, παραμετροποίηση της RFA βελόνας και βοήθά στην ακριβή εισαγωγή της για την αφαίρεση του όγκου με μία μόνο απόπειρα. Περιλαμβάνεται δυνατότητα ανίχνευσης τυχόν σύγκρουσης, για να αποφευχθεί βλάβη σε ζωτικά όργανα και σε κεντρικά αιμοφόρα αγγεία εξαιτίας επαφής με την RFA βελόνα. Επίσης, έχει αναπτυχθεί και ενσωμάτωση ενδοεγχειρητικών εικόνων για να ανιχνεύεται το εάν ακολουθείται επακριβώς το προεγχειρητικό πλάνο, όπως επίσης και βίντεο υφής υπερήχων σε πραγματικό χρόνο για βελτίωση των δεδομένων των υπερήχων. Αν και το σύστημα αυτό αρχικά αναπτύχθηκε για επεμβάσεις RFA, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και σε βιοψίες. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προσομοιωτής για εκπαίδευση του χειρουργικού προσωπικού.[59]



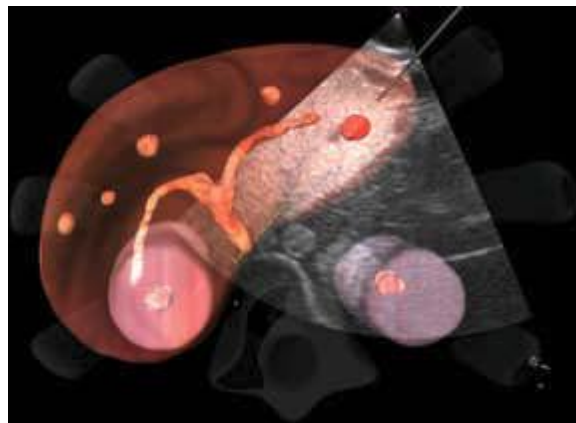
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 4.14.2-1: Σύστημα ARIS*ER RF. (α),(β),(γ) Οπτικοποιήσεις δεδομένων (δ) Υπέρθυση υπερήχου και 3D μοντέλου

4.14.3 Σύστημα τοποθέτησης ενδολαβίδας στην καρδιά

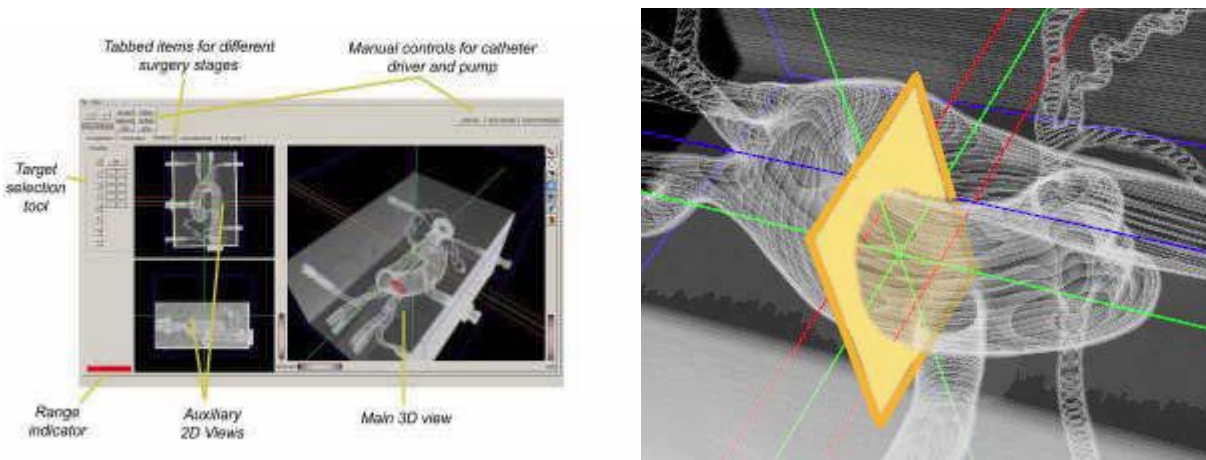
Στην ελάχιστα επεμβατική καρδιοχειρουργική, η λειτουργία της καρδιάς πρέπει να διακοπεί και η αορτή να «σφραγιστεί» με μια λαβίδα ώστε να απομονωθεί η καρδιά από την υπόλοιπη κυκλοφορία. Σε αντίθεση όμως με τις επεμβάσεις ανοιχτής καρδιάς, το κλείσιμο με λαβίδα της αορτής πρέπει να γίνει εσωτερικά με έναν κατάλληλο καθετήρα με ένα φουσκωτό μπαλόνι στην άκρη του, ή αλλιώς endoclamp (ενδολαβίδα). Μόλις το μπαλόνι διασταλεί μέσα στην αορτή, επιτυγχάνεται το επιθυμητό σφράγισμα.

Αυτή η τεχνική, χρησιμοποιείται ευρέως ως διαδικασία ρουτίνας, αλλά παρουσιάζει δύο βασικά προβλήματα, την αρχική τοποθέτηση του μπαλονιού και την επιτήρηση τυχόν μετακινήσεων του. Η αρχική τοποθέτηση με τον τρόπο που γίνεται παραδοσιακά, μέσω διοισοφαγικής υπερηχοκαρδιογραφίας, αποτελεί πρόβλημα, καθώς όσο υπάρχει ακόμα ροή αίματος στην αρτηρία,

είναι αρκετά δύσκολη η μετακίνηση του, όπως και η οπτική επαφή με το μπαλόνι. [75]

Η επιτήρηση της θέσης του μπαλονιού κατά τη διάρκεια της εγχείρησης είναι ακόμα πιο δύσκολη και γίνεται εμμέσως, συγκρίνοντας τις αρτηριακές πιέσεις, καθώς δεν μπορεί εδώ να μας δώσει οπτικά αποτελέσματα η διοισοφαγική υπερηχοκαρδιογραφία αφού υπάρχει αέρας μέσα στην καρδιά και το στομάχι. Είναι όμως πολύ σημαντικό να γίνεται σωστά, καθώς από εσφαλμένες κινήσεις μπορεί να προκληθεί βλάβη στην αορτική βαλβίδα ή στο κεντρικό νευρικό σύστημα.

Για να αντιμετωπιστούν αποκλειστικά αυτές οι δυσκολίες στην ελάχιστα επεμβατική καρδιοχειρουργική, αναπτύχθηκε ένα σύστημα, βασισμένο στο ARIS*ER, που παρέχει συνεχή και πραγματικού χρόνου επιτήρηση της θέσης του μπαλονιού και αυτόματο έλεγχο της πίεσής του. [70] Η θέση του μπαλονιού εκτιμάται σε πραγματικό χρόνο με ένα ηλεκτρομαγνητικό σύστημα εντοπισμού, όπου ο ηλεκτρομαγνητικός αισθητήρας πηνίου τοποθετείται στο εσωτερικό του μπαλονιού, ενώ ένας αισθητήρας πίεσης αναλαμβάνει τον αυτόματο έλεγχο της πίεσης. Ένα μοντέλο του μπαλονιού απεικονίζεται επιπρόσθετα σε ένα 3D ομοίωμα θώρακος του ασθενούς, δείχνοντας ανά πάσα στιγμή την ακριβή του θέση στο εσωτερικό του αγγείου.



Εικόνα 4.14.3-1: Το συνολικό περιβάλλον εργασίας του χρήστη, με δύο όψεις των ανατομικών δεδομένων και τη θέση του μπαλονιού

Ο χρήστης μπορεί να ορίσει ένα πλάνο δράσης (στην Εικόνα 4.14.3-1, με τις πράσινες γραμμές και το κίτρινο επίπεδο), και το περιθώριο ανοχής (με τις κόκκινες γραμμές) για τη θέση του μπαλονιού. Με τον έλεγχο ενεργοποιημένο, το σύστημα τοποθετεί το μπαλόνι αυτόματα στη θέση που όρισε προηγουμένως ο χρήστης, αλλά υπάρχει και η δυνατότητα να γίνει αυτό και χειρωνακτικά. Την μετακίνηση του μπαλονιού σε περίπτωση που ανιχνευτεί από τον ηλεκτρομαγνητικό αισθητήρα παρέκκλιση από τη θέση που όρισε ο χρήστης, αναλαμβάνει ένας ρομποτικός ένθετος καθετήρας εντός του αγγείου. [74]

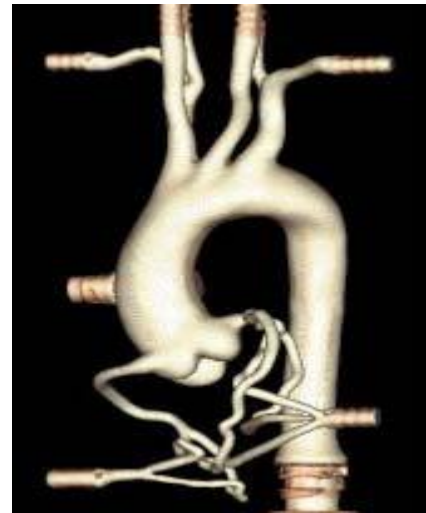


Εικόνα 4.14.3-2: Μπαλόκι και καθετήρας οδήγησης

Για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, δοκιμές πραγματοποιήθηκαν, αρχικά σε ένα ομοίωμα σιλκόνης με ακριβή αορτική ανατομία. Οι χρήστες πραγματοποίησαν αρκετές εισαγωγές του μπαλονιού με τρία είδη οπτικής υποστήριξης: με απευθείας παρατήρηση στο εσωτερικό της αορτής, με το ομοίωμα 3D του θώρακος και του συνολικού συστήματος και με προσομοίωση της όψης που παρέχεται στους χειρουργούς μέσω της διοισοφαγικής υπερηχοκαρδιογραφίας. Οι χρήστες τοποθέτησαν το σύστημα του καθετήρα και του μπαλονιού με μεγαλύτερη ακρίβεια και ευκολότερα με το δεύτερο είδος οπτικής υποστήριξης, δηλαδή με το 3D ομοίωμα. Τα αποτελέσματα λοιπόν έδειξαν πως όση πληροφορία είχε χαθεί κατά την μετάβαση από την εγχείρηση ανοιχτής καρδιάς στην κλειστή, αποκαταστάθηκε με το σύστημα αυτό. Προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν και σε ζώα, με το σύστημα να αποδεικνύεται αποτελεσματικό στην τοποθέτηση του καθετήρα-μπαλονιού και σε πραγματικούς ιστούς.



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 4.14.3-3: (α), (β) Δοκιμές σε ομοίωμα σιλικόνης (γ), (δ) Δοκιμές σε ζώα

Το προτεινόμενο σύστημα βελτιώνει σημαντικά την μέχρι τώρα ανεπαρκή οπτική επαφή με το μπαλόνι, παρέχοντας καθαρή εικόνα της θέσης του μπαλονιού και διορθώνοντας αυτόματα τυχόν λάθη της θέσης αυτής. Οι χειρισμοί του καθετήρα γίνονται ευκολότερα, και ο χειρουργός πραγματοποιεί ομαλά τη διαδικασία, χωρίς περιττές παύσεις. Συνεπώς, αν και οι κλινικές δοκιμές της τεχνικής αυτής διακρίνονται από υψηλό κόστος, διαφαίνεται η δυνατότητα ταχύτερης εκπαίδευσης του χειρουργικού προσωπικού και η προοπτική ασφαλέστερων επεμβάσεων.

4.14.4 Καθοδήγηση για ηπατεκτομές μέσω του Χάρτη Εκτομής

Συστήματα υποβοηθούμενα από υπολογιστή απαιτούνται και για συμβατικές αλλά και για λαπαροσκοπικές ηπατικές εκτομές. Οι χειρουργοί χρειάζονται υποστήριξη προσανατολισμού και οπτικοποίησης κατά τη διάρκεια των επεμβάσεων αυτών, για επιπλέον ακρίβεια και ασφάλεια. Ο *Χάρτης Εκτομής* (Resection Map) αποτελεί λύση για την ανάγκη ενδοεγχειρητικού σχεδιασμού για ασφαλείς ηπατεκτομές. Πρόκειται για διαδραστική 3D χαρτογράφηση της ανατομίας του ασθενούς με σκοπό την απλοποιημένη και αποτελεσματική οπτικοποίηση των σημαντικών δομών και της «διαδρομής» που έχει αποφασιστεί προεγχειρητικά.[59]



Εικόνα 4.14.4-1: Χάρτης Εκτομής

Η έννοια του Χάρτη Εκτομής είναι παραπλήσια με τη χρήση ενός συστήματος πλοήγησης αυτοκινήτου, αλλά χωρίς τις πληροφορίες θέσης. Το ζητούμενο είναι να αξιοποιηθεί ο πλούτος προεγχειρητικής πληροφορίας κατά τη διάρκεια της χαρτογράφησης χωρίς να απαιτείται επιπρόσθετος εξοπλισμός. Το σύστημα επιπλέον βασίζεται στην ικανότητα του χειρουργού να μπορεί να πραγματοποιεί νοητά ευθυγράμμιση μεταξύ του Χάρτη και του πραγματικού χειρουργικού πεδίου. Η ενσωμάτωση του στην χειρουργική αίθουσα μπορεί να βοηθήσει στην εκπαίδευση ανειδίκευτου στην ηπατική χειρουργική προσωπικού, στις περίπλοκες επεμβάσεις έμπειρων χειρουργών και για ευκολότερη μεταμόσχευση ήπατος. Το εργαλείο μπορεί ακόμα και να υποκαταστήσει κάποιες από τις χρήσεις των ενδοεγχειρητικών εργαλείων, όπως η αναγνώριση των αγγείων που πρόκειται να αφαιρεθούν ή η αναγνώριση της θέσης και του μεγέθους όγκων. Περαιτέρω έρευνα διεξάγεται για την ευθυγράμμιση του 3D ομοιώματος του ήπατος με την αληθινή ανατομία του ασθενούς, χωρίς προσθήκη επιπλέον συσκευών, όπως γίνεται και στον εντοπισμό των εργαλείων που προαναφέραμε, αλλά με εκμετάλλευση των πληροφοριών από την ενδοσκοπική κάμερα.

4.15 Εφαρμογές της AR στο σύστημα da Vinci

Η σκοπιμότητα της ανάπτυξης συστημάτων επαυξημένης πραγματικότητας, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, είναι η παροχή και προβολή συμπληρωματικών πληροφοριών που προήλθαν από τις προεγχειρητικές εξετάσεις του ασθενούς κατά τη διάρκεια της επέμβασης. Συγκεκριμένα, όσον αφορά το σύστημα da Vinci, το κύριο εμπορικό σύστημα ρομποτικής χειρουργικής, αναμένεται οι εικόνες που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις να συνδυαστούν με την εικόνα από το βίντεο και να προβληθούν στην κονσόλα του χειρουργού, ώστε αυτός να μη χρειάζεται να ανατρέχει διαρκώς στο χειρουργικό τραπέζι. [76]

Αυτό που μας απασχολεί περισσότερο, είναι η βαθμονόμηση του ενδοσκοπίου. Η μέθοδος που προτάθηκε από τον Hattori et al. χρησιμοποίησε έναν αισθητήρα θέσης τύπου POLARIS για να εντοπίσει ορόσημα στο ενδοσκόπιο. Χρησιμοποιήθηκαν τα κινηματικά δεδομένα πραγματικού χρόνου που παρέχει το λογισμικό API (Application Programming Interface) του συστήματος da Vinci για να αποφευχθεί η ανάγκη για ξεχωριστές συσκευές εντοπισμού που θα μετράνε τη θέση του ενδοσκοπίου και θα ενσωματώνουν τα δεδομένα για τη θέση των βραχιόνων. [77]

4.15.1 Βαθμονόμηση

Η διαδικασία βαθμονόμησης συνήθως διαιρείται σε δύο μέρη: βαθμονόμηση της *κάμερας* και βαθμονόμηση των *ρομποτικών βραχιόνων* οι οποίοι φέρουν τα χειρουργικά εργαλεία. Όταν παρατηρούμε μία όψη του πραγματικού κόσμου μέσω κάμερας, τα 3D αντικείμενα προβάλλονται σε 2D οθόνη. Για να βελτιώσουμε μία 2D τέτοια λήψη με τη χρήση γραφικών από υπολογιστή, πρέπει να γνωρίζουμε τον μετασχηματισμό μεταξύ διαφόρων συστημάτων συντεταγμένων. Αυτό γίνεται για να βεβαιωθούμε ότι τα γραφικά μπορούν να τοποθετηθούν σωστά και να προσανατολιστούν κατάλληλα μέσα στην εικόνα βίντεο που μας προμηθεύει η κάμερα.

4.15.2 Βαθμονόμηση της κάμερας

Οι εσωτερικές παράμετροι (οι πληροφορίες δηλαδή ανάμεσα στην εικόνα και το πλαίσιο συντεταγμένων της κάμερας) και οι εξωτερικές πληροφορίες (το πλαίσιο συντεταγμένων του πραγματικού κόσμου) της κάμερας καθορίζονται από τη βαθμονόμηση. Οι πιο κοινές τακτικές είναι

φωτογραμμετρική βαθμονόμηση και αυτοβαθμονόμηση.

Στη φωτογραμμετρική βαθμονόμηση, λαμβάνονται υπόψη εικόνες ενός αντικειμένου βαθμονόμησης, αποτελούμενου από δύο ή τρία ορθογωνικά επίπεδα και που η γεωμετρία τους είναι γνωστή. Λαμβάνονται εικόνες του αντικειμένου από τουλάχιστον πέντε διαφορετικές κατευθύνσεις, και από την αριστερή αλλά και από την δεξιά κάμερα του ενδοσκοπίου. Ένα απλό λογισμικό όπως η MATLAB αρκεί για την επεξεργασία των εικόνων με έναν αλγόριθμο βαθμονόμησης. Bouguet. Με αυτόν τον τρόπο δε χρειάζεται να είναι γνωστή ούτε η θέση αλλά ούτε και η κίνηση του αντικειμένου.

Η αυτοβαθμονόμηση δεν απαιτεί ένα συγκεκριμένο αντικείμενο βαθμονόμησης. Η κάμερα κινείται αυθαίρετα γύρω από μία στατική σκηνή και οι εσωτερικές και εξωτερικές παράμετροι υπολογίζονται μέσω σημείων αντιστοίχισης ανάμεσα στις εικόνες.[76]

4.15.3 Βαθμονόμηση των ρομποτικών βραχιόνων

Επιπρόσθετα, μια τεχνική βαθμονόμησης των βραχιόνων μπορεί δυνητικά να επιτρέψει την ανανέωση των εικονικών αντικειμένων με αλληλεπιδράσεις μεταξύ των εργαλείων ανίχνευσης και των ιστών. Για καθέναν από τους τρεις ρομποτικούς βραχιόνες, μπορούμε να έχουμε πρόσβαση στα δεδομένα των αρθρώσεων τους μέσω του λογισμικού API και να χρησιμοποιήσουμε τα κινηματικά δεδομένα πραγματικού χρόνου.

Τα δεδομένα προκύπτουν με βάση το σύστημα συντεταγμένων του da Vinci. Συνεπώς, για να συσχετιστούν τα φυσικά αντικείμενα (που έχουν υπολογιστεί με βάση το σύστημα συντεταγμένων του πραγματικού χρόνου) με τα εργαλεία του da Vinci, πρέπει να υπολογιστεί ο μετασχηματισμός ανάμεσα στα συστήματα συντεταγμένων του πραγματικού κόσμου και των εργαλείων του da Vinci. Αυτός είναι κι ο στόχος της τεχνικής βαθμονόμησης των βραχιόνων. Τα δεδομένα των κινήσεων των αρθρώσεων και της κορυφής του αντίστοιχου εργαλείου που διαθέτει αυτές τις αρθρώσεις υπολογίζονται και αντιστοιχίζονται μεταξύ τους με χρήση κατάλληλων μετασχηματισμών κι αλγορίθμων. Διαφορετικά, μπορεί να πραγματοποιηθεί και βαθμονόμηση με τη βοήθεια εικόνας βίντεο. Σε αυτή την περίπτωση, λαμβάνονται πολλές εικόνες διαφορετικών θέσεων και κατευθύνσεων των εργαλείων και βραχιόνων, με την επιλογή ενός συγκεκριμένου συνδέσμου σε κάθε εικόνα. Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης της κάμερας χρησιμοποιούνται για να βρεθούν οι πραγματικές συντεταγμένες του συνδέσμου σε κάθε θέση. Κατόπιν, πραγματοποιείται

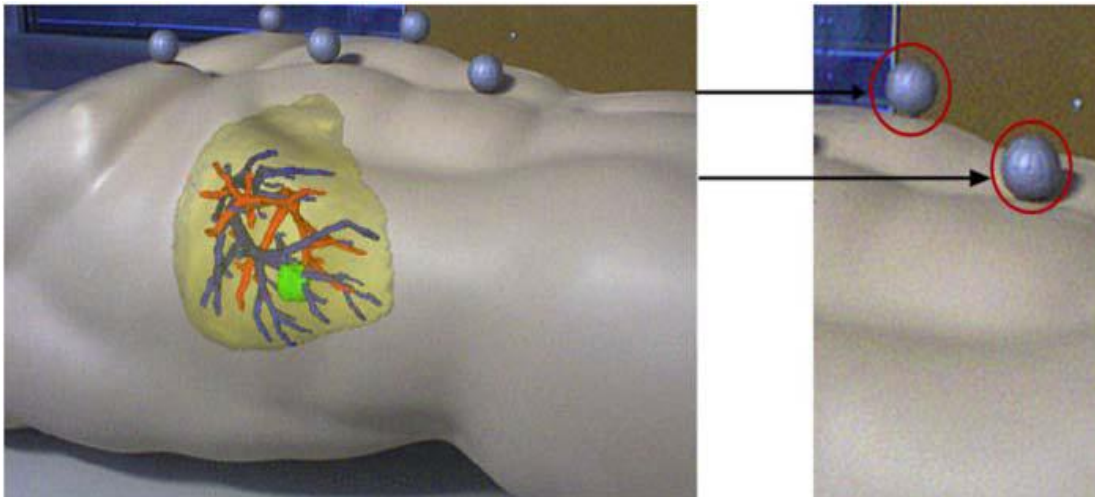
κατάλληλος μετασχηματισμός ανάμεσα στις συντεταγμένες του πραγματικού κόσμου και των αντίστοιχων του da Vinci.[76,77]

4.16 Ευθυγράμμιση της 2D εικόνας με το 3D γεωμετρικό μοντέλο

Το κύριο σημείο ενδιαφέροντος για μια AR εφαρμογή είναι η 3D αντιστοίχιση (registration) μεταξύ εικονικών και πραγματικών δεδομένων, και ιδίως στην κατηγορία των επεμβάσεων επί μαλακών ιστών, όπου τα όργανα μετατοπίζονται ή μπορεί να υποστούν εκτομή. Σε αυτή την περίπτωση, αυτόματος εντοπισμός είναι απαραίτητος και αποτελεί κύριο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς όσο πιο μεγάλες είναι οι διαφορές μεταξύ των 3D ανακατασκευασμένων ομοιωμάτων και των οργάνων του ασθενούς, τόσο πιο απαιτητική είναι η διαδικασία αντιστοίχισης. Οι ιατρικές, ψηφιακές εικόνες ενός ιστού, οστού ή κατανομής των αιμοφόρων αγγείων, όπως έχει ήδη αναφερθεί προηγουμένως προέρχονται από 3D γεωμετρικά μοντέλα, ανακατασκευασμένα από CT και MRI δισδιάστατες εικόνες που ελήφθησαν προεγχειρητικά. Αυτά τα γεωμετρικά 3D ομοιώματα προβάλλονται στο επίπεδο της 2D εικόνας που παρέχεται από το ενδοσκόπιο και υπερτίθενται σε αυτήν. Συμπεραίνεται λοιπόν, πως όσο πιο επιτυχημένη πραγματοποιηθεί αυτή η υπέρθεση, τόσο περισσότερο θα επηρεαστεί θετικά η αποτελεσματικότητα του ρομποτικού συστήματος.[78]

Μέχρι σήμερα, πλήθος διαφορετικών τεχνολογιών έχουν αναπτυχθεί για να υποστηρίξουν αυτή την αντιστοίχιση. Για παράδειγμα, αλγόριθμοι όρασης υπολογιστών μπορούν να εντοπίσουν την ακριβή θέση της κάμερας απευθείας από τις εικόνες που αυτή προμηθεύει στο σύστημα. [79] Για τον εντοπισμό της θέσης, αυτοί οι αλγόριθμοι επιλέγουν κάποια χαρακτηριστικά ορόσημα, όπως σκιές, περιγράμματα κ.α. από τις εικόνες, και τα αναλύουν. Επειδή όμως αυτή η διαδικασία είναι υπολογιστικά χρονοβόρα, κάποιες άλλες μέθοδοι προσθέτουν εξωτερικά τεχνητά ορόσημα στο 3D περιβάλλον, για να ρυθμιστούν με τη σωστή αντιστοιχία τα συστήματα συντεταγμένων ανάμεσα στον ασθενή και το ενδοσκόπιο. Μια τέτοια τυπική διαδικασία προβλέπει τη χρήση εξωτερικών δεικτών. Σε αυτή τη μέθοδο, η θέση των δεικτών που έχουν προσαρμοστεί στο δέρμα και στο ενδοσκόπιο, μετριοούνται από κάποια εξωτερική οπτική συσκευή. Ο υπολογισμός της βαθμονόμησης καθορίζει τις σχετικές θέσεις των δύο συστημάτων συντεταγμένων, και κατόπιν της βαθμονόμησης τα 3D γεωμετρικά ομοιωμάτων των οργάνων προβάλλονται στην 2D εικόνα-βίντεο του ενδοσκοπίου. Η ακρίβεια της τεχνικής αυτής μειώνεται εάν τα όργανα απομακρύνονται από την υπολογισμένη τους θέση, λόγω αναπνοής, χτύπου της καρδιάς ή άλλων παραγόντων.

Παραδείγματα τέτοιων ορόσημων, είναι οπισθοανακλαστικές σφαίρες, ακουστικές πηγές ή ακόμα και μαγνητικά πεδία. Τα μειονεκτήματα αυτών των προσθηκών είναι η τεχνητή μεταβολή του περιβάλλοντος, ο επιπρόσθετος χρόνος προετοιμασίας, καθώς και η ανάγκη για εξειδικευμένους δέκτες των σημάτων των προσθηκών.



Εικόνα 4.16-1: Αντιστοίχιση των δεδομένων με χρήση οπισθοανακλαστικών σφαιρών

Για τον ίδιο σκοπό, οι Viola et al. πρότειναν μια τεχνική βασισμένη σε στατιστική μέθοδο. Αυτή η μέθοδος υπολόγιζε τυχόν κοινή πληροφορία ανάμεσα στην 2D εικόνα και την εικόνα του 3D ομοιώματος με βάση την κατανομή της έντασης.[80] Αυτή η μέθοδος λειτουργεί καλά σε επιφάνειες με μικρό δείκτη albedo, αλλά μπορεί εύκολα να «παγιδευτεί» σε περιοχές με τοπικά ελάχιστα σε επιφάνειες με πλούσιες υφές. [59]

Διαφορετικές προσεγγίσεις προβλέπουν τη χρήση του περιγράμματος της εικόνας, όπως η μέθοδος του Lensch et al. [82]Χρησιμοποιήθηκε, συγκεκριμένα, η XOR τιμή των περιγραμμάτων 2D και 3D εικόνων για να εκτιμηθεί το σφάλμα της επιθυμητής ευθυγράμμισης. Το σφάλμα αυτό υπολογίζεται ως το άθροισμα των αποστάσεων μεταξύ των σημείων του περιγράμματος της 2D εικόνας και της 3D εικόνας. Καθώς το πλήθος όλων των αντιστοιχισμένων σημείων ανάμεσα στα δύο περιγράμματα πρέπει να καθοριστούν προηγουμένως ώστε να βρεθεί το σφάλμα της ευθυγράμμισης, αυτού του είδους οι αλγόριθμοι έχουν υψηλό υπολογιστικό κόστος.

Οι αισθητήρες φάσματος συχνά παράγουν εικόνες ανάκλασης σαν υποπροϊόντα των εικόνων φάσματος. Αυτή η 2D εικόνα ανάκλασης ευθυγραμμίζεται με την 3D εικόνα φάσματος επειδή και οι δύο εικόνες λαμβάνονται από την ίδια οπτική συσκευή. Χρησιμοποιώντας τη 2D

εικόνα ανάκλασης, το αρχικό πρόβλημα αντιστοίχισης της 2D εικόνας στο 3D μοντέλο τροποποιείται στο απλούστερο πρόβλημα αντιστοίχισης μίας 2D εικόνας σε άλλη μία.

Η ομάδα του Kurazume[83] πρότεινε έναν αλγόριθμο αντιστοίχισης, ο οποίος χρησιμοποιούσε την εικόνα ανάκλασης και τη 2D εικόνα υφής. Στην μέθοδό τους, μία σειρά από φωτομετρικές άκρες που εξήχθησαν από τις δύο εικόνες αντιστοιχήθηκαν και οι σχετικές τους θέσεις εκτιμήθηκαν χρησιμοποιώντας έναν ισχυρό εκτιμητή. Οι ομάδες των Elstrom και Umeda επίσης πρότειναν τέτοιες μεθόδους αντιστοίχισης που χρησιμοποιούν την εικόνα ανάκλασης και υφής. Ωστόσο, τα όργανα δεν διαθέτουν πλούσια υφή στην επιφάνειά τους και υπάρχουν αρκετές διαφορές στην υφή των οργάνων μεταξύ διαφορετικών ασθενών.[84,85] Γι' αυτό το λόγο, οι μέθοδοι που βασίζονται στις εικόνες υφής είναι αρκετά δύσκολο να χρησιμοποιηθούν για την αντιστοίχιση της 2D εικόνας στο 3D μοντέλο ενός χειρουργικού συστήματος πλοήγησης.

Από τους Wang et al. για το σύστημα da Vinci αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος επιλογής σημείων στην 2D εικόνα της κάμερας, με τις πραγματικές συντεταγμένες τους υπολογισμένες μέσω της βαθμονόμησης της κάμερας. Κατόπιν, έγινε και η αντιστοίχιση τους με τα σημεία του εικονικού ομοιώματος μέσω μετασχηματισμού, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί η ζητούμενη επικάλυψη πραγματικού και εικονικού κόσμου.

Μέσω της βαθμονόμησης του σκλάβου, θα μπορούμε να αποφασίζουμε τις συντεταγμένες γνωστών σημείων στο πλαίσιο του da Vinci και αντίστροφα. Τα δεδομένα που αφορούν τη θέση της ενδοσκοπικής κάμερας μπορούν να αποκτηθούν από το API του συστήματος και έτσι, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης του σκλάβου, οποιεσδήποτε αλλαγές στη θέση της κάμερας θα λαμβάνονται υπόψη και θα χρησιμοποιούνται ώστε να ενημερώνεται συνεχώς η εικονική σκηνή. Επίσης, εφόσον μπορούμε να εντοπίσουμε τη θέση των εργαλείων του σκλάβου στο μέλλον θα μπορούμε να εντοπίζουμε τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των εργαλείων και του ιστού έτσι ώστε να διαφανούν οποιεσδήποτε δυναμικές αλλαγές που προκαλούνται από τα εργαλεία πάνω στα εικονικά αντικείμενα που παραθέτονται στο χειρουργικό πεδίο. Είναι επίσης γνωστό ότι η παραμικρή παρέκκλιση στην επιλογή του pixel προκαλεί μεγάλη διαφορά στις συντεταγμένες του υπολογιστικού κόσμου. Γι' αυτό το λόγο η επιλογή του σημείου από τις 2D εικόνες θα πρέπει να είναι εξαιρετικά ακριβής.

Κεφάλαιο 5: Μελλοντικές προοπτικές, περιορισμοί και συμπεράσματα

Καθώς τα χειρουργικά ρομπότ εισέρχονται στην χειρουργική αίθουσα, οι χειρουργοί, οι επιστήμονες και οι μηχανικοί έρχονται αντιμέτωποι με καινούριες προκλήσεις αλλά και δυνατότητες που ποτέ δεν είχαν φανταστεί στο παρελθόν. Η χρησιμότητα των υπολογιστών και της ρομποτικής στο πολύπλοκο και δυναμικό περιβάλλον της χειρουργικής αίθουσας υπογραμμίζουν την ανάγκη για έξυπνες και χωρίς μηχανικές συνδέσεις διαδραστικές διεπιφάνειες ανθρώπου-μηχανής αλλάζοντας έτσι τους παραδοσιακούς ρόλους των χειρουργών και των βοηθών. Την ίδια στιγμή, εισάγοντας έναν υπολογιστή μέσα στο χειρουργικό πεδίο επιτρέπεται στον χειρουργό πρόσβαση σε πληροφορίες κατά την διάρκεια της επέμβασης που ήταν δύσκολο να συμβεί στο παρελθόν. Έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται οι συνθήκες για πλήρως ολοκληρωμένη χειρουργική προσομοίωση και εκπαίδευση, σχεδιασμό και εκτέλεση της εγχείρησης. Η τρισδιάστατη ανακατασκευή και ψηφιοποίηση της εικόνας, η μοντελοποίηση των δυναμικών ιστών και οι οθόνες αφής θα δημιουργήσουν την τεχνική βάση για την ανάπτυξη της επόμενης γενιάς χειρουργικών συστημάτων και διαδικασιών βοηθούμενων από υπολογιστές. Εκτός από το κόστος όμως, τα χειρουργικά συστήματα όπως το da Vinci και το Zeus αντιμετωπίζουν αρκετά εμπόδια που πρέπει να υπερνικηθούν πριν ενσωματωθεί πλήρως η χρήση τους στη ρουτίνα του χειρουργείου. Μειονεκτήματα όπως η έλλειψη ανάδρασης αφής, το μεγάλο του μέγεθος και οι απαιτήσεις εξειδικευμένης εκπαίδευσης υποδεικνύουν ότι τα υπάρχοντα ρομποτικά συστήματα είναι ένδειξη του τι θα ακολουθήσει στο πεδίο της ρομποτικής χειρουργικής, με υποσχόμενη την περαιτέρω ανάπτυξη και επέκταση. Για παράδειγμα, είναι επιθυμητό, στο μέλλον ο χειρουργός να τροφοδοτεί το σύστημα με όλες τις απαραίτητες πληροφορίες και παραμέτρους και κατόπιν απλά να επιτηρεί την επέμβαση καθώς το σύστημα εκτελεί μόνο του όλη τη διαδικασία.

Συναρπαστική μπορεί να είναι η εξέλιξη της επαυξημένης πραγματικότητας και του προεγχειρητικού σχεδιασμού και η πλήρης ενσωμάτωση τους στις χειρουργικές διαδικασίες. Η προοπτική ενός σωστού προεγχειρητικού πλάνου όπου έχει προβλεφθεί βήμα προς βήμα όλη η ενδοεγχειρητική διαδικασία, θα αποβεί ιδιαίτερα χρήσιμη για την επιτυχημένη έκβαση της. Όμως, πρέπει να αντιμετωπιστεί το ζήτημα της έλλειψης ανάδρασης αφής, κάτι που ήδη μελετάται από πολλούς ερευνητές. Επίσης, μελετάται η δυνατότητα «παραγωγής» του απαραίτητου αριθμού CT και MRI εικόνων που χρειάζονται για την κατασκευή του 3D μοντέλου μέσω αλγορίθμων, που θα βασίζονται στον ελάχιστο δυνατό αριθμό εικόνων CT/MRI που καλύπτουν τους βασικούς άξονες

συμμετρίας και γωνίες λήψης, για να προβλέψουν και να αποδώσουν προσεγγιστικά τις υπόλοιπες εικόνες, ώστε να μειωθεί η ακτινοβολία στην οποία εκτίθεται ο ασθενής. Παρόλα αυτά, οι περιορισμοί αυτοί παρακινούν συνεχή έρευνα και ανάπτυξη στο πεδίο του προεγχειρητικού σχεδιασμού, καθιστώντας τον όμως προς το παρόν ανεπαρκή για ορισμένες κλινικές εφαρμογές.

Ακόμα πιο εντυπωσιακά είναι τα αποτελέσματα των εφαρμογών της AR. Η ικανότητα που θα παρέχεται στο μέλλον να γίνεται άριστη αναπροσαρμογή και συγχρονισμός της εικόνας του κινούμενου ενδοσκοπίου με την 3D εικόνα που βλέπει ο χειρουργός στην οθόνη, με την αυτόματη ενημέρωση των πληροφοριών του 3D μοντέλου ανάλογα με τη νέα θέση του ενδοσκοπίου, μπορεί να υποσχεθεί σημαντικά βελτιωμένες κι ασφαλείς επεμβάσεις. Βέβαια, οι εξελίξεις στον τομέα της AR κατευθύνονται σε πολλά ακόμη μέτωπα. Μία βασική πτυχή είναι η μείωση του εξοπλισμού στη χειρουργική αίθουσα, με αξιοποίηση και διαμόρφωση των υπάρχοντων εργαλείων ώστε να μην προστεθούν άλλα. Άλλα κύρια σημεία ενδιαφέροντος είναι να αναπτυχθεί η παροχή ανάδρασης αφής στα ρομποτικά συστήματα, και να αντιμετωπιστεί η παραμόρφωση και μετακίνηση μαλακών ιστών κατά τη διάρκεια του χειρουργείου.

Η αναμενόμενη συνέχεια στην εξέλιξη της ελάχιστα επεμβατικής χειρουργικής δε θα μπορούσε να ήταν άλλη από την εξάλειψη των χειρουργικών τομών στην κοιλιακή χώρα. Η NOTES, ο πιο πρόσφατος κλάδος στον τομέα της ελάχιστα επεμβατικής χειρουργικής, δίνει τη δυνατότητα να εξαλειφθεί η παραδοσιακή σύνδεση της χειρουργικής με τις τομές και τον πόνο. Οι κύριοι στόχοι της είναι η αισθητή μείωση του μετεγχειρητικού πόνου, τη μείωση του χρόνου ανάρρωσης του ασθενή και των χειρουργικών επιπλοκών όσο αυτό είναι δυνατό, καθώς και βελτιωμένο αισθητικό αποτέλεσμα. Καθώς όμως η εφαρμογή της προϋποθέτει τη διάτρηση ενός κοίλου οργάνου, διαφαίνονται οι ενδεχόμενες επιπλοκές. Συνεπώς, για την ευρεία χρήση της NOTES απαιτείται η δημιουργία εξειδικευμένων χειρουργικών εργαλείων, η ανάπτυξη μίας πλατφόρμας εργασίας, η οποία θα μπορεί να εκτελεί ταυτόχρονα πολλαπλές εργασίες, για την εκτέλεση μίας χειρουργικής επέμβασης με την τεχνική NOTES, καθώς και η απαραίτητη εκπαίδευση του χειρουργικού προσωπικού. Δύο από τις κυριότερες προκλήσεις είναι η ανάπτυξη τεχνικών για ασφαλή πρόσβαση στην περιτοναϊκή κοιλότητα και η ασφαλής συρραφή των χειρουργικών τομών, για να αποφευχθούν τυχόν ενδοπεριτοναϊκές επιπλοκές.

Η χειρουργική NOTES είναι ιδανική για χρήση μικρο-ρομπότ, τα οποία θα είναι ικανά να εισέλθουν στο ανθρώπινο σώμα δια μέσου των φυσικών οπών του και να παρέχουν μέσω πολλαπλών αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο επαυξημένες και μη πληροφορίες (πχ. εικόνα,

θερμοκρασία, πίεση κλπ.), ώστε ο χειρουργός να μπορεί να εντοπίσει τυχόν επιπλοκή παρατηρώντας τις φυσιολογικές παραμέτρους του ασθενούς. Η εξέλιξη όμως των μικρο-ρομποτικών συστημάτων θα δημιουργήσει στους χειρουργούς νέα προβλήματα που θα αφορούν κυρίως το συντονισμένο χειρισμό τους. Συνεπώς, η ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού που θα ελέγχει με ακρίβεια την κίνηση των μικρο-ρομπότ είναι επιτακτική.

Οι έρευνες αυτή την περίοδο εστιάζουν και στην ανάπτυξη νέων ενδοσκοπικών πλατφορμών εκτέλεσης της χειρουργικής NOTES. Τα κύρια προβλήματα που εντοπίζονται είναι η φυσιολογία του σημείου εισόδου των χειρουργικών εργαλείων, η περιορισμένη δύναμη που μπορεί να ασκηθεί στους ιστούς όταν χρησιμοποιείται ένα εύκαμπτο ενδοσκόπιο και η ανάγκη τα οπτικά και τα χειρουργικά εργαλεία να είναι τοποθετημένα όλα μαζί. Η πλατφόρμα τεχνολογίας MAGS, είναι εξίσου επικρατής λύση όσο και τα μικρο-ρομπότ, αλλά πρέπει να αντιμετωπιστούν τόσο οι κλινικοί όσο και οι μηχανικοί περιορισμοί της. Οι χειρουργοί θα πρέπει να εξοικειωθούν με τα εργαλεία της νέας τεχνολογίας αρχικά στο εργαστήριο και στη συνέχεια σε μοντέλα ζώων. Επιπλέον, ο βέλτιστος αριθμός των εξωτερικών μαγνητών απομένει να προσδιοριστεί. Ένα ακόμη ζήτημα που πρέπει να επιλυθεί είναι η εκθετική μείωση της δύναμης συγκράτησης των μαγνητών με την απόσταση, με αποτέλεσμα η τρέχουσα κλινική χρήση της τεχνολογίας MAGS να περιοριστεί σε λιπόσαρκους ασθενείς ή παιδιά. Συμπληρωματικές εργασίες θα πρέπει να γίνουν επίσης και για την ανάπτυξη μιας κάμερας ικανής να οπτικοποιεί με επιτυχία το χειρουργικό πεδίο χωρίς να χρειάζεται τη παροχή για πηγές επιπλέον φωτισμού.

Βιβλιογραφία

- [1] Hockstein N., Gourin C., Faust R. and Terris D., *A history of robots: from science fiction to surgicalrobotics*, Journal of Robotic Surgery, 1(2):113-118, July 2007
- [2] Τζαφέστας Σ., Ρομποτική : ανάλυση - έλεγχος - σχεδιασμός - προγραμματισμός – αίσθηση, Αθήνα 2003
- [3] Satava R., *History of Robotic Surgery. The early chronicles: a personal historical perspective*, Epublication: WeBSurg.com, October 2006
<http://www.websurg.com/robotics/history.php>
- [4] Σκρέκας Γ., *Ρομποτική χειρουργική. Παρόν και μέλλον*, 2007
http://www.gomedica.org/robotic_surgery.htm
- [5] *Robot-Assisted Surgery*
http://biomed.brown.edu/Courses/BI108/BI108_2005_Groups/04/index.html
- [6] Lanfranco A., Castellanos A., Desai J. and Meyers W., *Robotic Surgery: A Current Perspective*, Annals of Surgery, 239(1):14-21, January 2004
<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1356187>
- [7] *Robotic Surgery*
<http://library.thinkquest.org/03oct/00760>
- [8] Αγγελόπουλος Χ., *Ρομποτική Χειρουργική: Μύθος ή Πραγματικότητα*, Ιούλιος 2009
- [9] Ζυγομαλάς Α., *Μικρο-ρομπότ στη χειρουργική διαμέσου φυσικών οπών(NOTES)*, ο ρόλος της ιατρικής πληροφορικής, Πάτρα 2009
- [10] Κωνσταντινίδης Κ., *Πλεονεκτήματα της ρομποτικής χειρουργικής*, Ελληνική Επιστημονική Εταιρεία Ρομποτικής Χειρουργικής, 2008
<http://robotic.kkonstantinidis.com/index.php/2008-10-23-16-20-35>
- [11] Morris B., *Robotic Surgery: Applications, Limitations, and Impact on Surgical Education*, Medscape General Medicine, 7(3):72, September 2005
<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1681689>
- [12] David B. Camarillo, Thomas M. Krummel, J. Kenneth Salisbury, Jr. *Robotic technology in surgery: past, present, and future*. The American Journal of Surgery 188 (Suppl to October 2004) 2S–15S.
- [13] http://biomed.brown.edu/Courses/BI108/BI108_2005_Groups/04/davinci.html
- [14] www.intuitivesurgical.com/products/davinci_surgical_system
- [15] Gary S. Guthart, Gary S. Guthart, *The IntuitiveTM Telesurgery System: Overview and Application*.

- [16] http://www.intuitivesurgical.com/products/871145_N_IA%20Catalog%20July%202011_Public_s_mall.pdf
- [17] Arulampalam T., Patterson-Brown S., Morris AJ., Parker MC. *Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery*. Ann R Coll Surg Engl 2009; 91: 456–459
- [18] Gee D. W., Rattner D. W. *Natural orifice transluminal endoscopic surgery: current status*. Adv Surg 2009;431-12.
- [19] Rattner D., Kalloo A. *ASGE/SAGES Working Group on Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery*. Surg Endosc 2006;20:329–33.
- [20] Sporn E., Miedema B. W. , Astudillo J. A. , Thaler K. *Access and closure for NOTES*. Eur Surg (2008) 40/3: 94–102.
- [21] Pearl J. P., Ponsky J. L. *Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery: A Critical Review*. J Gastrointest Surg 2008; 12:1293–1300.
- [22] Dolz C., Noguera J. F., Martín A., Vilella A., Cuadrado A. *Transvaginal cholecystectomy (NOTES) combined with minilaparoscopy*. Rev. esp. enferm. dig. v.99 n.12 Madrid dic. 2007.
- [23] Scwabas G. M., Swain P., Swanstrom L. L. *Endoluminal Methods for Gastrotomy Closure in Natural Orifice TransEnteric Surgery (NOTES)*. SURG INNOV 2006; 13: 23-30.
- [24] Swanstrom L. L., Khajanchee Y., Abbas M. A. *Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery: The Future of Gastrointestinal Surgery*. The Permanente Journal/ Spring 2008/ Volume 12 No. 2.
- [25] http://www.usgimedical.com/eos/usgi_gprox_description.pdf
- [26] Santos B. F., Hungness E. S. *Natural orifice transluminal endoscopic surgery: Progress in humans since white paper*. World J Gastroenterol 2011 April 7; 17(13): 1655-1665.
- [27] Meining A., Feussner H., Swain P., Yang G. Z., Lehmann K., Zorron R., Meisner S., Ponsky J., Martiny H., Reddy N. , Armengol-Miro J. R. , Fockens P. , Fingerhut A. , Costamagna G. *Natural-orifice transluminal endoscopic surgery (NOTES) in Europe: summary of the working group reports of the Euro-NOTES meeting 2010*. Endoscopy 2011; 43: 140–143.
- [28] Shaikh S. N. , Thompson C. C. *Natural orifice transluminal surgery: Flexible platform review*. World J Gastrointest Surg 2010 June 27; 2(6): 210-216.
- [29] Anthony Yuen Bun Teoh, Philip Wai Yan Chiu, Enders Kwok Wai Ng. *Current developments in natural orifices transluminal endoscopic surgery: An evidence-based review*. World J Gastroenterol 2010 October 14; 16(38): 4792-4799.
- [30] Kozarek R, Schembre D, Spaulding W, Swanstrom L, Rex D, Raju G, et al. *Initial application of the ShapeLock(TM) Endoscopic guide for small bowel enteroscopy*. Gastrointest Endosc 2005;61(5):AB172.

- [31] Swain P, Ewers R, Peh R, Sadaat V. *New measurement methods and a randomized comparison of force transmission using flexible endoscopes and instruments before and after the application of ShapeLock(TM) Technology*. *Gastrointest Endosc* 2005;61(5):AB241.
- [32] Vahe Karimyan, Mikael Sodergren , James Clark , Guang-Zhong Yang , Ara Darzi *Navigation systems and platforms in natural orifice transluminal endoscopic surgery (NOTES)*. *International Journal of Surgery* 7 (2009) 297–304.
- [33] http://www.usgimedical.com/eos/usgi_transport_description.pdf
- [34] Cadeddu JA, Eberhart R, Fernandez R, Bergs R. *Transabdominal magnetic anchoring system for trocar-less laparoscopic surgery*. *J Urol* 2002;167(suppl):4.
- [35] Park S, Bergs RA, Eberhart R, Baker L, Fernandez R, Cadeddu JA. *Trocar-less instrumentation for laparoscopy: Magnetic positioning of intra-abdominal camera and retractor*. *Ann Surg* 2007;245:379–384.
- [36] Jay D. Raman, M.D.,^{1,2} Daniel J. Scott, M.D.,³ and Jeffrey A. Cadeddu, M.D.² *Role of Magnetic Anchors During Laparoendoscopic Single Site Surgery and NOTES* .*JOURNAL OF ENDOUROLOGY* Volume 23, Number 5, May 2009 Mary Ann Liebert, Inc. Pp. 781–786
- [37] Box G. et al., B. *Rapid Communication: Robot-Assisted NOTES Nephrectomy: Initial Report*. *Journal of Endourology*. 2008, March , 22(3): 503-506.
- [38] Daniel J. Abbott, Chris Becke, Richard I. Rothstein, and William J. Peine *Design of an Endoluminal NOTES Robotic System* *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems San Diego, CA, USA, Oct 29 - Nov 2, 2007*
- [39] S J Phee, A P Kencana, V A Huynh, Z L Sun, S C Low, K Yang, D Lomanto, KY Ho. *Design of a master and slave transluminal endoscopic robot for natural orifice transluminal endoscopic surgery* *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 2010 224: 1495
<http://pic.sagepub.com/content/224/7/1495>
- [40] Iddan G, Meron G, Glukhovskiy A. *Wireless capsule endoscopy*. *Nature* 2000;405:417.
- [41] Ell C, Remke S, May A. The first prospective controlled trial comparing wireless capsule endoscopy with push enteroscopy in chronic gastrointestinal bleeding. *Endoscopy* 2002;34:685e9.
- [42] Rentschler M, Dumpert J, Platt S. *Mobile in vivo camera robots provide sole visual feedback for abdominal exploration and cholecystectomy*. *Surg Endosc* 2006;20:135e8.
- [43] Lehman A, Rentschler M, Farritor S. *Endoluminal minirobots for transgastric peritoneoscopy*. *Minim Invasive Ther Allied Technol* 2006;15:384e8.
- [44] A. Forgione. *In vivo microrobots for natural orifice transluminal surgery. Current status*

and future perspectives Surgical Oncology (2009) 18, 121-129

[45] Jens Rassweiler, Matthias Baumhauer, Uwe Weickert, Hans-Peter Meinzer, Dogu Teber, Li-Ming Suand Vipul R. Patel, *The Role of Imaging and Navigation for Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery* JOURNAL OF ENDOUROLOGY Volume 23, Number 5, May 2009 Pp. 793–802.

[46] Boyd WD, Stahl KD, *The Janus syndrome: a perspective on a new era of computer-enhanced robotic cardiac surgery*, J Thorac Cardiovasc Surg. 2003 Sep;126(3):625-30.

[47] Mohr F, Falk V, Diegeler A et al, *Computer-enhanced robotic cardiac surgery: experience in 148 patients*, J Thorac Cardiovasc Surg 2001; 121: 842-53

[48] Hayashibe, Hashizume, Suzuki, Kakeji, Konishi, *Hattori preoperative planning for surgical robotic setup with kinematics and haptics*, January 2005

[49]] Coste-Maniere E, Adhami L, Mourgues F et al, *Optimal planning of robotically assisted heart surgery*, Lecture notes in control and information sciences, 2002

[50] Groller E, Buhler K, *Virtual Endoscopy for Preoperative Planning and Training of Endonasal Transsphenoidal Pituitary Surgery* , May 2005

[51] R Bauernschmitt, M Feuerstein, E Schirmbeck, J Traub, G Klinker, S Wildhirt, R Lange, *Improved Preoperative Planning in Robotic Heart Surgery*, <http://www.slideshare.net/cardiainfo/improved-preoperative-planning-in-robotic-heart-surgery>

[52] R. Kurazume, K. Noshino, Z. Zhang and K. Ikeuchi, *Simultaneous 2D images and 3D geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute*, in: *Proc. 5th Asian Conf. on Computer Vision*, Melbourne, pp. 99–106 (2002).

[53] Κουτσούρης Δ, Νικήτα Κ, Παυλόπουλος Σ, *Ιατρικά Απεικονιστικά Μηχανήματα*, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2004

[54] Chung-Yi, Huang Lai-Jun, Luo Pei-Yuan et al., *Efficient Segmentation and Construction of 3D Bone Models in Medical Images*, Articles in Press, J. Med. Biol. Eng. (February 11, 2011), doi: 10.5405/jmbe.734

[55] K. Umeda, G. Godin and M. Rioux, *Registration of range and color images using gradient constraints and range intensity images*, in: *Proc. 17th Int. Conf. Pattern Recognition*, Cambridge, pp. 12–15 (2004).

[56] http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_open_source_healthcare_software

[57] R. Konietschke et al. , *Accuracy Identification of Markerless Registration with the DLR Handheld 3D-Modeller in Medical Application*, Tagungsband der 6. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Computergestützte Chirurgie 11.-13.10.2007

[58] Louai Adhami and Eve Coste-Maniere. *Optimal planning for minimally invasive surgical*

- robots. IEEE Transactions on Robotics and Automation: Special Issue on Medical Robotics, October 2003.
- [59] Lamata *et al.* *Augmented Reality for Minimally Invasive Surgery: Overview and Some Recent Advances*, INTECH January 2010
- [60] Raskar, R., Welch, G., Low, K.-L., et al. (2001). Shader Lamps: Animating Real Objects With Image-Based Illumination. *Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 89-102.
- [61] Teber, D., Guven, S., Simpfendorfer, T., et al. (2009b). Augmented Reality: A New Tool To Improve Surgical Accuracy during Laparoscopic Partial Nephrectomy? Preliminary In Vitro and In Vivo Results. *European Urology*, Vol. 56, No. 2, 332-338, 0302-2838
- [62] Johansson, R.S., Westling, G., Backstrom, A., et al. (2001). *Eye-Hand Coordination in Object Manipulation*. *J. Neurosci.*, Vol. 21, No. 17, 6917-6932, 1529-2401.
- [63] Baumhauer, M., Feuerstein, M., Meinzer, H.P., et al. (2008). *Navigation in endoscopic soft tissue surgery: Perspectives and limitations*. *Journal of Endourology*, Vol. 22, No. 4, 751-766, 0892-7790.
- [64] Beller, S., nerbein, M., Lange, T., et al. (2007). *Image-guided surgery of liver metastases by three-dimensional ultrasound-based optoelectronic navigation*. *British Journal of Surgery*, Vol. 94, No. 7, 866-875, 00071323 (ISSN).
- [65] El-Serag, H.B. and Rudolph, K.L. (2007), Hepatocellular carcinoma: epidemiology and molecular carcinogenesis. *Gastroenterology*, Vol. 132, No. 7, 2557-2576.
- [66] Rosenbaum, D.A. (1990). *Human Motor Control*, Academic Press.
- [67] Smith, A.C., Mobasser, F. and Hashtrudi-Zaad, K. (2006). *Neural-network-based contact force observers for haptic applications*. *IEEE Trans. Robot.*, Vol. 22, No. 6, 1163-1175
- [68] Kennedy, C.W., Hu, T. and Desai, J.P. (2002). Combining haptic and visual servoing for cardiothoracic surgery. *Proc. IEEE Int. Conf. of Robotics and Automation, 2002. ICRA '02.*, pp. 2106-2111, 0-7803-7272-7, Washington, DC, USA.
- [69] Goethals, P., Sette, M.M., Reynaerts, D., et al. (2008). *Flexible elastoresistive tactile sensor for minimally invasive surgery*. *Haptics: Perception, Devices and Scenarios, Proceedings*, Vol. 5024, 573-579, 0302-9743.
- [70] Sette, M., D'hooge, J., Langeland, S., et al. (2007). *Tactile feedback in minimally invasive procedures using an elastography-based method*. *Int J CARS*, Vol. S504.
- [71] Rosenberg, L.B. (1995). *The use of Virtual Fixtures to Enhance Operator Performance in Time Delayed Teleoperation*, Armstrong Laboratory.
- [72] Turro, N., Khatib, O. and Coste-Maniere, E. (2001). Haptically augmented teleoperation.

Proc. IEEE Int Conf on Robotics and Automation, pp. 386-392, 1050-4729.

[73] Cano, A., Gayá, F., Lamata, P., et al. (2008). *Laparoscopic Tool Tracking Method for Augmented Reality Surgical Applications*. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 5104, 191-196.

[74] Ali, W., Morvan, T., Risholm, P., et al. (2009). *A visualization and fusion system for image guided RFA procedures*. Int J Image & Graphics, Vol. (in press).

[75] Grossi, E., Ribakove, G., Galloway, A., et al. (2000). *Minimally invasive mitral valve surgery with endovascular balloon technique*. Operative Techniques in Thoracic and Cardiovascular Surgery, Vol. 5, 176-189.

[76] D.A. Wang, F. Bello, A. Darzi, *Augmented reality provision in robotically assisted minimally invasive surgery*, ELSEVIER International Congress Series 1268 (2004) 527– 532

[77] A. Hattori, et al., *A robotic surgery system (da Vinci) with image guided function—system architecture and cholecystectomy application*, MMVR (2003).

[78] Yumi Iwashita , *Fast model–image registration using a two-dimensional distance map for surgical navigation system*, Advanced Robotics, Vol. 21, No. 7, pp. 751–770 (2007)© VSP and Robotics Society of Japan 2007.

[79] Davison et al., *Transactivation from Gal4-VP16 transgenic insertions for tissue-specific cell labeling and ablation in zebrafish*, <http://zfin.org/cgi-bin/webdriver?MIval=aa-pubview2.apg&OID=ZDB-PUB-070310-4>

[80] P. Viola and W. W. III, *Alignment by maximization of mutual information*, Int. J. Comput. Vis 24, 137–154 (1997).

[81] H. Lensch, W. Heidrich and H.-P. Seidel, *Automated texture registration and stitching for real world models*, in: *Proc. Pacific Graphics*, Hong Kong, pp. 317–326 (2000).

[82] . Kurazume, K. Noshino, Z. Zhang, *Simultaneous 2D images and 3D geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute*, in: *Proc. 5th Asian Conf. on Computer Vision*, Melbourne, pp. 99–106 (2002).

[83] K. Umeda, G. Godin and M. Rioux, *Registration of range and color images using gradient constraints and range intensity images*, in: *Proc. 17th Int. Conf. Pattern Recognition*, Cambridge, pp. 12–15 (2004).

[84] M. D. Elstrom and P. W. Smith, *Stereo-based registration of multi-sensor imagery for enhanced visualization of remote environments*, in: *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Detroit, MI, pp. 1948–1953 (1999).

