

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Π. ΑΣΒΕΣΤΑΣ

Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΙΓΑΛΕΩ 2019

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Ιστορική αναδρομή	1
1.2	Ρομποτική στην Ιατρική	4
1.2.1	Τα πρώτα ρομποτικά συστήματα	5
1.2.2	Ρομποτική στην ορθοπαιδική	6
1.2.3	Ελάχιστα επεμβατικές χειρουργικές επεμβάσεις	6
1.2.4	Μη επεμβατικές επεμβάσεις.....	10
1.2.5	Ρομποτική στην νευροχειρουργική	10
1.2.6	Ρομποτική στην ακτινοθεραπεία	12
1.2.7	Αποκατάσταση.....	13
1.3	Οφέλη Ρομποτικής.....	17
1.4	Προδιαγραφές ιατρικών ρομπότ	17
1.4.1	Ασφάλεια	17
1.4.2	Αποστείρωση	18
1.4.3	Χώρος λειτουργίας.....	18
1.5	Κατηγοριοποίηση ρομπότ.....	18
1.6	Εξαρτήματα ρομποτικού βραχίονα	19
1.6.1	Σύνδεσμοι	19
1.6.2	Αρθρώσεις.....	20
1.6.3	Ενεργοποιητές	22
1.6.4	Τελικός επενεργητής.....	22
1.6.5	Αισθητήρες.....	23
1.6.6	Μονάδα ελέγχου	23
1.7	Βαθμοί Ελευθερίας	24
1.8	Βασικοί τύποι ρομπότ	26
1.8.1	Ρομπότ καρτεσιανού τύπου	26
1.8.2	Ρομπότ κυλινδρικού τύπου	27
1.8.3	Ρομπότ σφαιρικού τύπου	28
1.8.4	Ρομπότ τύπου SCARA	28
1.8.5	Ρομπότ ανθρωπομορφικού τύπου	29
	Βιβλιογραφία	31

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1-1. Το ρομπότ Unimate.	1
Εικόνα 1-2. WABOT-1: το πρώτο ανθρωποειδές ρομπότ (Πηγή: [1]).	2
Εικόνα 1-3. Το πρώτο πρωτότυπο του ρομπότ SCARA (Πηγή: [2]).	2
Εικόνα 1-4. Το ρομποτικό όχημα Sojourner στην επιφάνεια του πλανήτη Άρη (Πηγή: [3]).	3
Εικόνα 1-5. Το ρομπότ ASIMO της Honda.	3
Εικόνα 1-6. (α) Γραμμή παραγωγής αυτοκινητοβιομηχανίας. (β) Ρομποτικό όχημα εξερεύνησης ωκεανών. (γ) Το ρομποτικό όχημα Curiosity που χρησιμοποιήθηκε στην εξερεύνηση του πλανήτη Άρη. (δ) Ρομποτικός βραχίονας στο διάστημα.	4
Εικόνα 1-7. Πρώιμο μοντέλο εξ αποστάσεως χειρουργικής επέμβασης με ρομποτικό σύστημα (Πηγή: [4]).	4
Εικόνα 1-8. Πρώτο πρωτότυπο του Arthrobot, στα τέλη του 1984. Στο φορείο, εθελοντής της ομάδας μηχανικών (Πηγή: [5]).	5
Εικόνα 1-9. Σχηματικό διάγραμμα της ρομποτικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε στην πρώτη χειρουργική επέμβαση (Πηγή: [6]).	5
Εικόνα 1-10. Το ρομποτικό σύστημα TSolution-One (ROBODOC). (α) Σταθμός εργασίας για παραγωγή μοντέλου (Πηγή: THINK surgical). (β) Ρομποτικός βραχίονας (Πηγή: PR News Wire).	6
Εικόνα 1-11. Σύστημα Zeus. (α) και (β) Ρομποτικοί βραχίονες. (γ) Κονσόλα ιατρού. (δ) Κίνηση χεριού ιατρού (Πηγή: [8]).	7
Εικόνα 1-12. Το ρομποτικό σύστημα da Vinci. (α) Βραχίονες. (β) Κονσόλα χειρουργού. (γ) Η στερεοσκοπική κάμερα. (δ) Συνολική άποψη. (Πηγή: [8])	8
Εικόνα 1-13. Το ρομποτικό σύστημα Senhance (Telelap ALF-X) (Πηγή: https://transenterix.com/introducing-digital-laparoscopy/).	9
Εικόνα 1-14. Χειριστήριο του ρομποτικού συστήματος Senhance (Telelap ALF-X) (Πηγή: [9]).	9
Εικόνα 1-15. (α) Σύστημα Flex (Πηγή: https://www.mpro-mag.com/contents/view_breaking-news/2016-10-20/medrobotics-corporation-receives-expanded-ce-mark-for-flex-robotic-system). (β) Ο εύκαμπτος σωλήνας με την κάμερα και τα χειρουργικά εργαλεία. (γ) Ενδοστοματική τοποθέτηση (Πηγή: [10]).	10
Εικόνα 1-16. Επέμβαση DBS. (α) Συμβατικός τρόπος: τοποθέτηση πλαισίου για στερέωση χειρουργικών εργαλείων. (β) Χρήση ρομπότ Neuromate: δεν χρησιμοποιείται πλαίσιο, αλλά το ρομπότ αναλαμβάνει την στερέωση των εργαλείων προς τη σωστή θέση.	12
Εικόνα 1-17. Το σύστημα CyberKnife (Πηγή: https://www.cyberknife.com/technology)	13
Εικόνα 1-18. Το σύστημα MIT-MANUS (Πηγή: [14]).	14
Εικόνα 1-19. Παραδείγματα ρομποτικών συστημάτων (εξωσκελετοί) αποκατάστασης άνω άκρων. (α) ARMIN IV [15]. (β) MGA [16]. (γ) CADEN-7 [17]. (δ) ABLE [18]. (ε) SRE [19]. (στ) RUPERT IV [20].	15
Εικόνα 1-20. Το σύστημα Lokomat (Πηγή: https://exoskeletonreport.com/product/lokomat/).	16
Εικόνα 1-21. Παραδείγματα φορετών ρομπότ αποκατάστασης αστραγάλου. (α) Το anklebot [22]. (β) Ρομποτικό σύστημα αποκατάστασης βάρδισης [23].	16

Εικόνα 1-22. Παραδείγματα ρομποτικών πλατφόρμων αποκατάστασης αστραγάλου. (α) Σύστημα εξάσκησης αστραγάλου [24] (β) Διαμορφούμενο ρομπότ αποκατάστασης [25].	17
Εικόνα 1-23. Ρομποτικός βραχίονας όπου έχουν σημειωθεί σύνδεσμοί του.	20
Εικόνα 1-24. Ρομποτικός βραχίονας όπου έχουν σημειωθεί οι αρθρώσεις του.	21
Εικόνα 1-25. Μοντέλα αρθρώσεων. (α) Περιτροφική άρθρωση. (β) Πρισματική άρθρωση.	21
Εικόνα 1-26. Ρομποτικός βραχίονας όπου έχουν σημειωθεί οι ενεργοποιητές του.	22
Εικόνα 1-27. Παράδειγμα τελικού επενεργητή. (α) Δαγκάνα. (β) Χειρουργικά εργαλεία συστήματος Da Vinci.	23
Εικόνα 1-28. Ρομποτικός βραχίονας όπου έχει σημειωθεί ο τελικός επενεργητής.	23
Εικόνα 1-29. Ρομποτικός βραχίονας όπου έχει σημειωθεί η μονάδα ελέγχου.	24
Εικόνα 1-30. Παράδειγμα ρομπότ 6 αρθρώσεων. (α) Είναι σημειωμένες οι τρεις πρώτες αρθρώσεις που καθορίζουν τη γεωμετρία του ρομπότ καθώς και ο σφαιρικός καρπός που καθορίζει τον προσανατολισμό του τελικού επενεργητή. Επίσης είναι σημειωμένο ένα τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων που δείχνει τον προσανατολισμό του τελικού επενεργητή. (β), (γ), (δ) Παραδείγματα προσανατολισμού του τελικού επενεργητή λόγω περιστροφής των αρθρώσεων του καρπού.	25
Εικόνα 1-31. Βραχίονας στον οποίο έχουν σημειωθεί το κυρίως σώμα, ο καρπός και ο τελικός επενεργητής.	26
Εικόνα 1-32. Μοντέλο ρομπότ καρτεσιανού τύπου (Πηγή: [26]).	26
Εικόνα 1-33. Παράδειγμα ρομπότ καρτεσιανού τύπου.	27
Εικόνα 1-34. Ρομπότ κυλινδρικού τύπου. (α) Μοντέλο. (β) Ο χώρος εργασίας του ρομπότ σχηματίζει κύλινδρο (Πηγή: [26]).	27
Εικόνα 1-35. Παράδειγμα ρομπότ κυλινδρικού τύπου (Πηγή: [26]).	28
Εικόνα 1-36. Ρομπότ σφαιρικού τύπου. (α) Μοντέλο. (β) Ο χώρος εργασίας του ρομπότ σχηματίζει σφαίρα (Πηγή: [26]).	28
Εικόνα 1-37. Ρομπότ τύπου SCARA. (α) Μοντέλο. (β) Χώρος εργασίας (Πηγή: [26]).	29
Εικόνα 1-38. Παράδειγμα ρομπότ τύπου SCARA (Πηγή: [26]).	29
Εικόνα 1-39. Ρομπότ ανθρωπομορφικού τύπου (α) Μοντέλο. (β) Χώρος εργασίας. (Πηγή: [26])	30
Εικόνα 1-40. Παράδειγμα ρομπότ ανθρωπομορφικού τύπου.	30

1 Εισαγωγή

1.1 Ιστορική αναδρομή

Ο όρος ρομπότ προέρχεται από την τσέχικη λέξη *robota* που σημαίνει εξαναγκασμένη εργασία και πρωτοεμφανίστηκε στο θεατρικό έργο επιστημονικής φαντασίας R.U.R (Rossumoni Univerzální Roboti - Rossum's Universal Robots) του Karel Čapek το 1920. Τα ρομπότ στο έργο ήταν τεχνητοί άνθρωποι (ανθρωποειδή), τα οποία εργάζονταν πολύ σκληρά σε εργοστάσιο, μέχρι που ξεσηκώθηκαν και κατέστρεψαν την ανθρωπότητα.

Το 1942, ο Αμερικανός συγγραφέας Isaac Asimov χρησιμοποίησε για πρώτη φορά τον όρο “ρομποτική” και περιέγραψε τους 3 νόμους τους οποίους πρέπει να υπακούει κάθε ρομπότ:

1. Ένα ρομπότ δεν θα κάνει κακό σε άνθρωπο, ούτε με την αδράνειά του θα επιτρέψει να βλαφτεί ανθρώπινο ον.
2. Ένα ρομπότ πρέπει να υπακούει τις διαταγές που λαμβάνει από ανθρώπους, εκτός αν οι διαταγές έρχονται σε αντίθεση με τον πρώτο νόμο.
3. Ένα ρομπότ οφείλει να προστατεύει την ύπαρξή του, εφόσον αυτό δεν συγκρούεται με τον πρώτο και τον δεύτερο νόμο.

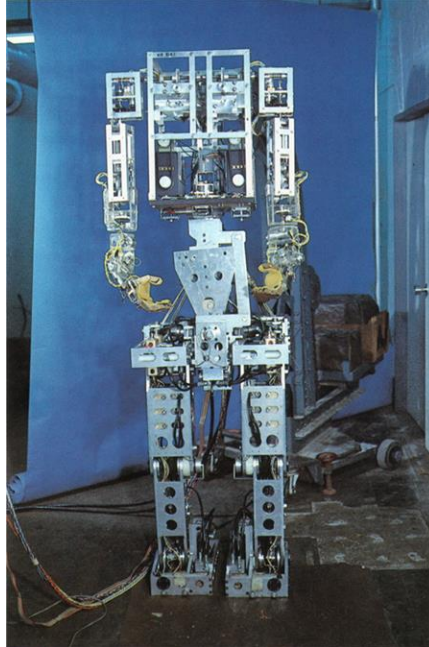
Το 1954 George C. Devol υπέβαλλε αίτηση κατοχύρωσης ευρεσιτεχνίας (πατέντα) για το πρώτο προγραμματιζόμενο ρομπότ, η οποία έγινε αποδεκτή το 1961. Το 1962 οι George Devol και Joseph Engelberger ίδρυσαν την πρώτη εταιρεία ρομποτικής, με την ονομασία Unimation. Η εταιρεία παρήγαγε το πρώτο ρομπότ για βιομηχανική χρήση, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στη γραμμή παραγωγής της αυτοκινητοβιομηχανίας General Motors. Το ρομπότ ονομάστηκε Unimate¹ (Εικόνα 1-1) και χρησιμοποιήθηκε για τη μεταφορά καυτού μετάλλου και την εναπόθεσή του σε ψυκτικό υγρό. Το Unimate ήταν τόσο επιτυχημένο, που ήδη από το 1968 πολλά εργοστάσια έκαναν χρήση ρομπότ αυτού του τύπου.



Εικόνα 1-1. Το ρομπότ Unimate.

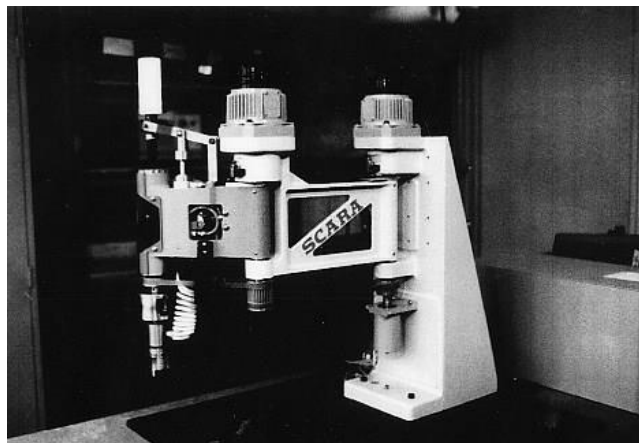
¹ Σχετικό βίντεο υπάρχει στον σύνδεσμο: <https://www.youtube.com/watch?v=hxsWeVtb-JQ>

Το 1972, παρουσιάστηκε το πρώτο ανθρωποειδές ρομπότ από το Πανεπιστήμιο Waseda στην Ιαπωνία, το οποίο ονομάστηκε WABOT-1 (Εικόνα 1-2). Ήταν σε θέση να περπατάει, να συγκρατεί και να μεταφέρει αντικείμενα. Επίσης, μπορούσε να υπολογίζει αποστάσεις και κατευθύνσεις και να συνομιλεί στα Ιαπωνικά.



Εικόνα 1-2. WABOT-1: το πρώτο ανθρωποειδές ρομπότ (Πηγή: [1]).

Το 1981, οι εταιρείες Sankyo Seiki, Pentel και NEC παρουσίασαν τον ρομποτικό βραχίονα SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm²) (Εικόνα 1-3). Το ρομπότ αναπτύχθηκε υπό την καθοδήγηση του Hiroshi Makino, καθηγητής στο Πανεπιστήμιο Yamagashi και ήταν ειδικά σχεδιασμένο για εργασίες συναρμολόγησης. Είχε ευελιξία κίνησης στο επίπεδο x-y, αλλά είχε περιορισμένη κινητικότητα στον άξονα z, καθώς μπορούσε να κινηθεί μόνο κατακόρυφα. Το γεγονός αυτό το έκανε ιδανικό για εργασίες μεταφοράς και τοποθέτησης αντικειμένων από ένα σημείο σε ένα άλλο στο οριζόντιο επίπεδο x-y.



Εικόνα 1-3. Το πρώτο πρωτότυπο του ρομπότ SCARA (Πηγή: [2]).

² Selective Compliance Assembly Robot Arm: Ρομποτικός Βραχίονας Συναρμολόγησης Επιλεκτικής Συμμόρφωσης

Το 1997, το ρομποτικό όχημα Sojourner προσεδαφίστηκε στον πλανήτη Άρη και χρησιμοποιήθηκε για την εξερεύνηση του πλανήτη και τη διεξαγωγή επιστημονικών πειραμάτων (Εικόνα 1-4).



Εικόνα 1-4. Το ρομποτικό όχημα Sojourner στην επιφάνεια του πλανήτη Άρη (Πηγή: [3]).

Το 2000, παρουσιάστηκε το ρομπότ ASIMO (Advanced Step in Innovative Mobility) από την εταιρεία Honda. Ήταν ένα ανθρωπόμορφο ρομπότ που προσέγγιζε αρκετά καλά την ανθρώπινη κινησιολογία και λειτουργία (Εικόνα 1-5). Το ρομπότ είχε τη δυνατότητα, να περπατάει, να ανεβαίνει σκαλοπάτια, να ανοίγει πόρτες και να ανάβει φώτα. Επίσης, ήταν σε θέση να ερμηνεύει τις χειρονομίες και τη στάση του σώματος ανθρώπων και να ανταποκρίνεται ανάλογα.

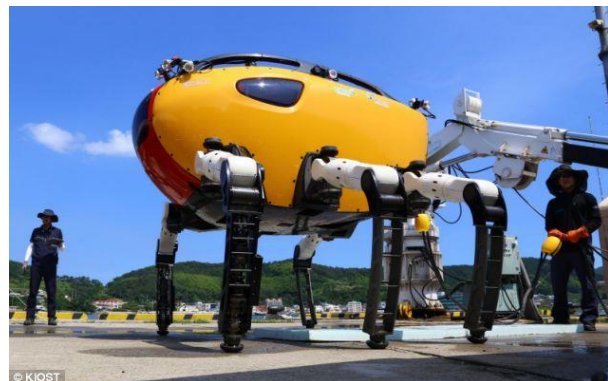


Εικόνα 1-5. Το ρομπότ ASIMO της Honda.

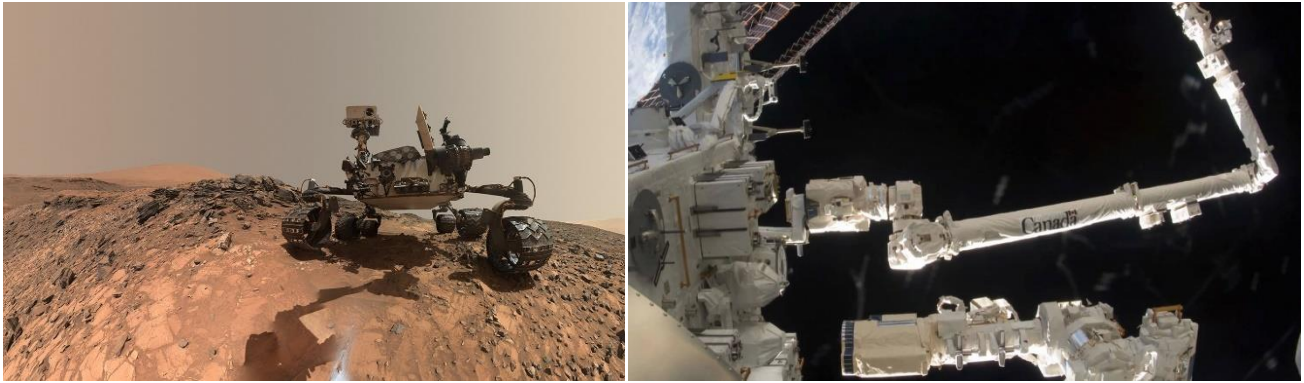
Τα ρομπότ έχουν χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς, κατά κύριο λόγο στη βιομηχανία για κατασκευή, μεταφορά και ακριβή τοποθέτηση εξαρτημάτων, αλλά και για πιο εξεζητημένους σκοπούς όπως η εξερεύνηση ωκεανών ή η ανάκτηση αντικειμένων από αυτούς, οχήματα χωρίς χειριστές, διαπλανητική εξερεύνηση κ.λπ. (Εικόνα 1-6).



(α)



(β)



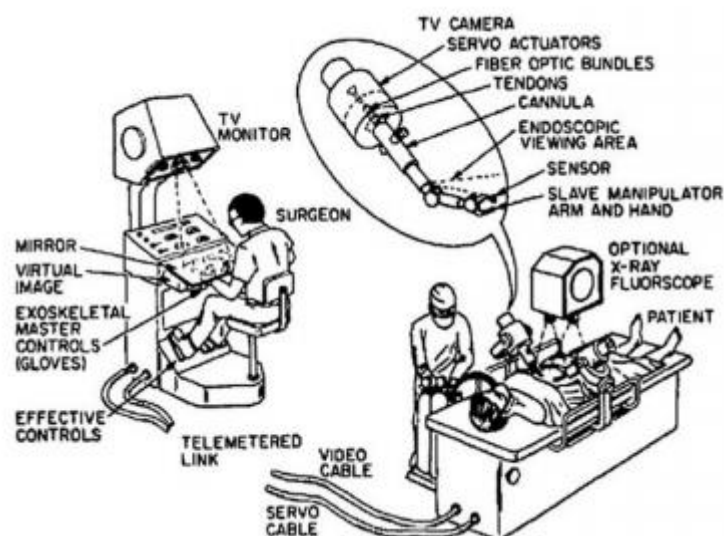
(γ)

(δ)

Εικόνα 1-6. (α) Γραμμή παραγωγής αυτοκινητοβιομηχανίας. (β) Ρομποτικό όχημα εξερεύνησης ωκεανών. (γ) Το ρομποτικό όχημα Curiosity που χρησιμοποιήθηκε στην εξερεύνηση του πλανήτη Άρη. (δ) Ρομποτικός βραχίονας στο διάστημα.

1.2 Ρομποτική στην Ιατρική

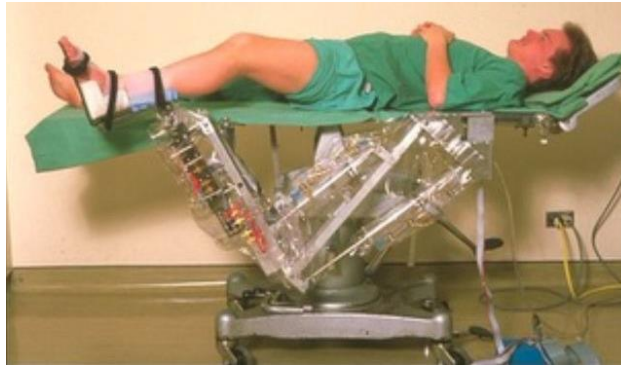
Η ρομποτική στην ιατρική συνδέεται κατά κύριο λόγο με τη τηλεχειρουργική, δηλαδή ο χειρουργός βρίσκεται σε κάποια απόσταση από τον ασθενή (π.χ. στο διπλανό δωμάτιο ή στο ίδιο δωμάτιο σε απόσταση μερικών μέτρων) και χειρίζεται ένα σύστημα που εκτελεί τις απαιτούμενες χειρουργικές εργασίες. Ήδη από τη δεκαετία του '70, υπήρχαν σχέδια για χρήση της ρομποτικής σε χειρουργικές επεμβάσεις χωρίς τη φυσική παρουσία χειρουργού με στόχο την εξ αποστάσεως παροχή φροντίδας σε αστροναύτες σε διαστημόπλοια. Για τον σκοπό αυτό, θα χρησιμοποιούνταν ρομπότ, ελεγχόμενα από τη Γη, όπως δείχνει η Εικόνα 1-7. Τα σχέδια αυτά δεν χρηματοδοτήθηκαν και παρήγαγαν μόνο κάποια περιορισμένη τεκμηρίωση της προτεινόμενης ιδέας. Το πρώτο μοντέλο ενός τέτοιου ρομποτικού συστήματος παρουσιάστηκε στη δεκαετία του '80. Όμως, υπήρχαν αρκετές δυσκολίες για την παραγωγή ενός αξιόπιστου συστήματος ρομποτικής τηλεχειρουργικής στο διάστημα, λόγω των μεγάλων χρονικών καθυστερήσεων στη μετάδοση εντολών από τη Γη στο διαστημόπλοιο. Ως αποτέλεσμα, έγιναν προσπάθειες δημιουργίας συστημάτων τηλεχειρουργικής για μικρότερες αποστάσεις. Η παρουσίαση των πρώτων εμπορικών συστημάτων έγινε στα τέλη του 1980.



Εικόνα 1-7. Πρώιμο μοντέλο εξ αποστάσεως χειρουργικής επέμβασης με ρομποτικό σύστημα (Πηγή: [4]).

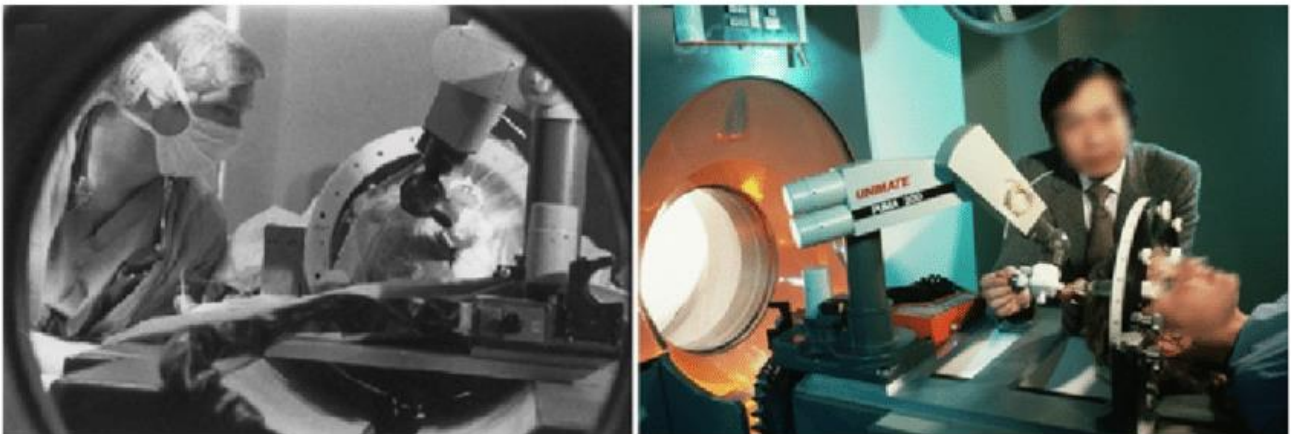
1.2.1 Τα πρώτα ρομποτικά συστήματα

Το πρώτο ρομπότ που σχεδιάστηκε για την υποστήριξη χειρουργικών, συγκεκριμένα ορθοπαιδικών, επεμβάσεων ήταν το Arthrobot, το 1983. Ήταν φωνητικά καθοδηγούμενο: με μια απλή φωνητική εντολή από τον χειρουργό, το ρομπότ μπορούσε να τοποθετήσει το πόδι του ασθενούς σε συγκεκριμένη θέση. Η πρώτη επέμβαση, με τη βοήθεια του ρομπότ, πραγματοποιήθηκε το 1984 στο νοσοκομείο UBC στον Καναδά. Ένα χρόνο αργότερα, αναφέρθηκε η χρήση του Arthrobot σε περισσότερες από 60 αρθροσκοπήσεις γονάτου³.



Εικόνα 1-8. Πρώτο πρωτότυπο του Arthrobot, στα τέλη του 1984. Στο φορείο, εθελοντής της ομάδας μηχανικών (Πηγή: [5]).

Το 1985, μία τροποποιημένη έκδοση του βιομηχανικού ρομπότ PUMA 200 (Programmable Universal Manipulation Arm) της εταιρίας Unimation χρησιμοποιήθηκε για υποβοήθηση βιοψίας εγκεφάλου (Εικόνα 1-9) [6]. Αρχικά, έγινε λήψη εικόνων αξονικής τομογραφίας (CT), όπου το κεφάλι του ασθενή ήταν ακινητοποιημένο με χρήση κατάλληλου πλαισίου. Στη συνέχεια, με βάση τις εικόνες αξονικής τομογραφίας, έγινε εντοπισμός των συντεταγμένων του σημείου όπου θα γινόταν η βιοψία. Το ρομπότ χρησιμοποιούσε τις συντεταγμένες αυτές για να δείξει την κατεύθυνση στην οποία έπρεπε να γίνει η τομή στο κρανίο μέσω της οποίας θα εισχωρούσε το όργανο για τη βιοψία.



Εικόνα 1-9. Σχηματικό διάγραμμα της ρομποτικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε στην πρώτη χειρουργική επέμβαση (Πηγή: [6]).

³ Η αρθροσκόπηση χρησιμοποιείται για αποκατάσταση ή αφαίρεση ιστών του γονάτου που υπέστησαν βλάβη. Γίνεται μέσω πολύ μικρών τομών από τις οποίες ο χειρουργός εισάγει ειδικά χειρουργικά εργαλεία καθώς και ένα πολύ μικρό όργανο με κάμερα (αρθροσκόπιο) στην άρθρωση του γόνατος. Η κάμερα στέλνει την εικόνα σε μια οθόνη τηλεόρασης στην οποία ο χειρουργός μπορεί να δει τις δομές του γόνατος με μεγάλη λεπτομέρεια.

1.2.2 Ρομποτική στην ορθοπαιδική

Το 1992, παρουσιάστηκε το πρώτο ολοκληρωμένο ρομποτικό ορθοπαιδικό χειρουργικό σύστημα (**ROBODOC**) από την εταιρία Integrated Surgical Systems. Από το 2014, το ROBODOC μετονομάστηκε σε **TSolution-One** (Εικόνα 1-10). Το σύστημα χρησιμοποιείται σε επεμβάσεις τοποθέτησης εμφυτευμάτων στο ισχίο ή στο γόνατο. Η χρήση του συστήματος (στην τρέχουσα μορφή του) περιλαμβάνει τρία στάδια: αρχικά λαμβάνεται μία προεγχειρητική αξονική τομογραφία (CT) της περιοχής ενδιαφέροντος. Οι εικόνες αξονικής τομογραφίας εισάγονται σε ένα ειδικό σταθμό εργασίας (TPLAN 3D Planning Workstation) στον οποίο παράγεται ένα τρισδιάστατο μοντέλο του οστού και της πάσχουσας άρθρωσης. Στη συνέχεια, ο χειρουργός χρησιμοποιεί τον σταθμό εργασίας για να μελετήσει και να επεξεργαστεί το τρισδιάστατο μοντέλο, να επιλέξει το κατάλληλο εμφύτευμα και να ορίσει τη βέλτιστη τοποθέτηση και ευθυγράμμιση του εμφυτεύματος. Τέλος, το μοντέλο αυτό μεταφέρεται στο ρομποτικό σύστημα το οποίο αναλαμβάνει να προετοιμάσει το οστό (αφαίρεση τμήματος οστού) με ακρίβεια υπο-χιλιοστών για την τοποθέτηση του εμφυτεύματος.



(α)



(β)

Εικόνα 1-10. Το ρομποτικό σύστημα TSolution-One (ROBODOC). (α) Σταθμός εργασίας για παραγωγή μοντέλου (Πηγή: [THINK surgical](#)). (β) Ρομποτικός βραχίονας (Πηγή: [PR News Wire](#)).

1.2.3 Ελάχιστα επεμβατικές χειρουργικές επεμβάσεις

Οι ελάχιστα επεμβατικές επεμβάσεις (minimally invasive procedures) αφορούν σε χειρουργικές τεχνικές που περιορίζουν το μέγεθος των αναγκαίων τομών και μειώνουν έτσι τον χρόνο επούλωσης του τραύματος, τον σχετικό πόνο και τον κίνδυνο μόλυνσης. Οι επεμβάσεις αυτές κάνουν χρήση μιας ειδικής κάμερας (ενδοσκόπιο), για την απεικόνιση του εσωτερικού του ανθρωπίνου σώματος και ειδικών χειρουργικών εργαλείων, αρθροσκοπικών (για επεμβάσεις σε αρθρώσεις ή στη σπονδυλική στήλη) ή λαπαροσκοπικών για επεμβάσεις στην κοιλιά ή στη λεκάνη.

Ένα από τα πρώτα τέτοια ρομποτικά συστήματα που χρησιμοποιήθηκε σε τέτοιες επεμβάσεις ήταν το **Zeus**, το οποίο παρουσιάστηκε το 1995 από την εταιρεία Computer Motion. Το Zeus περιελάμβανε

τρεις ρομποτικούς βραχίονες, οι οποίοι ελέγχονταν εξ αποστάσεως από χειρουργό (Εικόνα 1-11). Ένας από τους ρομποτικούς βραχίονες του Zeus ήταν υπεύθυνος για την πλοήγηση μίας ειδικής κάμερας (ενδοσκόπιο) στο εσωτερικό του ασθενή με χρήση φωνητικών εντολών και ονομαζόταν AESOP (Automated Endoscopic System for Optimal Positioning). Οι άλλοι δύο βραχίονες εκτελούσαν τις κινήσεις των χεριών του χειρουργού με ακρίβεια και σε μικρότερη κλίμακα (δηλαδή κινήσεις εκατοστών που έκανε με τα χέρια του ο χειρουργός αντιστοιχούσαν σε κινήσεις χιλιοστών των ρομποτικών βραχιόνων). Οι ρομποτικοί βραχίονες ήταν ανεξάρτητοι μεταξύ τους και στερεωμένοι στο χειρουργικό τραπέζι. Η περιοχή που γινόταν η εγχείρηση απεικονιζόταν σε μία οθόνη, η οποία όμως δεν έδινε την αίσθηση του βάθους στον χειρουργό. Η πιο εντυπωσιακή επίδειξη χρήσης του συστήματος Zeus ήταν για μια εξ αποστάσεως επέμβαση αφαίρεσης χοληδόχου κύστης, όπου ο χειρουργός ήταν στην Νέα Υόρκη (Η.Π.Α.) και η ασθενής στο Στρασβούργο (Γαλλία) [7].



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 1-11. Σύστημα Zeus. (α) και (β) Ρομποτικοί βραχίονες. (γ) Κονσόλα ιατρού. (δ) Κίνηση χεριού ιατρού (Πηγή: [8]).

Το 2003 η κατασκευάστρια εταιρία του Zeus (Computer Motion) εξαγοράστηκε από την εταιρία Surgical Intuitive, με αποτέλεσμα να διακοπεί η παραγωγή του και να δημιουργηθεί η μετεξέλιξη του, η οποία είναι το πολύ γνωστό ρομποτικό σύστημα da Vinci. Το σύστημα da Vinci σε αντίθεση με το σύστημα Zeus είναι μία τροχήλατη συμπαγής πλατφόρμα, εξοπλισμένη με τρεις βραχίονες (η αρχική έκδοση) και τέσσερις βραχίονες οι μεταγενέστερες εκδόσεις. Οι βραχίονες μπορούν να στερεωθούν γύρω από το χειρουργικό τραπέζι. Η κύρια βελτίωση του συστήματος da Vinci σε σχέση με το σύστημα Zeus είναι ότι είναι εξοπλισμένο με μία τρισδιάστατη, στερεοσκοπική κάμερα, η

οποία παρέχει δυνατότητα μεγέθυνσης $\times 10$ και ελέγχεται από τον χειρουργό για σταθερή και ακριβή πλοήγηση (Εικόνα 1-12). Το σύστημα da Vinci χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο σε χειρουργικές επεμβάσεις αφαίρεσης προστάτη, επιδιόρθωσης καρδιακής βαλβίδας και σε γυναικολογικές επεμβάσεις. Η πιο πρόσφατη έκδοση του συστήματος είναι το da Vinci Xi, το οποίο κυκλοφόρησε εμπορικά το 2014.



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 1-12. Το ρομποτικό σύστημα da Vinci. (α) Βραχίονες. (β) Κονσόλα χειρουργού. (γ) Η στερεοσκοπική κάμερα. (δ) Συνολική άποψη. (Πηγή: [8])

Ένα εναλλακτικό ρομποτικό σύστημα του da Vinci είναι το **Telelap ALF-X**, το οποίο αναπτύχθηκε από την ιταλική εταιρία Sofar, με την υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Το ρομποτικό σύστημα μετονομάστηκε σε **Senhance Surgical Robotic System** μετά από την εξαγορά του τμήματος ρομποτικής της Sofar από την εταιρία TransEnterix το 2015. Το σύστημα έχει λάβει σήμανση CE⁴ από

⁴ Η σήμανση CE υποδεικνύει τη συμμόρφωση με τα πρότυπα για την υγεία, την ασφάλεια και την προστασία του περιβάλλοντος για τα προϊόντα που πωλούνται εντός του Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου (ΕΟΧ). Η σήμανση CE βρίσκεται επίσης σε προϊόντα που πωλούνται εκτός του ΕΟΧ και τα οποία έχουν κατασκευαστεί ή έχουν σχεδιαστεί για να πωληθούν στον ΕΟΧ. Υπό την έννοια αυτή, είναι παρόμοια με τη δήλωση συμμόρφωσης FCC που χρησιμοποιείται σε ορισμένες ηλεκτρονικές συσκευές που πωλούνται στις Ηνωμένες Πολιτείες. Η σήμανση CE είναι η δήλωση του κατασκευαστή ότι το προϊόν πληροί τις απαιτήσεις των ισχυουσών οδηγιών της Ευρωπαϊκής Κοινότητας.

το 2016 για ουρολογικές, γυναικολογικές και θωρακικές χειρουργικές επεμβάσεις. Το σύστημα περιλαμβάνει τρεις ρομποτικούς βραχίονες (Εικόνα 1-13). Ο κάθε βραχίονας είναι τοποθετημένος στη δική του τροχήλατη βάση. Επιπλέον, περιλαμβάνει τρισδιάστατη απεικόνιση (με χρήση ειδικών γυαλιών που φοράει ο χειρουργός) σε οθόνη υψηλής ευκρίνειας. Τα χειριστήρια που χρησιμοποιεί ο χειρουργός έχουν τη μορφή λαπαροσκοπικών εργαλείων και με τα οποία μπορεί να ελέγξει τα χειρουργικά εργαλεία που είναι τοποθετημένα στους βραχίονες (Εικόνα 1-14). Δύο καινοτόμα χαρακτηριστικά του συστήματος είναι ότι παρέχει ανάδραση αφής και παρακολούθηση ματιού. Με την ανάδραση αφής (haptic feedback) ο χειρουργός έχει αίσθηση της δύναμης που εξασκεί με το χειρουργικό εργαλείο στο ανατομικό όργανο που γίνεται η επέμβαση. Η παρακολούθηση ματιού (eye tracking) προσαρμόζει τη εικόνα που φαίνεται στην οθόνη ανάλογα με τη θέση του ματιού του χειρουργού. Για παράδειγμα, αν το μάτι του χειρουργού πλησιάζει στην οθόνη γίνεται μεγέθυνση της εικόνας.



Εικόνα 1-13. Το ρομποτικό σύστημα Senhance (Telelar ALF-X) (Πηγή: <https://transenterix.com/introducing-digital-laparoscopy/>).



Εικόνα 1-14. Χειριστήριο του ρομποτικού συστήματος Senhance (Telelar ALF-X) (Πηγή: [9]).

1.2.4 Μη επεμβατικές επεμβάσεις

Τα ρομποτικά συστήματα που περιγράφονται παραπάνω χρησιμοποιούνται σε επεμβάσεις όπου πρέπει να γίνει μία τομή (έστω και μικρή), ώστε να υπάρχει πρόσβαση στο πάσχον όργανο. Το ρομποτικό σύστημα Flex της εταιρείας Medrobotics είναι μη επεμβατικό (δηλαδή δεν απαιτείται τομή στο ανθρώπινο σώμα). Η πρόσβαση στο όργανο ενδιαφέροντος γίνεται μέσω κοιλοτήτων του ανθρώπινου σώματος (στόμα, μύτη, ορθό κ.λπ.). Συγκεκριμένα, εισάγεται μέσω μίας κοιλότητας του σώματος, ένας εύκαμπτος σωλήνας πολλών αρθρώσεων ο οποίος μπορεί φέρει μία κάμερα υψηλής ευκρίνειας και χειρουργικά εργαλεία.



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 1-15. (α) Σύστημα Flex (Πηγή: https://www.mpo-mag.com/contents/view_breaking-news/2016-10-20/medrobotics-corporation-receives-expanded-ce-mark-for-flex-robotic-system). (β) Ο εύκαμπτος σωλήνας με την κάμερα και τα χειρουργικά εργαλεία. (γ) Ενδοσκοπική τοποθέτηση (Πηγή: [10]).

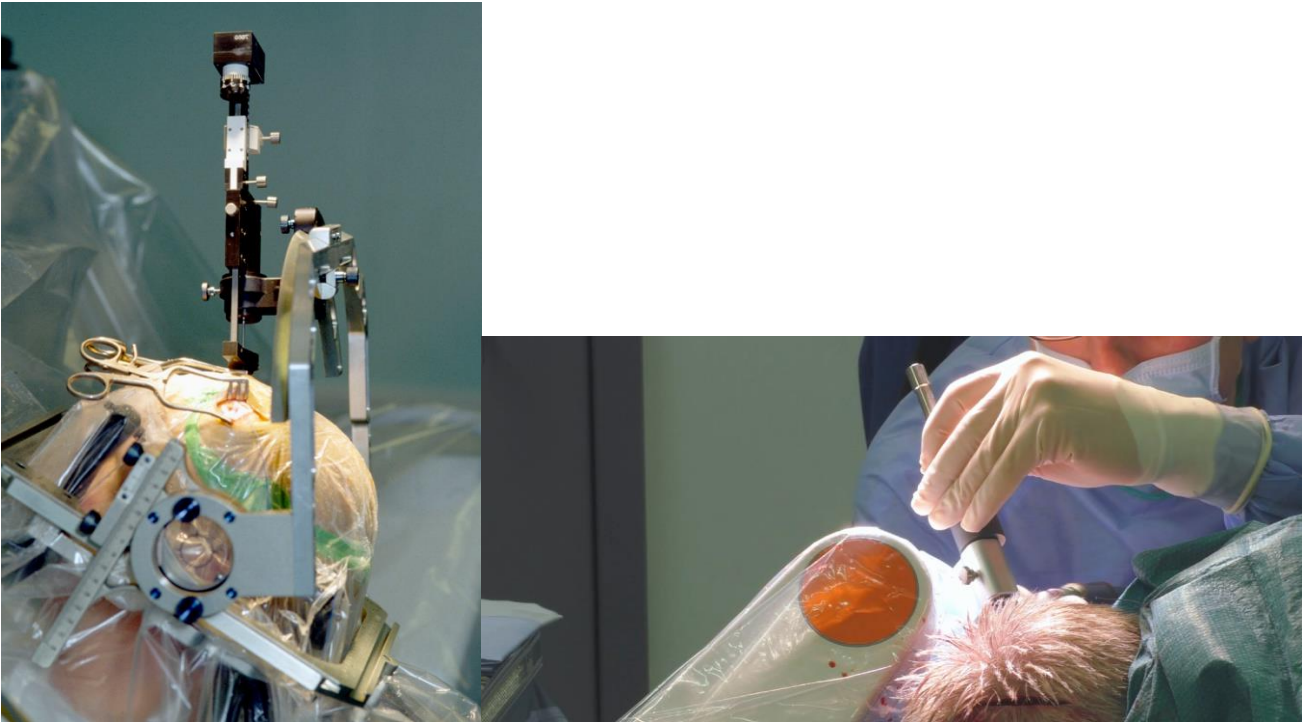
1.2.5 Ρομποτική στην νευροχειρουργική

Ένα άλλο πεδίο εφαρμογής της ρομποτικής είναι στη στερεοτακτική νευροχειρουργική και ειδικότερα στην εν τω βάθει εγκεφαλική διέγερση (Deep Brain Stimulation - DBS). Η επέμβαση χρησιμοποιείται για ασθενείς με νόσο του Πάρκινσον, ιδιοπαθή τρόμο (τρέμουλο), δυστονία και σε ασθενείς με δυσκινησίες, ενώ έχει ξεκινήσει η εφαρμογή σε ασθενείς με ψυχιατρικά νοσήματα, όπως η ιδεοψυχαναγκαστική διαταραχή, η επιληψία και ο χρόνιος πόνος. Η νευροχειρουργική

διαδικασία περιλαμβάνει τη διάνοιξη οπών στον κρανίο και την τοποθέτηση κατάλληλων ηλεκτροδίων για την παροχή ηλεκτρικών ερεθισμάτων σε συγκεκριμένα σημεία στον εγκέφαλο. Η διαδικασία αυτή είναι πολύωρη και απαιτεί μεγάλη ακρίβεια, σταθερότητα και διαρκή εγρήγορση από τους χειρουργούς. Για την υποβοήθηση της επέμβασης DBS, έχουν αναπτυχθεί κατάλληλα ρομποτικά συστήματα. Ένα από τα πιο γνωστά τέτοια συστήματα είναι το NeuroMate της εταιρείας Renishaw-Mayfield. Η επέμβαση DBS με χρήση του ρομπότ γίνεται ως εξής [11]: πριν την επέμβαση, λαμβάνονται εικόνες μαγνητικής τομογραφίας (MRI) του εγκεφάλου. Οι εικόνες αυτές εισάγονται σε ένα ειδικό λογισμικό, με το οποίο ο ιατρός καθορίζει τα σημεία του εγκεφάλου όπου θα γίνει η διέγερση, καθώς και την τροχιά που θα πρέπει να ακολουθηθεί για την πρόσβαση στα σημεία αυτά. Κατά τη διάρκεια της επέμβασης, αφού ακινητοποιηθεί το κεφάλι του ασθενή και γίνει ολική αναισθησία, λαμβάνονται εικόνες αξονικής τομογραφίας (CT) για να καθοδηγήσουν το ρομπότ. Οι εικόνες αυτές ευθυγραμμίζονται⁵ με τις προεγχειρητικές εικόνες MRI, ώστε το ρομπότ να λάβει τη σωστή θέση, καταδεικνύοντας το σημείο του κρανίου μέσω του οποίου θα γίνει η πρόσβαση. Στη συνέχεια, προσαρμόζεται στο ρομπότ κατάλληλος οδηγός για τη στήριξη και την ακριβή τοποθέτηση των χειρουργικών εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν. Αφού γίνει τομή στο δέρμα της κεφαλής, ανοίγεται οπή στο κρανίο. Κατόπιν, τοποθετείται αδιαφανές στις ακτίνες X σύρμα, το οποίο πρέπει να ακολουθεί τη προδιαγεγραμμένη τροχιά (όπως έχει σχεδιαστεί στις εικόνες MRI) προς το σημείο ενδιαφέροντος του εγκεφάλου. Για την επιβεβαίωση της σωστής τοποθέτησης του σύρματος, λαμβάνεται μία δεύτερη αξονική τομογραφία, μέσω της οποίας γίνεται σύγκριση της τροχιάς του σύρματος με τη προδιαγεγραμμένη τροχιά. Αφού επιβεβαιωθεί η ορθότητα της τροχιάς, αφαιρείται το σύρμα και τοποθετούνται το μικρο-ηλεκτρόδιο, το οποίο συνδέεται με τη γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικών σημάτων (νευροδιεγέρτης). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τα υπόλοιπα σημεία όπου θα γίνει η επέμβαση.

Η Εικόνα 1-16(α) παρουσιάζει τον συμβατικό τρόπο DBS, ενώ η Εικόνα 1-16(β) παρουσιάζει τη χρήση του ρομπότ NeuroMate. Παρατηρούμε ότι στον συμβατικό τρόπο, υπάρχει ένα ειδικό πλαίσιο (στερεοτακτικό πλαίσιο) το οποίο βοηθάει στην τοποθέτηση των εργαλείων για τη δημιουργία της τροχιάς προς το σημείο ενδιαφέροντος. Αντίθετα, με τη χρήση του ρομπότ NeuroMate, δεν υπάρχει το πλαίσιο αυτό και το ρομπότ αναλαμβάνει τη τοποθέτηση των εργαλείων προς τη σωστή κατεύθυνση.

⁵ Οι εικόνες MRI και CT και μεν δείχνουν την ίδια ανατομική περιοχή, αλλά είναι πιθανό να υπάρχει μετακίνηση ή περιστροφή στην απεικονιζόμενη ανατομική δομή (εγκέφαλος), ανάμεσα στα δύο σύνολα εικόνων. Για να εξαλειφθούν αυτές οι γεωμετρικές διαφοροποιήσεις, εφαρμόζεται, μέσω λογισμικού, η λεγόμενη διαδικασία ευθυγράμμισης (registration). Στην ουσία, οι εικόνες CT μετασχηματίζονται, ώστε να υπάρχει χωρική ταύτιση με τις εικόνες MRI.



Εικόνα 1-16. Επέμβαση DBS. (α) Συμβατικός τρόπος: τοποθέτηση πλαισίου για στερέωση χειρουργικών εργαλείων. (β) Χρήση ρομπότ Neuromate: δεν χρησιμοποιείται πλαίσιο, αλλά το ρομπότ αναλαμβάνει την στερέωση των εργαλείων προς τη σωστή θέση.

1.2.6 Ρομποτική στην ακτινοθεραπεία

Ένας άλλος κλάδος της ιατρικής όπου χρησιμοποιούνται ρομποτικά συστήματα είναι η ακτινοθεραπεία, η οποία αφορά στην καταστροφή καρκινικών κυττάρων με χρήση ιοντιζουσών ακτινοβολιών. Ένα τέτοιο σύστημα είναι το CyberKnife που κατασκευάζεται από την εταιρία Accuray Incorporated. Χρησιμοποιείται για τη θεραπεία όγκων στον προστάτη, πνεύμονα, εγκέφαλο, σπονδυλική στήλη, κεφάλι, λαιμό, ήπαρ, πάγκρεας, νεφρό και σε συγκεκριμένες γυναικολογικές περιπτώσεις. Αποτελεί μια εναλλακτική λύση στην κλασική χειρουργική αφαίρεση όγκων ή αποτελεί λύση σε περιπτώσεις που είναι μη χειρουργήσιμες ή πολύπλοκες χειρουργικά. Η συσκευή συνδυάζει έναν ελαφρύ γραμμικό επιταχυντή (η συσκευή παραγωγής ακτινοβολιών), τοποθετημένο σε ρομποτικό βραχίονα, που επιτρέπει την ακριβή ακτινοβολήση του όγκου-στόχου από διαφορετικές γωνίες (Εικόνα 1-17). Η ακριβής ακτινοβολήση επιτυγχάνεται με τη λήψη εικόνων (ακτινογραφίες) κατά τη διάρκεια της θεραπείας. Με αυτόν τον τρόπο, παρακολουθείται η κίνηση του όγκου και καθοδηγείται ο ρομποτικός βραχίονας ώστε να ευθυγραμμιστεί με ακρίβεια η δέσμη θεραπείας με τον κινούμενο όγκο. Το σύστημα εφευρέθηκε από τον John R. Adler, καθηγητή Νευροχειρουργικής και Ακτινοθεραπευτικής Ογκολογίας του Πανεπιστημίου του Stanford και τον Peter και Russell Schonberg της Schonberg Research Corporation. Το πρώτο σύστημα εγκαταστάθηκε στο Πανεπιστήμιο του Στάνφορντ το 1991 και έλαβε έγκριση από το FDA για κλινική έρευνα το 1994. Μετά από χρόνια κλινικής έρευνας, το FDA έδωσε έγκριση για τη χρήση του συστήματος στη θεραπεία ενδοκρανιακών όγκων το 1999 και στη θεραπεία όγκων οπουδήποτε στο σώμα το 2001. Το πιο πρόσφατο μοντέλο ονομάζεται CyberKnife M6 System και κυκλοφόρησε το 2012.



Εικόνα 1-17. Το σύστημα CyberKnife (Πηγή: <https://www.cyberknife.com/technology>)

1.2.7 Αποκατάσταση

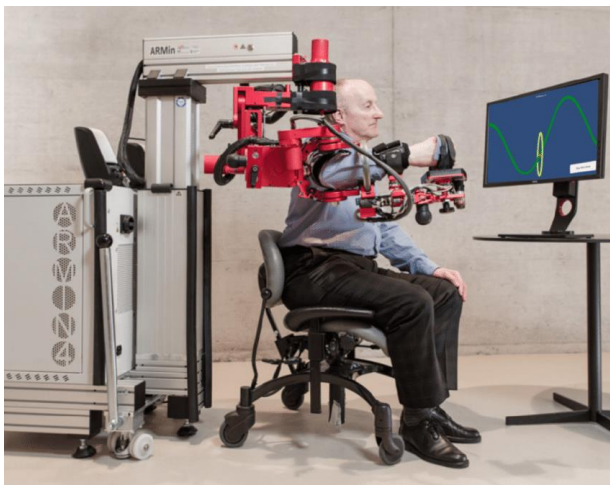
Η αποκατάσταση (rehabilitation) απευθύνεται σε ασθενείς με κινητικές δυσκολίες, οι οποίες είναι αποτέλεσμα τραυματισμού, εγκεφαλικού επεισοδίου ή κάποιας νευρολογικής πάθησης. Το εγκεφαλικό επεισόδιο, δηλαδή η διακοπή αιμάτωσης του εγκεφάλου, αποτελεί την κύρια αιτία πρόκλησης κινητικών δυσκολιών στις αναπτυγμένες χώρες. Συγκεκριμένα, μπορεί να προκαλέσει ημιπληγία, δηλαδή παράλυση ή απώλεια φυσικών δυνάμεων στη μια πλευρά του σώματος. Η φυσιοθεραπεία αποτελεί την κύρια θεραπευτική αγωγή σε τέτοιες περιπτώσεις, βοηθώντας τους ασθενείς να βελτιώσουν ή να επαναφέρουν τις κινητικές τους δυνατότητες. Η θεραπεία ειδικά για ασθενείς με εγκεφαλικό επεισόδιο μπορεί να είναι πολύχρονη και δαπανηρή. Επιπλέον, ο συμβατικός τρόπος φυσιοθεραπείας απαιτεί τακτικές συνεδρίες με χειροκίνητη εργασία του φυσιοθεραπευτή στο πάσχον μέλος, το οποίο συνήθως είναι αρκετό κουραστικό για τον φυσιοθεραπευτή. Από την άλλη, ειδικοί ρομποτικοί μηχανισμοί μπορούν να προσφέρουν συνεχή αποκατάσταση για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, χωρίς να επηρεάζονται από κούραση.

Ένα από τα πρώτα ρομπότ που χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση των άνω άκρων είναι το **MIT-MANUS** [12]. Το βασικό σύστημα έχει τη δυνατότητα να κατευθύνει την κίνηση του ασθενή σε ένα οριζόντιο επίπεδο, στοχεύοντας κίνηση στις αρθρώσεις του ώμου και του αγκώνα. Έχουν αναπτυχθεί, επεκτάσεις στο βασικό σύστημα οι οποίες επιτρέπουν την κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση καθώς και κίνηση του καρπού [13]. Οι ασκήσεις αποκατάστασης διεξάγονται με τη χρήση ειδικού λογισμικού το οποίο παρέχει οπτική ανάδραση στον ασθενή για τη θέση που είναι το χέρι του.



Εικόνα 1-18. Το σύστημα MIT-MANUS (Πηγή: [14]).

Η Εικόνα 1-19 δείχνει παραδείγματα ρομποτικών συστημάτων για αποκατάσταση άνω άκρων. Τα ρομποτικά συστήματα αυτού του τύπου είναι γνωστά και ως **εξωσκελετοί**. Οι εξωσκελετοί έχουν δομή που μοιάζει με το ανθρώπινο άνω άκρο και περιλαμβάνουν αρθρώσεις που ταιριάζουν με τις αρθρώσεις του άνω άκρου. Σχεδιάζονται για να λειτουργούν παράλληλα με το άνω άκρο και παράγουν κατάλληλες δυνάμεις και ροπές στον ανθρώπινο άνω άκρο, ανάλογα με το πρόγραμμα αποκατάστασης.



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

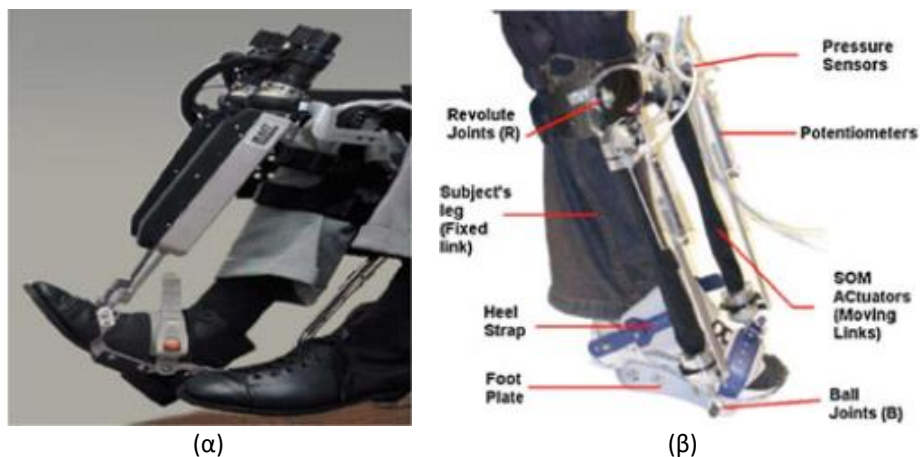
Εικόνα 1-19. Παραδείγματα ρομποτικών συστημάτων (εξωσκελετοί) αποκατάστασης άνω άκρων. (α) ARMIN IV [15]. (β) MGA [16]. (γ) CADEN-7 [17]. (δ) ABLE [18]. (ε) SRE [19]. (στ) RUPERT IV [20].

Ένα από τα πιο γνωστά ρομποτικά συστήματα αποκατάστασης κάτω άκρων είναι το Lokomat από την εταιρεία Hocoma, το οποίο κάνει χρήση ηλεκτρικού διαδρόμου [21]. Το σύστημα παρέχει μηχανισμό ώστε να διατηρεί τον ασθενή σε όρθια θέση ενώ βρίσκεται στον διάδρομο. Ένας ειδικός ρομποτικός νάρθηκας φοριέται από τον ασθενή για να καθοδηγήσει τον βηματισμό του, παρέχοντας ενισχυτική δύναμη μόνο εάν ο ασθενής δεν πραγματοποιήσει το απαιτούμενο πρότυπο βάδισης.



Εικόνα 1-20. Το σύστημα Lokomat (Πηγή: <https://exoskeletonreport.com/product/lokomat/>).

Τα ρομποτικά συστήματα αποκατάστασης των κάτω άκρων χρησιμοποιούνται κυρίως για την αποκατάσταση του αστραγάλου σε περιπτώσεις τραυματισμού ή για την αποκατάσταση της βάρδισης ύστερα από κάποια νευρολογική διαταραχή. Οι ρομποτικές συσκευές αποκατάστασης αστραγάλου μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες όσον αφορά την κινητικότητα της συσκευής κατά τη λειτουργία. Υπάρχουν τα φορετά (wearable) ρομπότ και οι ρομποτικές πλατφόρμες με σταθερές βάσεις. Τα φορετά ρομπότ αστραγάλου έχουν συνήθως τη μορφή εξωσκελετού ή νάρθηκα (Εικόνα 1-21), δηλαδή ενός συστήματος το οποίο προσαρμόζεται (φοριέται) στο πόδι του ασθενούς, και χρησιμοποιούνται για να διορθώσουν το μοτίβο βάρδισης του χρήστη.



Εικόνα 1-21. Παραδείγματα φορετών ρομπότ αποκατάστασης αστραγάλου. (α) Το anklebot [22]. (β) Ρομποτικό σύστημα αποκατάστασης βάρδισης [23].

Από την άλλη, στις ρομποτικές πλατφόρμες (Εικόνα 1-22), το πόδι του ασθενή πατάει σε αυτές και γενικά αναπτύσσονται για να διευκολύνουν τη θεραπεία των διαστρεμμάτων του αστραγάλου.



(α)



(β)

Εικόνα 1-22. Παραδείγματα ρομποτικών πλατφόρμων αποκατάστασης αστραγάλου. (α) Σύστημα εξάσκησης αστραγάλου [24] (β) Διαμορφούμενο ρομπότ αποκατάστασης [25].

1.3 Οφέλη Ρομποτικής

Η χρήση ρομπότ στην ιατρική και ειδικά στη χειρουργική έχει τα ακόλουθα βασικά πλεονεκτήματα:

- **Ακρίβεια:** ένα ρομπότ (υπό την καθοδήγηση ενός ιατρού) μπορεί να τοποθετήσει ένα χειρουργικό εργαλείο στην επιθυμητή θέση με ακρίβεια χιλιοστού (ή και λιγότερο).
- **Σμίκρυνση εύρους κινήσεων:** οι κινήσεις των χεριών ενός χειρουργού που είναι της τάξης μερικών εκατοστών μπορούν να μεταφραστούν από το ρομπότ σε κινήσεις χιλιοστών.
- **Σταθεροποίηση κίνησης:** ένα πιθανό τρέμουλο των χεριών ενός χειρουργού φιλτράρεται και εξαλείφεται από το ρομπότ.
- **Ευελιξία κίνησης:** ένα ρομπότ μπορεί να κάνει σύνθετες κινήσεις που ίσως να είναι δύσκολο να γίνουν με τα ανθρώπινα χέρια.
- **Συνδυασμός δεδομένων από πολλαπλές πηγές:** ένα ρομπότ μπορεί να κάνει χρήση δεδομένων (π.χ. εικόνων) για να καθορίζει τη θέση του και την ταχύτητά του. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το σύστημα Cyberknife που περιγράφεται πιο πάνω.

1.4 Προδιαγραφές ιατρικών ρομπότ

Τα ιατρικά ρομπότ, σε αντίθεση με τα βιομηχανικά ρομπότ, πρέπει να πληρούν τρεις βασικές προδιαγραφές που αφορούν στα ακόλουθα:

- Ασφάλεια γύρω από τον ασθενή και το ιατρικό προσωπικό.
- Αποστείρωση.
- Χώρος λειτουργίας.

1.4.1 Ασφάλεια

Το θέμα της ασφάλειας είναι πρωταρχικής σημασίας στην ιατρική ρομποτική. Αφορά όχι μόνο στην ασφάλεια του ασθενούς, αλλά και στην ασφάλεια του ιατρικού προσωπικού που χρησιμοποιεί το ρομποτικό σύστημα, καθώς συχνά βρίσκεται πολύ κοντά σε αυτό. Στην πράξη, στην ιατρική ρομποτική, το ρομποτικό σύστημα έρχεται σε επαφή με τον ασθενή ή/και το ιατρικό προσωπικό, το οποίο δεν συμβαίνει στη βιομηχανική ρομποτική. Επιπλέον, στον τομέα της υγείας, κάθε ατύχημα έχει τεράστιο αρνητικό αντίκτυπο τόσο για τον ιατρό όσο και για την κατασκευάστρια εταιρεία.

Ακόμη και αν, θεωρητικά, δεν υπάρχει κάποιος άμεσος κίνδυνος από τη χρήση ενός ιατρικού ρομπότ, πρέπει πάντα να διασφαλίζεται ότι μια χειρουργική επέμβαση που υποβοηθείται από ένα ρομποτικό σύστημα είναι πιο ασφαλής και ακριβής από ότι εάν γινόταν χωρίς αυτό. Γι' αυτό τον λόγο, τα συστήματα ρομποτικής πρέπει να διαθέτουν:

- καλά καθορισμένα, τεκμηριωμένα και ακριβή πρωτόκολλα χρήσης με επαρκή εκπαίδευση του ιατρικού προσωπικού
- εύχρηστες και φιλικές διασυνδέσεις ανθρώπου-ρομπότ, οι οποίες είναι εργονομικές και ξεκάθαρες,
- διαδικασίες αυτόματης προετοιμασίας
- διαδικασίες τερματισμού και μετατροπής σε συμβατική τεχνική,
- χειρισμό από ιατρό, εάν είναι δυνατόν.
- ασφαλείς ρομποτικές δομές.
- πλεονάζοντες αισθητήρες,
- ηλεκτρικές ασφάλειες
- όριο στον χώρο εργασίας, την ταχύτητα και τη δύναμη,
- έλεγχος με χρήση λογισμικού όλων των εξαρτημάτων του ρομπότ
- διαδικασίες για την εξασφάλιση της σωστής εκτέλεσης κάθε σταδίου της ιατρικής διαδικασίας

1.4.2 Αποστείρωση

Ένας άλλος ειδικός περιορισμός για ένα ιατρικό ρομπότ είναι η αποστείρωσή του κατά τη χρήση του σε χειρουργικές επεμβάσεις. Συγκεκριμένα, τα μέρη ενός ρομποτικού συστήματος που έρχονται σε άμεση επαφή με τον ασθενή, τον χειρουργό ή το ιατρικό προσωπικό θα πρέπει να αποστειρώνονται πλήρως. Τα μέρη που θα μπορούσαν να έρθουν σε επαφή και δεν μπορούν να αποστειρωθούν πρέπει να καλύπτονται σε αποστειρωμένο υλικό.

1.4.3 Χώρος λειτουργίας

Σε αντίθεση με τα βιομηχανικά ρομπότ, όπου το ρομποτικό σύστημα λειτουργεί σε ειδικό χώρο ειδικά σχεδιασμένο για αυτό το σκοπό, ένα ιατρικό ρομπότ πρέπει να προσαρμόζεται στο περιβάλλον του χειρουργείου. Στην πραγματικότητα, με εξαίρεση τη ρομποτική ακτινοθεραπεία, πολύ λίγα νοσοκομειακά δωμάτια είναι ειδικά σχεδιασμένα για να φιλοξενήσουν ένα ρομποτικό σύστημα. Εκτός από την πιστοποίηση του ιατρικού εξοπλισμού (σφραγίδα της ΕΕ, έγκριση FDA κ.λπ.), πρέπει να:

- Μην υπάρχουν εμπόδια (στον βαθμό που είναι εφικτό) στο χώρο που θα λειτουργήσει ένα ρομπότ.
- Είναι εύκολη η μεταφορά του ρομπότ μέσα και έξω από τον χειρουργικό χώρο, εκτός εάν ο χώρος χρησιμοποιείται αποκλειστικά για ρομποτικές επεμβάσεις.
- Υπάρχει ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα με τον άλλο ιατρικό εξοπλισμό
- Μπορεί να λειτουργήσει χωρίς εξειδικευμένο τεχνικό προσωπικό

1.5 Κατηγοριοποίηση ρομπότ

Τα ρομπότ ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Σταθερά ρομπότ.
- Κινούμενα ρομπότ.

Τα σταθερά ρομπότ είναι συνήθως ρομποτικοί βραχίονες ή πλατφόρμες που έχουν σταθερή θέση και εκτελούν κάποιες κινήσεις (είτε αυτοματοποιημένα ή με βάση τις εντολές που δέχονται από τον χρήστη). Τα κινούμενα ρομπότ μετακινούνται στον χώρο και συνήθως βρίσκονται σε δυναμικό περιβάλλον, το οποίο μπορεί να αλλάζει με τον χρόνο (π.χ. εμπόδια). Υπάρχουν τρεις υποκατηγορίες για τα κινούμενα ρομπότ ανάλογα με το περιβάλλον που λειτουργούν:

- Υποβρύχια
- Επιφανείας (αμαξίδια, αυτοκίνητα)
- Αέρος (drones)

1.6 Εξαρτήματα ρομποτικού βραχίονα

Ο ρομποτικός βραχίονας είναι το πιο συνηθισμένο είδος ρομποτικού μηχανισμού που χρησιμοποιείται στην ιατρική. Τα βασικά εξαρτήματα που περιλαμβάνει ένας ρομποτικός βραχίονας είναι:

- Σύνδεσμοι (Links)
- Αρθρώσεις (Joints)
- Τελικός επενεργητής (End effector)
- Ενεργοποιητές (Actuators)
- Αισθητήρες (Sensors)
- Μονάδα ελέγχου (Control unit)

1.6.1 Σύνδεσμοι

Οι σύνδεσμοι (links) είναι τα επιμέρους στερεά σώματα που απαρτίζουν έναν ρομποτικό βραχίονα (Εικόνα 1-23). Ένας σύνδεσμος συνδέεται με άλλους συνδέσμους και υπάρχει η δυνατότητα σχετικής κίνησης του ενός συνδέσμου ως προς τον άλλο. Συνήθως, η βάση στην οποία στηρίζεται ένας ρομποτικός βραχίονας θεωρείται ότι αποτελεί έναν σύνδεσμο. Αν δύο σύνδεσμοι συνδέονται, αλλά δεν υπάρχει σχετική κίνηση του ενός ως προς τον άλλο, τότε οι δύο σύνδεσμοι θεωρούνται ότι αποτελούν έναν ενιαίο σύνδεσμο.



Εικόνα 1-23. Ρομποτικός βραχίονας όπου έχουν σημειωθεί σύνδεσμοί του.

1.6.2 Αρθρώσεις

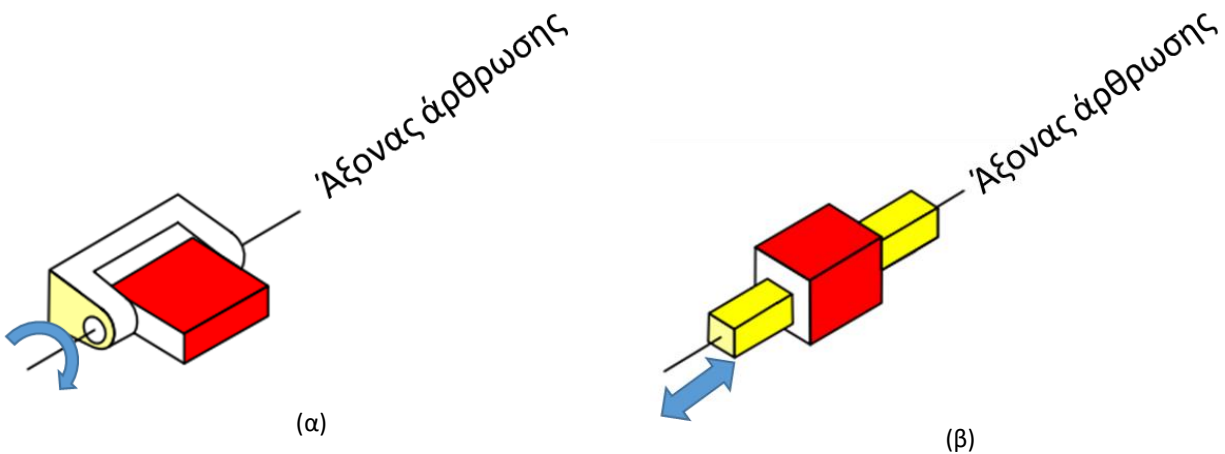
Οι αρθρώσεις (joints) είναι τα σημεία στα οποία συνδέονται δύο σύνδεσμοι και επιτρέπουν τη σχετική κίνηση του ενός συνδέσμου ως προς τον άλλο.



Εικόνα 1-24. Ρομποτικός βραχίονας όπου έχουν σημειωθεί οι αρθρώσεις του.

Σε κάθε άρθρωση, ορίζεται ένας **άξονας** ως προς τον οποίο γίνεται η κίνηση των συνδεδεμένων συνδέσμων. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες αρθρώσεων:

- **Περιστροφικές (revolute):** επιτρέπουν περιστροφική κίνηση συνδέσμων **ως προς** τον άξονα της άρθρωσης (Εικόνα 1-25(α)).
- **Πρισματικές (prismatic):** επιτρέπουν την σχετική μετατόπιση συνδέσμων **κατά μήκος** του άξονα της άρθρωσης (Εικόνα 1-25(β)).

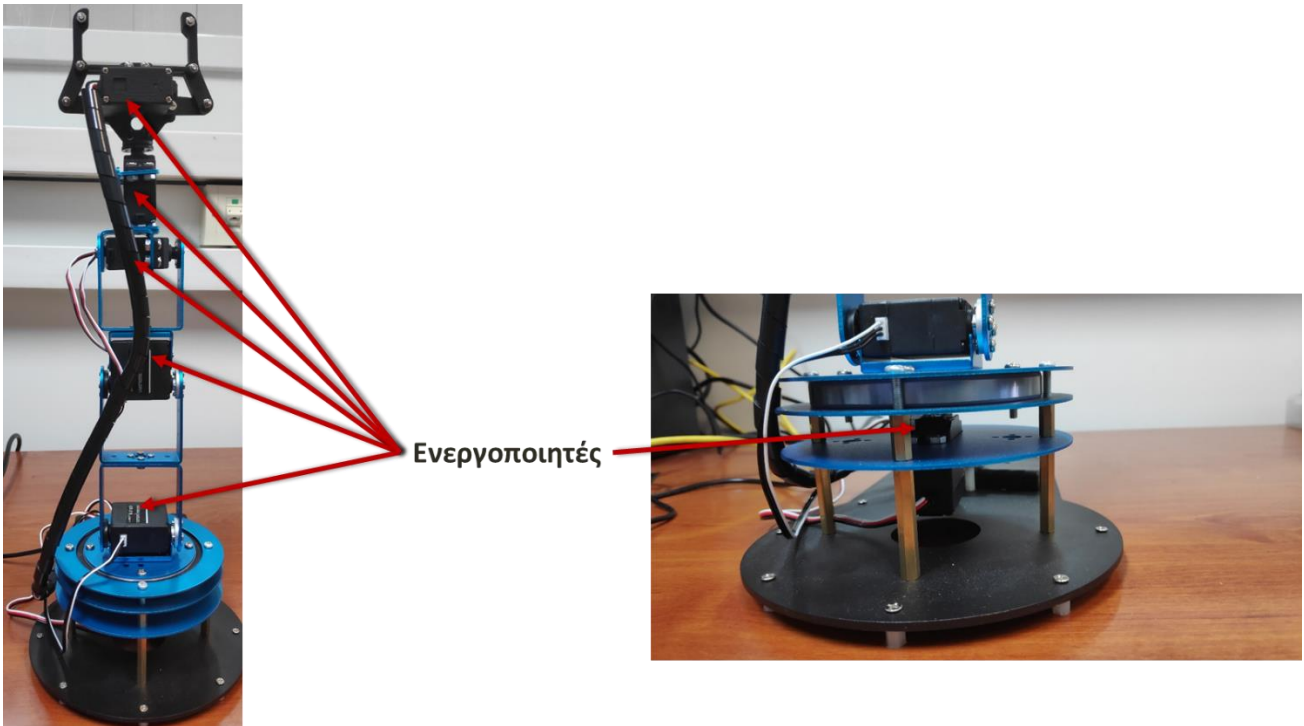


Εικόνα 1-25. Μοντέλα αρθρώσεων. (α) Περιστροφική άρθρωση. (β) Πρισματική άρθρωση.

1.6.3 Ενεργοποιητές

Οι ενεργοποιητές (actuators) είναι οι “μύες” ενός ρομποτικού βραχίονα. Λαμβάνουν εντολές από μία κεντρική μονάδα (π.χ. μικροελεγκτής) και ελέγχουν τις αρθρώσεις του βραχίονα και τη σχετική κίνηση των συνδέσμων. Συνήθεις τύποι ενεργοποιητών είναι σερβοκινητήρες, βηματικοί κινητήρες, πνευματικά συστήματα ή υδραυλικά συστήματα.

Στην Εικόνα 1-26, οι ενεργοποιητές είναι σερβοκινητήρες.



Εικόνα 1-26. Ρομποτικός βραχίονας όπου έχουν σημειωθεί οι ενεργοποιητές του.

1.6.4 Τελικός επενεργητής

Ο τελικός επενεργητής (end effector) είναι το εξάρτημα που συνδέεται στον τελευταίο σύνδεσμο και εκτελεί την απαιτούμενη εργασία του ρομπότ. Στην πιο απλή περίπτωση, ο τελικός επενεργητής είναι μία δαγκάνα (grripper) η οποία είναι σε θέση να ανοίγει ή να κλείνει (Εικόνα 1-27(α)). Από εκεί και πέρα, ανάλογα με τη λειτουργία του ρομπότ, ο τελικός επενεργητής μπορεί να είναι πιο σύνθετος, όπως για παράδειγμα ένα χειρουργικό εργαλείο (Εικόνα 1-27(β)).

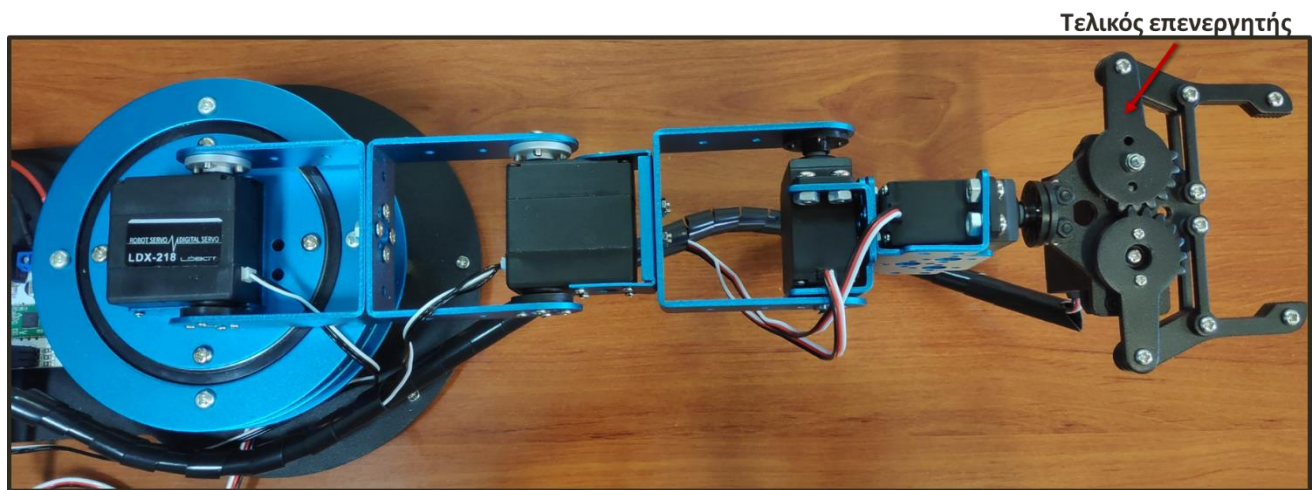


(α)

(β)

Εικόνα 1-27. Παράδειγμα τελικού επενεργητή. (α) Δαγκάνα. (β) Χειρουργικά εργαλεία συστήματος Da Vinci.

Στην Εικόνα 1-28, ο τελικός επενεργητής είναι μία δαγκάνα.



Εικόνα 1-28. Ρομποτικός βραχίονας όπου έχει σημειωθεί ο τελικός επενεργητής.

1.6.5 Αισθητήρες

Οι αισθητήρες είναι εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων τόσο για την εσωτερική κατάσταση του ρομπότ όσο για το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί. Οι αισθητήρες εσωτερικής κατάστασης του ρομπότ μπορεί να καταγράφουν για παράδειγμα, τη θέση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση των αρθρώσεων. Από την άλλη μεριά, μία συνδεδεμένη κάμερα αποτελεί παράδειγμα αισθητήρα που στέλνει πληροφορίες για το εξωτερικό περιβάλλον του ρομπότ.

1.6.6 Μονάδα ελέγχου

Η μονάδα ελέγχου είναι ένα προγραμματιζόμενο εξάρτημα (μικροελεγκτής) (Εικόνα 1-29) και έχει τρεις ρόλους:

1. Τη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων από τους αισθητήρες του ρομπότ.
2. Τον σχεδιασμό της κίνησης του ρομπότ.
3. Την επικοινωνία του ρομπότ με το περιβάλλον του.



Εικόνα 1-29. Ρομποτικός βραχίονας όπου έχει σημειωθεί η μονάδα ελέγχου.

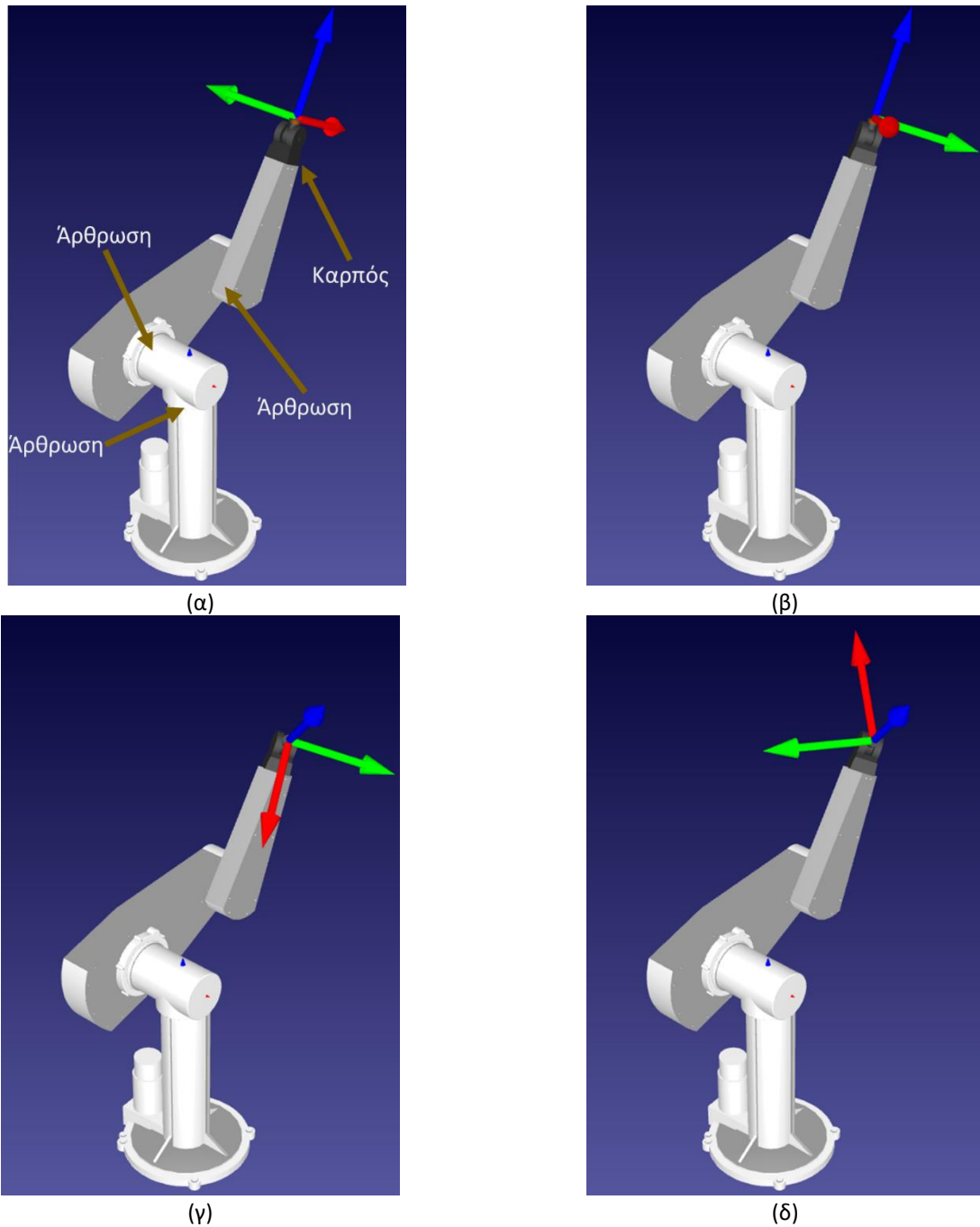
1.7 Βαθμοί Ελευθερίας

Οι βαθμοί ελευθερίας (Degrees of Freedom - DoF) ενός βραχίονα έχει να κάνει με το πλήθος των κινήσεων που μπορεί να επιτελέσουν οι αρθρώσεις του. Συνήθως το πλήθος των αρθρώσεων ισούται με τους βαθμούς ελευθερίας του βραχίονα. Δηλαδή αν ο βραχίονας έχει πέντε αρθρώσεις, τότε κάθε άρθρωση κάνει μία κίνηση και άρα υπάρχουν πέντε βαθμοί ελευθερίας.

Αξίζει να σημειωθεί πως ένας τυπικός βραχίονας έχει **6 αρθρώσεις (6 βαθμούς ελευθερίας)**. Οι τρεις πρώτες αρθρώσεις (ξεκινώντας από τη βάση του βραχίονα) συνδέουν τους συνδέσμους που απαρτίζουν το **κυρίως σώμα** του ρομπότ. Οι αρθρώσεις αυτές καθορίζουν τη γεωμετρία του βραχίονα και τη **θέση** του τελικού επενεργητή στον χώρο. Οι άλλες τρεις αρθρώσεις που ακολουθούν, συνδέουν το κυρίως σώμα με τον τελικό επενεργητή και απαρτίζουν αυτό που λέγεται στη γλώσσα της ρομποτικής τον **καρπό (wrist)** του ρομποτικού βραχίονα⁶. Οι αρθρώσεις αυτές είναι περιστροφικές και στην ουσία μπορούν να δώσουν οποιοδήποτε **προσανατολισμό** στον τελικό επενεργητή. Ένας καρπός με τρεις περιστροφικές αρθρώσεις ονομάζεται **σφαιρικός**.

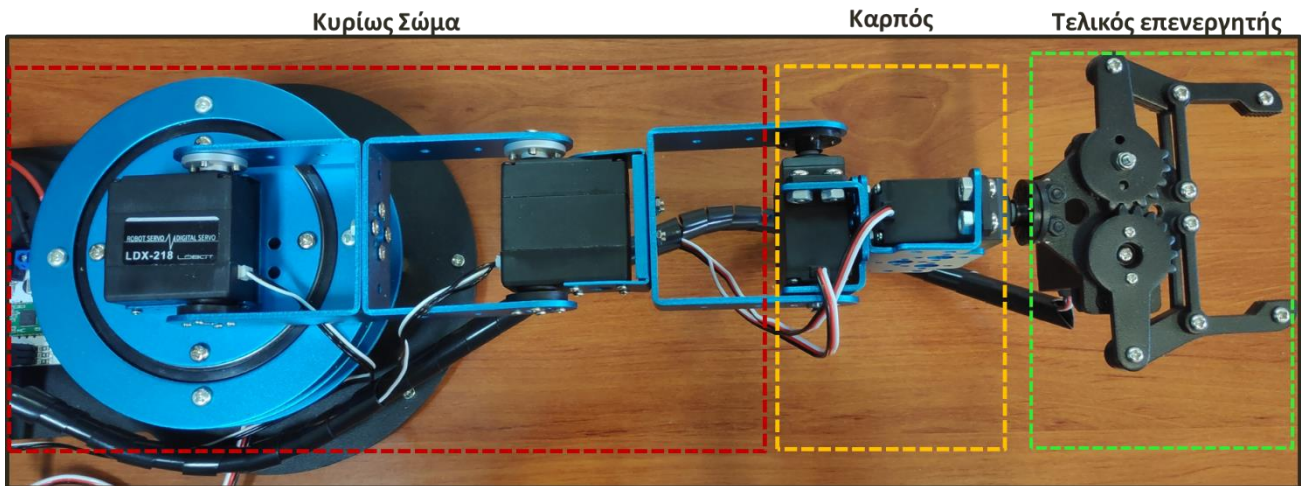
⁶ Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι υποχρεωτικό ο καρπός να έχει τρεις αρθρώσεις. Μπορεί κάλλιστα να έχει και λιγότερες (π.χ. μία περιστροφική άρθρωση).

Η Εικόνα 1-30 παρουσιάζει ένα ρομπότ 6 αρθρώσεων με σφαιρικό καρπό. Δείχνονται οι τρεις αρθρώσεις που καθορίζουν τη γεωμετρία του ρομπότ καθώς και παραδείγματα προσανατολισμού του τελικού επενεργητή.



Εικόνα 1-30. Παράδειγμα ρομπότ 6 αρθρώσεων. (α) Είναι σημειωμένες οι τρεις πρώτες αρθρώσεις που καθορίζουν τη γεωμετρία του ρομπότ καθώς και ο σφαιρικός καρπός που καθορίζει τον προσανατολισμό του τελικού επενεργητή. Επίσης είναι σημειωμένο ένα τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων που δείχνει τον προσανατολισμό του τελικού επενεργητή. (β), (γ), (δ) Παραδείγματα προσανατολισμού του τελικού επενεργητή λόγω περιστροφής των αρθρώσεων του καρπού.

Η Εικόνα 1-31 παρουσιάζει το κυρίως σώμα, τον καρπό και τον τελικό επενεργητή ενός βραχίονα. Το κυρίως σώμα έχει 3 αρθρώσεις και ο καρπός έχει δύο αρθρώσεις (βλ. επίσης Εικόνα 1-24). Συνεπώς, πρόκειται για έναν ρομποτικό βραχίονα 5 βαθμών ελευθερίας.



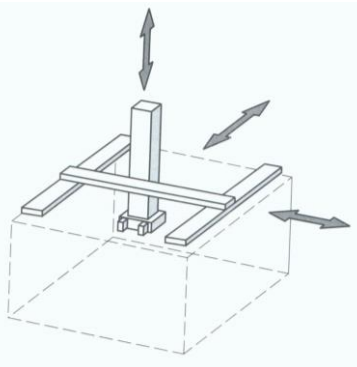
Εικόνα 1-31. Βαχίονας στον οποίο έχουν σημειωθεί το κυρίως σώμα, ο καρπός και ο τελικός επενεργητής.

1.8 Βασικοί τύποι ρομπότ

Στη συνέχεια, περιγράφονται οι πέντε βασικοί τύποι ρομποτικών βραχιόνων που χρησιμοποιούνται στην πράξη. Οι τύποι αυτοί αναφέρονται μόνο στο είδος των τριών πρώτων αρθρώσεων που απαρτίζουν το κυρίως σώμα του βραχίονα και στον τρόπο σύνδεσής τους.

1.8.1 Ρομπότ καρτεσιανού τύπου

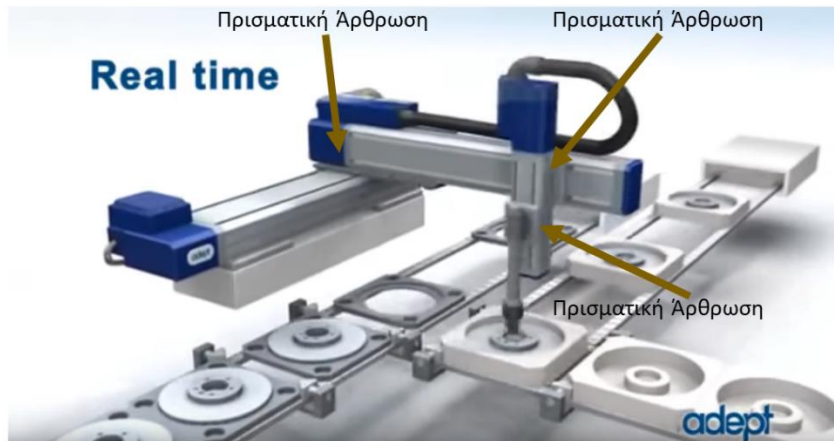
Ένα ρομπότ καρτεσιανού (cartesian) τύπου περιλαμβάνει τρεις πρισματικές αρθρώσεις. Οι άξονες κίνησης των αρθρώσεων είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους. Η Εικόνα 1-32 παρουσιάζει ένα παράδειγμα ενός ρομπότ τέτοιου τύπου. Τα σημεία του χώρου στα οποία μπορεί να πάει ο τελικός επενεργητής για όλες τις δυνατές θέσεις των τριών αρθρώσεων⁷ σχηματίζουν ένα παραλληλεπίπεδο.



Εικόνα 1-32. Μοντέλο ρομπότ καρτεσιανού τύπου (Πηγή: [26]).

⁷ Συνήθως, στη γλώσσα της ρομποτικής, τα σημεία του χώρου στα οποία μπορεί να πάει ο τελικός επενεργητής για όλες τις δυνατές θέσεις των αρθρώσεων ονομάζεται **χώρος εργασίας (workspace)**.

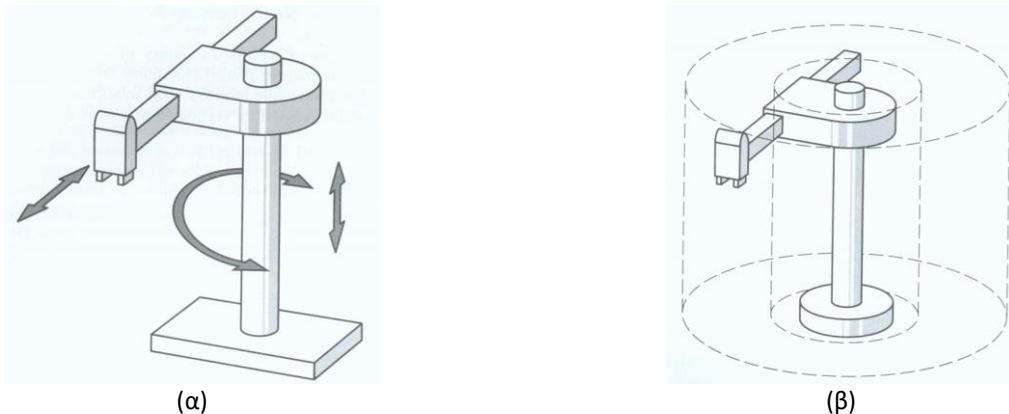
Η Εικόνα 1-33 παρουσιάζει παράδειγμα ενός ρομπότ καρτεσιανού τύπου, όπου έχουν σημειωθεί οι τρεις πρισματικές αρθρώσεις.



Εικόνα 1-33. Παράδειγμα ρομπότ καρτεσιανού τύπου.

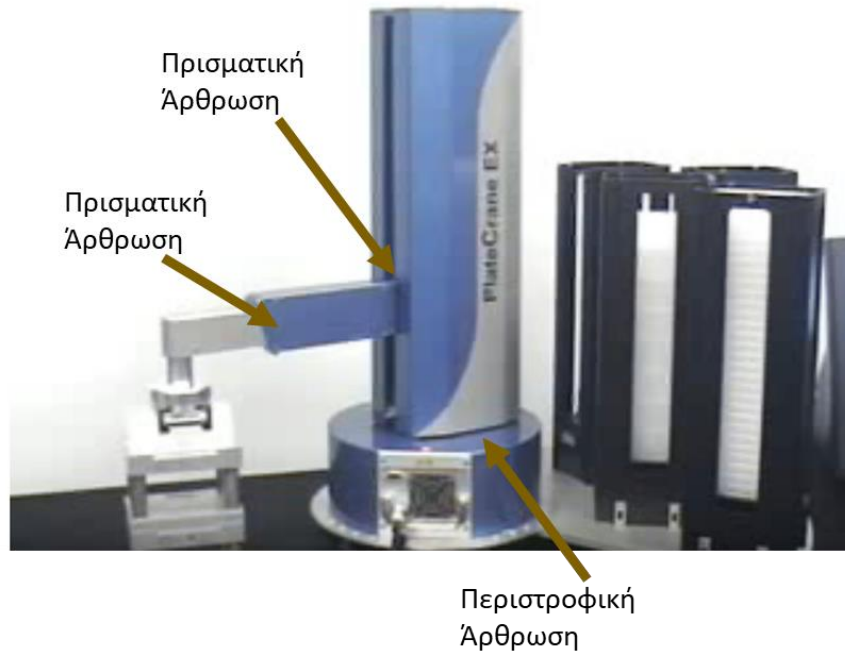
1.8.2 Ρομπότ κυλινδρικού τύπου

Ένα ρομπότ κυλινδρικού τύπου έχει μία περιστροφική άρθρωση (για τη βάση του ρομπότ) και ακολουθούν δύο πρισματικές αρθρώσεις (Εικόνα 1-34(α)). Ο άξονας της περιστροφικής άρθρωσης είναι παράλληλος με τον άξονα της πρώτης πρισματικής άρθρωσης. Οι άξονες των δύο πρισματικών αρθρώσεων είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους. Η ονομασία του προέρχεται από το γεγονός ότι ο χώρος στον οποίο μπορεί να κινηθεί ο τελικός επενεργητής σχηματίζει κύλινδρο (Εικόνα 1-34(β)).



Εικόνα 1-34. Ρομπότ κυλινδρικού τύπου. (α) Μοντέλο. (β) Ο χώρος εργασίας του ρομπότ σχηματίζει κύλινδρο (Πηγή: [26]).

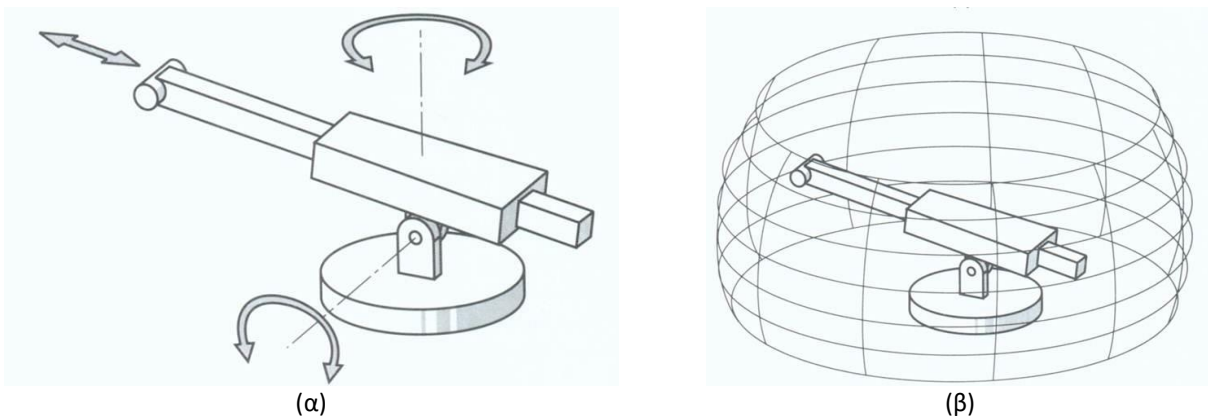
Η Εικόνα 1-35 παρουσιάζει παράδειγμα ενός ρομπότ κυλινδρικού τύπου, όπου έχουν σημειωθεί η μία περιστροφική άρθρωση και οι δύο πρισματικές αρθρώσεις.



Εικόνα 1-35. Παράδειγμα ρομπότ κυλινδρικού τύπου (Πηγή: [26]).

1.8.3 Ρομπότ σφαιρικού τύπου

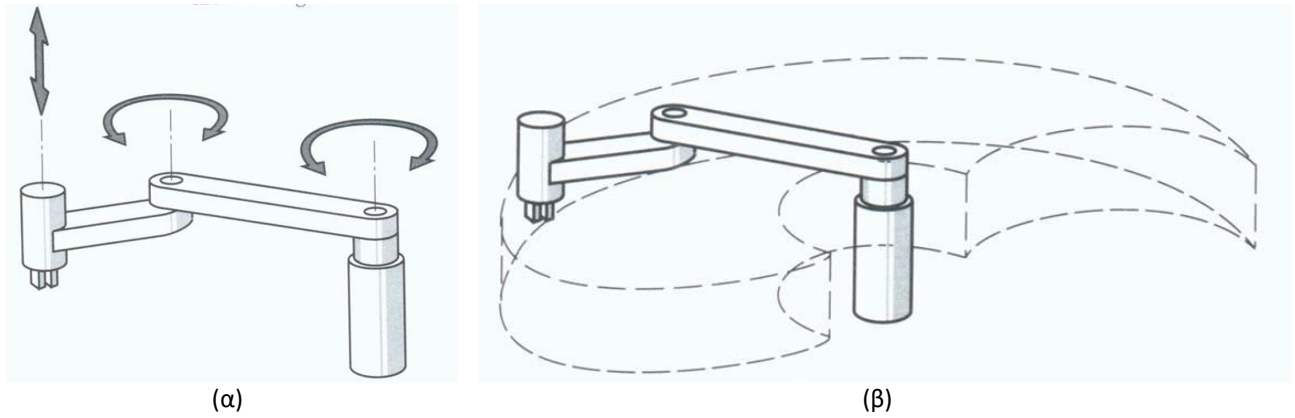
Ένα ρομπότ σφαιρικού τύπου έχει δύο περιστροφικές και μία πρισματική άρθρωση (Εικόνα 1-36(α)). Συγκεκριμένα, η πρώτη άρθρωση είναι περιστροφική και ακολουθεί η δεύτερη περιστροφική άρθρωση. Οι άξονές τους είναι ορθογώνιοι. Ακολουθεί η πρισματική άρθρωση με άξονα κάθετο στον άξονα της περιστροφικής. Η ονομασία οφείλεται στο ότι ο χώρος στον οποίο μπορεί να κινηθεί ο τελικός επενεργητής (χώρος εργασίας) σχηματίζει σφαίρα (Εικόνα 1-36(β)).



Εικόνα 1-36. Ρομπότ σφαιρικού τύπου. (α) Μοντέλο. (β) Ο χώρος εργασίας του ρομπότ σχηματίζει σφαίρα (Πηγή: [26]).

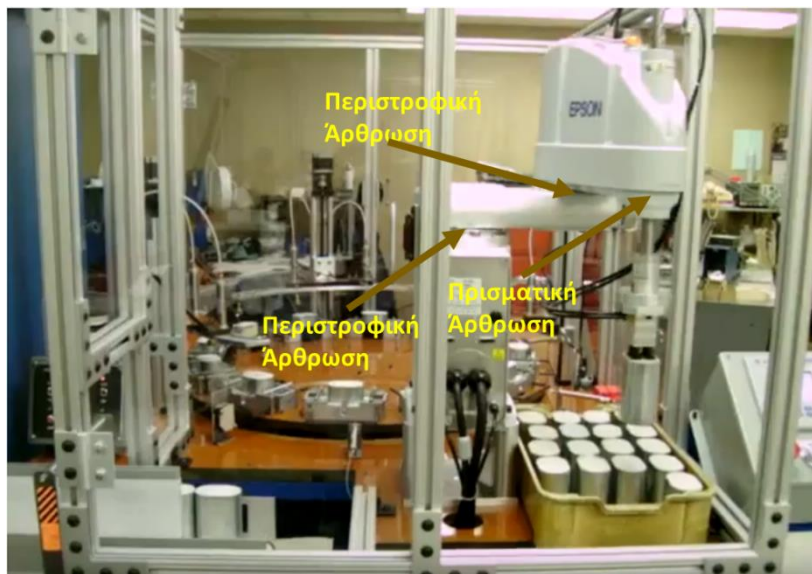
1.8.4 Ρομπότ τύπου SCARA

Ένα ρομπότ τύπου SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) περιλαμβάνει δύο περιστροφικές και μία πρισματική άρθρωση, αλλά σε διαφορετική διάταξη σε σχέση με το ρομπότ σφαιρικού τύπου, που περιλαμβάνει και αυτό τον ίδιο τύπο αρθρώσεων. Συγκεκριμένα, οι άξονες και των τριών αρθρώσεων είναι παράλληλοι μεταξύ τους, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1-37.



Εικόνα 1-37. Ρομπότ τύπου SCARA. (α) Μοντέλο. (β) Χώρος εργασίας (Πηγή: [26]).

Ένα παράδειγμα ρομπότ τύπου SCARA δίνεται στην Εικόνα 1-38.

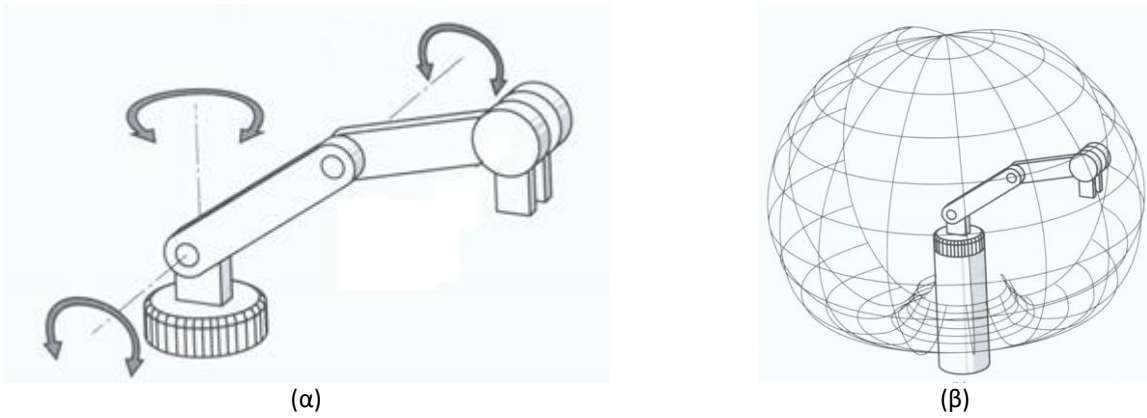


Εικόνα 1-38. Παράδειγμα ρομπότ τύπου SCARA (Πηγή: [26]).

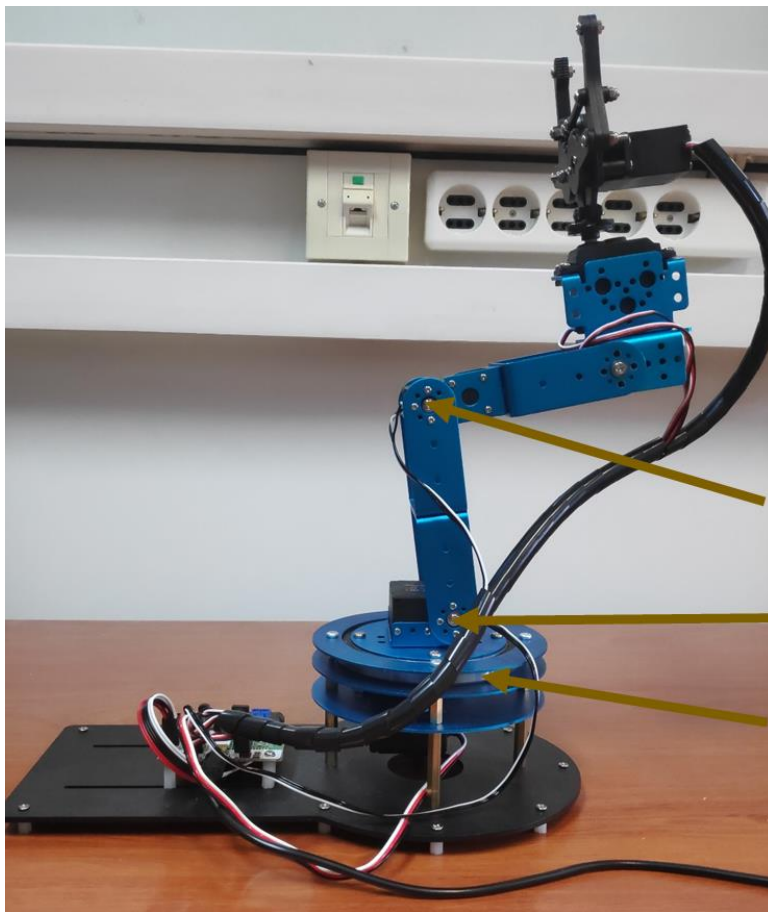
1.8.5 Ρομπότ ανθρωπομορφικού τύπου

Ένα ρομπότ ανθρωπομορφικού⁸ τύπου περιλαμβάνει τρεις περιστροφικές αρθρώσεις και μοιάζει με ανθρώπινο βραχίονα (ο λόγος για τον οποίο ονομάστηκε ως ανθρωπομορφικό). Οι τρεις αρθρώσεις αντιστοιχούν στην ανθρώπινη μέση, ώμο και αγκώνα. **Αποτελεί τον πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο τύπο ρομπότ.** Η Εικόνα 1-39(α) παρουσιάζει το μοντέλο ενός ανθρωπομορφικού ρομπότ, ενώ στην Εικόνα 1-39(β) απεικονίζεται ο χώρος εργασίας ενός τέτοιου ρομπότ. Τέλος, η Εικόνα 1-40 δίνει παράδειγμα ενός πραγματικού ανθρωπομορφικού ρομπότ.

⁸ Ο αγγλικός όρος που χρησιμοποιείται συνήθως είναι articulated robot.



Εικόνα 1-39. Ρομπότ ανθρωπομορφικού τύπου (α) Μοντέλο. (β) Χώρος εργασίας. (Πηγή: [26])



Περιστροφική
Άρθρωση
(Αγκώνας)

Περιστροφική
Άρθρωση (Ώμος)

Περιστροφική
Άρθρωση (Μέση)

Εικόνα 1-40. Παράδειγμα ρομπότ ανθρωπομορφικού τύπου.

Βιβλιογραφία

- [1] Waseda University, «WABOT -WAseda roBOT-,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato_2.html. [Πρόσβαση 15 Οκτώβριος 2018].
- [2] D. Feng, «Performing SCARA Robots,» 24 Απρίλιος 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.interactivearchitecture.org/performing-scara-robots.html>. [Πρόσβαση 15 Οκτώβριος 2018].
- [3] NASA, «PIA01122: Sojourner Rover Near "The Dice",» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01122>. [Πρόσβαση 15 Οκτώβριος 2018].
- [4] A. D. Alexander, «Impacts of telemation on modern society,» σε *On Theory and Practice of Robots and Manipulators. International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures No. 201)*, Berlin, Heidelberg, Springer, 1972, pp. 121-136.
- [5] J.-M. Blanco, «Así era Arthrobot, el abuelo de los robots cirujanos que se perdió en una mudanza,» 16 Ιούνιος 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.eldiario.es/hojaderouter/tecnologia/Arthrobot-Geof_Auchinleck-robot-cirujano-Brian_Day-James_McEwen-Canada_0_655134556.html. [Πρόσβαση 15 Οκτώβριος 2018].
- [6] Y. S. Kwoh, J. Hou, E. A. Jonckheere και S. Hayati, «A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery,» *IEEE Trans Biomed Eng*, τόμ. 35, pp. 153-160, 1988.
- [7] J. Marescaux, J. Leroy, M. Gagner, F. Rubino, D. Mutter, M. Vx, S. E. Butner και M. K. Smith, «Transatlantic robot-assisted telesurgery,» *Nature*, τόμ. 413, pp. 379-380, 2001.
- [8] M. Diana και J. Marescaux, «Robotic surgery,» *Br J Surg.*, τόμ. 102, αρ. 2, pp. 15-28, 2015.
- [9] J. J. Rassweiler, R. Autorino, J. Klein, A. Mottrie, A. S. Goetzen, J.-U. Stolzenburg, K. H. Rha, M. Schurr, J. Kaouk, V. Patel, P. Dasgupta and E. Liatsikos, «Future of robotic surgery in urology,» *BJU Int.*, vol. 120, no. 6, pp. 822-841, 2017.
- [10] S. Mattheis, P. Hasskamp, L. Holtmann, C. Schäfer, U. Geithoff, N. Dominas and S. Lang, «Flex Robotic System in transoral robotic surgery: The first 40 patients,» *Head Neck*, vol. 39, no. 3, pp. 471-475, 2017.
- [11] Renishaw, «Deep Brain Stimulation (DBS) procedure using neuromate robot,» 7 Δεκέμβριος 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=FJrpcULbHIQ>. [Πρόσβαση 21 Σεπτέμβριος 2018].
- [12] H. I. Krebs, B. T. Volpe, M. L. Aisen και N. Hogan, «Increasing productivity and quality of care: Robot-aided neuro-rehabilitation,» *J. Rehabil. Res. Dev.*, τόμ. 37, pp. 639-652, 2000.

- [13] H. I. Krebs, D. Williams, J. Celestino, S. K. Charles, D. Lynch και N. Hogan, «Robot-aided neurorehabilitation: a robot for wrist rehabilitation,» *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, τόμ. 15, pp. 327-335, 2007.
- [14] H. I. Krebs, J. J. Palazzolo, L. Dipietro, M. Ferraro, J. Krol, K. Ranekleiv, B. T. Volpe και N. Hogan, «Rehabilitation robotics: performance-based progressive robot-assisted therapy,» *Auton. Robots*, τόμ. 15, pp. 7-20, 2003.
- [15] L. M. Crespo, N. Rappo και R. Riener, «The effectiveness of robotic training depends on motor tasks,» *Exp Brain Res*, τόμ. 235, αρ. 12, pp. 3799-3816, 2017.
- [16] Y. Ren, S. Park και L. Q. Zhang, «Developing a whole-arm exoskeleton robot with hand opening and closing mechanism for upper limb stroke rehabilitation,» σε *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, 2009.
- [17] J. C. Perry, J. Rosen και S. Burns, «Upper-limb powered exoskeleton design,» *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, τόμ. 12, pp. 408-417, 2007.
- [18] P. Garrec, J. P. Friconeau, Y. Méasson και Y. Perrot, «ABLE, an innovative transparent exoskeleton for the upper-limb,» σε *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008.
- [19] D. G. Caldwell, N. G. Tsagarakis, S. Kousidou, N. Costa και I. Sarakoglou, «“Soft” exoskeletons for upper and lower body rehabilitation—design, control and testing,» *Int. J. Humanoid RobInt.*, τόμ. 4, pp. 549-573, 2007.
- [20] S. Balasubramanian, H. R. Wei, M. Perez, R. Shepard, E. Koeneman, J. Koeneman και J. He, «Rupert: an exoskeleton robot for assisting rehabilitation of arm functions,» σε *2008 Virtual Rehabilitation, IWVR*, 2008.
- [21] Hocoma, «Lokomat - Hocoma,» Hocoma, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.hocoma.com/solutions/lokomat/>. [Πρόσβαση 25 Σεπτέμβριος 2018].
- [22] A. Roy, H. I. Krebs, S. L. Patterson, T. N. Judkins, I. K. Larry, R. M. Macko και N. Hogan, «Measurement of human ankle stiffness using the anklebot,» σε *International Conference on Rehabilitation Robotics*, Noordwijk, 2007.
- [23] K. Bharadwaj, T. G. Sugar, J. B. Koeneman και E. J. Koeneman, « Design of a robotic gait trainer using spring over muscle actuators for ankle stroke rehabilitation,» *J. Biomech. Eng.* , τόμ. 127, pp. 1009-1013, 2005.
- [24] J. A. Saglia, N. G. Tsagarakis, J. S. Dai και D. G. Caldwell, «Control strategies for ankle rehabilitation using a high performance ankle exerciser,» σε *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010.

- [25] J. Yoon και J. Ryu, «A novel reconfigurable ankle/foot rehabilitation robo,» σε *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, 2005.
- [26] TEC 234 Robotic Systems Integration, «Robot Configurations,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://my.ilstu.edu/~kldevin/Introduction_to_robotics2/Introduction_to_robotics7.html. [Πρόσβαση 4 Οκτώβριος 2018].