

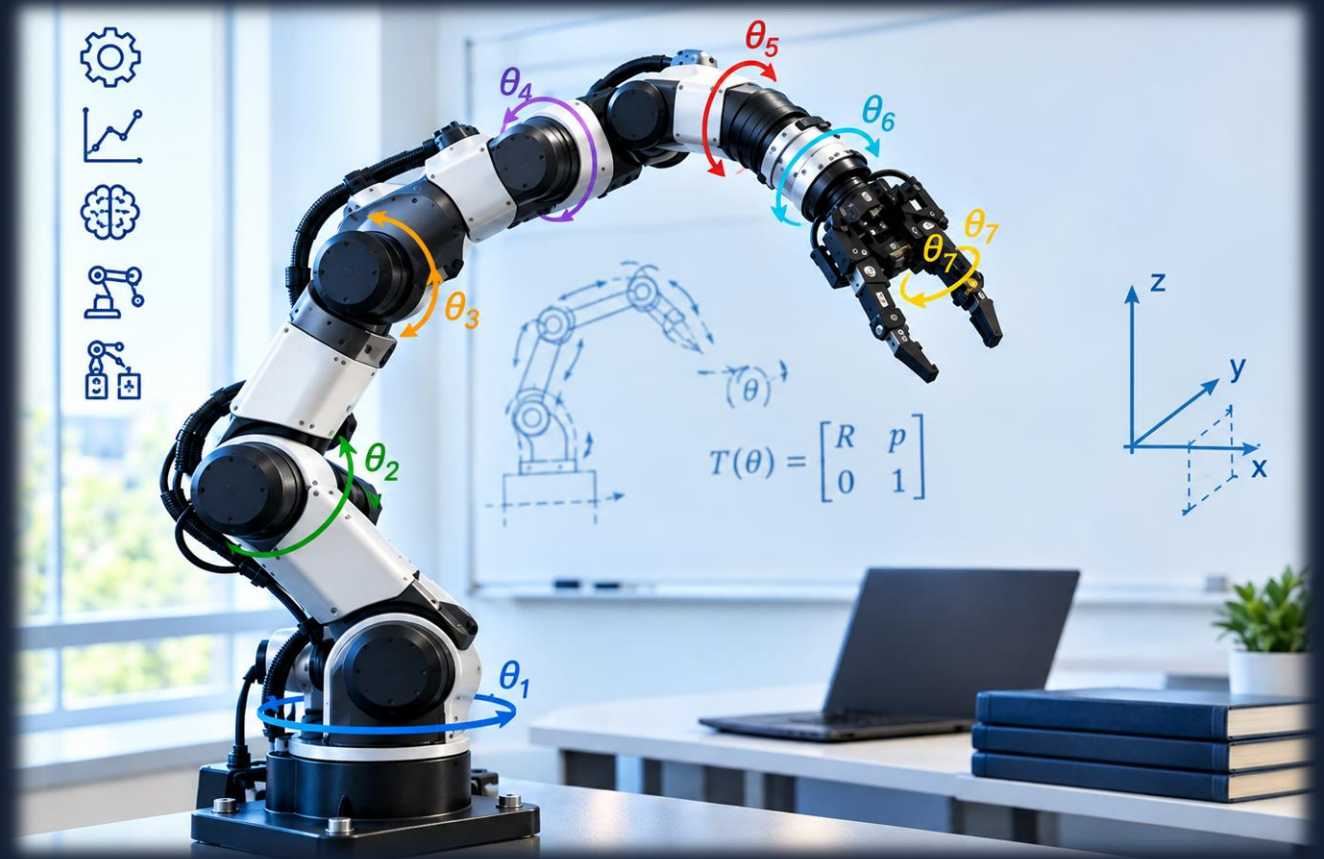
Ρομποτική

Διάλεξη 02

Ρομποτικές Αρθρώσεις
Βαθμοί Ελευθερίας
Ρομποτικοί Βραχίονες

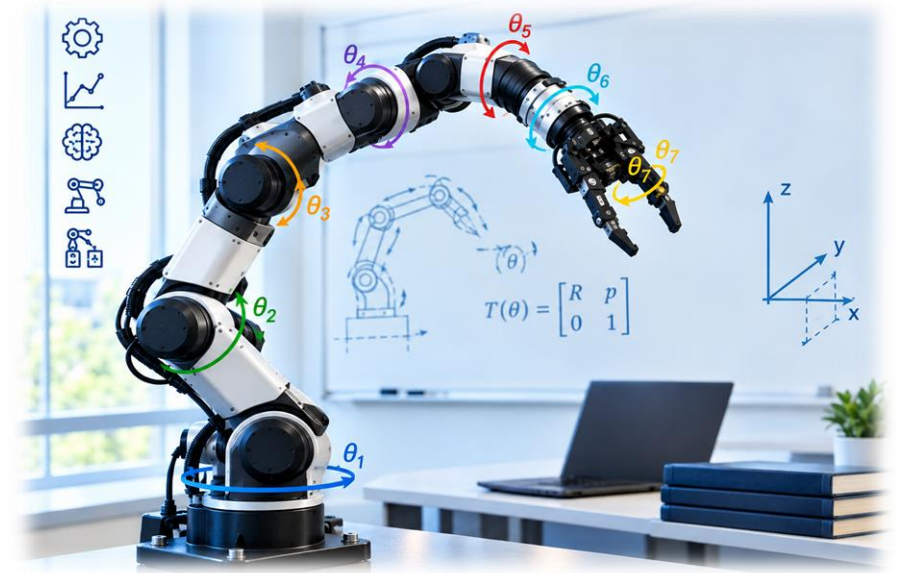
Καθ. Μιχαήλ Γ. Λαγουδάκης

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Πολυτεχνείο Κρήτης



Αρθρώσεις

και βαθμοί ελευθερίας και περιορισμοί



Κίνηση

- **Ρομποτική Κίνηση**

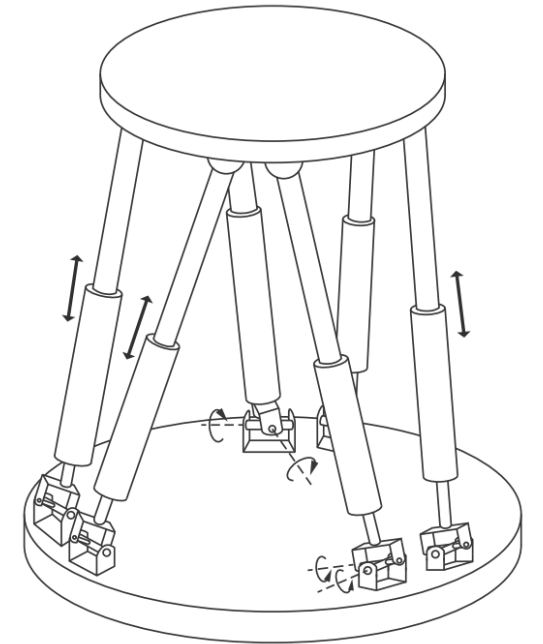
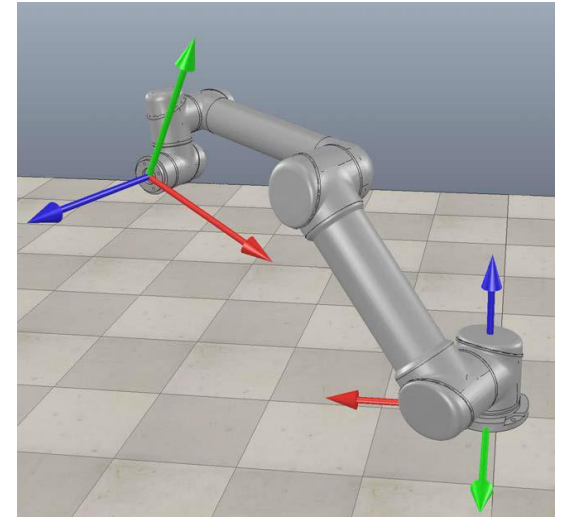
- ελεγχόμενη προγραμματιζόμενη κίνηση
- η καρδιά της ρομποτικής!

- **Μελετάμε**

- τη φύση της κίνησης
- τις διαθέσιμες κινήσεις στερεών σωμάτων
- τους κινηματικούς περιορισμούς για οργάνωση κινήσεων
- τους μηχανισμούς προγραμματιζόμενης πρόκλησης κίνησης
- τον στατικό και δυναμικό χαρακτήρα των μηχανισμών κίνησης
- τις δυσκολίες και προσεγγίσεις για έλεγχο και προγραμματισμό κινήσεων

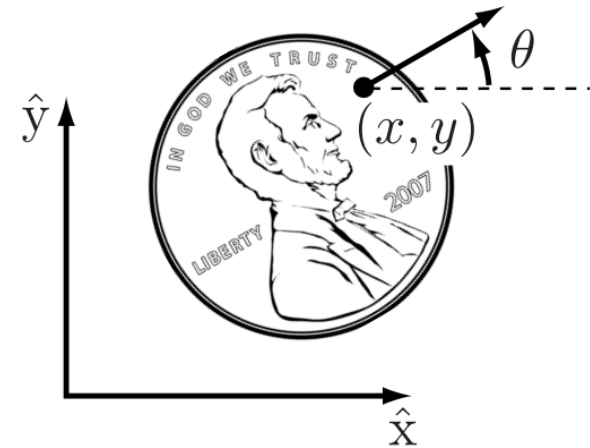
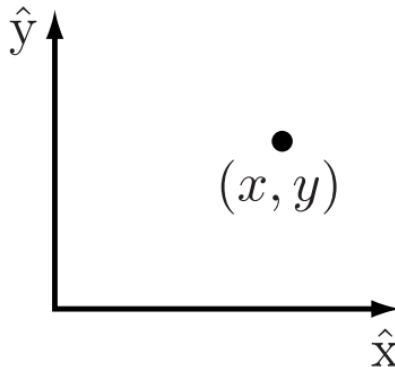
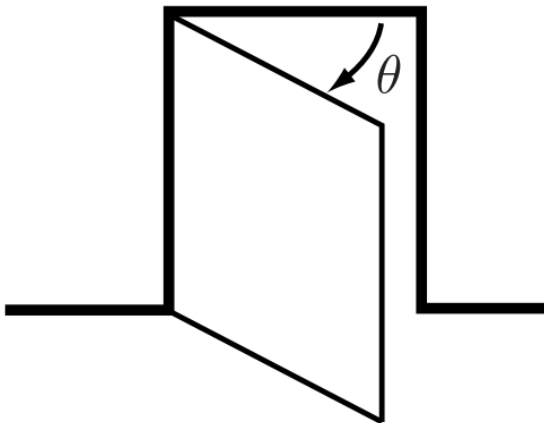
Ρομποτικοί Μηχανισμοί

- **Σύνθεση στερεών σωμάτων**
 - σύνδεσμοι (links), κάποιοι εξ αυτών: ακροδέκτες (end-effectors)
 - αρθρώσεις (joints)
- **Διάταξη συνδέσμων**
 - ανοικτή αλυσίδα (open chain)
 - κλειστή αλυσίδα (closed chain)
- **Επενέργηση αρθρώσεων**
 - ηλεκτρικοί, υδραυλικοί, πνευματικοί, ..., κινητήρες
 - ασκούν δυνάμεις ή προκαλούν ροπές ...
 - ... και αυτές με τη σειρά τους κίνηση των συνδέσμων
 - μετάδοση κίνησης: γρανάζια, ιμάντες, τροχαλίες, αλυσίδες, ...



Στάση

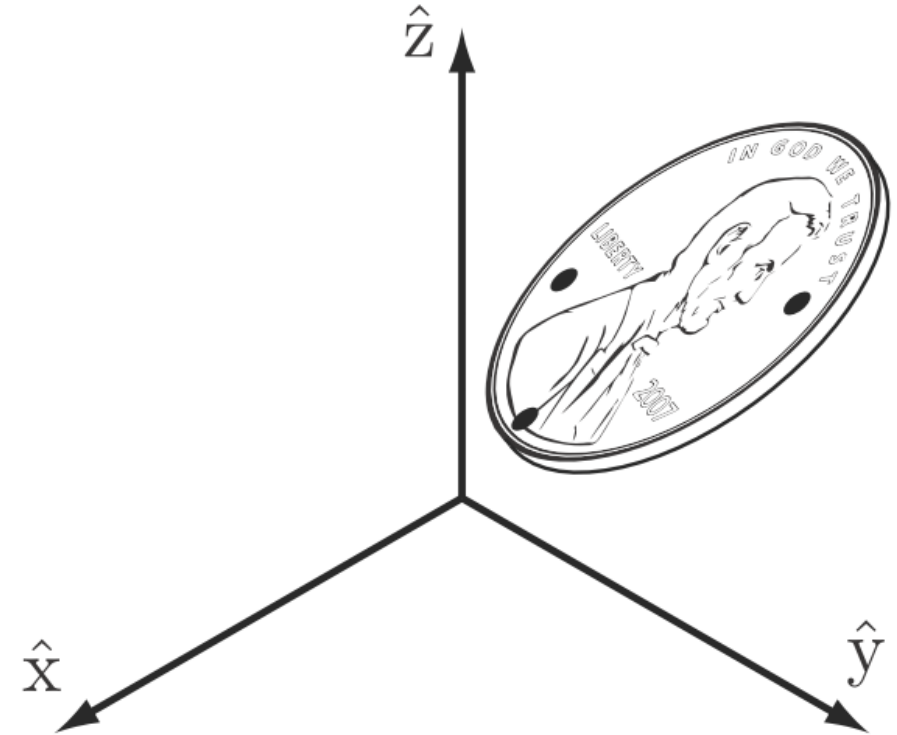
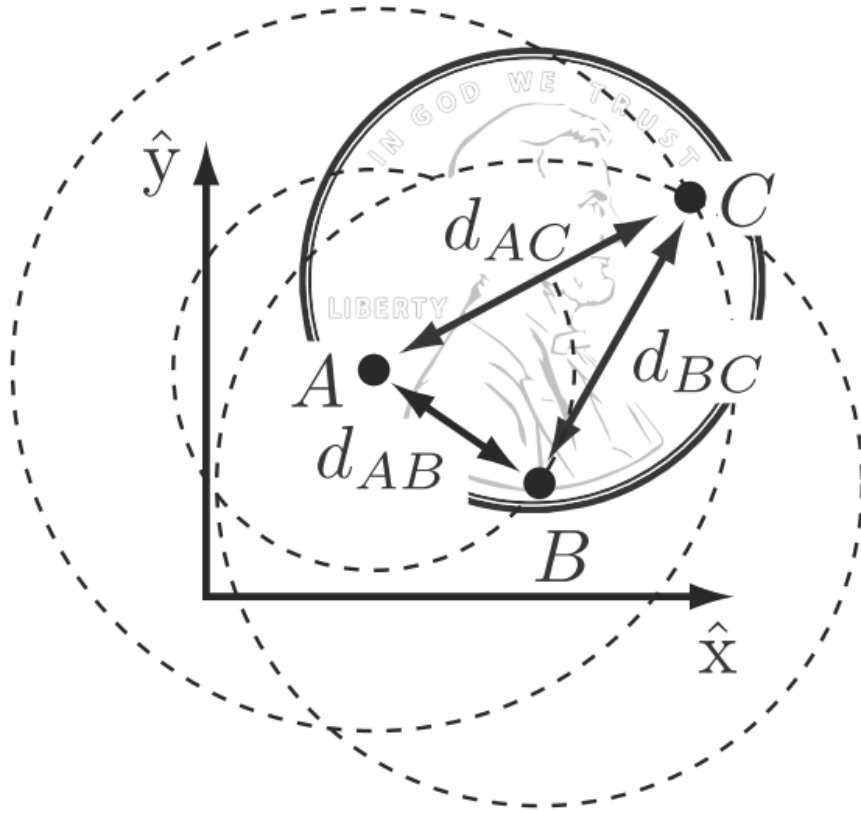
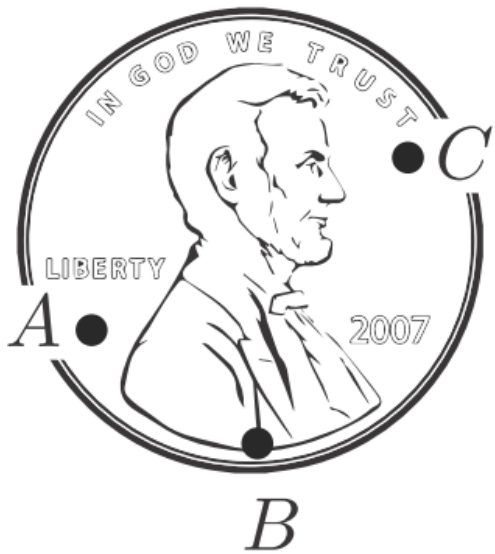
- **Θεμελιώδες ερώτημα**
 - πού βρίσκεται το ρομπότ (μέσα στον φυσικό χώρο);
- **Στάση (pose, configuration, ...)**
 - καθορισμός των θέσεων όλων των σημείων του ρομπότ
 - υπόθεση: οι σύνδεσμοι είναι άκαμπτα, στερεά σώματα!
 - αρκούν λίγοι αριθμοί για αναπαράσταση στάσης



Βαθμοί Ελευθερίας και Χώρος Στάσεων

- **Βαθμοί ελευθερίας (degrees of freedom, dof)**
 - το μικρότερο πλήθος συντεταγμένων που απαιτούνται για αναπαράσταση στάσης
 - συνήθως, συντεταγμένες στο συνεχές εύρος πραγματικών τιμών
- **Ρομποτική στάση**
 - πλήρης καθορισμός της θέσης κάθε σημείου ενός ρομπότ
- **Ρομποτικοί βαθμοί ελευθερίας**
 - το ελάχιστο πλήθος n πραγματικών συντεταγμένων για αναπαράσταση στάσης
- **Ρομποτικός χώρος στάσεων, C-χώρος (Configuration space, C-space)**
 - ο n -διάστατος χώρος που περιλαμβάνει όλες τις δυνατές στάσεις του ρομπότ

Βαθμοί Ελευθερίας Στερεού Σώματος



$$d(A, B) = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2} = d_{AB}$$

$$d(B, C) = \sqrt{(x_B - x_C)^2 + (y_B - y_C)^2} = d_{BC}$$

$$d(A, C) = \sqrt{(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2} = d_{AC}$$

degrees of freedom = (sum of freedoms of the points) –
(number of independent constraints)

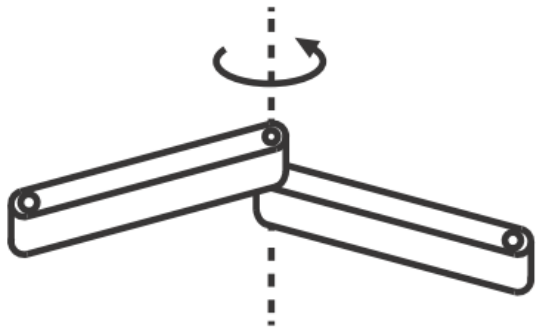
degrees of freedom = (number of variables) –
(number of independent equations)

Βαθμοί Ελευθερίας Στερεών Σωμάτων

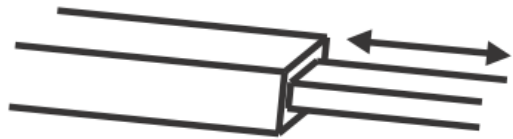
- **Χωρικό στερεό σώμα (spatial rigid body)**
 - στερεό σώμα στον φυσικό τριδιάστατο χώρο
 - έξι (6) βαθμοί ελευθερίας
- **Επίπεδο στερεό σώμα (planar rigid body)**
 - στερεό σώμα στο διδιάστατο επίπεδο
 - τρεις (3) βαθμοί ελευθερίας
 - μπορεί να θεωρηθεί και ως χωρικό στερεό σώμα με 6 dof, ...
 - αλλά με 3 ανεξάρτητους περιορισμούς: η διάσταση z θα πρέπει να έχει τιμή μηδέν

$$\text{degrees of freedom} = (\text{sum of freedoms of the bodies}) - (\text{number of independent constraints})$$

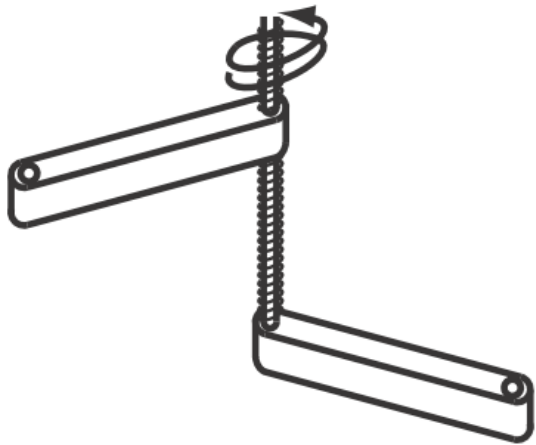
Ρομποτικές Αρθρώσεις



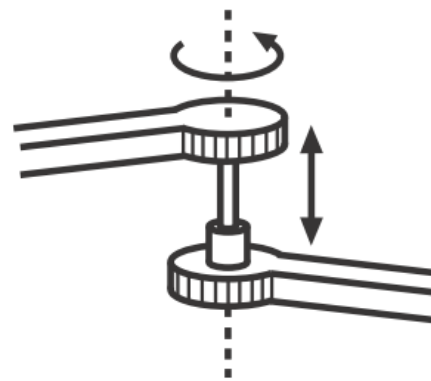
Revolute
(R)



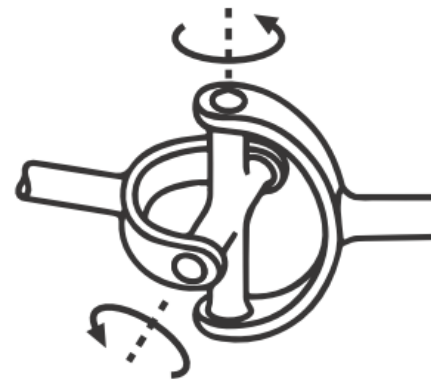
Prismatic
(P)



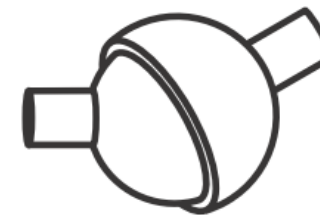
Helical
(H)



Cylindrical
(C)



Universal
(U)



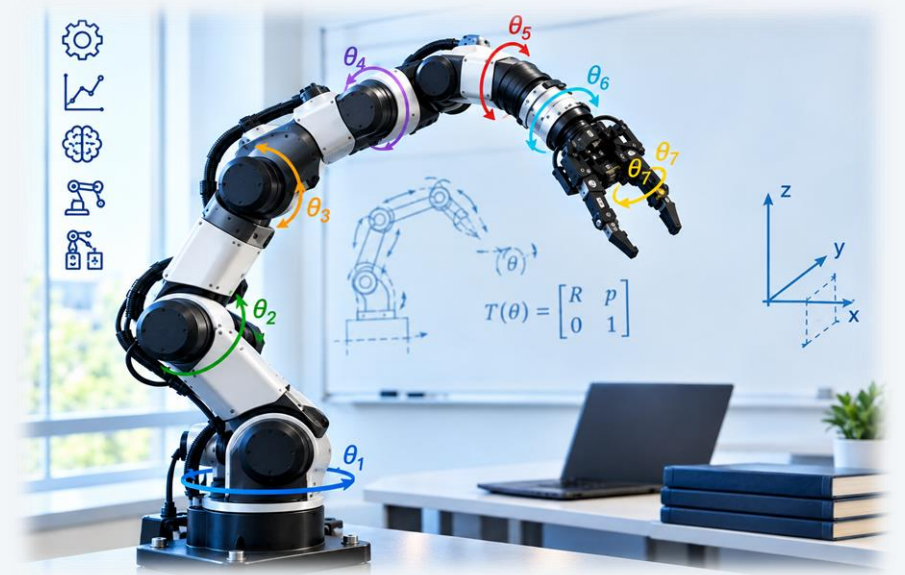
Spherical
(S)

Περιορισμοί Αρθρώσεων

Joint type	dof f	Constraints c between two planar rigid bodies	Constraints c between two spatial rigid bodies
Revolute (R)	1	2	5
Prismatic (P)	1	2	5
Helical (H)	1	N/A	5
Cylindrical (C)	2	N/A	4
Universal (U)	2	N/A	4
Spherical (S)	3	N/A	3

Ρομποτικοί Βραχίονες

Μια πρώτη ταξινόμηση



Τύποι Ρομποτικών Βραχιόνων – Ταξινόμηση

- **Κυριότερα κριτήρια**
 - με βάση την αρχή λειτουργίας
 - με βάση τη μέθοδο ελέγχου της κίνησης
 - με βάση τον γεωμετρικό σχηματισμό
 - με βάση τη κατηγορία εφαρμογής
 - με βάση τον τύπο παραγωγής και τη μετάδοση της κίνησης
 - ...

Ταξινόμηση σύμφωνα με την Αρχή Λειτουργίας

- **Ρομπότ Σταθερής Στάσης**

- το ρομπότ κατά τη μετακίνησή του έχει έλεγχο μόνο των σημείων στάσης
- δεν έχει έλεγχο των ενδιάμεσων σημείων της τροχιάς μεταξύ στάσεων
- κάθε άξονας έχει ένα προκαθορισμένο σταθερό μηχανικό όριο στο κάθε άκρο του
- το όριο μπορεί να είναι καθοριζόμενο κάθε φορά από τον ελεγκτή
- το ρομπότ μπορεί να σταματάει μόνο στα όρια αυτά
- ρομπότ εξειδικευμένων εφαρμογών
- όχι πολύ διαδεδομένα

Ταξινόμηση σύμφωνα με την Αρχή Λειτουργίας

- **Σερβοελεγχόμενα Ρομπότ**
 - κινείται από σερβομηχανισμούς (κινητήρες)
 - σήμα κίνησης: συνάρτηση διαφοράς μεταξύ διατεταγμένης και μετρούμενης:
 - θέσης (γωνία, μετατόπιση, ...)
 - ταχύτητας
 - επιτάχυνσης (σπανιότερα)
 - κινείται μέσα από έναν πρακτικά άπειρο πλήθος στάσεων
 - σύνολο στάσεων: συνδυασμός όλων των θέσεων των αρθρώσεων

Ταξινόμηση σύμφωνα με τη Μέθοδο Ελέγχου Κίνησης

- **Ρομπότ Σημείου-προς-Σημείο (Point-to-Point Robot)**
 - προγραμματίζεται από το χρήστη, ώστε να κινηθεί από μία στάση στην επόμενη
 - οι ενδιάμεσες τροχιές μεταξύ των στάσεων δεν προσδιορίζονται
 - σε μία τέτοια ακολουθία:
 - το ρομπότ κινείται σε μία προσδιορισμένη στάση,
 - σταματάει και εκτελεί μία λειτουργία,
 - κατόπιν κινείται σε μία άλλη προσδιορισμένη στάση,
 - σταματάει και εκτελεί μία άλλη λειτουργία, κ.ο.κ.
 - η τροχιά του ρομπότ (και η ταχύτητα):
 - κατά τη διαδρομή/μετακίνηση από τη μία στάση στην επόμενη
 - εν γένει δεν έχει σημασία, και συνήθως δεν προγραμματίζεται,
 - αποτελεί εσωτερική λειτουργία του ελεγκτή

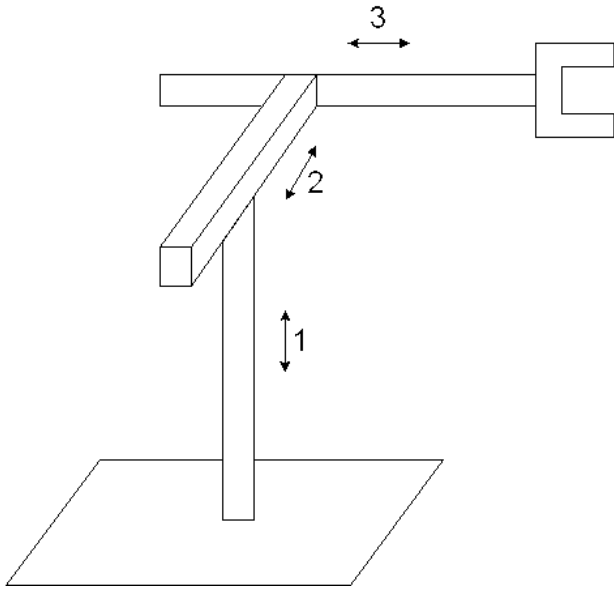
Ταξινόμηση σύμφωνα με τη Μέθοδο Ελέγχου Κίνησης

- **Ρομπότ Συνεχούς Τροχιάς (Continuous Path Robots)**
 - επαναλαμβάνει την κίνηση μέσα από διδαγμένες στάσεις σε μικρή απόσταση μεταξύ τους
 - οι στάσεις έχουν προγραμματισθεί σε μία σταθερή χρονική βάση κατά τη διδασκαλία
 - οι στάσεις διδασκαλίας καταγράφονται από τη μονάδα ελέγχου
 - καθώς το ρομπότ οδηγείται μέσα από μία επιθυμητή τροχιά
 - διαβάζοντας τη θέση του κάθε άξονα σε σταθερή χρονική βάση
 - ένας αλγόριθμος επανάληψης επιχειρεί να επαναλάβει την κίνηση αυτή
 - έλεγχος συνεχούς τροχιάς με την παρεμβολή μίας επιθυμητής καμπύλης τροχιάς
 - τέτοια ρομπότ μπορούν να εκτελέσουν ευρύ και χρήσιμο έργο
 - όλοι οι άξονές τους βρίσκονται σε ταυτόχρονη, συντονισμένη κίνηση
 - ενδεχομένως με διαφορετική ταχύτητα ο καθένας
 - προκειμένου ο ακροδέκτης να διαγράψει την επιθυμητή τροχιά
 - οι λειτουργίες συνεχούς τροχιάς εκτελούνται μόνο από σερβοελεγχόμενα ρομπότ

Ταξινόμηση σύμφωνα με τον Γεωμετρικό Σχηματισμό

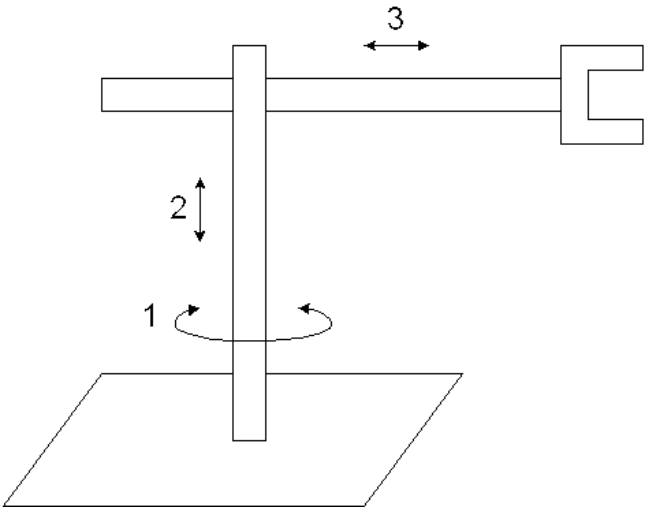
Ορθογωνικά Ρομπότ (Rectangular Robots)

- ορθογωνίων, καρτεσιανών ή ορθογραμμικών συντεταγμένων
- κινούνται σε ευθείες γραμμές
- οι βαθμοί ελευθερίας ορίζονται από το καρτεσιανό σύστημα αξόνων
- συνήθως δεν υπάρχει έλεγχος για συντονισμένη κίνηση αρθρώσεων
- ορθογώνιος παραλληλεπίπεδος χώρος εργασίας



- + υψηλή διακριτική ικανότητα, μεγάλη ακρίβεια
- + εύκολη αποφυγή εμποδίων
- μεγάλο δομικό πλαίσιο
- περιορισμένος χώρος εργασίας, δυσκολία συνεργασίας

Ταξινόμηση σύμφωνα με τον Γεωμετρικό Σχηματισμό



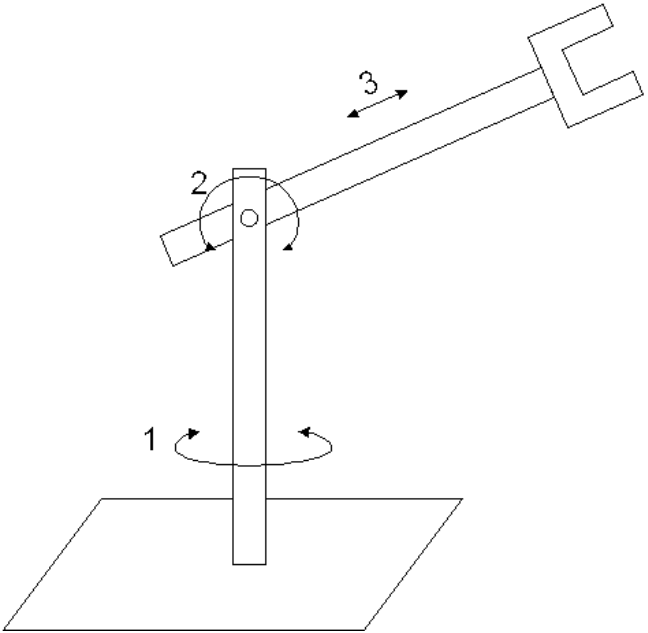
Κυλινδρικά Ρομπότ (Cylindrical Robots)

- ρομπότ κυλινδρικών συντεταγμένων ή ρομπότ στήλης
- στήλη που κινείται σε ένα κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων
- κάθε σημείο προσδιορίζεται συναρτήσσει:
 - της γωνίας της βάσης
 - της ακτινικής διάστασης
 - και του ύψους από το επίπεδο αναφοράς
- κυλινδρικός χώρος εργασίας



- + μικρή εξάρτηση από τα φορτία βαρύτητας
- + απλός μηχανικός σχεδιασμός
- + - περιορισμένη συμβατότητα συνεργασίας
- μικρότερη ακρίβεια και διακριτική ικανότητα από τα ορθογωνικά

Ταξινόμηση σύμφωνα με τον Γεωμετρικό Σχηματισμό



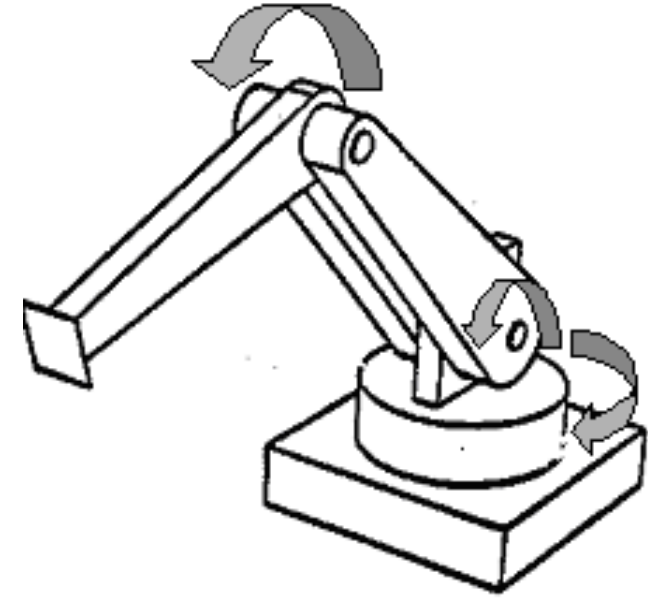
Σφαιρικά Ρομπότ (Spherical Robots)

- ρομπότ σφαιρικών συντεταγμένων, ικανά
 - να κινούνται περιστροφικά
 - να προσδίδουν κλίση στο βραχίονά τους
 - να επεκτείνουν τον βραχίονά τους
- κυλινδρικά ρομπότ με δυνατότητα περιστροφής του άκρου
- σφαιρικός χώρος εργασίας



- + μικρή πολυπλοκότητα της δομής και μικρό βάρος
- + δυνατότητα συνεργασίας με άλλα ρομπότ και εργαλαιομηχανές
- + καλή διακριτική ικανότητα τοποθέτησης
- περιορισμένη δυνατότητα αποφυγής συγκρούσεων
- μεγάλο σφάλμα τοποθέτησης λόγω των περιστροφικών κινήσεων

Ταξινόμηση σύμφωνα με τον Γεωμετρικό Σχηματισμό



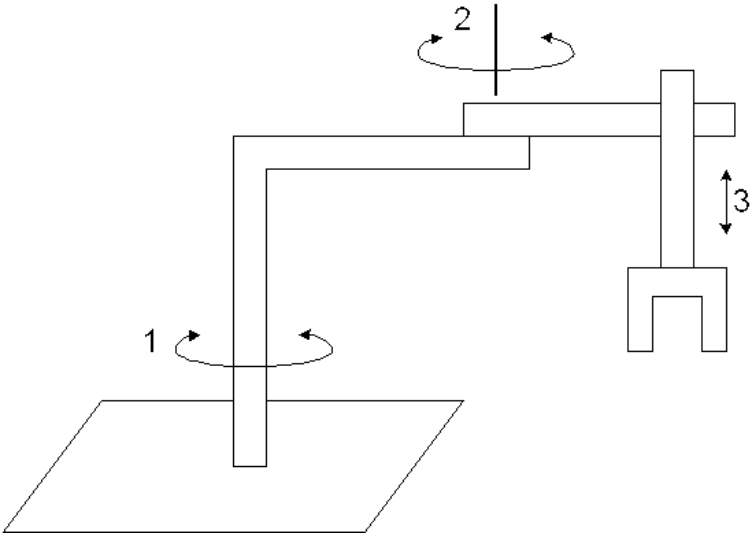
Αρθρωτά Ρομπότ (Articulated Robots)

- διαθέτουν μόνο περιστροφικές αρθρώσεις
- π.χ. ρομπότ PUMA (**P**rogrammable **U**niversal **M**achine for **A**ssembly)
- ανθρωπομορφικά: κινήσεις όμοιες με τις κινήσεις του ανθρώπου



- + ευελιξία προσέγγισης πάνω ή κάτω από ένα αντικείμενο
- + συμβατότητα συνεργασίας με άλλα ρομπότ σε κοινό χώρο
- χαμηλή διακριτική ικανότητα και ακρίβεια (σφάλμα τοποθέτησης)
- περιορισμένη αποφυγή εμποδίων, μεγάλες ροπές αδρανείας
- επιδράσεις φορτίων βαρύτητας που προκαλούν δονήσεις
- πρόβλημα εξισορρόπησης λόγω μεγάλων και μεταβλητών ροπών

Ταξινόμηση σύμφωνα με τον Γεωμετρικό Σχηματισμό



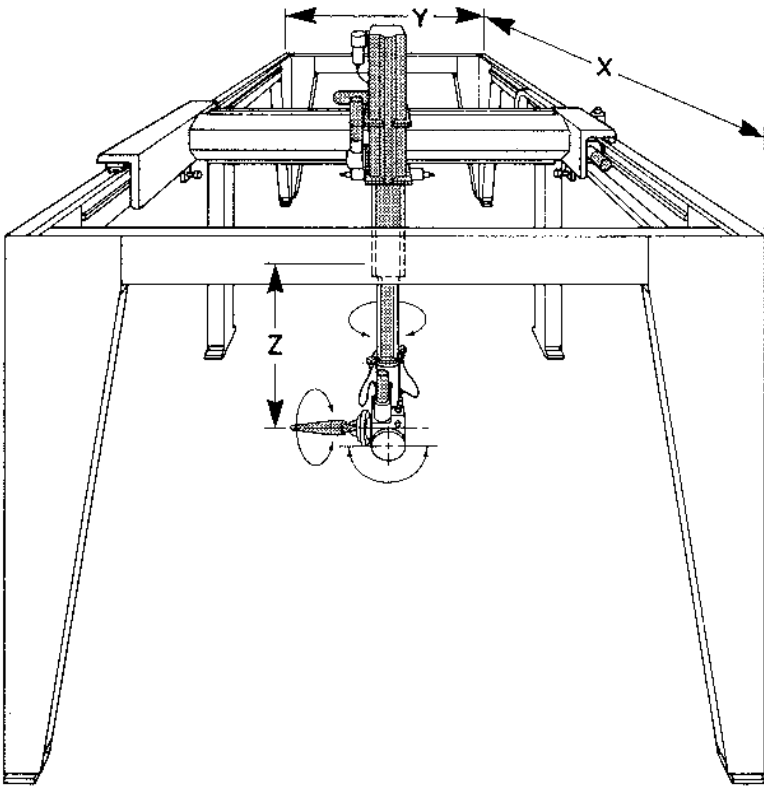
Robot SCARA (Selective Compliance ARm for Assembly)

- ρομποτικός σχηματισμός οριζόντιας περιστροφής
- σαρώνει μία (επίπεδη) περιοχή εξαρτημάτων
- για εργασίες ανάκτησης και τοποθέτησης μικρών αντικειμένων
- συνηθέστερη διαμόρφωση:
 - δύο ή τρεις οριζόντιες περιστροφικές αρθρώσεις (ώμος, αγκώνας και ορισμένες φορές καρπός)
 - μία κάθετη πρισματική άρθρωση



- + υψηλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα
- + μικρό δομικό πλαίσιο (όσο και το επίπεδο εργασίας)
- περιορισμένες δυνατότητες προσανατολισμού
- περιορισμένη έκταση πρόσβασης

Ταξινόμηση σύμφωνα με τον Γεωμετρικό Σχηματισμό



Ρομπότ Τύπου Gantry

- ορθογωνικά ρομπότ με τρεις (έως έξι) βαθμούς ελευθερίας
- τοποθετούνται στην οροφή του τόπου εργασίας
- ένα ρομπότ Gantry μπορεί να κινηθεί:
 - διανύοντας σχετικά μεγάλες αποστάσεις
(σε σχέση με ρομπότ εδάφους υψηλών ταχυτήτων)
 - παρέχει πολύ υψηλό βαθμό ακρίβειας τοποθέτησης
- χαρακτηριστικά του ρομπότ Gantry:
 - μεγάλοι χώρους εργασίας
 - ικανότητα ανύψωσης μεγάλων φορτίων
 - κινητή τοποθέτηση (οροφή, έδαφος, ράγες, τροχοί, ...)
 - ευελιξία λειτουργίας ισοδύναμη με πολλά ρομπότ δαπέδου



Ευχαριστίες

- Ελευθέριος Δοϊτσίδης (Αν. Καθ. Σχολής ΜΠΔ Πολυτεχνείου Κρήτης)
- Σάββας Πιπερίδης (ΕΔΙΠ Σχολής ΜΠΔ Πολυτεχνείου Κρήτης)
- Νικόλαος Τσουρβελούδης (Καθ. Σχολής ΜΠΔ Πολυτεχνείου Κρήτης)
- Νικόλαος Βλάσσης (πρ. Καθ. Σχολής ΜΠΔ Πολυτεχνείου Κρήτης)
- Κωνσταντίνος Κυριακόπουλος (Ομ. Καθ. Σχολής ΜΜ, ΕΜΠ)
- Αντώνιος Τζες (πρ. Καθ. Τμήματος ΗΜΤΥ Πανεπιστημίου Πατρών)
- Γεώργιος Φουσκιτάκης (Αν. Καθ. Τμήματος ΗΜ, ΕΛΜΕΠΑ)