



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ & ΜΗΧ/ΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ

## Μάθημα: "Ρομποτική II: Ευφυή Ρομποτικά Συστήματα"

(8<sup>ο</sup> εξάμηνο, Ακαδ. Έτος: 2024-25)

Διδάσκων: Κων/νος Τζαφέστας

### Εξαμηνιαία Εργασία 1:

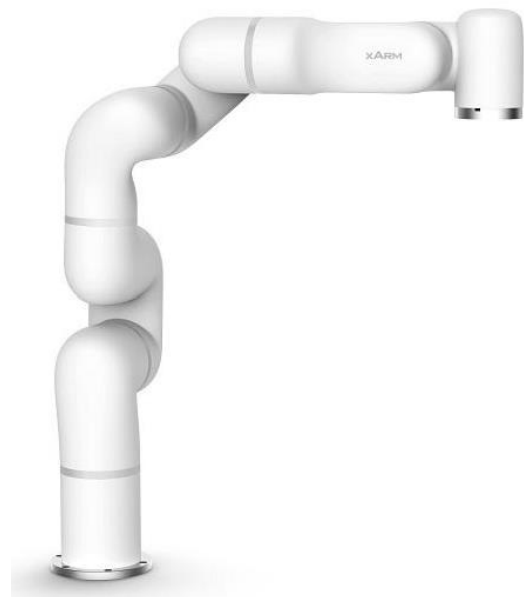
**Κινηματικός έλεγχος ρομποτικού χειριστή με πλεονάζοντες βαθμούς ελευθερίας: Παρακολούθηση τροχιάς και αποφυγή εμποδίου**

(Redundant manipulators: Path Following and Obstacle Avoidance)

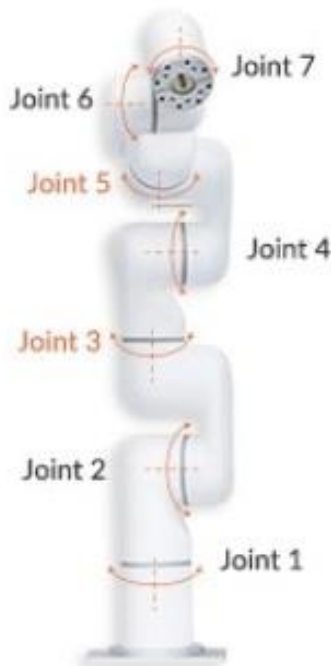
### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤ

#### **A. Το ρομπότ**

Τα **cobots**, ή *collaborative robots* (συνεργαζόμενα ρομπότ), είναι ρομπότ τα οποία προορίζονται για απευθείας και ασφαλή αλληλεπίδραση με ανθρώπους, σε αντίθεση με τις κλασσικές βιομηχανικές διατάξεις (*industrial robots*) οι οποίες είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν αυτόνομα, απομονωμένα από την ανθρώπινη παρουσία. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στους αισθητήρες με τους οποίους είναι εξοπλισμένα, τον περιορισμό στην ταχύτητα λειτουργίας, ή στην ασκούμενη δύναμη, αλλά και λόγω άλλων ιδιοτήτων σχετικών με το υλικό κατασκευής τους, κλπ. Παράλληλα, το κόστος παραμένει χαμηλό, και έτσι αποτελούν προσιτές λύσεις για μικρομεσαίες επιχειρήσεις.



**Εικόνα 1 – Cobot xArm 7**

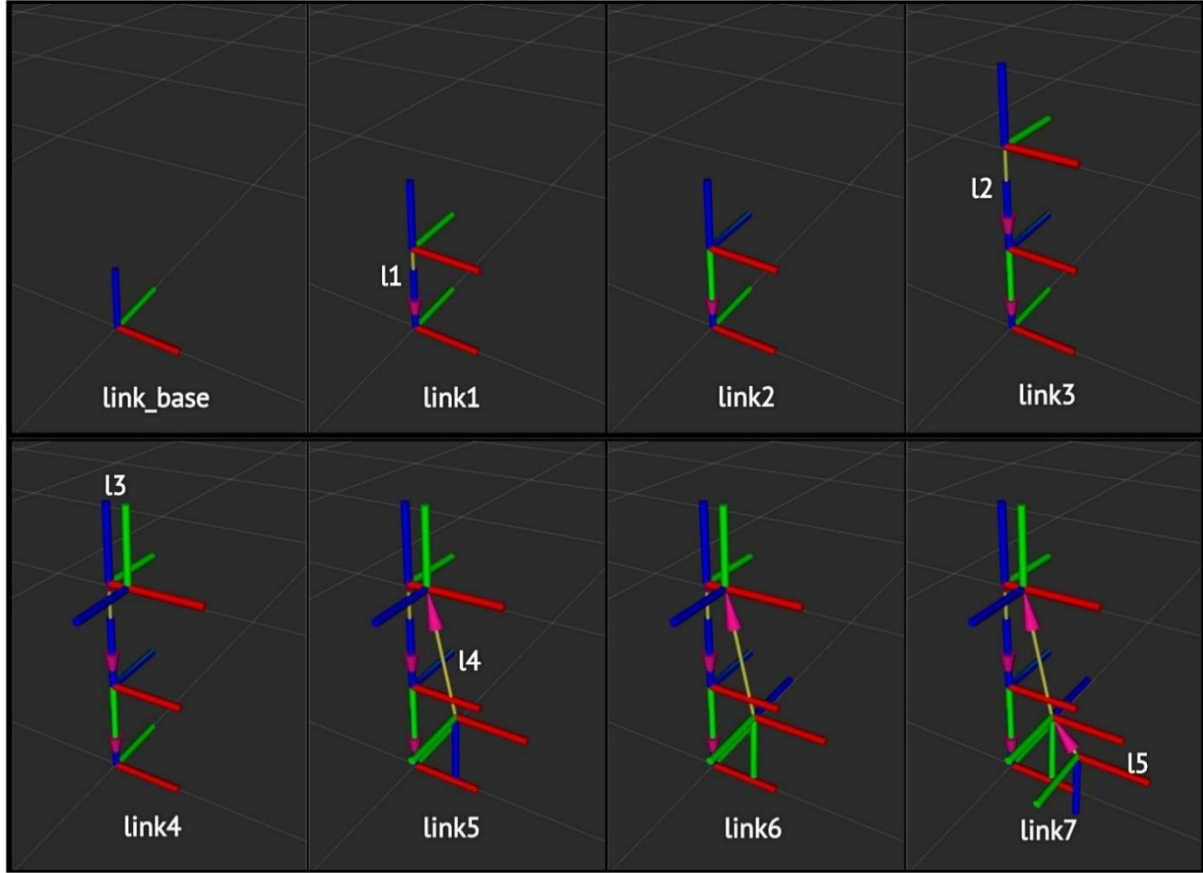


**Εικόνα 2 - Joints of xArm 7**

Στην **Εικόνα 1** φαίνεται το **xArm 7** το οποίο ανήκει στην παραπάνω κατηγορία (*cobot*). Δίνει δυνατότητα **3.5 kg** ωφέλιμου φορτίου, ο χώρος εργασίας του εκτείνεται στα **70 cm** από τη βάση του, πετυχαίνει μέγιστη ταχύτητα **1 m/s** στο τελικό στοιχείο δράσης, ενώ έχει **7 βαθμούς ελευθερίας (DOFs)**, όπως υποδεικνύεται άλλωστε από το όνομα. Αυτήν τη στιγμή χρησιμοποιείται, όχι μόνο σε πανεπιστημιακά κέντρα για ερευνητικούς σκοπούς, αλλά και στη βιομηχανία ως επιμέρους σύστημα σε γραμμές παραγωγής. Ένας από τους βασικούς λόγους που φαίνεται να έχει μεγάλη απήχηση στο προσεχές διάστημα, εκτός από το χαμηλό κόστος, είναι και η δυνατότητα χρήσης σε συνδυασμό με το ευρέως διαδεδομένο λογισμικό περιβάλλον ανάπτυξης ρομποτικών εφαρμογών **ROS**. Στην **Εικόνα 2** φαίνονται οι θέσεις των αρθρώσεων του ρομποτικού βραχίονα, καθώς και η φορά περιστροφής.

## B. Πλαίσια αναφοράς, κινηματική ανάλυση και διαστάσεις

Στην **Εικόνα 3** διακρίνονται τα πλαίσια αναφοράς στη διάταξη αρχικοποίησης, σύμφωνα με τα οποία έγινε η κινηματική ανάλυση του ρομποτικού βραχίονα xArm 7.



**Εικόνα 3 – Reference frames and links of xArm 7 (by Rviz)**

$$A_1^0(q_1) = Rot(z, q_1) \cdot Tra(z, l_1), \quad l_1 = 26.7cm$$

$$A_2^1(q_2) = Rot\left(x, -\frac{\pi}{2}\right) \cdot Rot(z, q_2)$$

$$A_3^2(q_3) = Rot\left(x, +\frac{\pi}{2}\right) \cdot Rot(z, q_3) \cdot Tra(z, l_2), \quad l_2 = 29.3cm$$

$$A_4^3(q_4) = Rot\left(x, +\frac{\pi}{2}\right) \cdot Tra(x, l_3) \cdot Rot(z, q_4), \quad l_3 = 5.25cm$$

$$A_5^4(q_5) = Rot\left(x, +\frac{\pi}{2}\right) \cdot Tra(x, l_4 \sin \theta_1) \cdot Rot(z, q_5) \cdot Tra(z, l_4 \cos \theta_1), \quad \begin{matrix} l_4 = 35.12 cm \\ \theta_1 = 0.2225 rad \end{matrix}$$

$$A_6^5(q_6) = Rot\left(x, +\frac{\pi}{2}\right) \cdot Rot(z, q_6)$$

$$A_7^6(q_7) = Rot\left(x, -\frac{\pi}{2}\right) \cdot Tra(x, l_5 \sin \theta_2) \cdot Rot(z, q_7) \cdot Tra(z, l_5 \cos \theta_2), \quad \begin{matrix} l_5 = 12.32 cm \\ \theta_2 = 0.6646 rad \end{matrix}$$

Σημείωση: οι ανωτέρω διαδοχικοί μετασχηματισμοί και η τοποθέτηση των πλαισίων αναφοράς στους συνδέσμους ακολουθεί ουσιαστικά την εναλλακτική σύμβαση D-H, όπως αυτή περιγράφεται στο βιβλίο του John Craig (*Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, ISBN 978-0201543612).

## Γ. Εκτέλεση προγραμμάτων

Η εκτέλεση προγραμμάτων ελέγχου του ρομπότ γίνεται σε περιβάλλον *ROS (Robot Operating System)*. Το λογισμικό περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών ROS είναι μια συλλογή από εργαλεία, βιβλιοθήκες και συμβάσεις εργασίας η οποία έχει ως βασικό στόχο να απλοποιήσει τη δημιουργία σύνθετου και αξιόπιστου ρομποτικού λογισμικού, διευκολύνοντας επιπλέον τη φορητότητα, τη διαλειτουργικότητα και το διαμοιρασμό κώδικα.

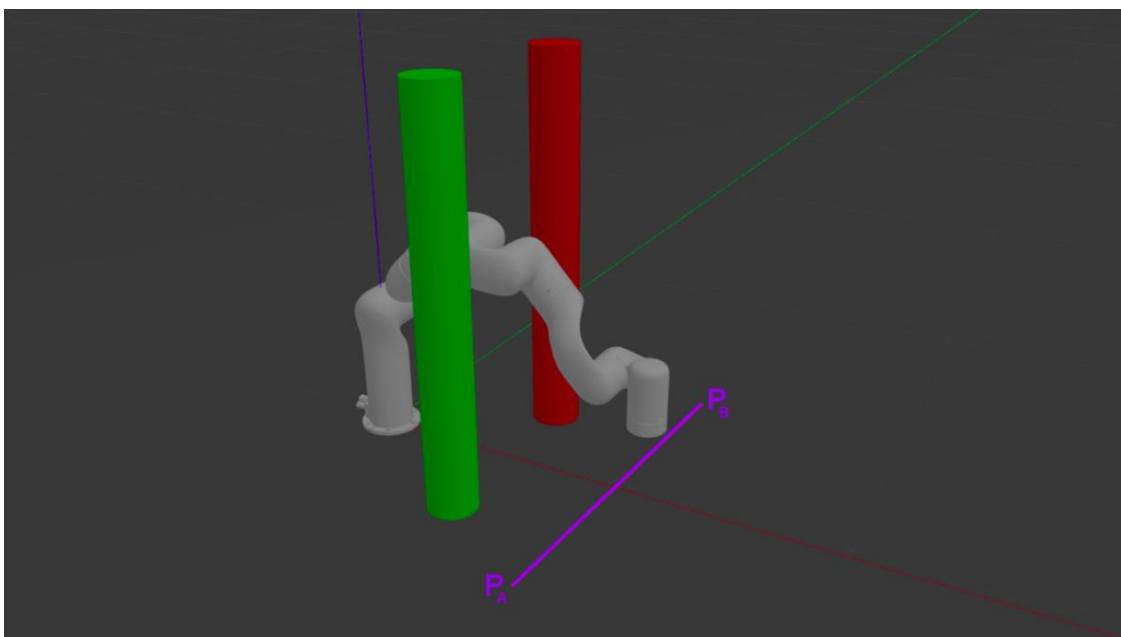
## ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ

Η προγραμματιστική υλοποίηση για τις ανάγκες εκπόνησης της εργασίας μπορεί να γίνει με χρήση του περιβάλλοντος προσομοίωσης «*gazebo*»: <https://gazebo.org/>

Το συγκεκριμένο περιβάλλον προσομοίωσης παρέχει ρεαλιστικές υλοποιήσεις ενός μεγάλου αριθμού ρομποτικών διατάξεων και μπορεί ως εκ τούτου να χρησιμοποιηθεί (αντί ή συμπληρωματικά/προκαταρκτικά μιας πειραματικής/εργαστηριακής υλοποίησης επί του πραγματικού ρομπότ) για την ανάπτυξη και δοκιμή των προγραμμάτων ελέγχου του ρομπότ και την ολοκλήρωση των στόχων της εργασίας που περιγράφονται ακολούθως. Ο συγκεκριμένος τύπος προσομοιωτή έχει την δυνατότητα συνεργασίας με το ROS.

## ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

Στόχος της εργασίας είναι η υλοποίηση ενός αλγορίθμου για την παρακολούθηση τροχιάς από το τελικό στοιχείο δράσης της προαναφερθείσας ρομποτικής διάταξης (*xArm 7*) με ταυτόχρονη αποφυγή εμποδίων. Πιο συγκεκριμένα, το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα καλείται να εκτελέσει ευθύγραμμη περιοδική κίνηση μεταξύ των θέσεων  $P_A$  και  $P_B$  (με έλεγχο θέσης και ΟΧΙ προσανατολισμού), όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4** όπου αποτυπώνεται μια απεικόνιση του συνολικού συστήματος στο περιβάλλον προσομοίωσης *Gazebo*. Επιπλέον, οι δύο ακραίες θέσεις που ορίζουν το ευθύγραμμο τμήμα κίνησης του τελικού στοιχείου δράσης του ρομπότ είναι συμμετρικές ως προς τον  $x$ -άξονα, βρίσκονται στην ευθεία  $\{x = 0.617 | z = 0.199\}$ , ενώ απέχουν απόσταση **40 cm**. Ταυτόχρονα επιδιώκεται αποφυγή των εμποδίων, θεωρώντας συνεχώς γνωστές τις θέσεις τους στο χώρο. Σε αυτό το σημείο να επισημανθεί ότι η διάμετρος της διατομής κάθε συνδέσμου του βραχίονα είναι **12.6 cm**, ενώ οι δύο κύλινδροι-εμπόδια είναι πανομοιότυποι με διάμετρο διατομής **10 cm**, τα κέντρα τους απέχουν απόσταση **40 cm**, και βρίσκονται πάνω στο επίπεδο  $x = 0.3$ .



Εικόνα 4 - *xArm 7* within obstacles

## **A. Θεωρητική Ανάλυση**

Να περιγραφεί αναλυτικά ένας τρόπος εφαρμογής της θεωρητικής μεθοδολογίας κινηματικού ελέγχου πλεοναζόντων βαθμών ελευθερίας μέσω διάσπασης ρομποτικής εργασίας σε υποεργασίες, για το συγκεκριμένο πρόβλημα που συνίσταται στην αποφυγή των εμποδίων με ταυτόχρονη εκτέλεση της επιθυμητής κίνησης του τελικού στοιχείου δράσης στο επίπεδο, όπως περιγράφεται παραπάνω.

## **B. Προσομοίωση**

Να υλοποιηθεί η μέθοδος αυτή για το συγκεκριμένο πρόβλημα, και να γίνει η κινηματική προσομοίωσή της. Εκτός της απεικόνισης του ρομποτικού βραχίονα κατά την εκτέλεση της απαιτούμενης εργασίας, να γίνει καταγραφή στο χρόνο διαφόρων άλλων μεταβλητών τις οποίες κρίνετε σημαντικές για την καλύτερη αποτύπωση, επεξήγηση και αξιολόγηση της λειτουργίας του αλγορίθμου (όπως αποστάσεις από εμπόδια, σφάλμα θέσης, κλπ.) ο σχολιασμός των οποίων θα γίνει εντός της αναφοράς.

## **ΠΑΡΑΔΟΤΕΑ**

Να παραδοθούν (σε ένα αρχείο .zip):

(α) Αναφορά (PDF) με τη θεωρητική ανάλυση του προβλήματος και της μεθοδολογίας κινηματικού ελέγχου, καθώς και επεξήγηση των διαγραμμάτων εξόδου της προσομοίωσης

(β) το πακέτο ROS που υλοποιήθηκε.

**Σημείωση:** Για οποιαδήποτε απορία απευθυνθείτε στο σχετικό φόρουμ που υπάρχει στη σελίδα του μαθήματος στο <https://helios.ntua.gr/>, αφού πρώτα αναζητήσετε στο αρχείο προηγούμενων ετών ενδεχόμενη απάντηση/λύση στο πρόβλημά σας.

Η αποστολή των εργασιών γίνεται αποκλειστικά μέσω του **helios**.

---

Μεταπτυχιακοί Συνεργάτες:

- Πάρης Οικονόμου <[oikonpar@mail.ntua.gr](mailto:oikonpar@mail.ntua.gr)>
- Ιωάννης Καραμπίνας <[ioannis.karampinas3773@gmail.com](mailto:ioannis.karampinas3773@gmail.com)>