

ĐẠI HỌC QUỐC GIA THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA CƠ KHÍ – BỘ MÔN CƠ ĐIỆN TỬ



Báo cáo bài tập lớn
KỸ THUẬT ROBOT

Giảng viên hướng dẫn: TS Phạm Công Bằng

Lớp: DT01

Nhóm: ROBOT_HATD

Đề tài: Epson S5 series 6 axis robot

Danh sách thành viên:

STT	MSSV	Họ tên	Email
1	1910758	Ngô Huỳnh Anh	anh.ngoanhdep20@hcmut.edu.vn
2	2033135	Nguyễn Mạnh Điền	dien.nguyen1512@hcmut.edu.vn
3	1711557	Trương Nguyễn Khánh Huy	huy.tranmechanical@hcmut.edu.vn
4	1910678	Chu Thanh Tùng	tung.chu.k.chu@hcmut.edu.vn

HỌC KÌ 213/2021-2022

LỜI CẢM ƠN

Chúng em xin chân thành cảm ơn thầy Phạm Công Bằng đã mang đến đề tài bài tập lớn vô cùng thú vị và hấp dẫn trong môn học *Kỹ thuật robot* qua đó tạo tiền đề cho chúng em hiểu hơn về môn học và trang bị những kiến thức vô cùng quan trọng trong khi chúng em thực hiện luận văn tốt nghiệp.

Và càng cảm ơn thầy hơn nữa trong những buổi học thí nghiệm ở trường, thầy đã tận tâm chỉ bảo chúng em với những vấn đề chúng em chưa hiểu và qua những buổi thí nghiệm này mà chúng em đã hiểu được bản chất của môn học.

Trong quá trình thực hiện báo cáo những sai sót là khó tránh khỏi, kính mong thầy hãy thông cảm và bỏ qua cho chúng em.

Cảm ơn thầy.

ROBOT_HATD group

TÓM TẮT NỘI DUNG BÁO CÁO

Nội dung của bài báo cáo được khái quát qua các nội dung chính sau:

- Giới thiệu những đặc điểm của robot mà nhóm tìm hiểu.
- Thực hiện đặt hệ tọa độ cho các khâu của robot.
- Xác định các thông số của bảng Denavit – Hartenberg các khâu đã đặt hệ tọa độ.
- Xây dựng bài toán động học thuận, sau đó xác định tọa độ của điểm cuối end-effector dựa trên các biến khớp và tạo đồ thị biểu diễn mối quan hệ đó.
- Xây dựng bài toán động học ngược, sau đó xác định các giá trị của biến khớp dựa trên tọa độ của điểm cuối end-effector và tạo đồ thị biểu diễn mối quan hệ đó.
- Nhận xét về vùng làm việc của robot.
- Xây dựng ma trận Jacobian cho robot và xác định các điểm kì dị (nếu có)
- Thực hiện mô phỏng cho robot để viết các kí tự đầu tiên của tên mỗi thành viên trong nhóm trên một mặt phẳng vuông góc với trục z_0 .

MỤC LỤC

1. TỔNG QUAN VỀ EPSON S5 SERIES 6 AXIS ROBOT	5
2. THỰC HIỆN ĐẶT HỆ TỌA ĐỘ CHO CÁC KHẤU CỦA ROBOT.....	9
3. CÁC THÔNG SỐ BẢNG DENAVIT – HARTENBERG	12
4. THỰC HIỆN BÀI TOÁN ĐỘNG HỌC THUẬN.....	12
5. THỰC HIỆN BÀI TOÁN ĐỘNG HỌC NGHỊCH.....	14
6. DẠNG HÌNH HỌC CỦA KHÔNG GIAN LÀM VIỆC ROBOT	16
7. MA TRẬN JACOBIAN VÀ ĐIỂM KÌ DỊ CỦA ROBOT.....	19
8. MÔ PHỎNG ROBOT	22
BẢNG PHÂN CHIA CÔNG VIỆC NHÓM	28

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1. 1: Epson S5 series 6 axis robot.....	5
Hình 1. 2: Bảng vẽ cơ khí robot	7
Hình 1. 3: Phạm vi hoạt động của robot.....	8
Hình 2. 1: Mô hình Epson S5 3 bậc trong Solidworks	9
Hình 2. 2: Sơ đồ cánh tay Epson S5 3 bậc.....	9
Hình 2. 3: Quy đổi khâu 3 trong Solidworks.....	10
Hình 2. 4: Quy đổi khâu 3 trong sơ đồ cánh tay.....	11
Hình 2. 5: Đặt hệ tọa độ cho sơ đồ cánh tay.....	11
Hình 4. 1: Kết quả trả về tọa độ của end-effector so với $\{0\}$ và tư thế của robot trong trường hợp (0;0;0)deg	13
Hình 4. 2: Kết quả trả về tọa độ của end-effector so với $\{0\}$ và tư thế của robot trong trường hợp (90;180;-90)deg	14
Hình 6. 1: Tách robot thành hai phần	17
Hình 6. 2: Vùng làm việc của cơ cấu bên phải.....	17
Hình 6. 3: Vùng làm việc của robot trong mặt phẳng bất kỳ	18
Hình 6. 4: Vùng làm việc của robot trong không gian ba chiều.....	19
Hình 7. 1: Đồ thị thể hiện sự thay đổi của vận tốc góc khớp 2 dựa theo góc khớp 1.....	22
Hình 7. 2: Đồ thị thể hiện sự thay đổi của vận tốc góc khớp 3 dựa theo góc khớp 1.....	22
Hình 8. 1: Đồ thị thể hiện vị trí của đầu tool theo thời gian qua lý thuyết.....	23
Hình 8. 2: Biểu data trả về với ma trận thể hiện các thông số t, theta, position qua mỗi lần lặp	23
Hình 8. 3: Lắp các khối trong Matlab Simulink cho bài toán động học thuận.....	24
Hình 8. 4: Đồ thị thể hiện vị trí của đầu tool qua mô phỏng	24
Hình 8. 5: Chọn các tọa độ điểm nút thích hợp.....	25
Hình 8. 6: Lắp các khối trong Matlab Simulink cho bài toán động học ngược.....	26
Hình 8. 7: Hiển thị kết quả mặt phẳng robot vẽ các ký tự.....	26
Hình 8. 8: Sai lệch do quá trình rời rạc hóa.....	27

1. TỔNG QUAN VỀ EPSON S5 SERIES 6 AXIS ROBOT

1.1. Giới thiệu:

Epson S5 series 6 axis robot hay dòng cánh tay robot 6 bậc Epson S5 với hiệu suất vượt trội cùng với công nghệ điều khiển bằng máy tính. Nếu bạn đang tìm kiếm robot hoạt động với *tốc độ cao, độ rung thấp, chịu tải trọng lớn, phạm vi hoạt động rộng cũng như có thể hoạt động trong các môi trường đặc biệt* thì dòng cánh tay robot 6 bậc S5 của Epson là một lựa chọn tối ưu dành cho bạn.



Hình 1. 1: Epson S5 series 6 axis robot

S5 có thiết kế cơ khí với cánh tay cứng kết hợp với công nghệ điều khiển Epson servo tiên tiến nên có thể chuyển động với tốc độ cao và độ rung thấp ngay cả khi yêu cầu về đáp ứng chu kỳ nhanh với độ chính xác cao. Tất cả các robot S5 6 bậc đều có hệ thống phanh trên tất cả các khớp và có thể linh hoạt trong việc bố trí các vị trí như trên bàn, treo tường hoặc thậm chí là trần nhà.

1.2. Ứng dụng:

Robot Epson S5 6 bậc được sử dụng phổ biến trong các ngành như y tế, tiêu dùng, thực phẩm, ô tô, điện tử, máy tính ngoại vi, bán dẫn, nhựa, hàng không,... với các ứng dụng đòi hỏi sự khéo léo có thể kể đến như:

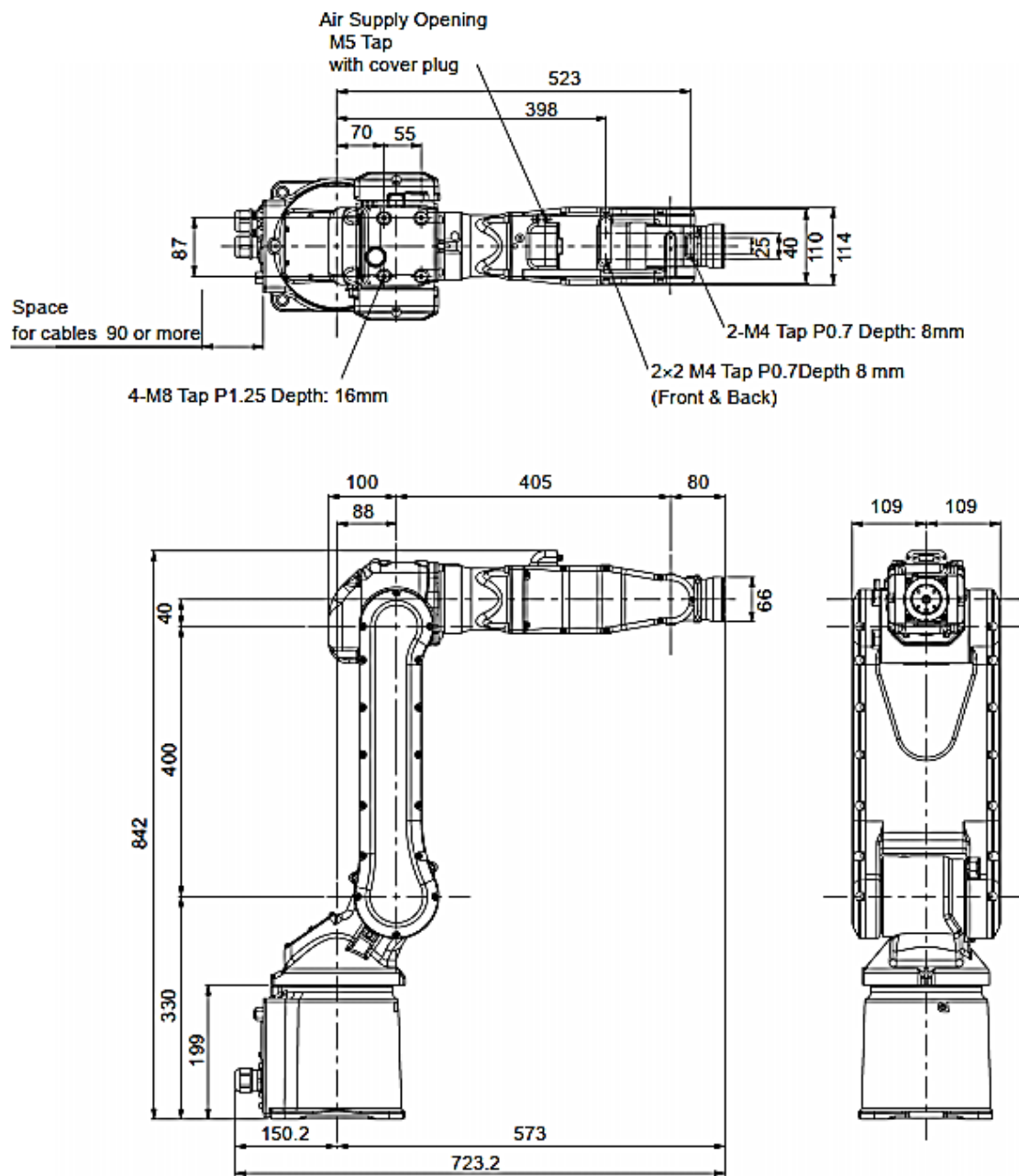
- Lắp ráp các bộ phận có kích thước nhỏ,
- Pha chế, tự động hóa trong các phòng thí nghiệm,
- Chăm sóc máy móc, xử lý vật liệu,
- Sản xuất thiết bị y tế,
- Đóng gói, xử lý thực phẩm,...

Cùng nhiều ứng dụng khác khi đòi hỏi tốc độ cao, độ chính xác cao và hoạt động trơn tru.

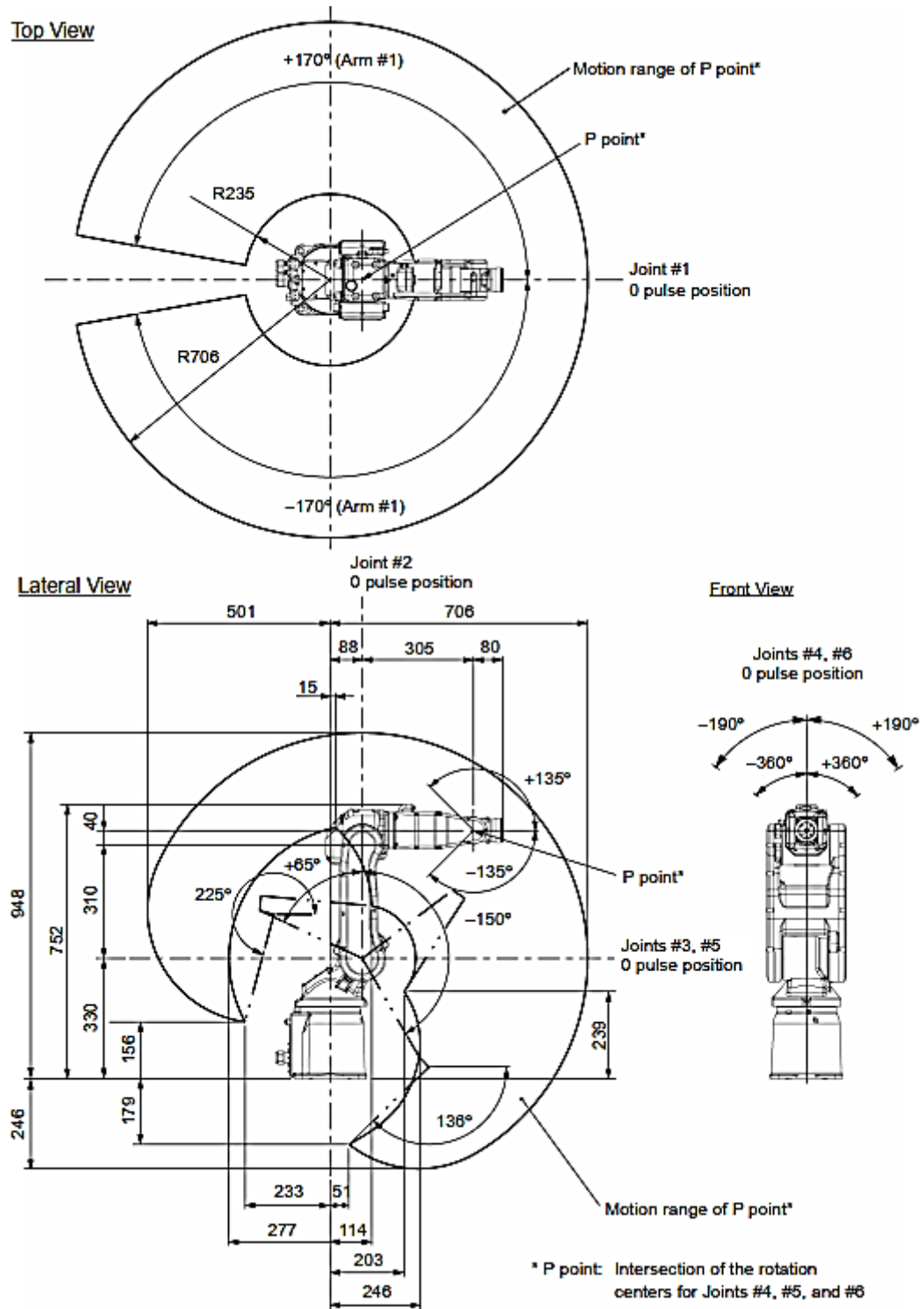
1.3. Thông số kỹ thuật:

Thông số kỹ thuật	Giá trị
Số trục	6
Tải trọng tối đa	7kg
Phạm vi hoạt động: - Trục 1 - Trục 2 - Trục 3 - Trục 4 - Trục 5 - Trục 6	$\pm 170\text{deg}$ [−150; 65]deg [−70; 190]deg $\pm 190\text{deg}$ $\pm 135\text{deg}$ $\pm 360\text{deg}$
Tốc độ hoạt động tối đa: - Trục 1 - Trục 2 - Trục 3 - Trục 4 - Trục 5 - Trục 6	376deg/s 350deg/s 400deg/s 450deg/s 450deg/s 720deg/s
Tầm vươn dài	706mm
Tầm vươn cao	948mm
Sai số lặp lại	$\pm 0.02\text{mm}$
Bộ điều khiển	RC180
Khối lượng	36kg

Bảng 1. 1: Thông số kỹ thuật robot



Hình 1. 2: Bảng vẽ cơ khí robot

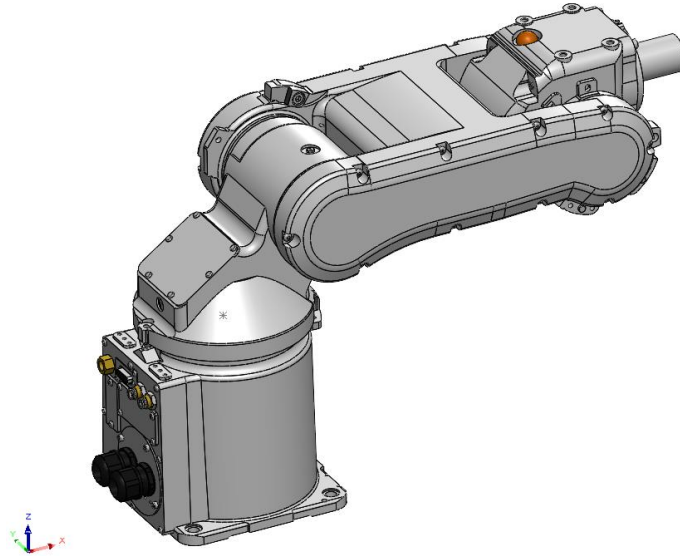


Hình 1. 3: Phạm vi hoạt động của robot

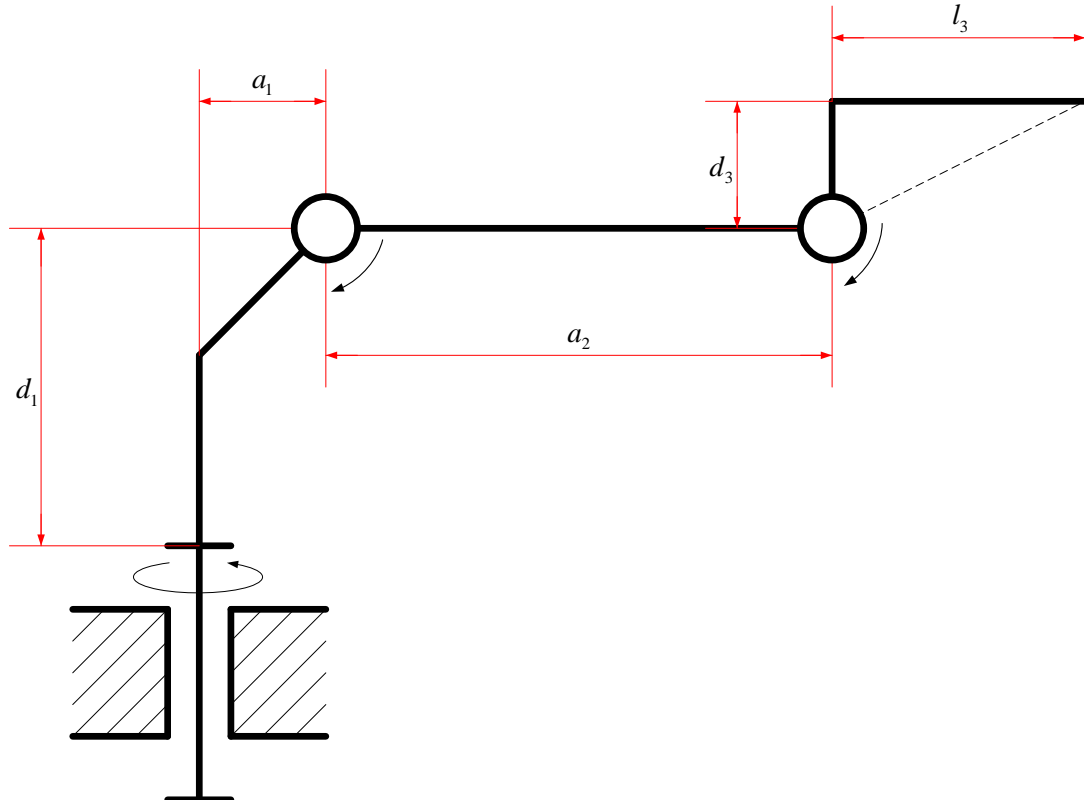
2. THỰC HIỆN ĐẶT HỆ TỌA ĐỘ CHO CÁC KHÂU CỦA ROBOT

2.1. Đặt vấn đề:

Do giới hạn về nội dung môn học cũng như đơn giản hóa bài toán nên nhóm chúng em xin được thực hiện cánh tay robot Epson S5 với 3 bậc đầu tiên thay vì 6 bậc.



Hình 2. 1: Mô hình Epson S5 3 bậc trong Solidworks



Hình 2. 2: Sơ đồ cánh tay Epson S5 3 bậc

Với:

$$a_1 = 88mm$$

$$a_2 = 310mm$$

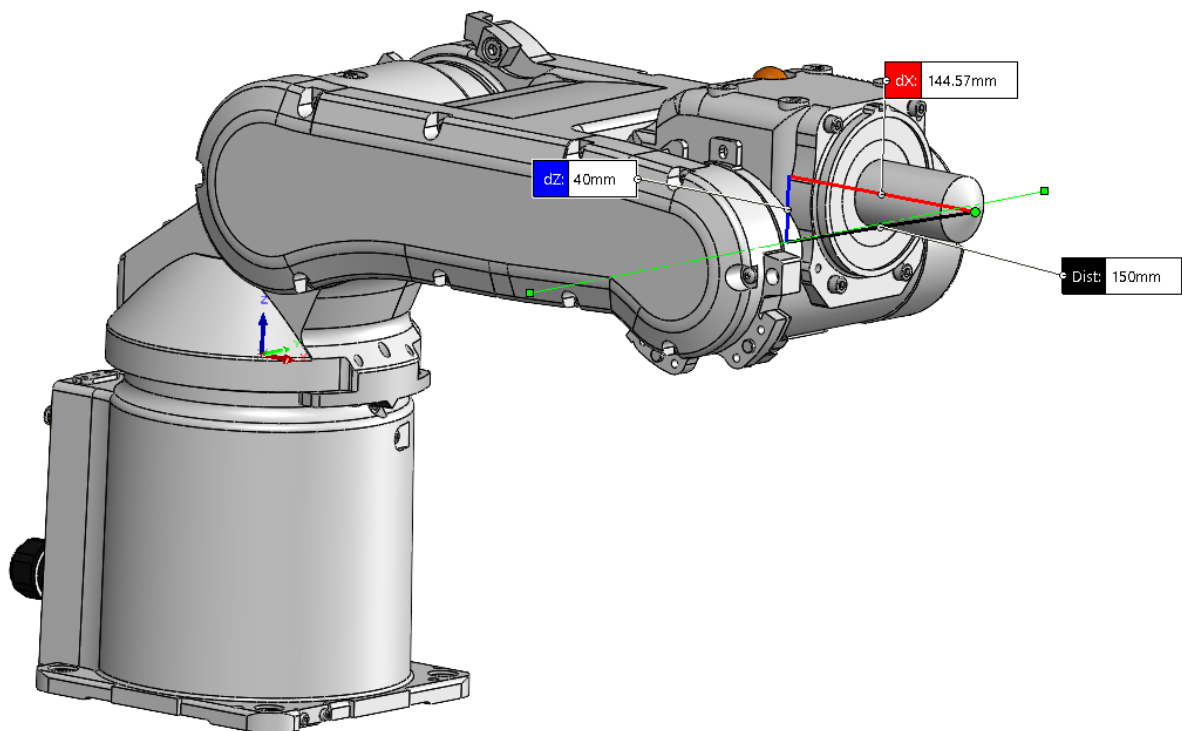
$$d_1 = 126.5mm$$

$$d_3 = 40mm$$

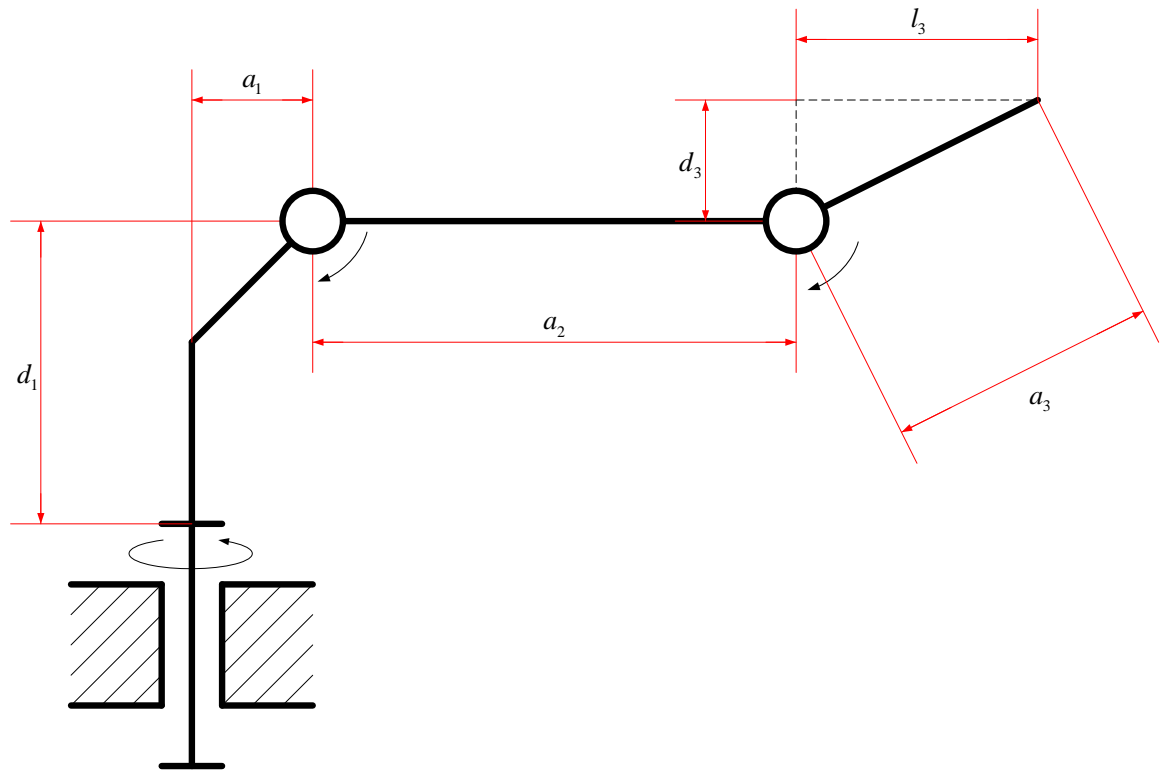
$$l_3 = 144.57mm$$

Tuy nhiên, với mẫu thiết kế của nhà sản xuất thì ở khâu thứ 3 ta thấy sẽ xuất hiện hai thành phần l_3 và d_3 trong bảng D-H. Điều này sẽ tạo ra sự phức tạp khi giải các bài toán động học sau này. Do đó, để đơn giản bài toán hơn, chúng em quyết định sẽ quy đổi khâu 3 này thành một khâu 3 giả định với duy nhất một thông số a_3 duy nhất.

$$a_3 = \sqrt{d_3^2 + l_3^2} = \sqrt{40^2 + 144.57^2} = 150(mm)$$

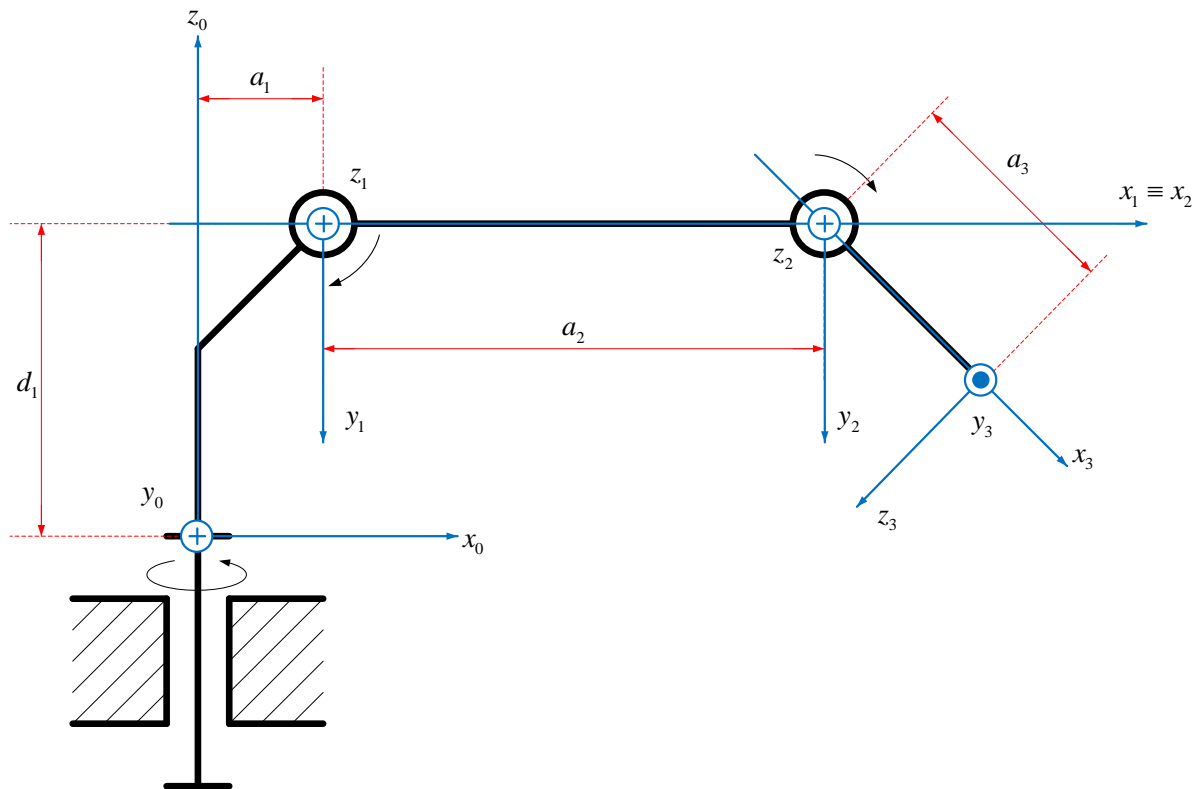


Hình 2. 3: Quy đổi khâu 3 trong Solidworks



Hình 2. 4: Quy đổi khâu 3 trong sơ đồ cánh tay

2.2. Thực hiện đặt hệ tọa độ cho sơ đồ cánh tay:



Hình 2. 5: Đặt hệ tọa độ cho sơ đồ cánh tay

3. CÁC THÔNG SỐ BẢNG DENAVIT – HARTENBERG

Dựa vào sơ đồ Hình 2.5, ta thành lập được bảng thông số D-H như sau:

i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	a_1	-90°	d_1	θ_1
2	a_2	0	0	θ_2
3	a_3	-90°	0	θ_3

Bảng 2. 1: Bảng thông số Denavit - Hartenberg

4. THỰC HIỆN BÀI TOÁN ĐỘNG HỌC THUẬN

Dựa vào các thông số bảng Denavit – Hartenberg ở phần 3 mà ta có được ma trận biến đổi thuận nhất giữa các khâu kế cận nhau theo công thức:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Từ đó, ta có các ma trận biến đổi thuận nhất giữa các khâu kế cận nhau:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & a_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & a_1 \sin \theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & -\sin \theta_3 & a_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 & a_3 \sin \theta_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ma trận biến đổi thuận nhất từ khâu 3 về khâu 0:

$${}^0T_3 = {}^0T_1 \times {}^1T_2 \times {}^2T_3 = \begin{bmatrix} c_{23}c_1 & s_1 & -s_{23}c_1 & c_1(a_1 + a_3c_{23} + a_2c_2) \\ c_{23}s_1 & -c_1 & -s_{23}s_1 & s_1(a_1 + a_3c_{23} + a_2c_2) \\ -s_{23} & 0 & -c_{23} & d_1 - a_3s_{23} - a_2s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

với $s_i = \sin\theta_i, c_i = \cos\theta_i, s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j), c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$.

Từ đó, ta có vector vị trí của điểm cuối M trên end-effector:

$${}^0p_M = \begin{bmatrix} {}^0x_M \\ {}^0y_M \\ {}^0z_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 [a_1 + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos\theta_2] \\ \sin\theta_1 [a_1 + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos\theta_2] \\ d_1 - a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - a_2 \sin\theta_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

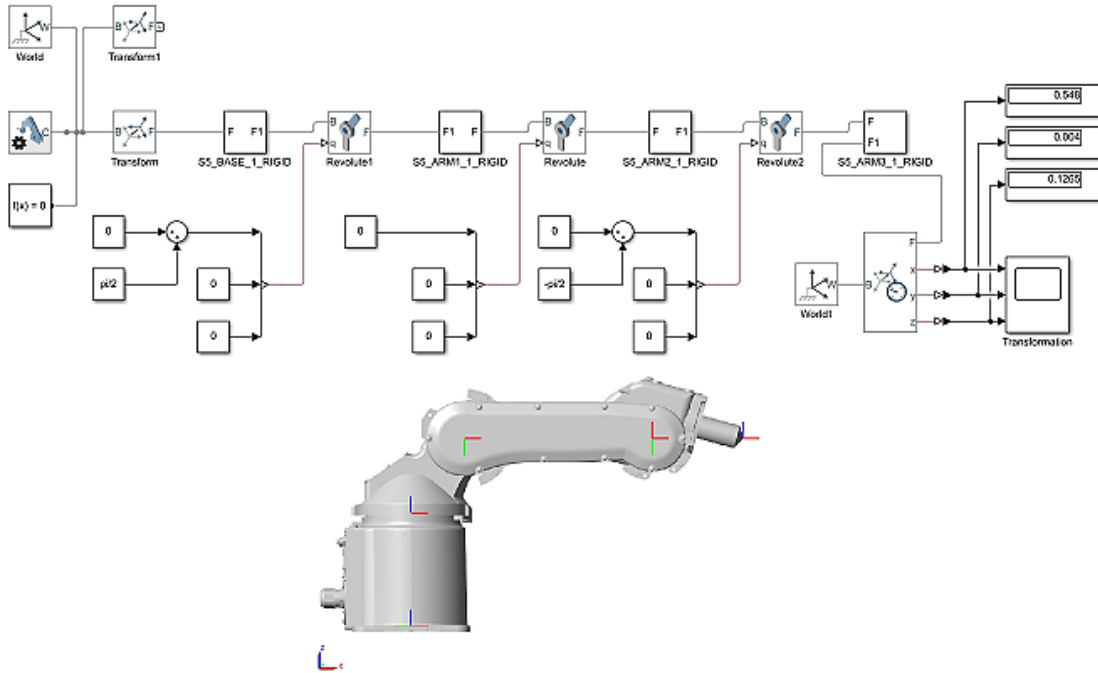
Giả sử, ban đầu ta có $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0$. Thay các góc này vào (1), ta có:

$${}^0p_M = \begin{bmatrix} a_1 + a_3 + a_2 \\ 0 \\ d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 548 \\ 0 \\ 126.5 \end{bmatrix}$$

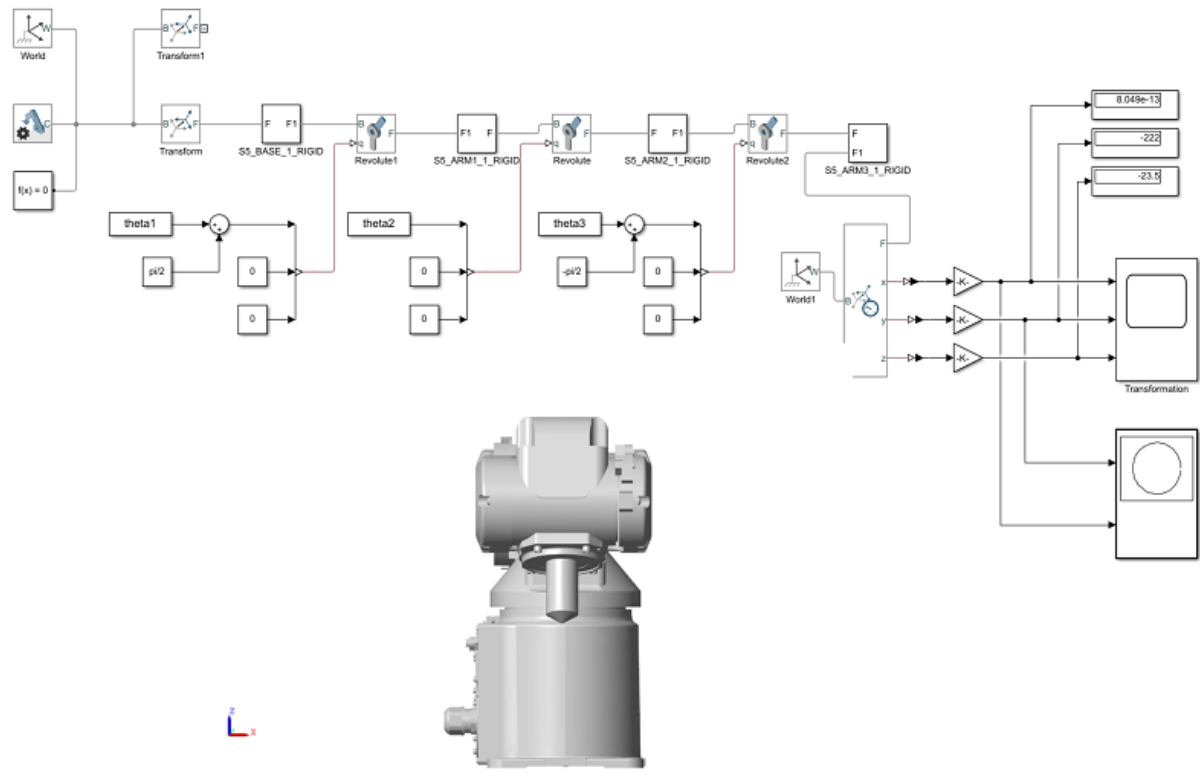
Sau đó, thực hiện cho robot di chuyển đến vị trí mới với $\theta_1 = 90^\circ, \theta_2 = 180^\circ, \theta_3 = -90^\circ$. Thay các góc này vào (1), ta có:

$${}^0p_M = \begin{bmatrix} 0 \\ a_1 - a_2 \\ d_1 - a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -222 \\ -23.5 \end{bmatrix}$$

Ta mô phỏng bằng Matlab simulink cho cánh tay robot di chuyển từng trường hợp với các thông số khớp $\theta = (\theta_1; \theta_2; \theta_3)$ là $(0; 0; 0)^\circ$ và $(90; 180; -90)^\circ$, kết quả như sau:



Hình 4. 1: Kết quả trả về tọa độ của end-effector so với $\{0\}$ và tư thế của robot trong trường hợp $(0;0;0)deg$



Hình 4. 2: Kết quả trả về tọa độ của end-effector so với $\{0\}$ và tư thế của robot trong trường hợp $(90;180;-90)deg$

Dựa vào hai kết quả trong hai trường hợp ta thấy được sự chênh lệch vị trí của điểm M trên end-effector giữa bài toán động học thuận và mô phỏng là gần như nhau. Như vậy, ta có thể kết luận rằng bài toán động học thuận là chính xác.

5. THỰC HIỆN BÀI TOÁN ĐỘNG HỌC NGHỊCH

5.1. Xác định θ_1 :

Từ (1), suy ra:

$$\frac{y}{x} = \frac{s_1}{c_1} = \tan \theta_1$$

$$\rightarrow \theta_1 = \arctan(y, x)$$

5.2. Xác định θ_3 :

Từ (1), có:

$$\begin{aligned}
 & \begin{cases} \left(\sqrt{x^2 + y^2} - a_1 \right)^2 = (a_3 c_{23} + a_2 c_2)^2 \\ (d_1 - z)^2 = (a_3 s_{23} + a_2 s_2)^2 \end{cases} \\
 & \rightarrow (d_1 - z)^2 + \left(\sqrt{x^2 + y^2} - a_1 \right)^2 - a_2^2 - a_3^2 = 2a_3 a_2 c_3 \\
 & \rightarrow \frac{(d_1 - z)^2 + \left(\sqrt{x^2 + y^2} - a_1 \right)^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_3 a_2} = c_3 \\
 & \rightarrow s_3 = \pm \sqrt{1 - c_3^2} \\
 & \rightarrow \theta_3 = \arctan(s_3, c_3)
 \end{aligned}$$

5.3. Xác định θ_2 :

Từ (1), có:

$$\begin{cases} xc_1 + ys_1 - a_1 = a_3 c_{23} + a_2 c_2 = (a_3 c_3 + a_2) c_2 - (a_3 s_3) s_2 \\ d_1 - z = a_3 s_{23} + a_2 s_2 = (a_3 c_3) s_2 + (a_3 c_3 + a_2) c_2 \end{cases}$$

Đặt $k_1 = a_3 c_3 + a_2, k_2 = a_3 s_3$:

$$\begin{cases} xc_1 + ys_1 - a_1 = k_2 c_2 - k_1 s_2 \\ d_1 - z = k_2 s_2 + k_1 c_2 \end{cases}$$

Giả sử: $r = \sqrt{k_1^2 + k_2^2} \rightarrow \begin{cases} k_1 = r \cos \gamma \\ k_2 = r \sin \gamma \end{cases}$

$$\rightarrow \begin{cases} \cos(\gamma + \theta_2) = \frac{xc_1 + ys_1 - a_1}{r} \\ \sin(\gamma + \theta_2) = \frac{d_1 - z}{r} \end{cases}$$

$$\rightarrow \tan(\gamma + \theta_2) = \frac{d_1 - z}{xc_1 + ys_1 - a_1}$$

$$\rightarrow \theta_2 = \arctan(d_1 - z, xc_1 + ys_1 - a_1) - \arctan(k_2, k_1)$$

5.4. Kiểm chứng bài toán:

Để kiểm tra bài toán động học nghịch đã giải đúng hay chưa, ta thực hiện thay thế các giá trị kết quả vị trí ở bài toán động học thuận $p = [x \ y \ z]^T = [548 \ 0 \ 126.5]^T$ vào các công thức tính giá trị góc khớp đã tính phía trên.

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \arctan(y, x) = \arctan\left(\frac{0}{548}\right) = 0 \\ c_3 &= \frac{(d_1 - z)^2 + \left(\sqrt{x^2 + y^2} - a_1\right)^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_3a_2} \\ &= \frac{(126.5 - 126.5)^2 + \left(\sqrt{548^2 + 0^2} - 88\right)^2 - 310^2 - 150^2}{2 \times 150 \times 310} = 1 \\ s_3 &= \pm\sqrt{1 - c_3^2} = 0 \\ \rightarrow \theta_3 &= \arctan(s_3, c_3) = \arctan(0) = 0 \\ \arctan(d_1 - z, xc_1 + ys_1 - a_1) &= \arctan(0) = 0 \\ k_2 &= a_3s_3 = 0 \\ k_1 &= a_3c_3 + a_2 = a_3 + a_2 = 460 \\ \arctan(k_2, k_1) &= \arctan(0) = 0 \\ \rightarrow \theta_2 &= \arctan(d_1 - z, xc_1 + ys_1 - a_1) - \arctan(k_2, k_1) = 0\end{aligned}$$

Ta thấy kết quả bài toán động học nghịch là trùng khớp với bài toán động học thuận. Vì vậy, ta kết luận bài toán động học nghịch đã giải đúng.

6. DẠNG HÌNH HỌC CỦA KHÔNG GIAN LÀM VIỆC ROBOT

Ta có tọa độ điểm cuối của end-effector:

$${}^0P_M = \begin{bmatrix} {}^0x_M \\ {}^0y_M \\ {}^0z_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 [a_1 + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos \theta_2] \\ \sin \theta_1 [a_1 + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos \theta_2] \\ d_1 - a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - a_2 \sin \theta_2 \end{bmatrix}$$

Ta có:

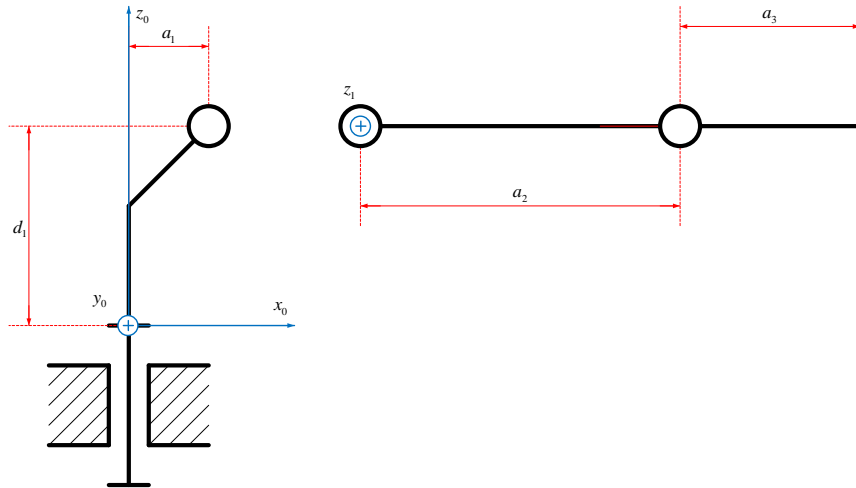
$$\begin{aligned}\sqrt{x^2 + y^2} - a_1 &= a_3c_{23} + a_2c_2 \\ d_1 - z &= a_3s_{23} + a_2s_2 \\ \rightarrow \left(\sqrt{x^2 + y^2} - a_1\right)^2 + (d_1 - z)^2 &= a_2^2 + a_3^2 + 2a_2a_3c_3\end{aligned}$$

Do $-1 \leq \cos \theta_3 \leq 1$, nên ta quy hoạch được vùng hoạt động của robot:

$$\begin{aligned}(a_2 - a_3)^2 &\leq \left(\sqrt{x^2 + y^2} - a_1\right)^2 + (d_1 - z)^2 \leq (a_2 + a_3)^2 \\ \rightarrow 25600 &\leq \left(\sqrt{x^2 + y^2} - 88\right)^2 + (126.5 - z)^2 \leq 211600 \quad (2)\end{aligned}$$

Tuy nhiên, nếu biểu diễn dưới dạng bất phương trình (2) thì ta sẽ khó hình dung về vùng không gian làm việc của robot. Do đó, để các bạn hiểu rõ hơn về điều này, ta sẽ tiến hành phân tích chuyển động của từng khâu trong robot qua các bước sau.

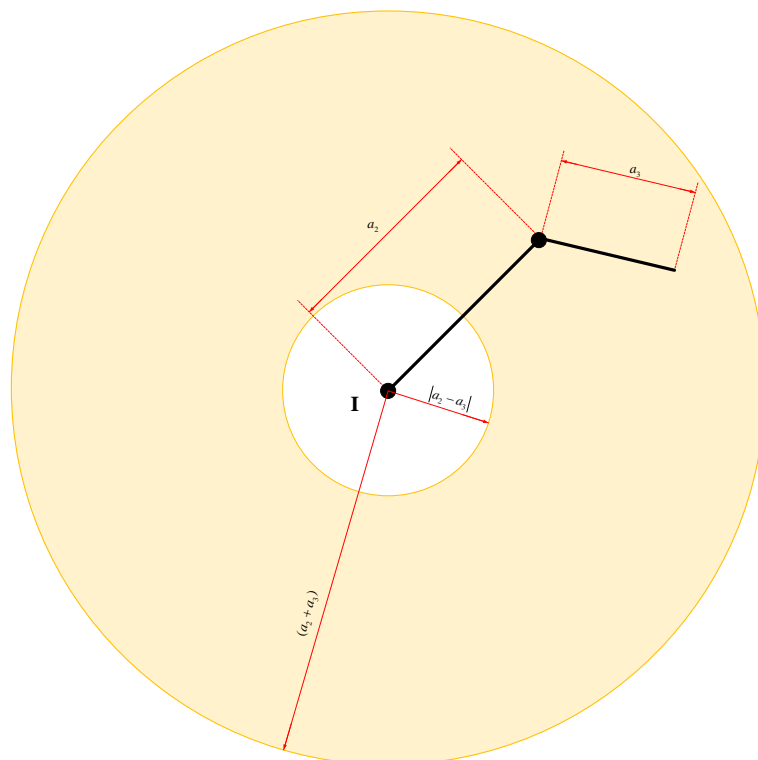
Đầu tiên, ta tách robot thành hai phần như hình dưới:



Hình 6. 1: Tách robot thành hai phần

Chọn hệ trục $\{0\}$ là hệ trục quy chiếu chung.

Xét cơ cấu bên phải, ta thấy rằng vùng làm việc của phần này giới hạn bởi một hình vành khăn với hai bán kính nhỏ $|a_2 - a_3|$ và bán kính lớn $(a_2 + a_3)$ với tâm $I(a_1; 0; d_1)$.

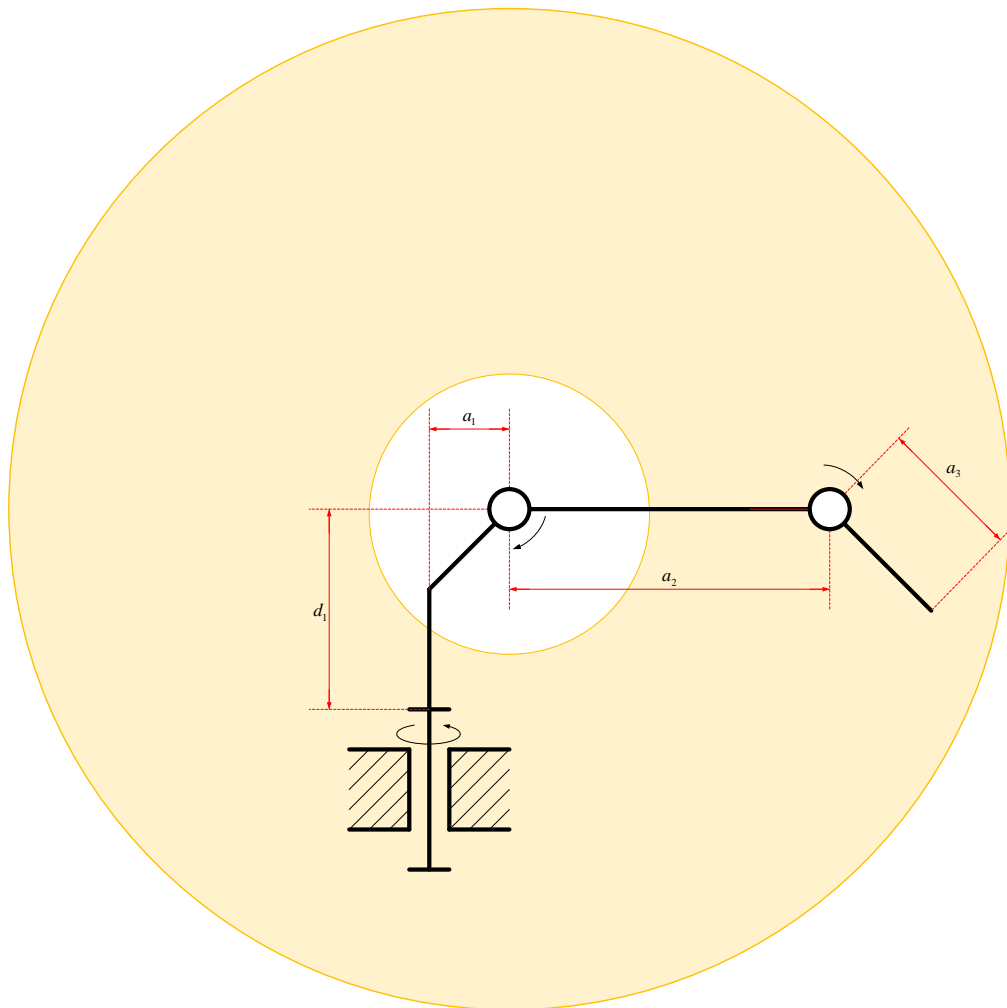


Hình 6. 2: Vùng làm việc của cơ cấu bên phải

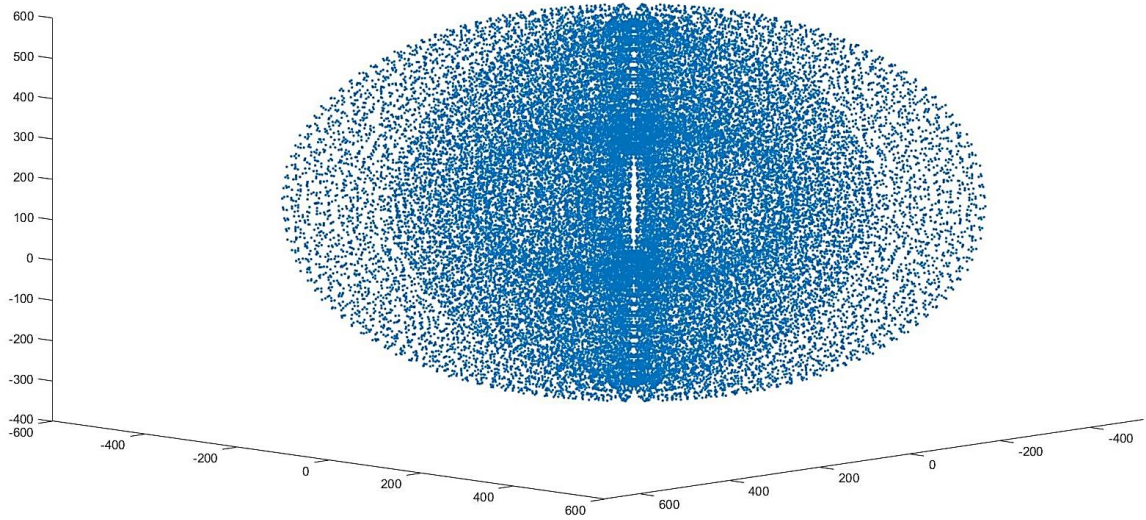
Bất phương trình vùng làm việc vành khăn:

$$\begin{aligned} (a_2 - a_3)^2 &\leq (x - a_1)^2 + (z - d_1)^2 \leq (a_2 + a_3)^2 \\ \rightarrow 25600 &\leq (x - 88)^2 + (z - 126.5)^2 \leq 211600 \quad (3) \end{aligned}$$

Tiếp đến, do ta thấy cơ cấu bên trái chỉ có chuyển động quay quanh trục z_0 nên ta có thể dễ dàng hình dung được vùng hoạt động của robot này chính là ta đem vùng vành khăn ở hình 6.2 quay quanh trục z_0 . Khi đó, ta sẽ có một khối tròn xoay được hình thành bởi mặt sinh là hình vành khăn (2) này.



Hình 6. 3: Vùng làm việc của robot trong mặt phẳng bất kỳ



Hình 6. 4: Vùng làm việc của robot trong không gian ba chiều

7. MA TRẬN JACOBIAN VÀ ĐIỂM KÌ DI CỦA ROBOT

7.1. Ma trận Jacobian:

Ma trận Jacobian về vận tốc dài:

Ta có vị trí của điểm cuối trên end-effector so với $\{0\}$:

$$p_E = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 [a_1 + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos \theta_2] \\ \sin \theta_1 [a_1 + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos \theta_2] \\ d_1 - a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - a_2 \sin \theta_2 \end{bmatrix}$$

Thực hiện tính đạo hàm với x, y, z, có:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -s_1 (a_1 + a_3 c_{23} + a_2 c_2) \dot{\theta}_1 - c_1 (a_3 s_{23} + a_2 s_2) \dot{\theta}_2 - a_3 c_1 s_{23} \dot{\theta}_3 \\ \dot{y} &= c_1 (a_1 + a_3 c_{23} + a_2 c_2) \dot{\theta}_1 - s_1 (a_3 s_{23} + a_2 s_2) \dot{\theta}_2 - a_3 s_1 s_{23} \dot{\theta}_3 \\ \dot{z} &= -(a_3 c_{23} + a_2 c_2) \dot{\theta}_2 - a_3 c_{23} \dot{\theta}_3 \end{aligned}$$

Ta có thể biểu diễn dưới dạng ma trận như sau:

$$\begin{aligned} V_{T,L} &= J_L \times V_J \\ \rightarrow \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -s_1 (a_1 + a_3 c_{23} + a_2 c_2) & -c_1 (a_3 s_{23} + a_2 s_2) & -a_3 c_1 s_{23} \\ c_1 (a_1 + a_3 c_{23} + a_2 c_2) & -s_1 (a_3 s_{23} + a_2 s_2) & -a_3 s_1 s_{23} \\ 0 & -(a_3 c_{23} + a_2 c_2) & -a_3 c_{23} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (4) \end{aligned}$$

Ma trận Jacobian về vận tốc góc:

Ta có:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & a_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & a_1 \sin \theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & -\sin \theta_3 & a_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 & a_3 \sin \theta_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Thực hiện tính toán vận tốc góc ${}^0\omega_3$ theo kiểu lan truyền theo công thức các tổng quát:

$${}^i\omega_i = {}^iR_{i-1} \left({}^{i-1}\omega_{i-1} + \dot{\theta}_i {}^{i-1}\hat{Z}_{i-1} \right)$$

$${}^0\omega_i = {}^0R_i {}^i\omega_i$$

Có:

$$\dot{\theta}_1 {}^0\hat{Z}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix}; \quad \dot{\theta}_2 {}^1\hat{Z}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}; \quad \dot{\theta}_3 {}^2\hat{Z}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix}.$$

Tính toán ta có:

$${}^0\omega_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad {}^1\omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad {}^2\omega_2 = \begin{bmatrix} -s_2\dot{\theta}_1 \\ -c_2\dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}; \quad {}^3\omega_3 = \begin{bmatrix} -s_{23}\dot{\theta}_1 \\ -(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \\ -c_{23}\dot{\theta}_1 \end{bmatrix}$$

$${}^0\omega_3 = {}^0R_3 {}^3\omega_3 = \begin{bmatrix} -s_1\dot{\theta}_2 - s_1\dot{\theta}_3 \\ c_1\dot{\theta}_2 + c_1\dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix}$$

Biểu diễn lại, có:

$$V_{T,A} = J_A \times V_J$$

$$\rightarrow \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -s_1 & -s_1 \\ 0 & c_1 & c_1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Ma trận Jacobian:

Như vậy, từ (4) và (5) ta có ma trận Jacobian như sau:

$$J = \begin{bmatrix} J_L \\ J_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_1(a_1 + a_3c_{23} + a_2c_2) & -c_1(a_3s_{23} + a_2s_2) & -a_3c_1s_{23} \\ c_1(a_1 + a_3c_{23} + a_2c_2) & -s_1(a_3s_{23} + a_2s_2) & -a_3s_1s_{23} \\ 0 & -a_3c_{23} - a_2c_2 & -a_3c_{23} \\ 0 & -s_1 & -s_1 \\ 0 & c_1 & c_1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Thực hiện các phép biến đổi sơ cấp để đơn giản hóa ma trận Jacobian, ta có:

$$J = \begin{bmatrix} a_1 + a_3c_{23} + a_2c_2 & 0 & 0 \\ 0 & -a_3c_{23} - a_2c_2 & -a_3c_{23} \\ 0 & c_1 & c_1 \end{bmatrix}$$

7.2. Điểm kỳ dị của robot:

Ta có:

$$\det(J) = \det \begin{pmatrix} a_1 + a_3c_{23} + a_2c_2 & 0 & 0 \\ 0 & -a_3c_{23} - a_2c_2 & -a_3c_{23} \\ 0 & c_1 & c_1 \end{pmatrix} =$$

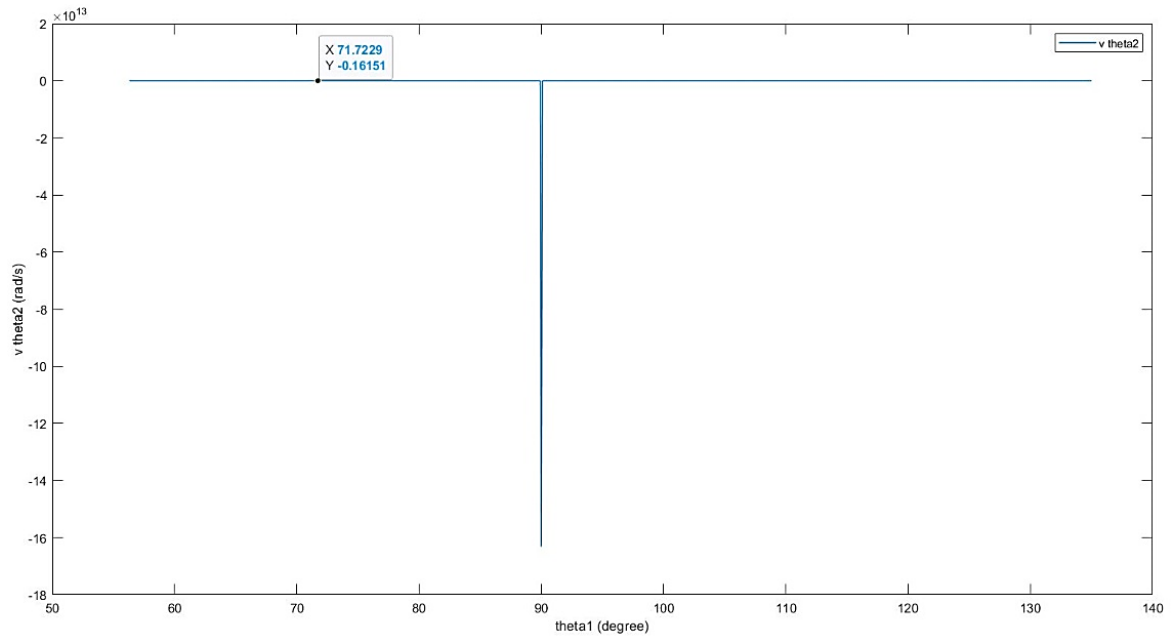
$$= c_1(a_2^2c_2^2 - a_1a_2c_2 - a_2a_3c_{23}c_2)$$

Điểm kỳ dị là nghiệm của phương trình $\det(J) = 0$, tức là:

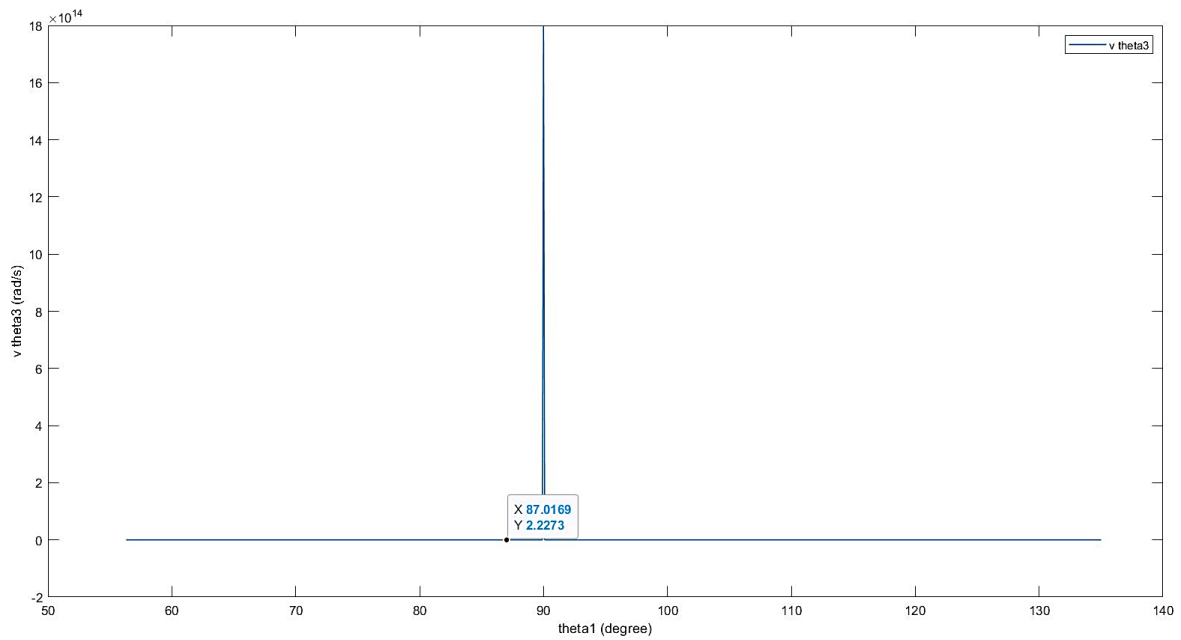
$$\cos \theta_1 (a_2^2 \cos^2 \theta_2 - a_1a_2 \cos \theta_2 - a_2a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_2) = 0 \quad (6)$$

Như vậy, điểm kỳ dị sẽ nằm ở biên của vùng không gian làm việc của robot, tại vị trí $\theta_1 = 90^\circ, 270^\circ$. Ngoài ra, robot còn có các điểm kỳ dị nằm trong vùng không gian làm việc với điều kiện θ_2, θ_3 thỏa phương trình (6).

Khi robot gần tiến đến những điểm kỳ dị này thì vận tốc của các góc khớp sẽ tăng lên đột ngột có thể dẫn đến quá tải, gây ra sai số và hư hỏng cho robot.



Hình 7. 1: Đồ thị thể hiện sự thay đổi của vận tốc góc khớp 2 dựa theo góc khớp 1



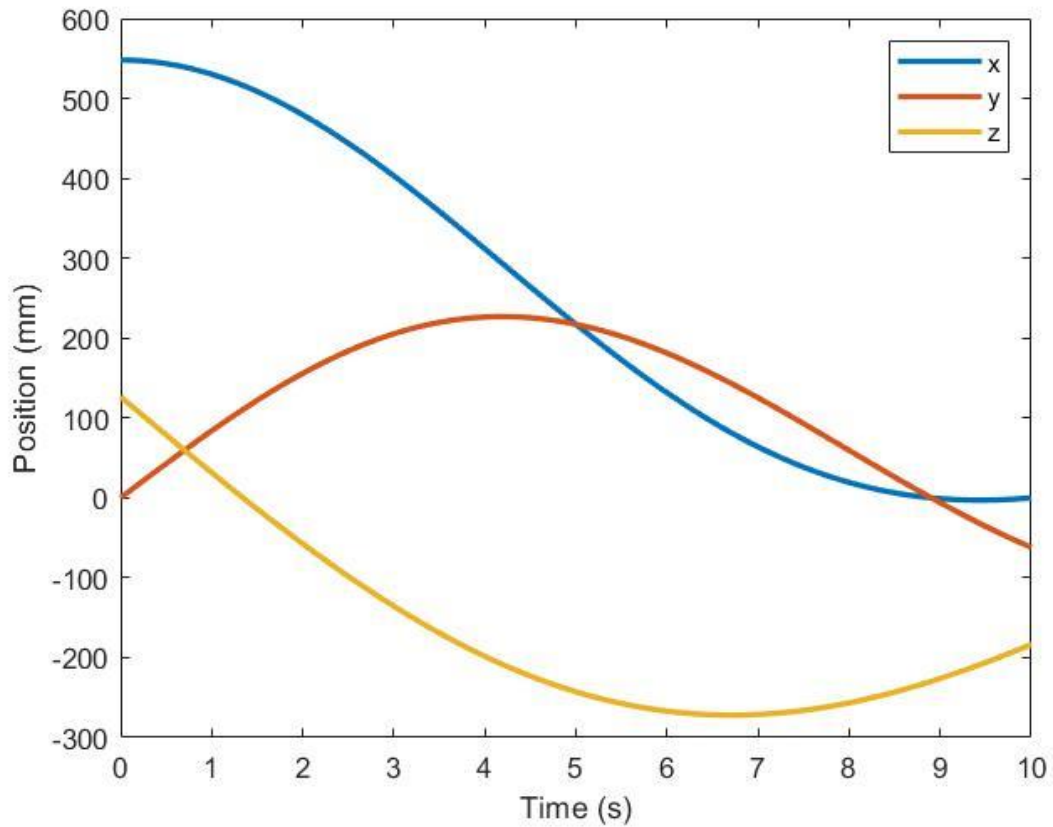
Hình 7. 2: Đồ thị thể hiện sự thay đổi của vận tốc góc khớp 3 dựa theo góc khớp 1

8. MÔ PHỎNG ROBOT

8.1. Mô phỏng bài toán động học thuận:

Sau đây, ta sẽ thực hiện mô phỏng bài toán động học thuận của robot qua việc đo tọa độ của đầu tool robot (điểm cuối end-effector) khi cho robot di chuyển từ vị trí $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3] = [0 \ 0 \ 0]^\circ$ đến vị trí $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3] = [90 \ 90 \ 90]^\circ$ trong khoảng thời gian là 10 giây.

Trước tiên, ta cần tính tọa độ x,y,z của đầu tool qua lý thuyết để sau này thực hiện kiểm tra với kết quả mô phỏng. Ta thực hiện code Matlab và thu được kết quả lý thuyết như sau:

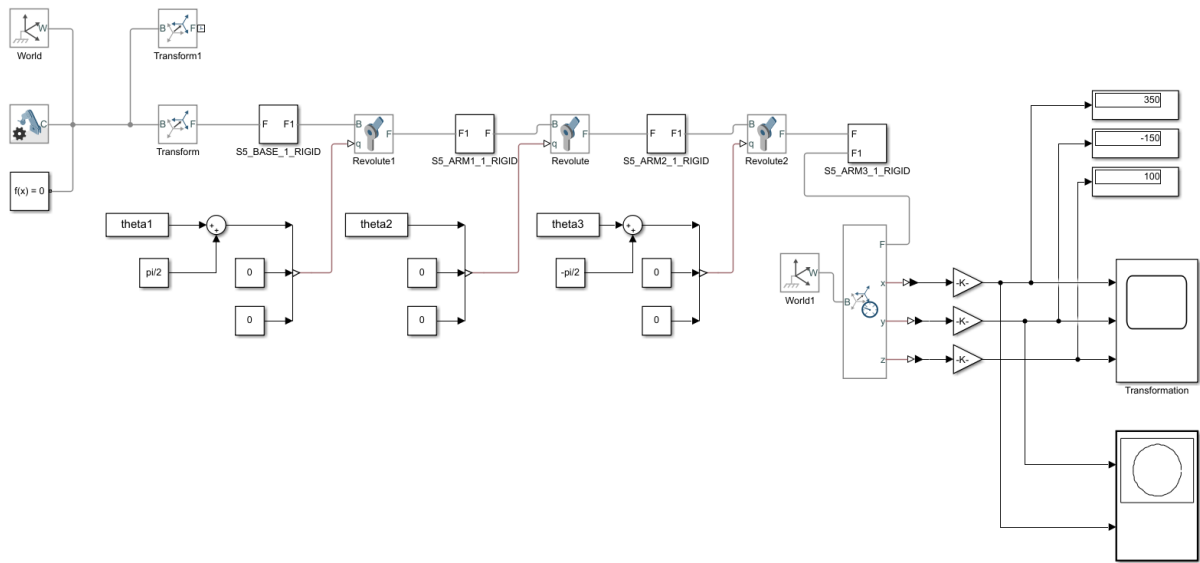


Hình 8. 1: Đồ thị thể hiện vị trí của đầu tool theo thời gian qua lý thuyết

	1 t	2 theta1	3 theta2	4 theta3	5 x	6 y	7 z
1	0	0	0	0	548	0	126.5000
2	0.1000	0.0157	0.0157	0.0157	547.8201	8.6058	116.9191
3	0.2000	0.0314	0.0314	0.0314	547.2809	17.1990	107.3441
4	0.3000	0.0471	0.0471	0.0471	546.3829	25.7668	97.7808
5	0.4000	0.0628	0.0628	0.0628	545.1277	34.2965	88.2350
6	0.5000	0.0785	0.0785	0.0785	543.5170	42.7757	78.7125
7	0.6000	0.0942	0.0942	0.0942	541.5532	51.1918	69.2192
8	0.7000	0.1100	0.1100	0.1100	539.2391	59.5326	59.7609
9	0.8000	0.1257	0.1257	0.1257	536.5783	67.7856	50.3432
10	0.9000	0.1414	0.1414	0.1414	533.5746	75.9389	40.9720
11	1	0.1571	0.1571	0.1571	530.2324	83.9806	31.6528
12	1.1000	0.1728	0.1728	0.1728	526.5567	91.8989	22.3913
13	1.2000	0.1885	0.1885	0.1885	522.5528	99.6823	13.1931
14	1.3000	0.2042	0.2042	0.2042	518.2265	107.3196	4.0638
15	1.4000	0.2199	0.2199	0.2199	513.5843	114.7997	-4.9913
16	1.5000	0.2356	0.2356	0.2356	508.6328	122.1119	-13.9666
17	1.6000	0.2513	0.2513	0.2513	503.3792	129.2458	-22.8569

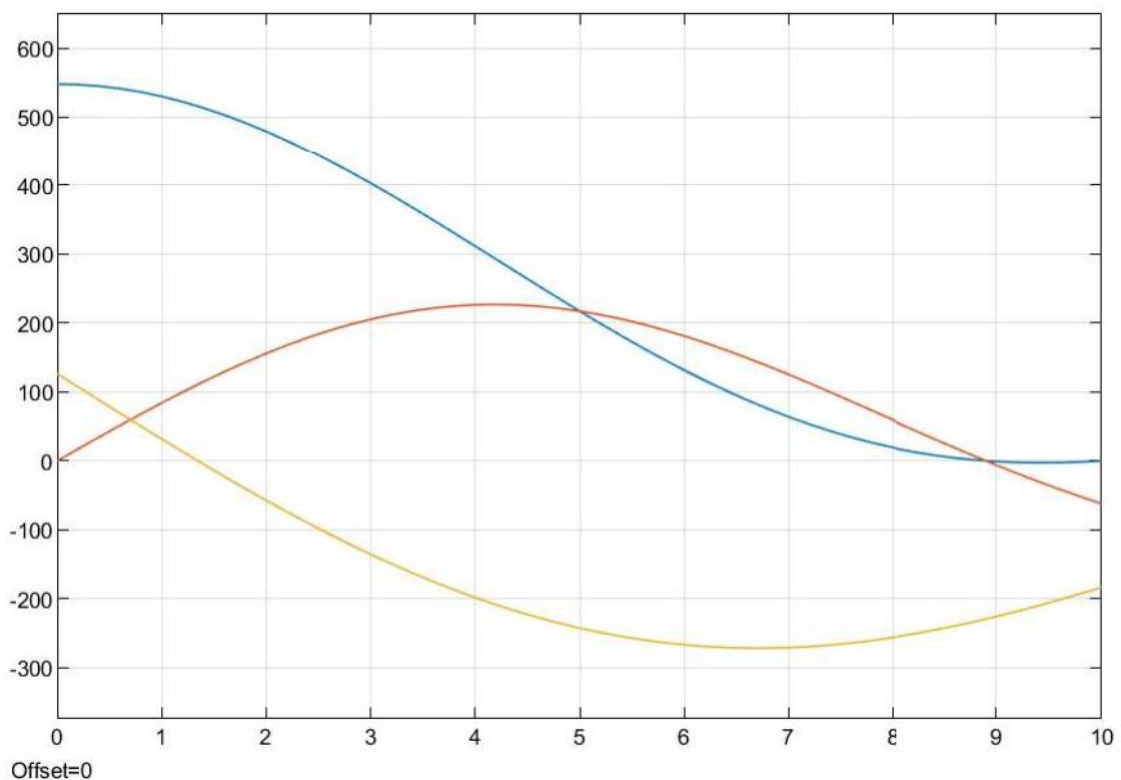
Hình 8. 2: Biến data trả về với ma trận thể hiện các thông số t, theta, positon qua mỗi lần lặp

Tiếp đến, ta thực hiện lắp các khối trong Matlab Simulink như hình:



Hình 8. 3: Lắp các khối trong Matlab Simulink cho bài toán động học thuận

Thực hiện code Matlab để chạy khởi tạo các biến θ_1 , θ_2 , θ_3 trong Matlab và chạy trong Matlab Simulink, ta có kết quả như sau:



Hình 8. 4: Đồ thị thể hiện vị trí của đầu tool qua mô phỏng

Video mô phỏng:

<https://drive.google.com/file/d/1A77vblzVisXtmX9gI2g3RfI510G845kI/view?usp=sharing>

Nhận xét kết quả:

Dựa vào kết quả của hai đồ thị ở hình 8.1 và hình 8.4, ta thấy rằng hình dạng x, y, z ở cả hai trường hợp tính toán lý thuyết và mô phỏng là giống nhau nên có thể kết luận rằng việc mô phỏng bài toán động học thuận là chính xác.

8.2. Mô phỏng bài toán động học ngược:

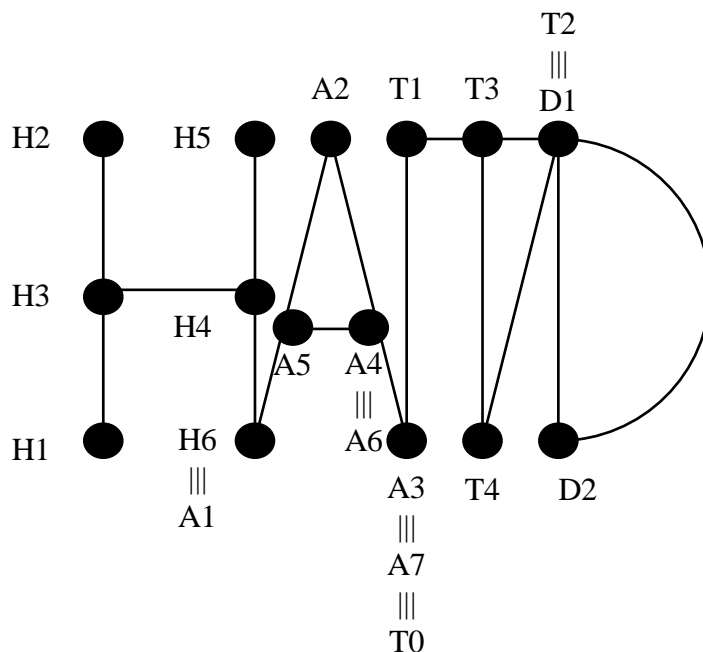
Tiếp theo, ta sẽ mô phỏng bài toán động học ngược của robot qua việc sử dụng đầu tool robot (điểm cuối end-effector) để thực hiện vẽ lần lượt 4 chữ cái đầu tiên của tên các thành viên trong nhóm (H-A-T-D).

Do robot có vùng không gian làm việc thỏa mãn bất phương trình (2) nên ta cũng thực hiện chọn các điểm nút cho các điểm trong chữ cái sao cho thỏa mãn (2). Ở đây, ta mong muốn robot thực hiện vẽ trên mặt phẳng $0x_0y_0$ nên ta chọn trước $z = 100$:

$$(a_2 - a_3)^2 \leq \left(\sqrt{x^2 + y^2} - a_1 \right)^2 + (d_1 - z)^2 \leq (a_2 + a_3)^2$$

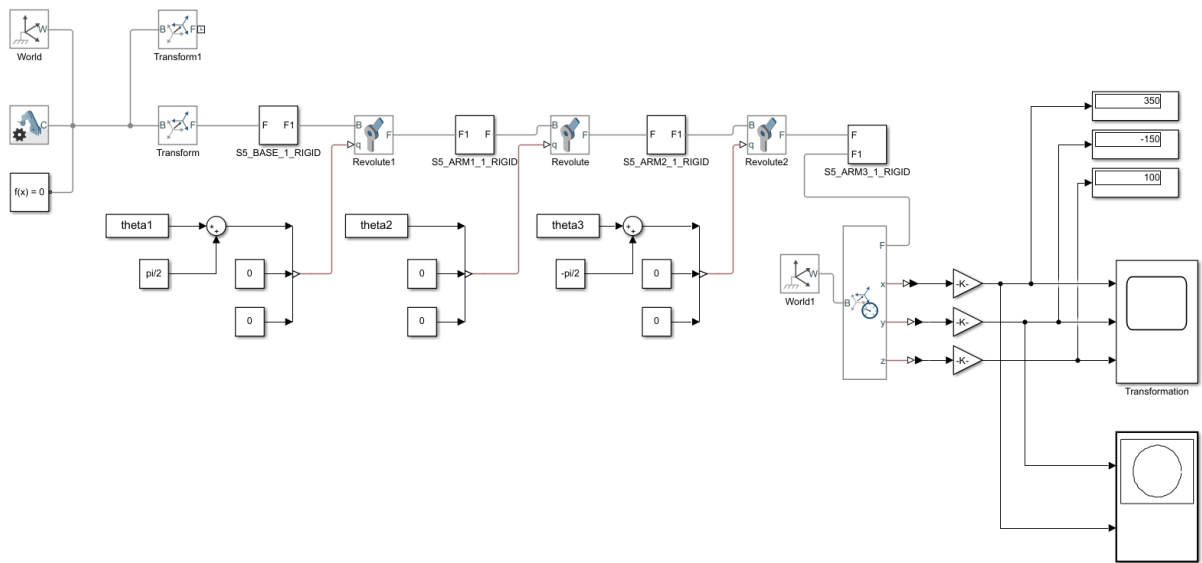
$$\rightarrow 25600 \leq \left(\sqrt{x^2 + y^2} - 88 \right)^2 + (126.5 - z)^2 \leq 211600$$

Tiếp đến, thực hiện chọn các điểm nút thỏa mãn bất phương trình trên qua hình sau:



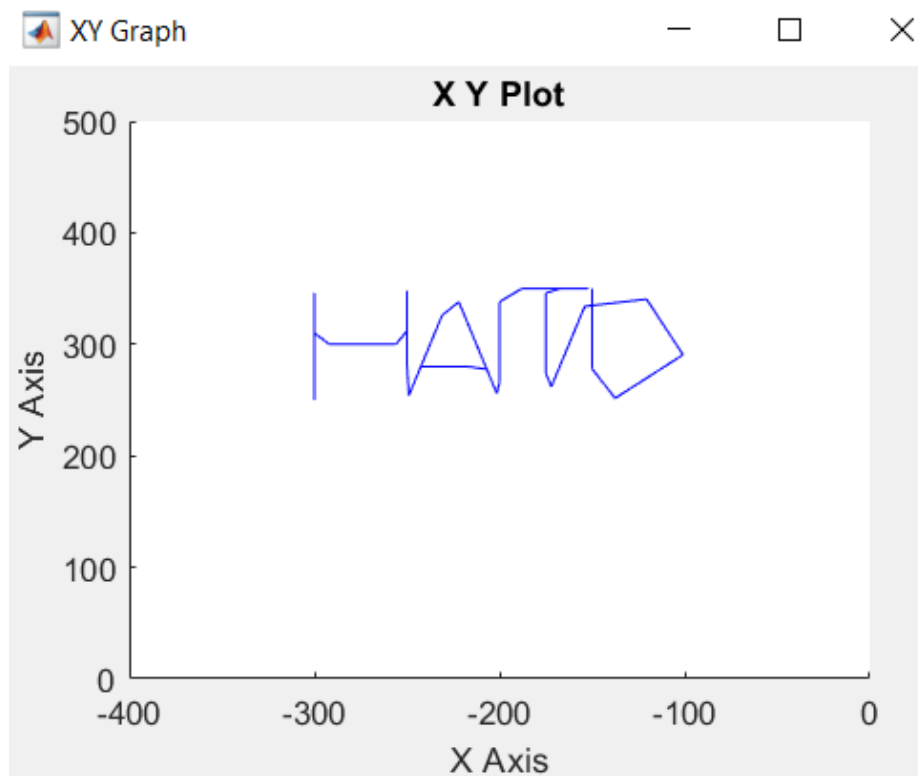
Hình 8. 5: Chọn các tọa độ điểm nút thích hợp

Thực hiện lắp các khối trong Matlab Simulink như sau:



Hình 8. 6: Lắp các khối trong Matlab Simulink cho bài toán động học ngược

Thực hiện nạp code để chạy khởi tạo các biến θ_1 , θ_2 , θ_3 trong Matlab và chạy trong Matlab Simulink, ta có kết quả như sau:



Hình 8. 7: Hiện thị kết quả mặt phẳng robot vẽ các ký tự




Video mô phỏng:

https://drive.google.com/file/d/1K6E_Vw30APA1QKCmWZ1VSyN3A1MdDzn3/view?usp=s_haring

Nhận xét kết quả:

Nhìn vào hình 8.7 cũng như video mô phỏng, ta thấy rằng robot khi thực hiện vẽ các ký tự chưa thực sự “mượt mà”, ta thấy các đường vẽ có một số vị trí bị cong, méo làm biến dạng chút ít về hình dạng chữ nhưng tổng quan thì vẫn có thể nhìn rõ được các ký tự H,A,T,D. Điều này có thể lý giải là do sự quá tải khi xử lý các bộ biến θ_1 , θ_2 , θ_3 qua hai quá trình xử lý là rời rạc hóa và tính toán góc θ .

Khi ta thực hiện rời rạc hóa với độ chia nhỏ cho mỗi đường đi của robot thì số lượng kết quả trả về là rất nhiều và qua nhiều đường đi cho cả 4 ký tự trên thì số hàng trong các ma trận θ_1 , θ_2 , θ_3 là 3601.

	θ_1	<i>3601x2 double</i>
	θ_2	<i>3601x2 double</i>
	θ_3	<i>3601x2 double</i>

Hình 8. 8: Sai lệch do quá trình rời rạc hóa

Và trong việc tính toán mỗi bộ số θ_1 , θ_2 , θ_3 trong mỗi vòng lặp cũng chứa nhiều hàm toán học phức tạp như atan2 , sqrt ,... ta đã thấy qua các công thức tính θ_1 , θ_2 , θ_3 trong phần 5. Việc này cũng dẫn đến quá tải khối lượng xử lý trong Matlab dẫn đến sau 3601 vòng lặp thì xuất hiện sai lệch trong việc vẽ các ký tự.

BẢNG PHÂN CHIA CÔNG VIỆC NHÓM

STT	MSSV	Họ tên	Công việc thực hiện
1	1910758	Ngô Huỳnh Anh	<ul style="list-style-type: none"> - Tính toán động học vận tốc. - Mô phỏng bài toán động học ngược bằng Matlab. - Soạn báo cáo Powerpoint.
2	2033135	Nguyễn Mạnh Điền	<ul style="list-style-type: none"> - Giới thiệu về robot. - Đặt các hệ tọa độ cho robot.
3	1711557	Trần Nguyễn Khánh Huy	<ul style="list-style-type: none"> - Tính toán động học thuận. - Soạn báo cáo Word.
4	1910678	Chu Thanh Tùng	<ul style="list-style-type: none"> - Tính toán động học ngược. - Quy hoạch vùng làm việc của robot. - Mô phỏng bài toán động học thuận bằng Matlab.