

LỜI CẢM ƠN

Đề tài tốt nghiệp này đã được bản thân em lên ý tưởng và bắt đầu tìm hiểu từ tháng 6 năm 2017, đến nay khi hoàn thành đã qua gần một năm. Tại đây, em xin bày tỏ lòng cảm ơn chân thành đến thầy hướng dẫn TS. **Phạm Hoàng Vương** đã tận tình hướng dẫn và định hướng giúp em hoàn thành đề tài này trong suốt thời gian qua.

Em xin chân thành cảm ơn các thầy cô trong Bộ môn Kỹ thuật máy, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông vận tải đã tận tình chỉ bảo và tạo điều kiện thuận lợi cho em trong suốt bốn năm học tập và rèn luyện trên giảng đường Đại học. Bên cạnh đó, em cũng xin bày tỏ lòng biết ơn chân thành đến các thầy cô bồi dưỡng các đội tuyển Olympic: TS. Nguyễn Thế Vinh (Bộ môn Toán giải tích), TS. Đinh Thị Thanh Huyền (Bộ môn Kỹ thuật máy), TS. Lê Thị Hà (Bộ môn Cơ lý thuyết), những người đã tận tình bồi dưỡng em tham gia các cuộc thi Olympic sinh viên trong thời gian qua, nhờ đó bản thân em đã có thêm những kiến thức và trải nghiệm bổ ích thời sinh viên.

Cuối cùng em xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến Gia đình và người thân, nơi đã cho em được yêu thương và thêm trân trọng những giá trị của lao động trong cuộc sống. Cùng với đó là những người bạn tuyệt vời đã cùng em học tập, phấn đấu, chia sẻ những khó khăn và động viên giúp em vững bước trên chặng đường vừa qua.

Hà Nội, ngày.....tháng.....năm.....

Sinh viên

Nguyễn Văn Thành

TÓM TẮT

Trong ngành sản xuất hiện đại ngày nay, Robot đang ngày càng giữ một vai trò quan trọng góp phần nâng cao năng suất và chất lượng cho sản phẩm, đồng thời thay thế con người trong các công việc nặng nhọc, độc hại, đôi khi là nhảm chán. Bên cạnh những Robot dạng chuỗi (Serial Robots) đang được ứng dụng rất thành công trong công nghiệp với khả năng linh hoạt và không gian làm việc lớn, các Robot song song (Parallel Robots) tuy ra đời muộn hơn từ những năm 1980 nhưng nhờ thiết kế độc đáo mang lại nhiều ưu điểm nổi trội so với Robot chuỗi nên ngày nay chúng cũng đã được ứng dụng rất thành công trong nhiều lĩnh vực từ sản xuất, công cụ đến y tế giúp thay thế và hỗ trợ con người trong một số công việc cụ thể.

Với mục đích tìm hiểu những nguyên lý cơ bản của Robot song song, từ cơ cấu, động học, động lực học đến điều khiển, em đã quyết định thực hiện đề tài tốt nghiệp “**Tính toán động lực học và mô phỏng chuyển động Robot song song Delta ba bậc tự do**” dưới sự hướng dẫn của TS. **Phạm Hoàng Vương**. Các Robot với cấu trúc song song là các cơ hệ phức tạp với nhiều vòng động học, nhiều khâu nhiều khớp ràng buộc đan xen nhau, việc phân tích động học cũng như động lực học Robot do vậy dẫn đến những phương trình phi tuyến khá phức tạp. Với sự trợ giúp của máy tính đề tài đã thực hiện giải được các kết quả tính toán và mô phỏng động học và động lực học Robot, đặc biệt đã sử dụng kỹ thuật mô phỏng chuyển động Robot giúp quan sát trực quan hoạt động và đánh giá tính đúng đắn các kết quả tính toán. Nội dung của đề tài bao gồm năm chương sau:

Chương 1: Tổng quan về Robot song song

Chương 2: Động học Robot.

Chương 3: Động lực học Robot.

Chương 4: Mô phỏng chuyển động Robot.

Chương 5: Điều khiển Robot.

Em xin cam đoan đây là đề tài do bản thân tự thực hiện dưới sự hướng dẫn của thầy TS. **Phạm Hoàng Vương** và tham khảo các tài liệu trong và ngoài nước, những tài liệu tham khảo này đã được trích dẫn và liệt kê trong mục tài liệu tham khảo.

MỤC LỤC

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ ROBOT SONG SONG	1
1.1. Lịch sử phát triển và ứng dụng.	1
1.2. Robot song song Delta trên thị trường thương mại.	4
1.3. Một số biến thể của Robot song song Delta.....	8
1.4. Giới thiệu Robot song song Hornet 565 của hãng Adept	10
CHƯƠNG 2: PHÂN TÍCH ĐỘNG HỌC ROBOT SONG SONG DELTA.....	14
2.1. Sơ đồ động học Robot.....	14
2.2. Phân tích động học Robot song song bằng phương pháp Denavit-Hartenberg ..	16
2.3. Phân tích động học Robot song song Delta bằng phương pháp hình học ..	19
2.4. Phân tích động học thuận Robot song song Delta	20
2.5. Phân tích động học ngược Robot.	22
CHƯƠNG 3: ĐỘNG LỰC HỌC ROBOT.....	24
3.1. Bài toán động lực học Robot song song Delta.....	24
3.2. Phương trình Lagrange dạng nhân tử cho hệ vật rắn chịu liên kết Holonom.	25
3.3. Phân tích động lực học Robot song song Delta sử dụng phương trình Lagrange dạng nhân tử.	27
3.4. Các kết quả tính toán số bài toán động lực học ngược Robot song song Delta..	31
CHƯƠNG 4: MÔ PHỎNG CHUYÊN ĐỘNG ROBOT.....	34
4.1. Giới thiệu công cụ Simscape Multibody.....	34
4.2. Xây dựng mô hình mô phỏng Robot song song Delta bằng công cụ Simscape Multibody	36
4.3. Mô phỏng chuyên động Robot.....	40
4.3.1. Quỹ đạo đường tròn	40
4.3.2. Quỹ đạo hình chữ U.....	44
4.3.3. Quỹ đạo dạng đường thẳng.....	47
4.4. Tính toán động lực học bằng công cụ Simscape Multibody.....	52
CHƯƠNG 5: ĐIỀU KHIỂN ROBOT.	54
5.1. Hệ thống điều khiển tay máy song song	54
5.2. Mô hình mô phỏng điều khiển từng chuỗi động Robot song song Delta.	56
5.3. Mô hình vật lí đối tượng điều khiển.....	57

5.4. Mô phỏng bộ điều khiển PD từng khớp độc lập Robot.	59
5.4.1. Điều khiển PD vị trí từng khớp độc lập.....	59
5.4.2. Điều khiển PD bám quỹ đạo.....	63
KẾT LUẬN	70
TÀI LIỆU THAM KHẢO	71
PHỤ LỤC	73

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình 1.1. GS. Reymond Clavel và Sơ đồ cấu trúc Robot Delta	1
Hình 1.2. Lược đồ cơ cấu Robot song song Delta	2
Hình 1.3. Robot song song ứng dụng trong dây truyền đóng gói sản phẩm	3
Hình 1.4. Robot Delta của hãng Hitachi Seiki thực hiện chức năng nâng đặt và khoan và ứng dụng cơ cấu song song trong nâng đỡ các thiết bị y tế	4
Hình 1.5. Robot Line-Placer của hãng Demaurex	4
Hình 1.6. Cơ cấu thị trường Robot công nghiệp năm 2012 [13]	6
Hình 1.7. Robot song song Kawasaki YF03N và ABB IRB 360 FlexPicker	7
Hình 1.8. Robot Quattro s650 của hãng Adept	7
Hình 1.9. Cấu tạo bàn máy động Robot Quattro s560 của hãng Adept	8
Hình 1.10. Robot FANUC M3-Series	8
Hình 1.11. Robot song song Clavel, Robot song song ở đại học Maryland và Robot NUWAR	9
Hình 1.12. Robot song song dẫn động khớp trượt với phương trượt nằm ngang và 3 trực tiếp giao	10
Hình 1.13. Robot song song dẫn động khớp trượt với phương trượt song song thẳng đứng và phương trượt nghiêng đồng quy	10
Hình 1.14. Robot song song Hornet 565 của hãng adept	11
Hình 1.15. Mô hình khâu chủ động của Robot Hornet 565	12
Hình 1.16. Mô hình tay nối của Robot Hornet 565	12
Hình 1.17. Mô hình bàn máy động của Robot Hornet 565	13
Hình 1.18. Vùng không gian làm việc của Robot Hornet 565	13
Hình 2.1. Sơ đồ động học Robot song song Delta	15
Hình 2.2. Mô hình Simulink khảo sát động học thuận Robot Delta	21
Hình 2.3. Chuyển vị của bàn máy động theo các trực tọa độ	21
Hình 2.4. Đường di chuyển của bàn máy động trong không gian	22
Hình 3.1. Sơ đồ động học cơ cấu bốn khâu bắn lè	25
Hình 3.2. Các thành phần khối lượng và quán tính Robot song song Delta	27

Hình 3.3. Đồ thị momen ngẫu lực tác động trên các khâu chủ động.....	32
Hình 3.4. Đồ thị góc quay các khâu chủ động.....	32
Hình 3.5. Đồ thị công suất tác động trên các khâu chủ động	33
Hình 4.1. Ví dụ mô phỏng Robot với công cụ Simscape Multibody.	35
Hình 4.2. Ví dụ mô trường mô phỏng chuyển động của Robot	35
Hình 4.3. Ví dụ tính toán momen tại các khớp động của Robot.	36
Hình 4.4. Mô hình lắp ghép Robot trong môi trường Assembly của Solidworks.....	36
Hình 4.5. Mô hình thay thế tương đương tại vị trí khớp cầu.....	37
Hình 4.6. Xuất file .xml và .step trong môi trường assembly của Solidworks.....	37
Hình 4.7. Mô hình Simulink mô phỏng chuyển động Robot.....	38
Hình 4.8. Khối mở rộng của bàn máy cố định (Base)	39
Hình 4.9. Mô hình mô phỏng chuyển động của Robot theo quỹ đạo đường tròn.	41
Hình 4.10. Hình ảnh mô phỏng chuyển động của Robot theo quỹ đạo đường tròn....	42
Hình 4.11. Quỹ đạo chuyển động đường tròn của bàn máy động trong không gian....	42
Hình 4.12. Chuyển động của bàn máy động theo các trục trong không gian.....	43
Hình 4.13. Chuyển động của khâu chủ động ứng với quỹ đạo đường tròn.....	43
Hình 4.14. Sơ đồ mô phỏng chuyển động của Robot theo quỹ đạo hình chữ U	45
Hình 4.15. Quỹ đạo thiết kế hình chữ U cho bàn máy động.	45
Hình 4.16. Chuyển vị, vận tốc và gia tốc theo các trục tọa độ của bàn máy động theo quỹ đạo hình chữ U	46
Hình 4.17. Góc quay, vận tốc và gia tốc của các biến khớp chủ động với quỹ đạo hình chữ U	46
Hình 4.18. Đồ thị chuyển vị, vận tốc và gia tốc bàn máy động theo thời gian với quỹ đạo đường thẳng.....	48
Hình 4.19. Quỹ đạo chuyển động đường thẳng của bàn máy động trong không gian. 49	49
Hình 4.20. Góc quay, vận tốc và gia tốc của khâu chủ động ứng với quỹ đạo đường thẳng.....	49
Hình 4.21. Đường di chuyển của bàn máy động vẽ hình chữ E trong mặt phẳng.....	50
Hình 4.22. Đồ thị chuyển vị, vận tốc và gia tốc của bàn máy động với quỹ đạo hình chữ E.....	51

Hình 4.23. Đồ thị góc quay, vận tốc và gia tốc của khâu chủ động với quỹ đạo hình chữ E.....	51
Hình 4.24. Cửa sổ Mechanism Configuration thiết lập gia tốc trọng trường cho mô hình mô phỏng Robot và cửa sổ cấu hình khớp quay nối giữa bàn máy cố định và khâu chủ động.	52
Hình 4.25. Mô hình mô phỏng và tính toán động lực học Robot	53
Hình 4.26. Kết quả tính toán momen tại khớp chủ động bằng công cụ Simscape Multibody	53
Hình 5.1. Sơ đồ hệ thống điều khiển Robot Hexapod 6 bậc tự do [6].....	55
Hình 5.2. Sơ đồ cấu trúc điều khiển cho Hexapod [7].....	55
Hình 5.3. Sơ đồ điều khiển Robot song song ba bậc tự do.....	56
Hình 5.4. Mô hình động lực điều khiển một chuỗi động của Robot.	57
Hình 5.5. Mô hình động cơ điện một chiều kích từ bằng nam châm vĩnh cửu	58
Hình 5.6. Sơ đồ khói mô hình toán học động cơ điện một chiều	59
Hình 5.7. Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển PD.	60
Hình 5.8. Sơ đồ mô phỏng điều khiển PD từng khớp độc lập điều khiển vị trí của Robot.	61
Hình 5.9. Đáp ứng bước nhảy góc quay của khâu chủ động với BĐK PD.	62
Hình 5.10. Sai số điều khiển đáp ứng bước với BĐK PD.	62
Hình 5.11. Tín hiệu điều khiển với đáp ứng bước BĐK PD	63
Hình 5.12. Sơ đồ Simulink mô phỏng bộ điều khiển PD cho nhiệm vụ bám quỹ đạo.64	
Hình 5.13. Đáp ứng góc quay của khâu chủ động.....	65
Hình 5.14. Sai số điều khiển với bộ điều khiển PD cho nhiệm vụ bám quỹ đạo	65
Hình 5.15. Tín hiệu điều khiển đặt lên động cơ với nhiệm vụ bám quỹ đạo.	66
Hình 5.16. Chuyển vị của bàn máy động theo trục Ox.....	66
Hình 5.17. Chuyển vị của bàn máy động theo trục Oy.....	67
Hình 5.18. Chuyển vị của bàn máy động theo trục Oz.....	67
Hình 5.19. Sai số quỹ đạo theo các trục tọa độ.....	68
Hình 5.20. Quỹ đạo mong muốn và đường chuyển động thực của bàn máy động trong không gian.	68

- Hình 5.21.** Đáp ứng góc quay của khâu chủ động với $K_P = 200, K_D = 5$ 69
Hình 5.22. Đáp ứng góc quay khâu chủ động khi $K_P = 300, K_D = 2$ 69

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

- Bảng 1.1.** Một số thông số kĩ thuật của Robot Hornet 565 11
Bảng 2.1. Các kích thước động học của Robot 16
Bảng 5.1. Các thông số động cơ điện một chiều 59

DANH MỤC CÁC KÍ HIỆU VÀ TỪ VIẾT TẮT

Kí hiệu, từ viết tắt	Ý nghĩa
$c\varphi$	$\cos\varphi$
$s\varphi$	$\sin\varphi$
BĐK	Bộ điều khiển
PD	Proportional-Derivative, khâu tỉ lệ - vi phân

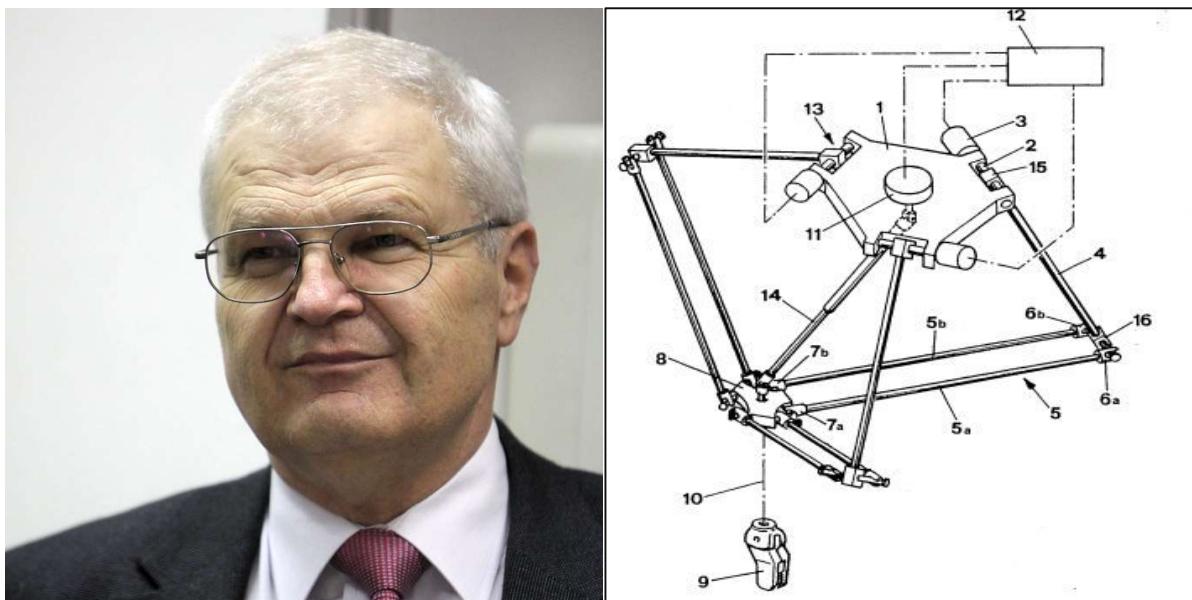
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ ROBOT SONG SONG

Tóm tắt:

Kể từ khi ra đời vào những năm 1980, đến nay Robot song song Delta và các biến thể của nó đã đạt được nhiều thành công trong các ứng dụng phục vụ sản xuất công nghiệp và các lĩnh vực khác trong cuộc sống. Chương này trình bày một số nét khái quát về lịch sử phát triển của Robot song song Delta, một số ứng dụng điển hình trong thực tế của mẫu Robot này cũng như các biến thể của nó. Bên cạnh đó một mẫu Robot song song thương mại được sử dụng trong mô phỏng cũng được giới thiệu khái quát các đặc tính kỹ thuật trong nội dung này.

1.1. Lịch sử phát triển và ứng dụng.

Robot Delta được phát minh lần đầu tiên vào đầu những năm 1980 bởi **Reymond Clavel** (Giáo sư tại EPFT – École Polytechnique Fédérale de Lausanne – Đại học Bách khoa liên bang Lausanne, Thụy Sĩ) dựa trên nguyên lý của cơ cấu hình bình hành để tổng hợp một thiết kế cơ cấu với ba bậc tự do là ba chuyển động tịnh tiến trong không gian cùng một bậc tự do quay của khâu thao tác.. Trước đó khái niệm robot có cấu trúc song song đã được Gough và Whitehall đưa ra vào năm 1962 và các ứng dụng đầu tiên của nó được sử dụng để xây dựng một phòng tập lái máy bay dựa trên cơ cấu song song được xây dựng bởi Stewart vào năm 1965. Tuy vậy sáng chế của GS. Reymond Clavel là hoàn toàn mới và sáng tạo, không bắt chước các cơ cấu song song được trình bày ở các bài báo trước đó. Phát minh của ông được cấp bằng sáng chế số 4,976,582 của Hoa Kì với tên là “*Device for the movement and positioning of an element in space*”.



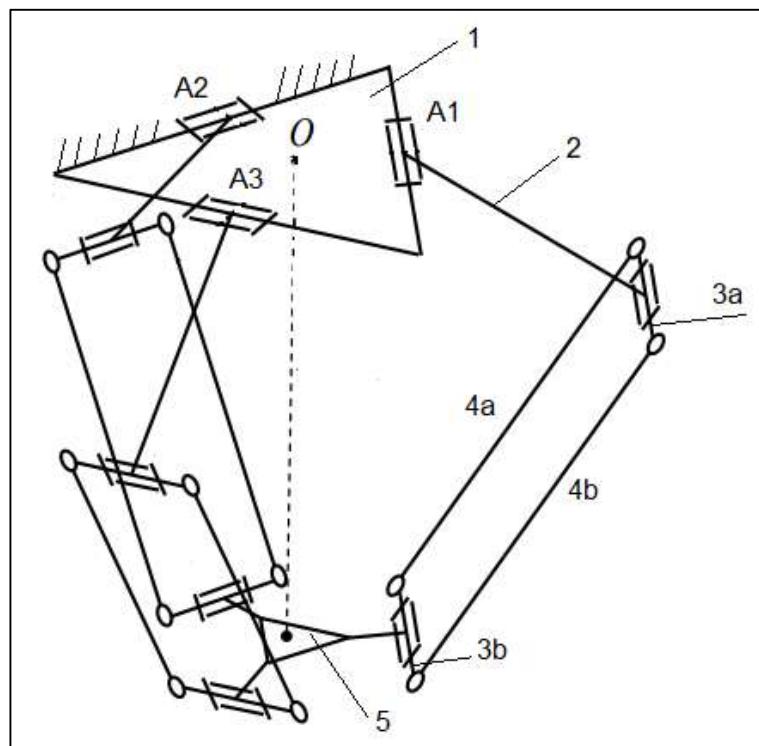
Hình 1.1. GS. Reymond Clavel và Sơ đồ cấu trúc Robot Delta

Thiết bị bao gồm phần tử giá (1) và bàn chuyển động (8). Ba tay điều khiển (4) được gắn cứng tại các điểm đầu (15) trên ba trục quay (2). Ba cụm lắp, mỗi cụm được tạo bởi trục (2), tay (4) là các bộ phận dẫn động của ba cụm phát động (13) với động cơ (3)

được gắn trên giá (1). Đầu còn lại (16) của ba tay điều khiển (4) được nối với bàn chuyển động (8) thông qua hai tay nối (5a, 5b) được nối với đầu (16) của tay điều khiển. Đầu còn lại của thanh nối (5a, 5b) được nối với bàn chuyển động. Phương và hướng trong không gian của bàn chuyển động được duy trì không đổi với mọi chuyển động của ba tay điều khiển. Bàn chuyển động hỗ trợ một bộ phận thao tác trong đó chuyển động quay được điều khiển bởi động cơ (11) được gắn cố định trên đế. Một tay duỗi (14) được dùng để kết nối động cơ (11) và bộ phận thao tác. Các động cơ (3) và (11) được điều khiển bởi bộ điều khiển (12).

- Theo US Patent number 4,976,582.-

Mẫu chốt trong thiết kế của Robot song song Delta đó là việc sử dụng các cơ cấu hình bình hành để duy trì sự định hướng trong không gian của bàn máy động.



Hình 1.2. Lược đồ cơ cấu Robot song song Delta

1: Bàn máy cố định

4a, 4b : Tay nối

2: Tay chủ động

5 : Bàn máy động

3a,3b: Đầu nối

Theo lược đồ cơ cấu Robot **Hình 1.2**, cụm các khâu 3a, 3b, 4a, 4b tạo thành một cơ cấu hình bình hành. Do đó trong quá trình chuyển động các đầu nối 3a và 3b luôn có phương song song với nhau. Các đầu nối 3a luôn song song với mặt phẳng ($A_1A_2A_3$) trên bàn máy cố định nên các đầu nối 3b cũng có phương song song với ($A_1A_2A_3$). Mặt phẳng bàn máy động chứa các đầu nối 3b nên trong quá trình chuyển động bàn máy động luôn giữ phương song song với mặt phẳng ($A_1A_2A_3$) trên bàn máy cố định.

Mục tiêu ban đầu của GS.R. Clavel là phát triển một mẫu robot công nghiệp phục vụ sản xuất với nhiệm vụ đóng gói sản phẩm với đối tượng tác động là những sản phẩm socola [13] có khối lượng nhỏ (khoảng 10-35 g) và yêu cầu làm việc với tốc độ rất cao (gấp-đặt 3 sản phẩm trong 1s) qua đó giúp thay thế nhân công cho nhiệm vụ lặp lại nhảm chán này. GS. Clavel đã rất sáng tạo, đột phá với sáng chế này và sự ra đời của Robot song song Delta đã phát triển một loại Robot công nghiệp mới. Từ phát minh ban đầu này, rất nhiều các mẫu thiết kế Robot song song về sau đã được phát triển nhằm đáp ứng những yêu cầu kỹ thuật cao hơn phục vụ các ứng dụng khác nhau trong công nghiệp và nghiên cứu.

Kết cấu của Robot song song Delta có nhiều điểm đặc biệt tạo nên những ưu điểm lớn của nó so với các Robot dạng chuỗi (Serial Robots). Các khâu động có kết cấu nhỏ gọn, đơn giản, khâu nối hình bình hành chỉ truyền lực dọc trực nên kết cấu có thể thiết kế với khối lượng nhẹ giúp giảm thiểu đáng kể ảnh hưởng của lực quán tính phát sinh trong quá trình chuyển động. Điều này đặc biệt hữu ích giúp Robot có thể đạt được tốc độ làm việc lớn, gia tốc có thể rất lớn (có thể đạt 50G trong phòng thí nghiệm và 12G trong các ứng dụng công nghiệp [15]). Đồng thời với cấu trúc đặc biệt với ba mạch động học kín cùng nối với bàn máy động, các động cơ đều được gắn cố định trên giá nén tải trọng được phân bổ đều cho cả ba chân qua đó giúp giảm yêu cầu về công suất, momen của động cơ. Cũng với thiết kế đặc biệt này mà các cơ cấu song song còn được ứng dụng trong việc chế tạo các thiết bị mô phỏng chuyển động với tải trọng có thể lên đến hàng tấn [20] điều mà các Robot chuỗi không có khả năng thực hiện. Nhược điểm lớn nhất của loại Robot này có lẽ là sự hạn chế trong không gian thao tác [12]. Vùng không gian này là giao của 3 mặt cầu và thường được thiết kế có dạng hình ống trụ với đường kính khoảng trên 1m, chiều cao có thể đạt từ 0.2 đến 0.3m.

Với những đặc điểm trên Robot song song Delta được ứng dụng nhiều nhất trong các công việc đóng gói, phân loại sản phẩm với khối lượng nhỏ (thường dưới 1kg).



Hình 1.3. Robot song song ứng dụng trong dây truyền đóng gói sản phẩm

Ngoài ra một số robot khác còn được ứng dụng trong một số nhiệm vụ như nâng đỡ thiết bị hay gia công cơ khí, mô phỏng các cơ cấu chuyển động...



Hình 1.4. Robot Delta của hãng Hitachi Seiki thực hiện chức năng nâng đỡ và khoan (trái) và ứng dụng cơ cấu song song trong nâng đỡ các thiết bị y tế (phải).

1.2. Robot song song Delta trên thị trường thương mại.

Câu chuyện thương mại của Robot Delta bắt đầu vào năm 1983 khi mà hai anh em người Thụy Sỹ là Marc-Oliver và Pascal Demaurex thành lập công ty đóng tại Romanel sur Lausanne, Thụy Sỹ. Đến năm 1987 họ mua giấy phép sử dụng bản quyền Robot Delta và đặt mục tiêu thương mại hóa Robot này vào thị trường công nghiệp đóng gói. Sau vài năm Demaurex đã thành công trong việc giữ vai trò trọng yếu trong thị trường mới mẻ này, đồng thời họ cũng tiến hành cải tiến sản phẩm của họ. Đã có bốn phiên bản khác nhau được đưa ra thị trường với tên gọi là Pack-Placer, Line-Placer, Top-Placer và Presto. Đến hiện nay Demaurex tuyên bố đã bán được hơn 500 Robot Delta trên toàn thế giới.



Hình 1.5. Robot Line-Placer của hãng Demaurex

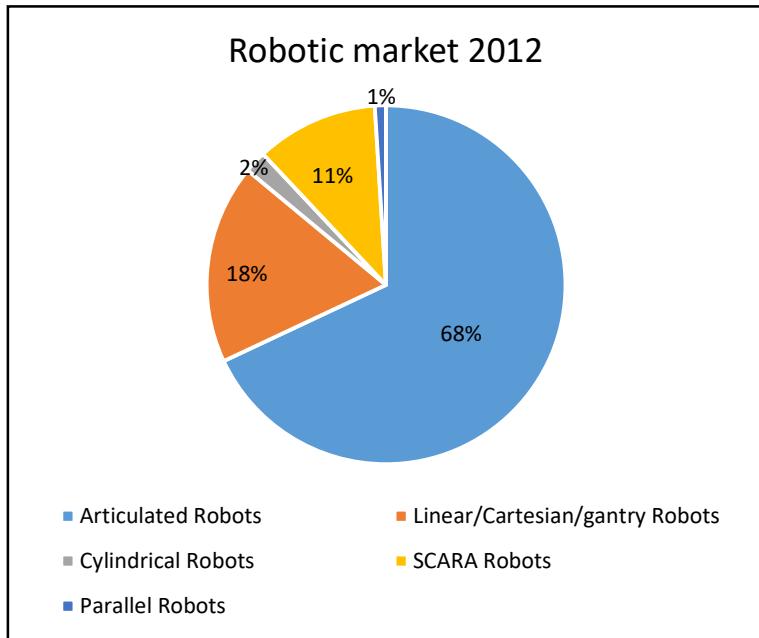
Vào năm 1996, công ty Demaurex đã mua bản quyền robot Delta từ EPFL. Tuy nhiên trước khi thương vụ này diễn ra, EPFL cũng đã bán hai giấy phép sử dụng. Giấy phép đầu tiên là loại có kích cỡ nhỏ (cánh tay hình bình hành có chiều dài nhỏ hơn 800mm) được cấp cho Demaurex năm 1987. Giấy phép thứ hai là loại Robot có kích cỡ lớn được bán cho ADI và sau đó được bán lại cho DeeMed. Công ty này sau đó được mua lại bởi Elekta, một công ty Thụy Điển chuyên về lĩnh vực giải phẫu và sản xuất Robot Delta để nâng đỡ kính hiển vi có khối lượng lớn hơn 20kg. Sản phẩm này có tên gọi là SurgiScope. Công nghệ Robot Delta một lần nữa lại được bán cho Medtronic vào cuối năm 1999.

Trước thương vụ SurgiScope, Elekta IGS đã tiến hành đàm phán về giấy phép sử dụng Robot Delta của họ với hãng ABB. ABB cũng đã có giấy phép sản xuất Robot Delta với kích cỡ lớn (khoảng từ 1200mm trở lên). Đối với Demaurex, do giao ước không gia nhập vào thị trường Robot có kích cỡ lớn nên có lẽ họ đã không sản xuất Robot loại này mà chỉ độc quyền sản xuất loại có kích thước dưới 800mm.

Demaurex cũng đã thỏa thuận với một công ty Đức là GROB-Werke về giấy phép sản xuất tên TRIAGLIDE 5g, cũng như với Mikron Technology Group về robot Trianglide, đây là hai loại Robot được trang bị động cơ tuyến tính. Ngoài ra Demaurex cũng cấp giấy phép cho một công ty Nhật Bản là Hitachi Seiki được quyền sản xuất Robot Delta có kích cỡ nhỏ dùng để đóng gói và khoan (**Hình 1.3**)

Ông lớn ABB đã giới thiệu các Robot Delta của mình vào năm 1999, đó là Robot có tên là IRB 340 FlexPicker được trang bị hệ thống chân không tích hợp luôn vào Robot giúp nó có khả năng nhánc và nhả nhanh đối với các đối tượng có khối lượng đến 1kg. Ngoài ra nó còn được trang bị thêm hệ thống quan sát dẫn hướng của hãng Cognex và bộ điều khiển ABB S4C mạnh mẽ. Ngoài ra nó cũng có thể được trang bị bộ quan sát dẫn hướng và bộ điều khiển chuyển động của hãng Adept Technology. Vận tốc mà Robot này có thể đạt được khoảng 10m/s và gia tốc lên đến $100m/s^2$.

Như vậy với sự tham gia của ABB vào thị trường này Demaurex đã thực sự mất thế chủ đạo trong thương mại hóa Robot Delta. Ngày nay Robot dòng FlexPicker của ABB đã trở thành loại Robot song song được *ưa chuộng* nhất trên thị trường. Tuy vậy trên thị trường Robot công nghiệp nói chung, Robot song song Delta vẫn còn chiếm một tỉ lệ rất nhỏ.



Hình 1.6. Cơ cấu thị trường Robot công nghiệp năm 2012 [13]

Theo số liệu năm 2012, các Robot song song (hay robot Delta) chỉ chiếm một thị phần khoảng 1%, với khoảng (1650 robots hoạt động trên thế giới), các Robots với cấu trúc dạng chuỗi khớp liên kết bản lề vẫn được sử dụng rộng rãi nhất với thị phần lên đến 68%. Hạn chế lớn nhất khiến cho việc ứng dụng Robot song song vào các ngành công nghiệp có lẽ là vấn đề không gian thao tác của Robot song song khá khiêm tốn so với Robot chuỗi khớp bản lề làm hạn chế tính linh hoạt của nó trong môi trường sản xuất công nghiệp.

Một phân tích từ khoảng 25 hãng sản xuất Robot, điển hình là ABB, Adept, Bosch, FANUC, Kawasaki và MAJAtronic cho thấy tải trọng các Robot song song thường giới hạn từ 1-3 kg, một số có thể đạt 8kg (ABB IRB 360), 15kg (Adept Quattro s650H) hoặc thậm chí là 20kg (MAJAtronic IP 65). Vùng không gian làm việc (thường có dạng hình ống trụ) đạt đường kính trung bình từ 700-1350 mm, tối đa lên tới 1600mm, chu kỳ thao tác đạt khoảng 180 lần/phút tùy vào tải trọng.

Các hãng sản xuất Robot song song đều bổ sung thêm một số bậc tự do cho robot trong đó phổ biến nhất là bổ sung thêm một khâu quay quanh trực thăng đứng gắn trên bàn máy động. Trục quay này có thể được dẫn động bởi một động cơ độc lập gắn trên bàn máy động (**Hình 1.7** bên trái) hoặc một động cơ gắn trên bàn máy cố định dẫn động thông qua một trục duỗi (kết cấu gồm các ống trụ lồng vào nhau) với hai khớp cắc-đăng ở hai đầu (thiết kế này chiếm khoảng 72%) giúp giảm khối lượng quán tính tại bàn máy động (**Hình 1.7** bên phải)

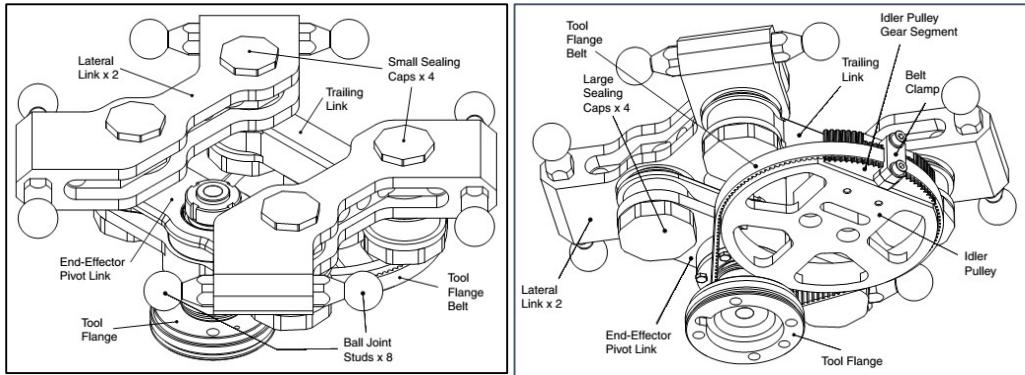


Hình 1.7. Robot song song Kawasaki YF03N (trái) và ABB IRB 360 FlexPicker (phải)

Việc bổ sung một khâu nối nhằm truyền động quay từ động cơ gắn ở bàn máy cố định đến khâu quay ở bàn máy động có thể dẫn đến một số vấn đề về độ tin cậy và đặc biệt là trong các ứng dụng sản xuất thực phẩm, thiết kế này gặp hạn chế về vấn đề vệ sinh thiết bị sạch. Để khắc phục những hạn chế này Pierrot và nhà sản xuất đã đưa ra một họ Robot Delta mới với bốn chuỗi động có cấu tạo như Robot song song Delta. Họ Robot H4 (4 chuỗi động độc lập cùng với bàn máy động hình chữ H) được thiết kế để loại bỏ khâu truyền động phụ, qua đó với 4 bậc tự do ứng với 4 chuỗi động độc lập, ngoài 3 khả năng chuyển động tịnh tiến theo ba trục, bàn máy động còn có khả năng chuyển động quay quanh trục thẳng đứng do thiết kế đặc biệt của bàn máy động. **Hình 1.7** là một mẫu Robot như vậy do hãng Adept sản xuất.



Hình 1.8. Robot Quattro s650 của hãng Adept.



Hình 1.9. Cấu tạo bàn máy động Robot Quattro s560 của hãng Adept.

Ngoài ra hãng công nghệ của Nhật Bản FANUC còn trình làng mẫu thiết kế Robot song song với 6 bậc tự do (**Hình 1.10**). Nó được bổ sung thêm ba động cơ gắn ở ba tay nối hình bình hành truyền động đến các khớp quay ở bàn máy động thông qua các trực với khớp cac-đăng. Thiết kế này hiển nhiên giúp nó tăng tính linh hoạt trong các thao tác qua đó có thể ứng dụng cho những nhiệm vụ lắp ghép đòi hỏi không chỉ chính xác về vị trí của chi tiết mà còn cả về sự định hướng của chi tiết lắp ghép trong không gian. Tuy vậy, do sự xuất hiện thêm các thành phần quán tính chuyển động (các động cơ ở tay nối hình bình hành, cơ cấu bánh răng ở bàn máy động) nên điều này làm giảm tốc độ chuyển động của nó.



Hình 1.10. Robot FANUC M3-Series.

1.3. Một số biến thể của Robot song song Delta

a. Robot song song với dẫn động khớp quay.

Các cơ cấu song song có thể được dẫn động nhờ chuyển động quay hoặc tịnh tiến trượt của khâu chủ động. Đối với Robot dẫn động bằng chuyển động quay, các khâu chủ động thực hiện chuyển động quay quanh các trực cố định bố trí trên bàn máy cố định,

các khớp liên kết giữa khâu chủ động và tay nối, giữa tay nối với bàn máy động thường sử dụng khớp cầu. Điều này dẫn đến việc tăng chi phí chế tạo và độ chính xác chế tạo của khớp cầu ảnh hưởng nhiều đến độ chính xác của cơ cấu. Vì vậy để khắc phục những hạn chế này Tsai và Stamper tại đại học Maryland đã đề xuất mô hình Robot song song sử dụng toàn khớp quay tại các khớp liên kết. Ngoài ra để có được không gian thao tác lớn hơn, Miller đã đưa ra một thiết kế mới với Robot có tên là NUWAR (The New University of Western Australia Robot) với đặc điểm nổi bật là thay đổi sự bố trí định hướng của các trục khớp chủ động, theo đó cả ba trục khớp chủ động không còn được bố trí đồng phẳng với bàn máy cố định mà được đánh lệch một góc so với bàn máy cố định. **Hình 1.11** minh họa các mẫu thiết kế này.



Hình 1.11. Robot song song Clavel (ngoài cùng trái), Robot song song ở đại học Maryland (giữa) và Robot NUWAR (ngoài cùng phải)

b. Robot song song với dãy động khớp trượt.

Việc thay thế khớp dãy động từ khớp quay thành khớp trượt ở Robot song song Delta mang lại một số ưu điểm như tăng độ cứng vững và ổn định, cải thiện độ chính xác trong chuyển động, một số trường hợp còn dẫn đến phương trình động học đơn giản hơn nên dễ tính toán hơn so với cấu hình Robot sử dụng khớp dãy động quay. Các dãy động bằng khớp trượt thường sử dụng cơ cấu truyền động bằng đai hoặc cơ cấu trực vít - đai óc nên có thể cho bước dịch chuyển rất nhỏ và chính xác tại khớp chủ động.

Tùy vào sự bố trí, sắp xếp các phương trượt của khâu chủ động mà có thể có các loại như: 3 trục trực giao (Orthogonal), nằm ngang đồng phẳng (Horizontal coplanar), nằm ngang không đồng phẳng (Horizontal non-coplanar), song song thẳng đứng (vertical) hay 3 trục nghiêng (inclined). **Hình 1.11** và **Hình 1.12** thể hiện các mẫu thiết kế này.



Hình 1.12. Robot song song dãy động khớp trượt với phương trượt nằm ngang (trái) và 3 trục trực giao (phải)



Hình 1.13. Robot song song dãy động khớp trượt với phương trượt song song thẳng đứng (trái) và phương trượt nghiêng đồng quy (phải)

1.4. Giới thiệu Robot song song Hornet 565 của hãng Adept

Trong phần này ta giới thiệu mô hình Robot song song Hornet 565, một sản phẩm Robot song song thương mại của hãng công nghệ **adept** nổi tiếng trong lĩnh vực tự động hóa và Robotics. Đây là mô hình Robot được sử dụng trong tính toán mô phỏng chuyển động trong nội dung các **Chương 2, 3, 4 và 5** sau này.



Hình 1.14. Robot song song Hornet 565 của hãng adept

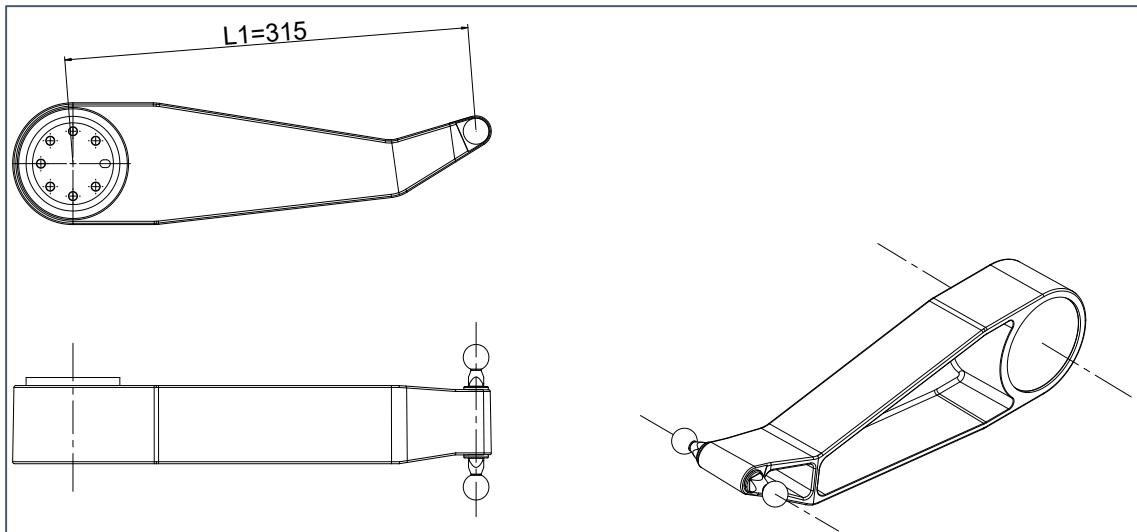
Cũng như các Robot song song thương mại của các hãng khác, Robot Hornet 565 là loại Robot song song được thiết kế cho các nhiệm vụ gấp đặt và đóng gói sản phẩm trong công nghiệp với tốc độ cao. Một ưu điểm nổi bật của Robot này là bộ điều khiển và bộ khuếch đại đã được tích hợp sẵn trong bàn máy của Robot, do vậy nó không cần thêm bộ điều khiển bên ngoài (thường là 1 PLC) mà có thể kết nối trực tiếp với máy tính và phần mềm điều khiển đi kèm để cấu hình và thiết lập các chuyển động cho Robot. Điều này cũng giúp tiết kiệm không gian và giảm giá thành lắp đặt cho Robot. Ngoài ra nó cũng có thể được lập trình điều khiển trực tiếp từ một PLC bên ngoài bằng ngôn ngữ thông dụng như ngôn ngữ ladder giúp người sử dụng dễ dàng tiếp cận và làm chủ công nghệ. Một hệ thống hoàn chỉnh cho công đoạn đóng gói sản phẩm trong sản xuất mà *adept* cung cấp còn bao gồm hệ băng tải dẫn động, camera dẫn hướng tốc độ cao và một phần mềm chuyên dụng được thiết kế riêng cho công việc này. Một số thông số kỹ thuật của Robot được thể hiện ở **Bảng 1.1**.

Bảng 1.1. Một số thông số kỹ thuật của Robot Hornet 565.

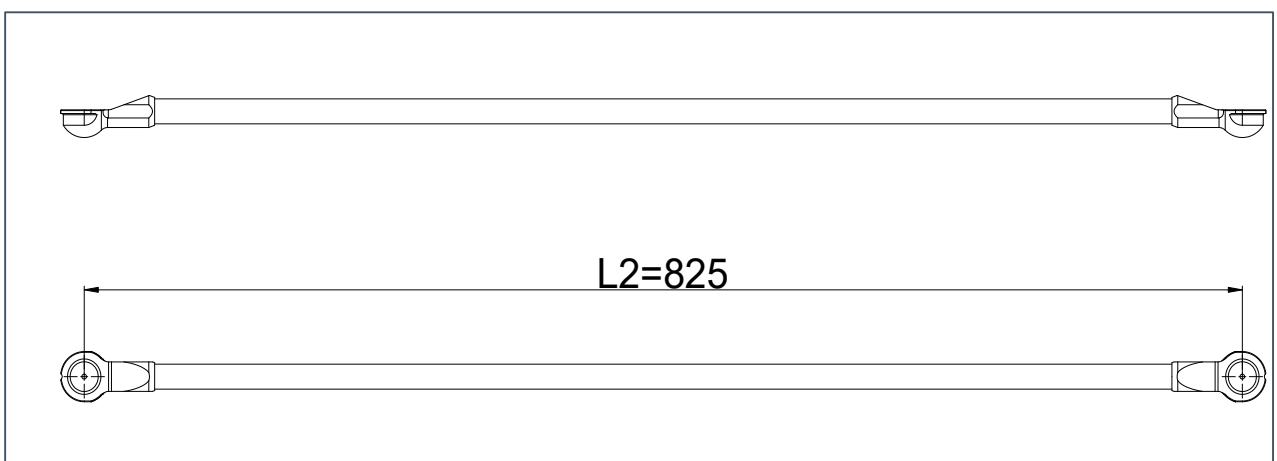
Số trục	3 hoặc 4
Tải trọng	
Định mức	1 kg
Tối đa	3 kg
Vùng làm việc	
Đường kính	1130 mm
Chiều cao	425 mm
Góc quay theta (4 trục)	360°

Góc quay khâu chủ động	$114.6^\circ \div -53^\circ$
Độ chính xác	$\pm 0.1\text{ mm}$
Khối lượng	52 kg
Nguồn điện cung cấp	24 VDC: 6A 200 \div 240 VAC: 10A, một pha

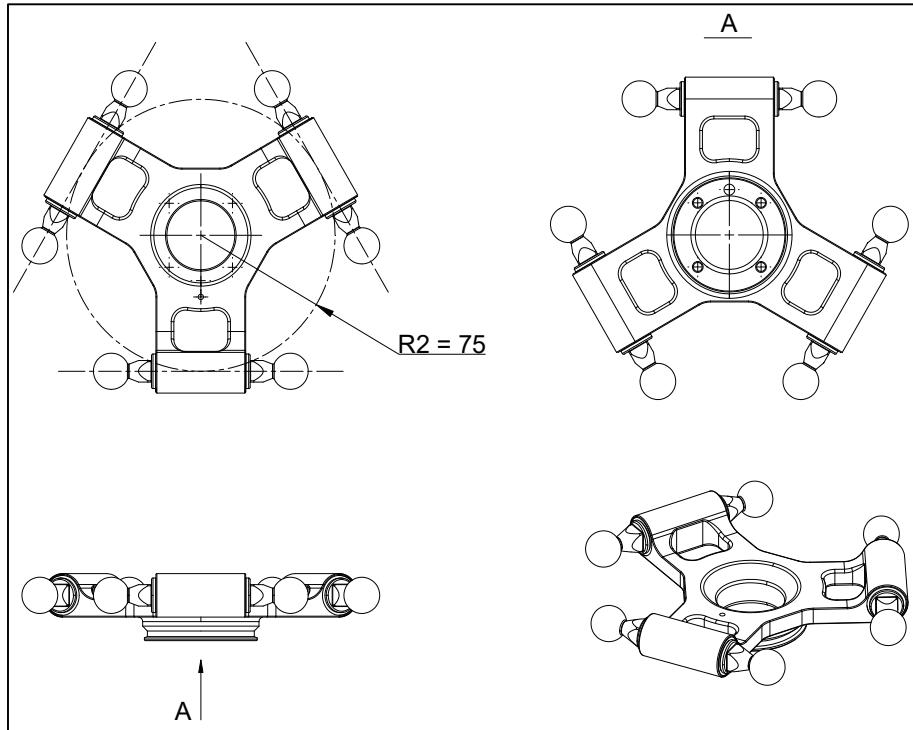
Các kích thước kĩ thuật về vùng làm việc và các bộ phận chính của Robot được thể hiện ở các hình dưới, đây là những thông số quan trọng trong tính toán, mô phỏng động học Robot.



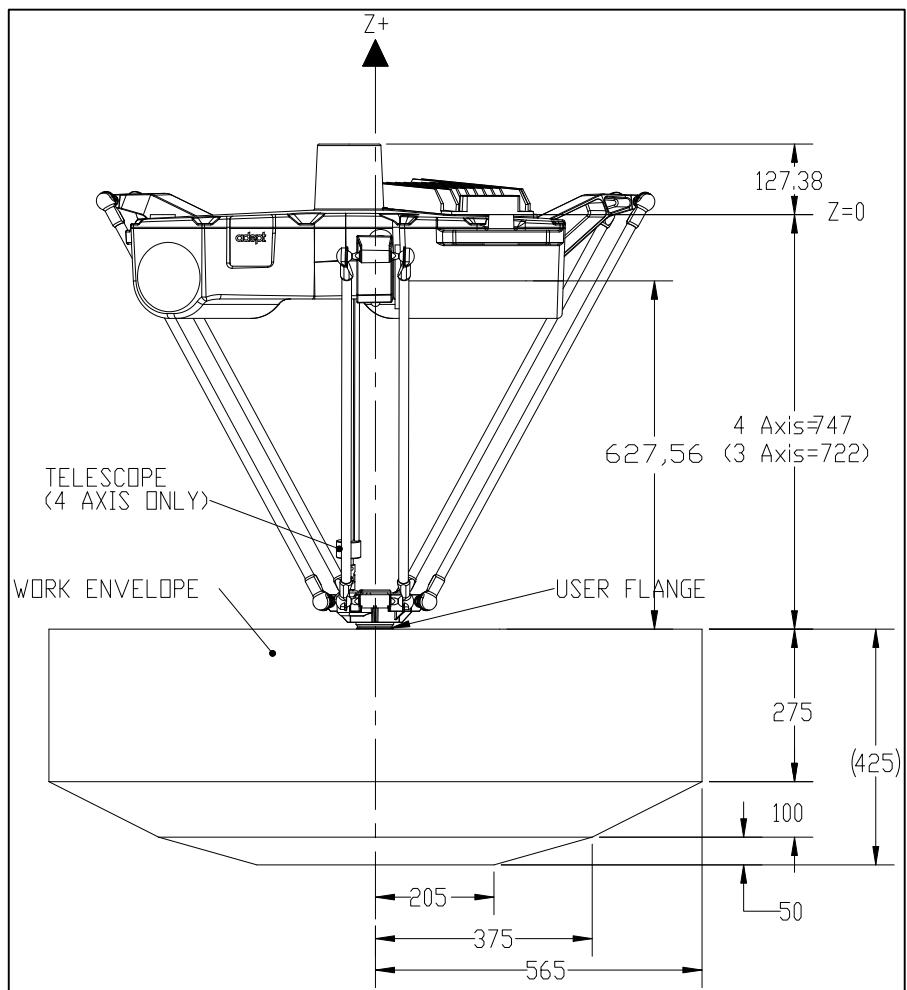
Hình 1.15. Mô hình khâu chủ động của Robot Hornet 565



Hình 1.16. Mô hình tay nối của Robot Hornet 565.



Hình 1.17. Mô hình bàn máy động của Robot Hornet 565.



Hình 1.18. Vùng không gian làm việc của Robot Hornet 565 [23]

CHƯƠNG 2: PHÂN TÍCH ĐỘNG HỌC ROBOT SONG SONG DELTA.

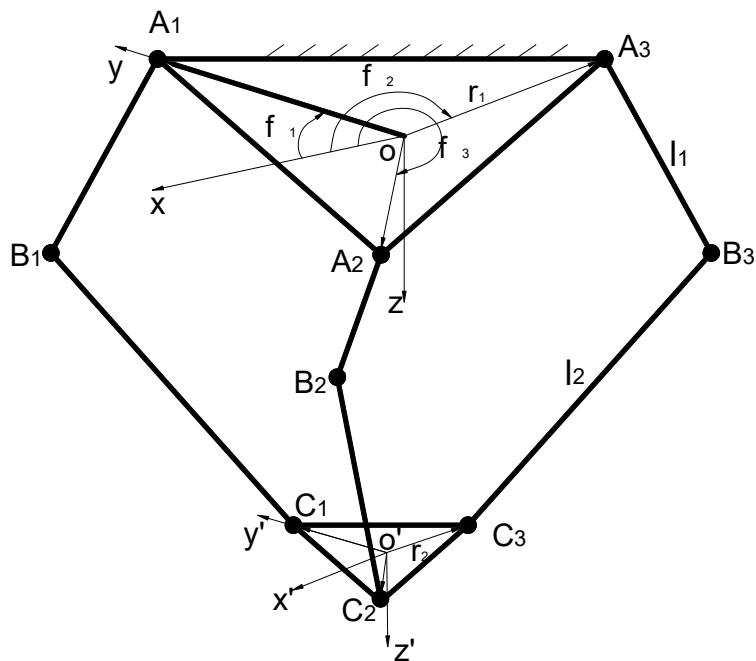
Tóm tắt:

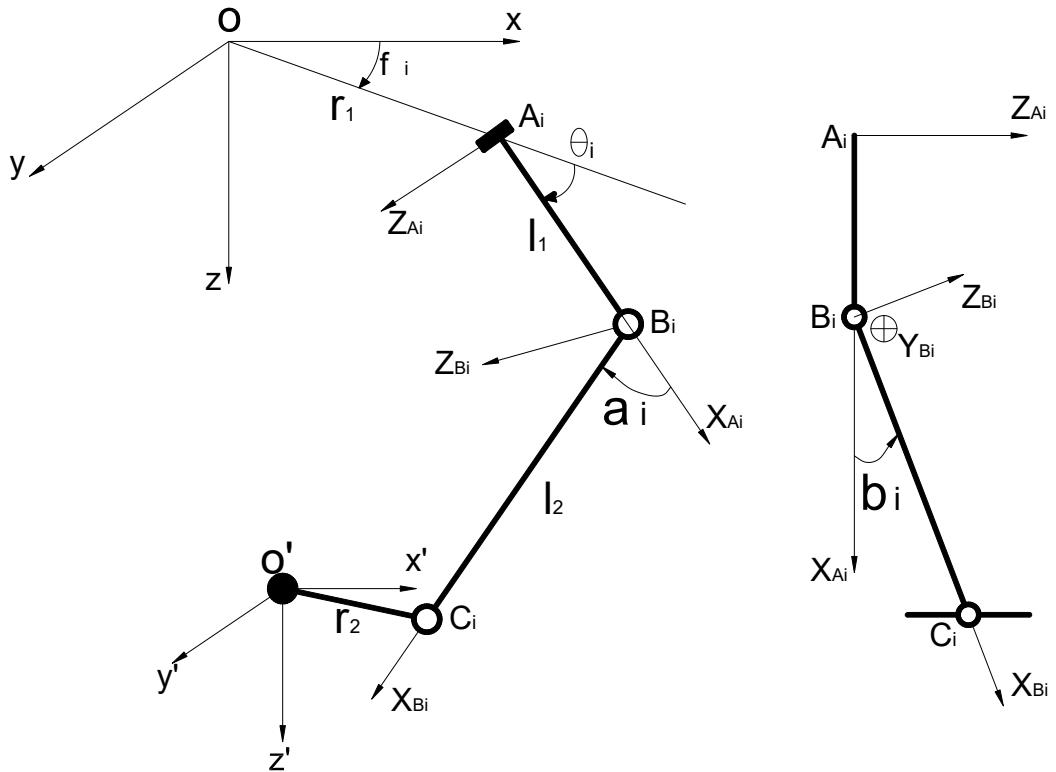
Phân tích động học là một công việc quan trọng trong việc nghiên cứu và sáng tạo Robot bởi các ứng dụng của Robot đều dựa trên khả năng chuyển động mà nó có thể tạo ra. Hai bài toán cơ bản trong việc phân tích động học Robot là bài toán động học thuận và động học ngược. Với bài toán động học thuận yêu cầu cần xác định được vị trí của điểm tác động cuối của Robot ứng với vị trí của các biến khớp còn với bài toán động học ngược yêu cầu xác định vị trí của các biến khớp để đạt được vị trí mong muốn của điểm tác động cuối. Các kết quả của hai bài toán động học cơ bản có vai trò quan trọng trong việc khảo sát và điều khiển chuyển động của Robot. Từ kết quả của bài toán động học ngược, tín hiệu về vị trí mong muốn của điểm tác động cuối sẽ được tính toán chuyển thành tín hiệu vị trí của các biến khớp, từ đó bộ điều khiển sẽ tính toán điều khiển cơ cấu chấp hành để đạt được những vị trí đó.

Chương này trình bày hai phương pháp thành lập phương trình động học cho Robot song song Delta đó là phương pháp Denavit-Hartenberg và phương pháp hình học. Trên cơ sở hệ phương trình động học thành lập được, xem xét vai trò của thông tin vào là biến khớp chủ động hay vị trí của bàn máy động mà ta sẽ giải quyết được các bài toán động học thuận và động học ngược.

2.1. Sơ đồ động học Robot.

Sơ đồ động học của Robot Delta được thể hiện ở hình dưới.





Hình 2.1. Sơ đồ động học Robot song song Delta.

Trong sơ đồ trên, hệ trục tọa độ cố định Oxyz được gắn tại tâm của bàn cố định, đó là trọng tâm của tam giác đều $A_1A_2A_3$. Hệ tọa độ khâu $O'x'y'z'$ được gắn tại tâm của bàn di động là trọng tâm tam giác đều $C_1C_2C_3$. (A_i, B_i, C_i với $i = 1, 2, 3$ là vị trí các khớp liên kết). Các giá trị l_1, l_2 lần lượt là độ dài hình học giữa hai tâm khớp của các khâu A_iB_i và B_iC_i . θ_i là góc quay của khâu A_iB_i quanh trực đi qua tâm khớp tại A_i . Các góc α_i và β_i là các góc quay tương đối của khâu B_iC_i so với khâu A_iB_i quanh khớp B_i .

Trong hệ Oxyz vị trí các điểm A_1, A_2, A_3 được xác định bởi các vecto $\overrightarrow{OA_i}$. Vecto $\overrightarrow{OA_i}$ có độ dài r_1 và tạo với trục Ox góc φ_i với $\varphi_i = \frac{2\pi}{3}i - \frac{\pi}{6}$ ($i=1,2,3$). Tương tự trên mặt phẳng bàn máy động $C_1C_2C_3$ vị trí các điểm C_i được xác định bằng các vecto $\overrightarrow{OC_i}$ có độ dài r_2 tạo với trục $O'x'$ góc φ_i .

Trên khâu A_iB_i có gắn tọa độ khâu $O_{A_i}x_{A_i}y_{A_i}$ với gốc tọa độ O_{A_i} trùng với tâm khớp tại A_i . Trên khâu B_iC_i gắn tọa độ khâu $O_{B_i}x_{B_i}y_{B_i}$ với gốc tọa độ O_{B_i} trùng với tâm khớp tại B_i .

Các kích thước động học của Robot được lấy từ mô hình Robot Hornet 565 ở **Chương 1** có các giá trị được thể hiện ở bảng sau:

Bảng 2.1. Các kích thước động học của Robot.

Kích thước	Giá trị (mm)
r_1	225
r_2	75
l_1	315
l_2	825

2.2. Phân tích động học Robot song song bằng phương pháp Denavit-Hartenberg

Phương pháp phân tích động học Denavit-Hartenberg rất tổng quát cho các bài toán phân tích động học Robot. Đối với Robot có cấu trúc nhiều vòng động học kín, phương pháp trở nên khá phức tạp so với phương pháp hình học nhưng lại phản ánh được tất cả các thông tin của các biến khớp so với phương pháp hình học lại loại bỏ đi thông tin về các biến khớp bị động. Phương pháp này sử dụng các phép biến đổi thuần nhất để thiết lập quan hệ về vị trí và hướng giữa hai hệ tọa độ trong không gian. Theo đó các ma trận biến đổi thuần nhất giữa hệ trục tọa độ $O_i x_i y_i z_i$ gắn trên khâu thứ i thành hệ tọa độ $O_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$ gắn trên khâu $i - 1$ như sau:

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & -s\alpha & 0 \\ 0 & s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad R_y(\alpha) = \begin{bmatrix} c\alpha & 0 & s\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\alpha & 0 & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$R_z(\alpha) = \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_x(d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_y(d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_z(d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Trong đó $R_x(\alpha), R_y(\alpha), R_z(\alpha)$ lần lượt là các ma trận chuyển từ hệ tọa độ khâu thứ i đến khâu thứ $i - 1$ khi quay hệ tọa độ $i - 1$ quanh các trục $O_{i-1} x_{i-1}, O_{i-1} y_{i-1}, O_{i-1} z_{i-1}$ một góc α và $T_x(d), T_y(d), T_z(d)$ lần lượt là các ma trận chuyển từ hệ i về hệ $i - 1$ khi tịnh tiến hệ tọa độ $i - 1$ theo các trục $O_{i-1} x_{i-1}, O_{i-1} y_{i-1}, O_{i-1} z_{i-1}$ một đoạn bằng d .

Dựa trên sơ đồ động học trình bày ở trên ta có các phân tích về các phép chuyển đổi giữa các hệ tọa độ như sau:

Hệ tọa độ cố định $Oxyz$ chuyển thành hệ $O_{A_i} x_{A_i} y_{A_i}$ bằng việc thực hiện phép quay quanh trục Oz góc φ_i rồi tịnh tiến theo trục Ox một đoạn bằng r_1 , sau đó quay tiếp theo trục Ox một góc -90° và cuối cùng là quay quanh trục Oz một góc θ_i . Do đó ta có ma trận chuyển từ hệ $O_{A_i} x_{A_i} y_{A_i}$ về hệ $Oxyz$ như sau:

$${}_{A_i}^0T = R_z(\varphi_i) \cdot T_x(r_1) R_x(-90^\circ) R_z(-\theta_i) \quad (2.1)$$

Với các ma trận:

$$R_z(\varphi_i) = \begin{bmatrix} c\varphi_i & -s\varphi_i & 0 & 0 \\ s\varphi_i & c\varphi_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_x(r_1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & r_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_z(\theta_i) = \begin{bmatrix} c\theta_i & s\theta_i & 0 & 0 \\ -s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad R_x(-90) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Vậy ta có

$${}_{A_i}^0T = R_z(\varphi_i) \cdot T_x(r_1) R_x(-90^\circ) R_z(\theta_i) = \begin{bmatrix} c\varphi_i \cdot c\theta_i & c\varphi_i \cdot s\theta_i & -s\varphi_i & r_1 \cdot c\varphi_i \\ c\theta_i \cdot s\varphi_i & s\varphi_i \cdot s\theta_i & c\varphi_i & r_1 \cdot s\varphi_i \\ s\theta_i & -c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Hệ $O_{A_i}x_{A_i}y_{A_i}z_{A_i}$ chuyển thành hệ $O_{B_i}x_{B_i}y_{B_i}z_{B_i}$ bằng việc tịnh tiến theo trục x một độa l_1 rồi lần lượt quay quanh trục z góc $-\alpha_i$ và trục y góc β_i . Khi đó ta có ma trận chuyển từ hệ $O_{B_i}x_{B_i}y_{B_i}$ về hệ $O_{A_i}x_{A_i}y_{A_i}$ như sau:

$${}_{B_i}^{A_i}T = T_x(l_1) \cdot R_z(-\alpha_i) \cdot R_y(\beta_i) \quad (2.3)$$

Trong đó các ma trận:

$$T_x(l_1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_z(-\alpha_i) = \begin{bmatrix} c\alpha_i & s\alpha_i & 0 & 0 \\ -s\alpha_i & c\alpha_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$R_y(\beta_i) = \begin{bmatrix} c\beta_i & 0 & s\beta_i & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ -s\beta_i & 0 & c\beta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Khi đó ta có kết quả

$${}_{B_i}^{A_i}T = \begin{bmatrix} c\alpha_i \cdot c\beta_i & s\alpha_i & s\alpha_i + c\alpha_i \cdot s\beta_i & l_1 \\ -c\beta_i \cdot s\alpha_i & c\alpha_i & c\alpha_i - s\alpha_i \cdot s\beta_i & 0 \\ -s\beta_i & 0 & c\beta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Ta có ma trận chuyển từ hệ $O_{B_i}x_{B_i}y_{B_i}z_{B_i}$ về hệ $Oxyz$:

$${}_{B_i}^0T = {}_{A_i}^0T \cdot {}_{B_i}^{A_i}T \quad (2.5)$$

Khi đó tọa độ điểm C_i xét trong hệ $Oxyz$:

$$[x_{C_i} \ y_{C_i} \ z_{C_i} \ 1]^T = {}^0_{B_i}T \cdot [l_2 \ 0 \ 0 \ 1]^T = {}^0_{A_i}T \cdot {}^{A_i}_{B_i}T \cdot [l_2 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (2.6)$$

Trong đó $[l_2 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ là tọa độ điểm C xét trong hệ $O_{B_i}x_{B_i}y_{B_i}z_{B_i}$. Thay các ma trận ${}^0_{A_i}T$, ${}^{A_i}_{B_i}T$ đã tính toán ở (2.2) và (2.4) ở trên vào phương trình (2.6) ta được:

$$\begin{bmatrix} x_{C_i} \\ y_{C_i} \\ z_{C_i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \cdot c\varphi_i + l_1 \cdot c\varphi_i \cdot c\theta_i + l_2 \cdot s\beta_i \cdot s\varphi_i + l_2 \cdot c\varphi_i \cdot c\beta_i \cdot c(\alpha_i + \theta_i) \\ r_1 \cdot s\varphi_i - l_1 \cdot c\varphi_i \cdot s\beta_i + l_1 \cdot c\theta_i \cdot s\varphi_i + l_2 \cdot c\beta_i \cdot s\varphi_i \cdot c(\theta_i + \alpha_i) \\ l_1 \cdot s\theta_i + l_2 \cdot c\beta_i \cdot s(\theta_i + \alpha_i) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Mặt khác tọa độ điểm C_i còn có thể xác định theo phương trình sau:

$$[x_{C_i} \ y_{C_i} \ z_{C_i} \ 1]^T = {}^0_{O'}T \cdot r_{C_i}^{O'} \quad (2.8)$$

Trong đó

$${}^0_{O'}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

là ma trận chuyển từ hệ $O'x'y'z'$ về hệ $Oxyz$ với (x, y, z) là tọa

độ điểm O' xét trong hệ tọa độ $Oxyz$ (Do tính chất động học của Robot, phương của bàn máy động luôn giữ không đổi và song song với giá cố định nên hệ $Oxyz$ chuyển về hệ $O'x'y'z'$ chỉ bằng phép tịnh tiến theo tọa độ của điểm O' xét trong hệ cố định)

$$r_{C_i}^{O'} = \begin{bmatrix} r_2 c\varphi_i \\ r_2 s\varphi_i \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

là tọa độ của điểm C_i xét trong hệ $O'x'y'z'$.

Suy ra

$$\begin{bmatrix} x_{C_i} \\ y_{C_i} \\ z_{C_i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + r_2 c\varphi_i \\ y + r_2 s\varphi_i \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Như vậy đồng nhất (2.7) và (2.9) ta thu được quan hệ sau:

$$\begin{bmatrix} x + r_2 c\varphi_i \\ y + r_2 s\varphi_i \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \cdot c\varphi_i + l_1 \cdot c\varphi_i \cdot c\theta_i + l_2 \cdot s\beta_i \cdot s\varphi_i + l_2 \cdot c\varphi_i \cdot c\beta_i \cdot c(\alpha_i + \theta_i) \\ r_1 \cdot s\varphi_i - l_1 \cdot c\varphi_i \cdot s\beta_i + l_1 \cdot c\theta_i \cdot s\varphi_i + l_2 \cdot c\beta_i \cdot s\varphi_i \cdot c(\theta_i + \alpha_i) \\ l_1 \cdot s\theta_i + l_2 \cdot c\beta_i \cdot s(\theta_i + \alpha_i) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Đặt $r = r_1 - r_2$ và thu gọn các biểu thức ta có:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\varphi_i \cdot [r + l_1 \cdot c\theta_i + l_2 \cdot c\beta_i \cdot c(\alpha_i + \theta_i)] + l_2 \cdot s\beta_i \cdot s\varphi_i \\ s\varphi_i \cdot [r + l_1 \cdot c\theta_i + l_2 \cdot c\beta_i \cdot c(\theta_i + \alpha_i)] - l_2 \cdot c\varphi_i \cdot s\beta_i \\ l_1 \cdot s\theta_i + l_2 \cdot c\beta_i \cdot s(\theta_i + \alpha_i) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Khi thay các chỉ số $i = 1, 2, 3$ ta sẽ thu được 9 phương trình động học mô tả quan hệ giữa 3 biến khớp chủ động ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) và các tọa độ phụ thuộc ($x, y, z, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3$). Khi chỉ quan tâm đến quan hệ giữa các biến khớp chủ động ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) và tọa độ tâm bàn máy động (x, y, z) từ (2.11) ta có thể loại bỏ biến khớp bị động α_i và β_i , bằng cách chuyển các số hạng $\cos\varphi_i \cdot (r + l_1 \cos\theta_i)$, $\sin\varphi_i \cdot (r + l_1 \cos\theta_i)$ và $l_1 \sin\theta_i$ sang vế trái rồi bình phương 2 vế, ta rút ra quan hệ sau:

$$[x - \cos\varphi_i \cdot (r + l_1 \cos\theta_i)]^2 + [y - \sin\varphi_i \cdot (r + l_1 \cos\theta_i)]^2 + (z - l_1 \sin\theta_i)^2 = l_2^2 \quad (2.12)$$

Đặt các biểu thức:

$$\begin{cases} X_i = \cos\varphi_i \cdot (r + l_1 \cos\theta_i) \\ Y_i = \sin\varphi_i \cdot (r + l_1 \cos\theta_i) \\ Z_i = l_1 \sin\theta_i \end{cases}$$

Ta thu được phương trình

$$(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2 = l_2^2 \quad (2.13)$$

2.3. Phân tích động học Robot song song Delta bằng phương pháp hình học .

So với phương pháp Denavit-Hartenberg, phương pháp hình học tỏ ra khá ngắn gọn và nhanh chóng. Cơ sở chủ yếu dựa vào các phép toán giải tích vecto thông thường để định vị các khớp.

Theo sơ đồ động học **Hình 2.1**, ta có vị trí của khớp A_i được xác định bởi $\overrightarrow{OA_i}$ xét trong hệ Oxy :

$$\overrightarrow{OA_i} = r_1 \begin{bmatrix} \cos\varphi_i \\ \sin\varphi_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Vị trí của khớp B_i được xác định bởi $\overrightarrow{OB_i}$:

$$\overrightarrow{OB_i} = \overrightarrow{OA_i} + \overrightarrow{A_iB_i} = r_1 \begin{bmatrix} \cos\varphi_i \\ \sin\varphi_i \\ 0 \end{bmatrix} + l_1 \begin{bmatrix} \cos\theta_i \cdot \cos\varphi_i \\ \cos\theta_i \cdot \sin\varphi_i \\ \sin\theta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \cos\varphi_i + l_1 \cos\theta_i \cos\varphi_i \\ r_1 \sin\varphi_i + l_1 \cos\theta_i \sin\varphi_i \\ l_1 \sin\theta_i \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Vị trí của khớp C_i được xác định bởi $\overrightarrow{OC_i}$:

$$\overrightarrow{OC_i} = \overrightarrow{OO'} + \overrightarrow{O'C_i} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + r_2 \begin{bmatrix} \cos\varphi_i \\ \sin\varphi_i \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + r_2 \cos\varphi_i \\ y + r_2 \sin\varphi_i \\ z \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Mặt khác ta có quan hệ vecto sau :

$$\begin{aligned}\overrightarrow{OC_i} &= \overrightarrow{OB_i} + \overrightarrow{B_iC_i} \\ \Rightarrow \overrightarrow{B_iC_i} &= \overrightarrow{OC_i} - \overrightarrow{OB_i} = \begin{bmatrix} x + r_2 \cos\varphi_i \\ y + r_2 \sin\varphi_i \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_1 \cos\varphi_i + l_1 \cos\theta_i \cos\varphi_i \\ r_1 \sin\varphi_i + l_1 \cos\theta_i \cdot \sin\varphi_i \\ l_1 \sin\theta_i \end{bmatrix} \\ \Rightarrow \overrightarrow{B_iC_i} &= \begin{bmatrix} x + r_2 \cos\varphi_i - r_1 \cos\varphi_i - l_1 \cos\theta_i \cos\varphi_i \\ y + r_2 \sin\varphi_i - r_1 \sin\varphi_i - l_1 \cos\theta_i \cdot \sin\varphi_i \\ z - l_1 \sin\theta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - \cos\varphi_i(r + l_1 \cos\theta_i) \\ y - \sin\varphi_i(r + l_1 \cos\theta_i) \\ z - l_1 \sin\theta_i \end{bmatrix} \quad (2.17)\end{aligned}$$

Do ràng buộc về độ dài $B_iC_i^2 = l_2^2$ nên ta lập được phương trình động học như sau:

$$[x - \cos\varphi_i \cdot (r + l_1 \cos\theta_i)]^2 + [y - \sin\varphi_i \cdot (r + l_1 \cos\theta_i)]^2 + (z - l_1 \sin\theta_i)^2 = l_2^2$$

Với $r = r_1 - r_2$.

Như vậy, giống như phương pháp Denavit-Hartenberg khi đặt các biểu thức:

$$\begin{cases} X_i = \cos\varphi_i \cdot (r + l_1 \cos\theta_i) \\ Y_i = \sin\varphi_i \cdot (r + l_1 \cos\theta_i) \\ Z_i = l_1 \sin\theta_i \end{cases}$$

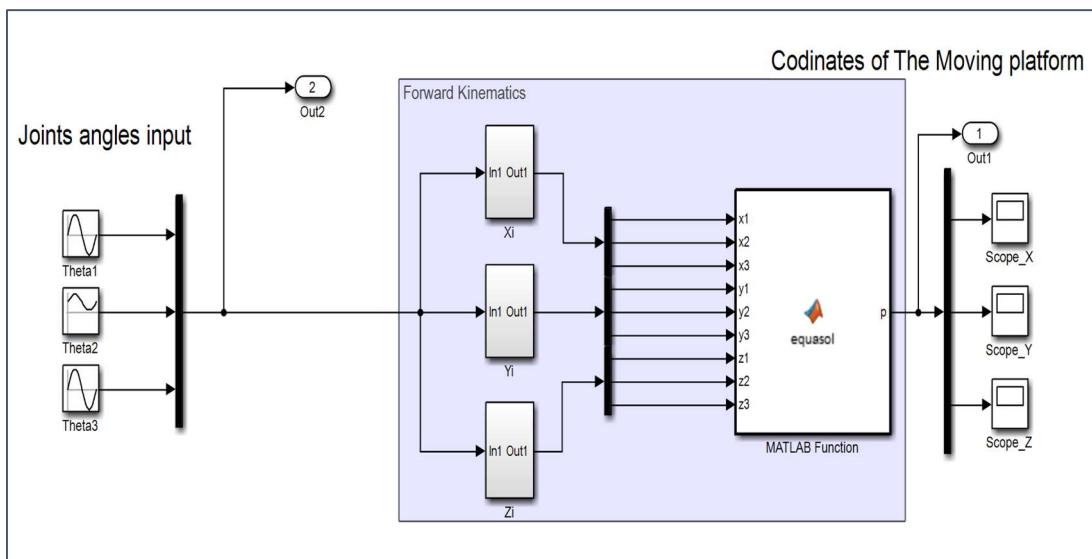
Ta lại thu được hệ phương trình động học mô tả quan hệ giữa các biến khớp chủ động và vị trí bàn máy động như phương trình (2.13):

$$(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2 = l_2^2$$

2.4. Phân tích động học thuận Robot song song Delta

Phương trình (2.13) là biểu thức giải tích của mặt cầu trong không gian với tâm có tọa độ (X_i, Y_i, Z_i) và bán kính $R = l_2$. Khi cho trước các giá trị của biến khớp chủ động $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$, các giá trị của biến X_i, Y_i, Z_i là hoàn toàn xác định, do đó dựa vào phương trình (2.13) có thể giải tìm được các giá trị tọa độ (x, y, z) của bàn máy động. Đây chính là nội dung của bài toán động học thuận yêu cầu.

Với các chỉ số $i = 1, 2, 3$ phương trình (2.13) thể hiện sự giao nhau trong không gian của ba mặt cầu. Với cùng một giá trị $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ hệ phương trình (2.13) có thể có hai nghiệm phân biệt. Hai nghiệm này biểu diễn cho hai vị trí đối xứng qua giá máy cố định của bàn máy động trong không gian. Do Robot chỉ hoạt động ở một phía của giá máy nên một nghiệm sẽ là không khả dĩ và bị loại. Có thể ứng dụng phần mềm tính toán Matlab để giải hệ (2.13) qua đó khảo sát vị trí của bàn máy động khi cho trước quy luật chuyển động của các khớp chủ động. **Hình 2.2** trình bày mô hình Simulink trong Matlab khảo sát bài toán động học thuận Robot. Trọng tâm của mô hình là khôi Matlab Function gọi hàm giải hệ phương trình phi tuyến (2.13) được viết bằng một Script file bên ngoài (Chi tiết xem Phụ lục)

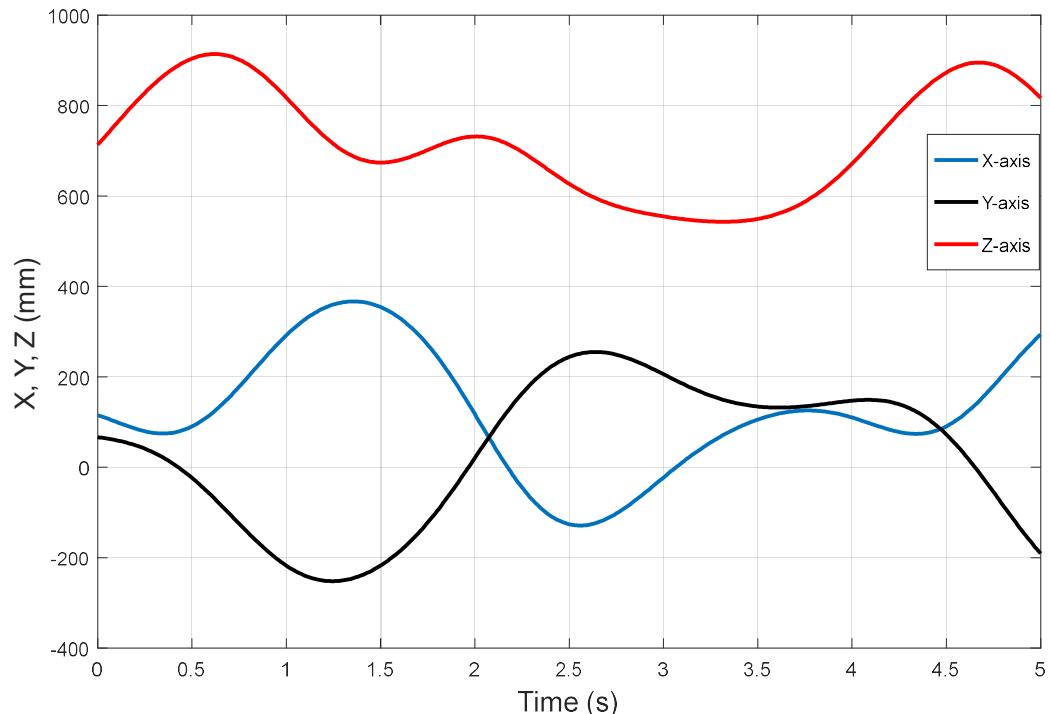


Hình 2.2. Mô hình Simulink khảo sát động học thuận Robot Delta

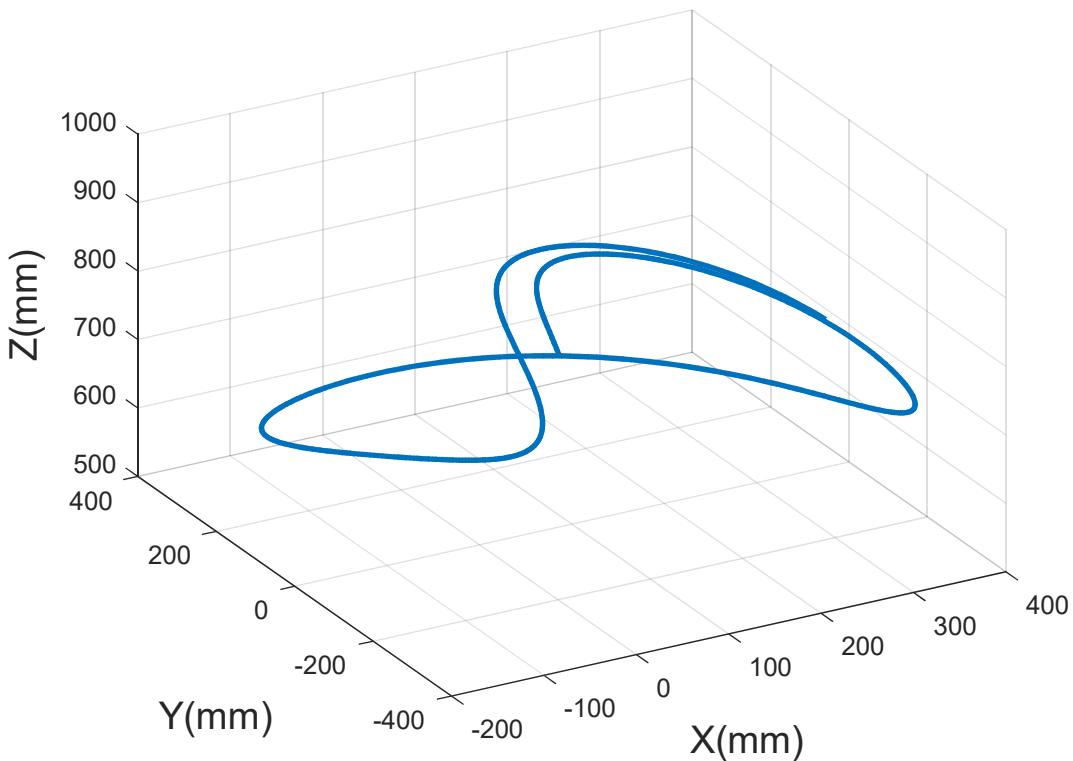
Khảo sát mô hình động học thuận của robot bằng việc cho các biến khớp chuyển động với các quy luật sau:

$$\begin{cases} \theta_1 = \sin(1.5t) \\ \theta_2 = 0.5 \sin\left(\frac{\pi}{2}t\right) + \frac{\pi}{8} \\ \theta_3 = 0.5 \sin(\pi t) \end{cases}$$

Khi đó chuyển vị của bàn di động được thể hiện trong đồ thị sau:



Hình 2.3. Chuyển vị của bàn máy động theo các trục tọa độ



Hình 2.4. Đường di chuyển của bàn máy động trong không gian.

2.5. Phân tích động học ngược Robot.

Từ yêu cầu về vị trí của khâu thao tác, việc giải bài toán động học ngược cần xác định được các thông số vị trí của khâu dẫn. Với bài toán này, đầu vào là các thông số vị trí của khâu thao tác còn đầu ra là thông số vị trí tương ứng của khâu dẫn để cơ cấu đạt được vị trí đó. Bài toán động học ngược có ý nghĩa quan trọng trong việc tính toán các thông số động học của khâu dẫn để điều khiển Robot.

Việc giải bài toán động học ngược dựa trên cơ sở của hệ phương trình (2.13) với x, y, z là các giá trị cho trước, các giá trị góc xoay ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) là các giá trị cần xác định.

Khai triển các phuong trình của hệ (2.13) và thu gọn ta được:

$$x^2 + y^2 + z^2 + r^2 + l_1^2 - l_2^2 - 2r(x\cos\varphi_i + y\sin\varphi_i) + 2l_1(r - x\cos\varphi_i - y\sin\varphi_i)\cos\theta_i - 2zl_1\sin\theta_i = 0 \quad (i = 1,2,3)$$

Đặt các biểu thức:

$$\begin{cases} a_i = 2l_1(r - x\cos\varphi_i - y\sin\varphi_i) \\ b_i = -2zl_1 \\ c_i = 2r(x\cos\varphi_i + y\sin\varphi_i) - (x^2 + y^2 + z^2 + r^2 + l_1^2 - l_2^2) \end{cases}$$

Phương trình được viết gọn lại là:

$$a_i \cdot \cos\theta_i + b_i \cdot \sin\theta_i = c_i \quad (2.18)$$

Đây là phương trình lượng giác bậc nhất đối với các biểu thức \sin và \cos , có thể dễ dàng giải được bằng cách đưa về dạng sau:

$$\sin(\theta_i + \alpha_i) = \frac{c_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}} \quad (2.19)$$

Với $\alpha_i = \arcsin\left(\frac{a_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}}\right)$

Với $a_i^2 + b_i^2 \geq c_i^2$ thì phương trình có nghiệm là:

$$\begin{cases} \theta_{i1} = \arcsin\left(\frac{c_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}}\right) - \alpha_i & (2.20a) \\ \theta_{i2} = \pi - \arcsin\left(\frac{c_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}}\right) + \alpha_i & (2.20b) \end{cases}$$

Giá trị khả dụng sẽ tìm được từ điều kiện là phạm vi chuyển động của khâu chủ động.

Như vậy từ kết quả ở phương trình (2.20), với một vị trí có tọa độ xác định của bàn máy động trong không gian thao tác ta có thể dễ dàng tính toán góc quay tương ứng của các khâu chủ động. Phương trình (2.20) thể hiện cho 2 vị trí của khâu chủ động. Nhìn chung giá trị khả dụng sẽ là kết quả ở phương trình (2.20a), phương trình (2.20b) chỉ cho kết quả trên lý thuyết vì thực tế các vị trí này thường vượt ra ngoài phạm vi chuyển động của Robot. Kết quả bài toán động học ngược có ý nghĩa quan trọng trong việc tính toán điều khiển chuyển động của Robot theo các quỹ đạo mong muốn.

CHƯƠNG 3: ĐỘNG LỰC HỌC ROBOT.

Tóm tắt:

Phân tích động lực học là một bài toán có ý nghĩa quan trọng trong việc khảo sát, đánh giá hoạt động của một hệ động lực nói chung và với các cơ cấu Robot nói riêng. Việc xây dựng mô hình động lực và giải các bài toán động lực cơ bản là nhiệm vụ chính của bài toán phân tích động lực học các cơ cấu Robot. Hai bài toán động lực học cơ bản bao gồm bài toán động lực học thuận, là bài toán biết các lực hoặc momen tác dụng vào các khâu chủ động yêu cầu xác định các yếu tố chuyển động (chuyển vị, vận tốc, gia tốc) của điểm tác động cuối, và bài toán động lực học ngược là bài toán cho trước quỹ đạo của điểm tác động cuối với các yêu cầu về vận tốc và gia tốc tương ứng yêu cầu xác định các quy luật của lực và momen cần thiết để tác động lên các khâu chủ động nhằm đưa điểm tác động cuối chuyển động theo quy luật mong muốn đó. Bài toán động lực học ngược có ý nghĩa quan trọng trong việc tính toán xác định công suất của các động cơ phù hợp và xác định tín hiệu vào đặt lên bộ điều khiển momen của cơ cấu chấp hành mà qua đó bộ điều khiển sẽ tính toán cung cấp tín hiệu điều khiển phù hợp cho cơ cấu chấp hành đó.

Nội dung chính trong chương này trình bày phương pháp phân tích động lực cơ cấu Robot Delta sử dụng phương trình Lagrange dạng nhân tử. Từ các phương trình động lực xây dựng được ta tiến hành giải bài toán động lực học ngược cho Robot áp dụng cho một số dạng quỹ đạo cụ thể. Kết quả của bài toán giúp ta khảo sát được công suất cần thiết phải cung cấp trên các khâu chủ động, qua đó lựa chọn được động cơ với các thông số phù hợp đồng thời giá trị các momen tính được tại các khớp chủ động còn đóng vai trò là tín hiệu vào cho các bộ điều khiển momen động cơ để bộ điều khiển tính toán tín hiệu điều khiển cần thiết cung cấp cho cơ cấu chấp hành.

3.1. Bài toán động lực học Robot song song Delta.

Phân tích động lực học Robot song song nói chung gặp nhiều khó khăn do cấu trúc có nhiều vòng động học kín. Có nhiều phương pháp để phân tích động lực học của các Robot song song nói chung như phương pháp sử dụng phương trình Newton-Euler, phương trình Lagrange, nguyên lí công ảo... [4]

Phương pháp sử dụng phương trình Newton-Euler đòi hỏi thành lập phương trình vi phân chuyển động cho từng vật thể trong cơ cấu nên phát sinh rất nhiều phương trình và các phản lực liên kết tại các khớp động, do đó việc tính toán rất khó khăn, hiệu suất thấp.

Phương pháp sử dụng phương trình Lagrange hiệu quả hơn phương pháp Newton-Euler. Bài luận văn [1] trình bày phương pháp tách cấu trúc và sử dụng phương trình Lagrange II thành lập hệ phương trình vi phân cho các chuỗi động. Theo đó ba chuỗi động được tách rời khỏi bàn máy động và bổ sung lực liên kết tại vị trí khớp được tách ra, sau đó sử dụng phương trình Lagrange II lập phương trình chuyển động cho mỗi

chuỗi động. Phương pháp này vẫn không loại bỏ hết lực liên kết. Để loại bỏ hoàn toàn lực liên kết có thể dùng phương trình Lagrange dạng nhân tử, các thông tin về lực liên kết được ẩn trong các nhân tử Lagrange. Đây là phương pháp phân tích được sử dụng trong chương này.

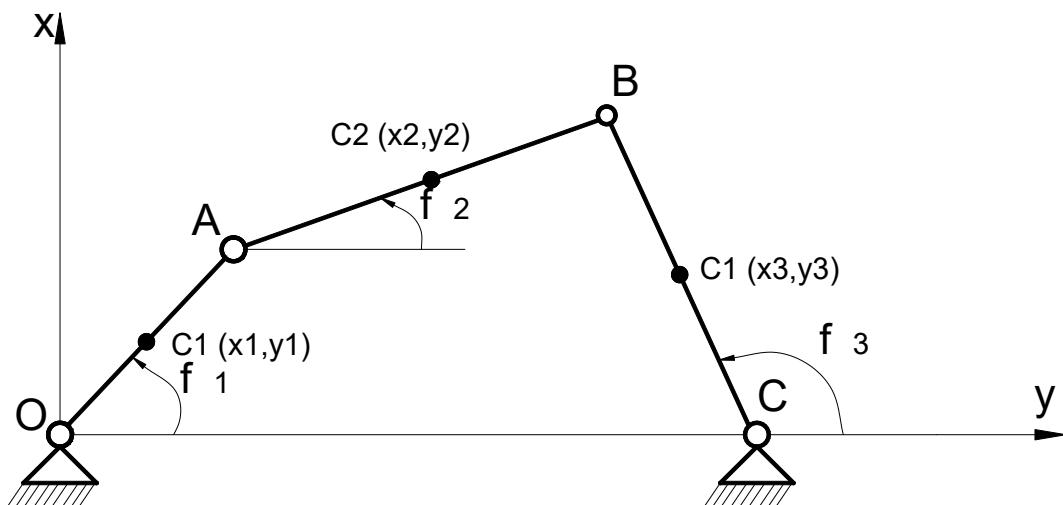
Ngoài ra, phương pháp phân tích động lực học dựa trên nguyên lí công ảo cũng là một phương pháp phân tích hiệu quả trong việc phân tích động lực các cơ cấu song song [4]

3.2. Phương trình Lagrange dạng nhân tử cho hệ vật rắn chịu liên kết Holonom.

a) Khái niệm tọa độ suy rộng đủ và tọa độ suy rộng có dư [2]

Số tọa độ suy rộng độc lập duy nhất dùng để xác định vị trí của một cơ hệ được gọi là tọa độ suy rộng đủ. Như vậy với một cơ hệ thì số tọa độ suy rộng đủ bằng số bậc tự do của cơ hệ. Khi ta sử dụng nhiều hơn số tọa độ suy rộng đủ để xác định vị trí của cơ hệ thì các tọa độ này gọi là các tọa độ suy rộng có dư. Các tọa độ suy rộng có dư hay được sử dụng để xác định vị trí của cơ hệ có cấu trúc mạch vòng động học.

Ví dụ trong **Hình 3.1**, sơ đồ động học của cơ cấu bốn khâu bán lề, để xác định vị trí của cơ cấu, ta sử dụng các *tọa độ suy rộng dư* đó là các góc $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ là các góc xác định độ lệch của các khâu động so với Ox, các tọa độ $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ là tọa độ các trọng tâm của các khâu động.



Hình 3.1. Sơ đồ động học cơ cấu bốn khâu bán lề

Thực tế cơ cấu này chỉ có một bậc tự do nên giữa các tọa độ suy rộng dư tồn tại các quan hệ ràng buộc đó là các *phương trình liên kết*. Với 9 tọa độ suy rộng dư, ta có 8 *phương trình liên kết* ràng buộc 8 bậc tự do như sau:

Vị trí khối tâm C_1 :

$$x_1 = \frac{l_1}{2} \cos(\varphi_1), y_1 = \frac{l_1}{2} \sin(\varphi_1)$$

Vị trí khôi tâm C_2 :

$$x_2 = l_1 \cos(\varphi_1) + \frac{l_2}{2} \cos(\varphi_2)$$

$$y_2 = l_1 \sin(\varphi_1) + \frac{l_2}{2} \sin(\varphi_2)$$

Vị trí khôi tâm C_3 :

$$x_3 = l_1 \cos(\varphi_1) + l_2 \cos(\varphi_2) + \frac{l_3}{2} \cos(\varphi_3)$$

$$y_3 = l_1 \sin(\varphi_1) + l_2 \sin(\varphi_2) + \frac{l_3}{2} \sin(\varphi_3)$$

Do các khâu OA, AB, BC nối với nhau bằng các khớp bản lề nên ta có hai phương trình ràng buộc chuyển động của các khâu:

$$l_1 \cos(\varphi_1) + l_2 \cos(\varphi_2) - l_3 \cos(\varphi_3) - l_0 = 0$$

$$l_1 \sin(\varphi_1) + l_2 \sin(\varphi_2) - l_3 \sin(\varphi_3) = 0$$

b) Phương trình Lagrange dạng nhân tử của hệ nhiều vật.

Xét cơ hệ được xác định bởi m tọa độ suy rộng dư q_k ($k = 1, 2, \dots, m$). Giả sử hệ chịu r liên kết Holonom được thể hiện bởi các phương trình liên kết:

$$f_i(q_1, q_2, \dots, q_m, t) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, r)$$

Khi đó, phương trình Lagrange dạng nhân tử cho hệ gồm p vật rắn chịu r liên kết Holonom có dạng [1, 2, 9] :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial q_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} = Q_k - \sum_{i=1}^r \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial q_k} - \frac{\partial U}{\partial q_k} \quad (3.1)$$

Trong đó:

T : Là tổng động năng của cơ hệ.

U : Là tổng thế năng của cơ hệ.

λ_i : Nhân tử Lagrange chứa thông tin về lực liên kết.

Q_k : Lực suy rộng tác dụng vào cơ hệ (gồm các lực không có thế).

Như vậy cùng với r phương trình liên kết và m phương trình vi phân ở dạng (3.1) ta có tổng cộng $m + r$ phương trình dùng để xác định m tọa độ suy rộng và r nhân tử Lagrange.

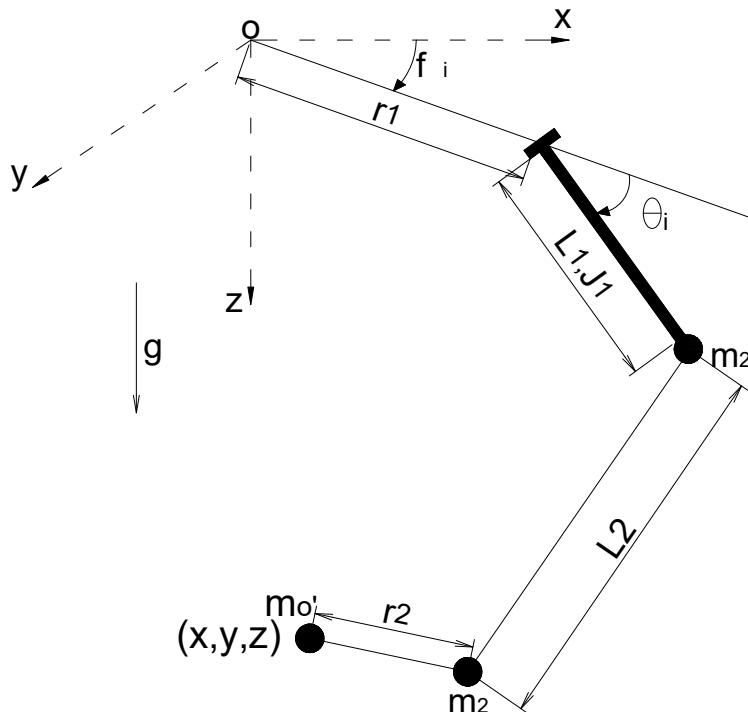
3.3. Phân tích động lực học Robot song song Delta sử dụng phương trình Lagrange dạng nhân tử.

Các thành phần khối lượng và quán tính của Robot song song Delta được thể hiện ở **Hình 3.2** trong đó:

Khâu chủ động là thanh mảnh có chiều dài l_1 , khối lượng m_1 .

Tay nối được thay thế tương đương bằng hai khối lượng tập trung tại hai đầu khớp là m_2 , khoảng cách giữa hai khớp động ở hai đầu tay nối là l_2 [9].

Bàn di động có khối lượng là m_o , khối tâm bàn di động có tọa độ xét trong hệ cố định gắn với bàn máy là (x, y, z) . Các tọa độ suy rộng dư được lựa chọn bao gồm góc quay của các khâu chủ động ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) và tọa độ của bàn máy động (x, y, z) .



Hình 3.2. Các thành phần khối lượng và quán tính Robot song song Delta

Để áp dụng phương trình (3.1), ta xác định các thành phần trong phương trình như sau:

Tổng động năng của cơ hệ bao gồm động năng chuyển động của các khâu chủ động, tay nối và bàn máy động trong đó:

- Động năng của khâu chủ động với chuyển động quay xung quanh trục khớp cố định:

$$T_1 = \frac{1}{6} m_1 l_1^2 \cdot \sum_{i=1}^3 \dot{\theta}_i^2$$

➤ Động năng của tay dẫn với hai khối lượng tập trung ở hai đầu khớp :

$$T_2 = \frac{1}{2}m_2 \cdot \sum_{i=1}^3 (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 + l_1^2 \dot{\theta}_i^2)$$

➤ Động năng của bàn máy động chuyển động tịnh tiến trong không gian:

$$T_3 = \frac{1}{2}m_{o'}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2)$$

Như vậy tổng động năng của Robot là:

$$T = \frac{1}{2}m_{o'}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + \frac{1}{6}m_1l_1^2 \cdot \sum_i \dot{\theta}_i^2 + \frac{1}{2}m_2 \cdot \sum_{i=1}^3 (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 + l_1^2 \dot{\theta}_i^2) \quad (3.2)$$

Tổng thế năng của cơ hệ:

$$U = m_{o'}g.z + \frac{1}{2}m_1gl_1 \sum_{i=1}^3 \sin\theta_i + m_2g \sum_{i=1}^3 (z + l_1 \sin\theta_i) \quad (3.3)$$

Trong đó:

$U_1 = \frac{1}{2}m_1gl_1 \sum_{i=1}^3 \sin\theta_i$ là thế năng của khâu chủ động.

$U_2 = m_2g \sum_{i=1}^3 (z + l_1 \sin\theta_i)$ là thế năng của tay nối.

$U_3 = m_{o'}g.z$ là thế năng của bàn máy động.

Các phương trình liên kết thể hiện quan hệ ràng buộc giữa các tọa độ suy rộng dư chính là các phương trình động học (2.13):

$$f_i(\theta_1, \theta_2, \theta_3, x, y, z) = (x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2 - l_2^2 = 0$$

Trong đó:

$$\begin{cases} X_i = \cos\varphi_i \cdot (r + l_1 \cos\theta_i) \\ Y_i = \sin\varphi_i \cdot (r + l_1 \cos\theta_i) \\ Z_i = l_1 \sin\theta_i \end{cases}$$

Thay các biểu thức vào phương trình Lagrange nhân tử ta thành lập được các phương trình sau:

➤ Phương trình vi phân chuyển động của bàn máy động :

Tính toán các số hạng $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial q_i} \right)$ ta có:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) &= \frac{1}{2}m_{o'} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2)}{\partial \dot{x}} \right) + \frac{1}{2}m_2 \sum_{i=1}^3 \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 + l_1^2 \dot{\theta}_i^2)}{\partial \dot{x}} \right) \\ &= (m_{o'} + 3m_2)\ddot{x} \end{aligned}$$

Tương tự đối với các thành phần $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right)$ và $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}} \right)$ ta có :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) = (m_{o'} + 3m_2)\ddot{y}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}} \right) = (m_{o'} + 3m_2)\ddot{z}$$

Các thành phần $\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z}$ và $\frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}$ bằng 0, thành phần

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{\partial(m_{o'}g \cdot z)}{\partial z} + m_2 g \sum_{i=1}^3 \frac{\partial(z + l_1 \sin \theta_i)}{\partial z} = (m_{o'} + 3m_2)g$$

Xác định các thành phần $\sum_{i=1}^3 \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial q_k}$:

$$\sum_{i=1}^3 \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial x} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \frac{\partial (x - \cos \varphi_i \cdot (r + l_1 \cos \theta_i))^2}{\partial x} = 2 \sum_{i=1}^3 \lambda_i (x - \cos \varphi_i \cdot (r + l_1 \cos \theta_i))$$

$$\sum_{i=1}^3 \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial y} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \frac{\partial (y - \sin \varphi_i \cdot (r + l_1 \cos \theta_i))^2}{\partial x} = 2 \sum_{i=1}^3 \lambda_i (y - \sin \varphi_i \cdot (r + l_1 \cos \theta_i))$$

$$\sum_{i=1}^3 \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial z} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \frac{\partial (z - l_1 \sin \theta_i)^2}{\partial z} = 2 \sum_{i=1}^3 \lambda_i (z - l_1 \sin \theta_i)$$

Các lực suy rộng không có thể đối với các tọa độ suy rộng (x,y,z) đều bằng 0 (giả thiết bỏ qua lực cản). Thay các số hạng tính toán ở trên vào phương trình Lagrange dạng nhân tử ta thu được các phương trình vi phân chuyển động của bàn máy động như sau:

$$(m_{o'} + 3m_2)\ddot{x} + 2 \sum_{i=1}^3 \lambda_i (x - \cos \varphi_i \cdot (r + l_1 \cos \theta_i)) = 0 \quad (3.4)$$

$$(m_{o'} + 3m_2)\ddot{y} + 2 \sum_{i=1}^3 \lambda_i (y - \sin \varphi_i \cdot (r + l_1 \cos \theta_i)) = 0 \quad (3.5)$$

$$(m_{o'} + 3m_2)\ddot{z} + 2 \sum_{i=1}^3 \lambda_i (z - l_1 \sin \theta_i) = -(m_{o'} + 3m_2)g \quad (3.6)$$

➤ Phương trình vi phân chuyển động của khâu chủ động:

Tính các số hạng $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_i} \right)$ ta có:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_i} \right) &= \frac{1}{6} m_1 l_1^2 \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \dot{\theta}_i^2}{\partial \dot{\theta}_i} \right) + \frac{1}{2} m_2 \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 + l_1^2 \dot{\theta}_i^2)}{\partial \dot{\theta}_i} \right) \\ &= \left(\frac{1}{3} m_1 + m_2 \right) l_1^2 \ddot{\theta}_i \end{aligned}$$

Với $i = 1, 2, 3$.

Tính các số hạng $\frac{\partial U}{\partial \theta_i}$ ta có:

$$\frac{\partial U}{\partial \theta_i} = \frac{1}{2} m_1 g l_1 \cdot \frac{\partial \sin \theta_i}{\partial \theta_i} + m_2 g \frac{\partial (z + l_1 \sin \theta_i)}{\partial \theta_i} = \left(\frac{1}{2} m_1 + m_2 \right) g l_1 \cdot \cos \theta_i$$

Tính số hạng $\sum_{i=1}^3 \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial \theta_k}$, ($k = 1, 2, 3$) ta có:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^3 \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial \theta_k} \\ &= \lambda_i \frac{\partial [((x - \cos \varphi_i \cdot (r + l_1 \cos \theta_i))^2 + (y - \sin \varphi_i \cdot (r + l_1 \cos \theta_i))^2 + (z - l_1 \sin \theta_i)^2]}{\partial \theta_i} \\ &= 2\lambda_i \cdot [(x - \cos \varphi_i \cdot (r + l_1 \cos \theta_i)) \cdot l_1 \cos \varphi_i \sin \theta_i \\ &\quad + (y - \sin \varphi_i \cdot (r + l_1 \cos \theta_i)) \cdot l_1 \sin \varphi_i \sin \theta_i + (z - l_1 \sin \theta_i) \cdot (-l_1 \cos \theta_i)] \end{aligned}$$

Nhân ra và thu gọn các biểu thức ta sẽ thu được:

$$\sum_{i=1}^3 \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial \theta_k} = 2\lambda_i l_1 [(x \cos \varphi_i + y \sin \varphi_i - r) \sin \theta_i - z \cos \theta_i]$$

Lực suy rộng không thể ứng với các tọa độ suy rộng θ_i chính là các momen tác động từ động cơ τ_i . Thay các số hạng đã tính toán vào phương trình Lagrange dạng nhân tử ta thu được phương trình vi phân chuyển động của khâu chủ động như sau:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{3} m_1 + m_2 \right) l_1^2 \ddot{\theta}_i + 2\lambda_i l_1 [(x \cos \varphi_i + y \sin \varphi_i - r) \sin \theta_i - z \cos \theta_i] \\ &+ \left(\frac{1}{2} m_1 + m_2 \right) g l_1 \cdot \cos \theta_i = \tau_i \end{aligned} \tag{3.7}$$

Với $i = 1, 2, 3$.

Như vậy ta có hệ gồm 6 phương trình vi phân chuyển động (3.4)-(3.7) mô tả cho bàn máy động và khâu chủ động như sau:

$$(m_o' + 3m_2) \ddot{x} + 2 \sum_{i=1}^3 \lambda_i (x - \cos \varphi_i \cdot (r + l_1 \cos \theta_i)) = 0$$

$$(m_o' + 3m_2) \ddot{y} + 2 \sum_{i=1}^3 \lambda_i (y - \sin \varphi_i \cdot (r + l_1 \cos \theta_i)) = 0$$

$$(m_o' + 3m_2) \ddot{z} + 2 \sum_{i=1}^3 \lambda_i (z - l_1 \sin \theta_i) = -(m_o' + 3m_2) g$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{3}m_1 + m_2\right)l_1^2\ddot{\theta}_i + 2\lambda_il_1[(x\cos\varphi_i + y\sin\varphi_i - r)\sin\theta_i - z\cos\theta_i] + \\ & \left(\frac{1}{2}m_1 + m_2\right)gl_1.\cos\theta_i = \tau_i \quad (i = 1,2,3) \end{aligned}$$

Kết hợp với kết quả của bài toán động học nghịch, ta có thể giải bài toán động lực học ngược cho Robot song song Delta theo quy trình sau [1], [2], [3], [9]:

- Với các quỹ đạo thiết kế từ trước, các tọa độ của bàn máy động (x, y, z) là hoàn toàn xác định theo thời gian
- Bằng việc giải bài toán động học ngược ta xác định được giá trị các biến khớp θ_i theo thời gian
- Thay các giá trị tọa độ (x, y, z) và θ_i và các đạo hàm cấp hai của chúng theo thời gian vào ba phương trình vi phân chuyển động của bàn máy động ta giải và tìm được giá trị của các nhân tử Lagrange λ_i ($i = 1,2,3$).
- Thay các giá trị của nhân tử Lagrange và các đạo hàm cấp hai của biến khớp θ_i vào ba phương trình vi phân chuyển động của khâu chủ động ta tính toán được các giá trị momen τ_i tác động vào các khâu chủ động.

Với quy trình tính toán như trên ta có thể ứng dụng các phần mềm tính toán số để lập trình giải bài toán động lực học ngược cho Robot song song kiểu Delta. Trong phần tiếp theo ta sẽ trình bày các kết quả tính toán cho bài toán này.

3.4. Các kết quả tính toán số bài toán động lực học ngược Robot song song Delta.

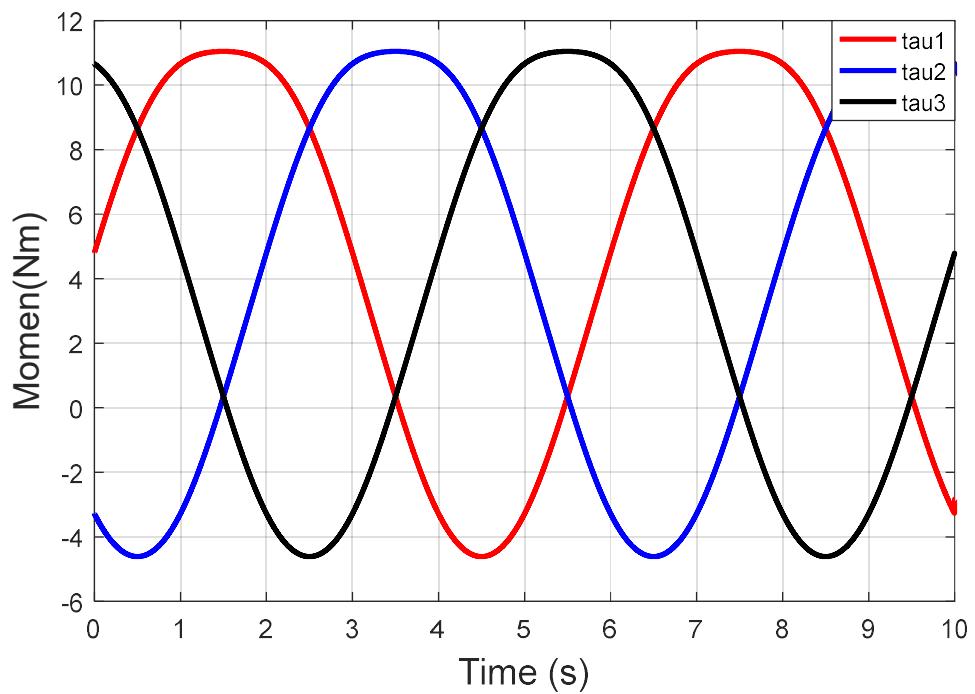
Khảo sát bài toán động lực học ngược của Robot với bàn máy động chuyển động theo một quỹ đạo đường tròn nằm trên mặt phẳng $z = 0.85$ (m), tâm có tọa độ (0,0,0.85) bán kính bằng 0.5m.

$$x = 0.5 * \cos\left(\frac{\pi}{3}t\right) \quad (m)$$

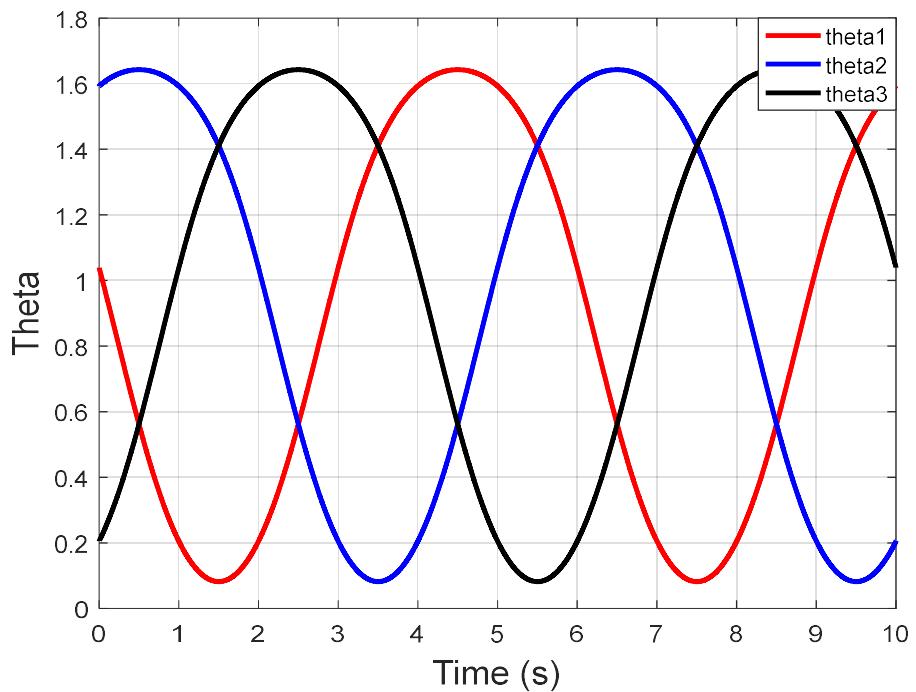
$$y = 0.5 * \sin\left(\frac{\pi}{3}t\right) \quad (m)$$

$$z = 0.85 \quad (m)$$

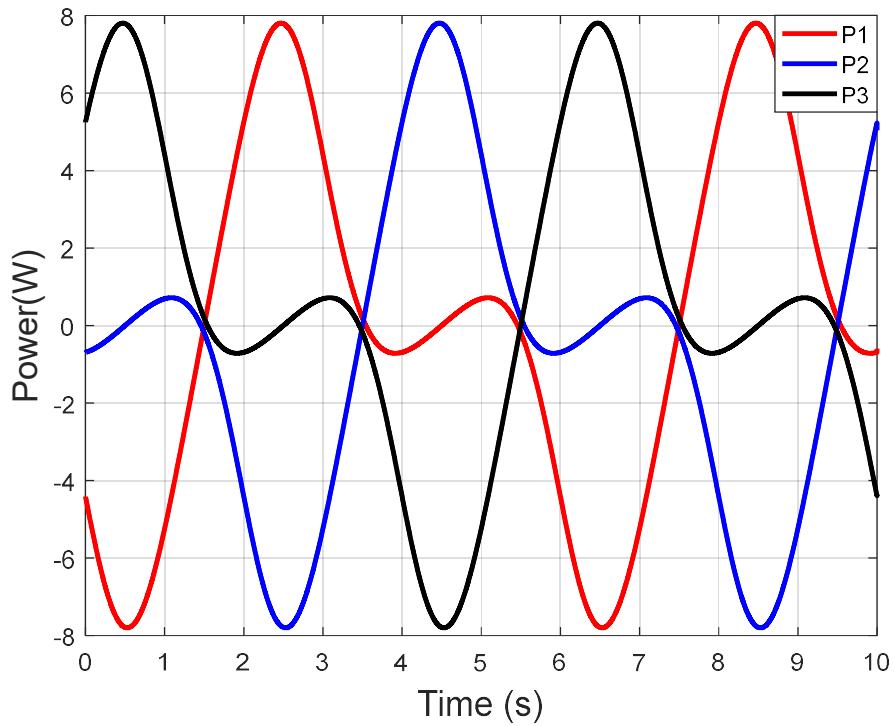
Các thông số về khối lượng các khâu như sau: $m_1 = 1.954\text{ kg}$, $m_2 = 0.475\text{ kg}$, $m_o' = 0.504\text{ kg}$, gia tốc trọng trường $g = 9.8\text{ m/s}^2$. Ứng dụng phần mềm Matlab ta viết một *Script file* lập trình giải bài toán động lực học ngược theo quy trình ở trên (chi tiết được trình bày ở phần **Phụ lục**). Với quỹ đạo cho trước của bàn máy động như ở trên, có thể nhận thấy định tính rằng các đại lượng như góc quay, momen, công suất tác động trên các khâu chủ động là điều hòa như nhau, chỉ lệch nhau về pha. Các kết quả sau thể hiện rõ hơn điều đó.



Hình 3.3. Đồ thị momen ngẫu lực tác động trên các khâu chủ động



Hình 3.4. Đồ thị góc quay các khâu chủ động



Hình 3.5. Đồ thị công suất tác động trên các khâu chủ động

Như vậy với sự trợ giúp của máy tính việc tính toán động lực học Robot song song đã trở nên dễ dàng và thuận tiện hơn. Các kết quả được thể hiện ở các **Hình 3.3** đến **3.5** được thực hiện với bước chia thời gian là 0.01s, thời gian tính toán là 0.217s. Điều đó cho thấy việc áp dụng phương trình Lagrange dạng nhân tử để tính toán động lực học Robot song song cho năng suất tính toán khá tốt.

CHƯƠNG 4: MÔ PHỎNG CHUYỂN ĐỘNG ROBOT.

Tóm tắt:

Trong chương này ta ứng dụng công cụ Simscape Multibody của phần mềm Matlab để xây dựng mô hình mô phỏng chuyển động cho Robot trong môi trường Simulink. Nhờ công cụ này ta có thể xây dựng mô hình 3D nguyên lý của các cơ cấu cơ học bằng các phần mềm thiết kế thông dụng như Solidwork, Autodesk Inventor, PTC Creo sau đó chuyển cơ hệ thành mô hình Simulink trong Matlab gồm các khâu và các khớp liên kết với nhau. Công cụ này cho phép mô phỏng trực quan chuyển động của cơ cấu, đồng thời còn giúp tính toán một số đại lượng động học và động lực học cơ cấu.

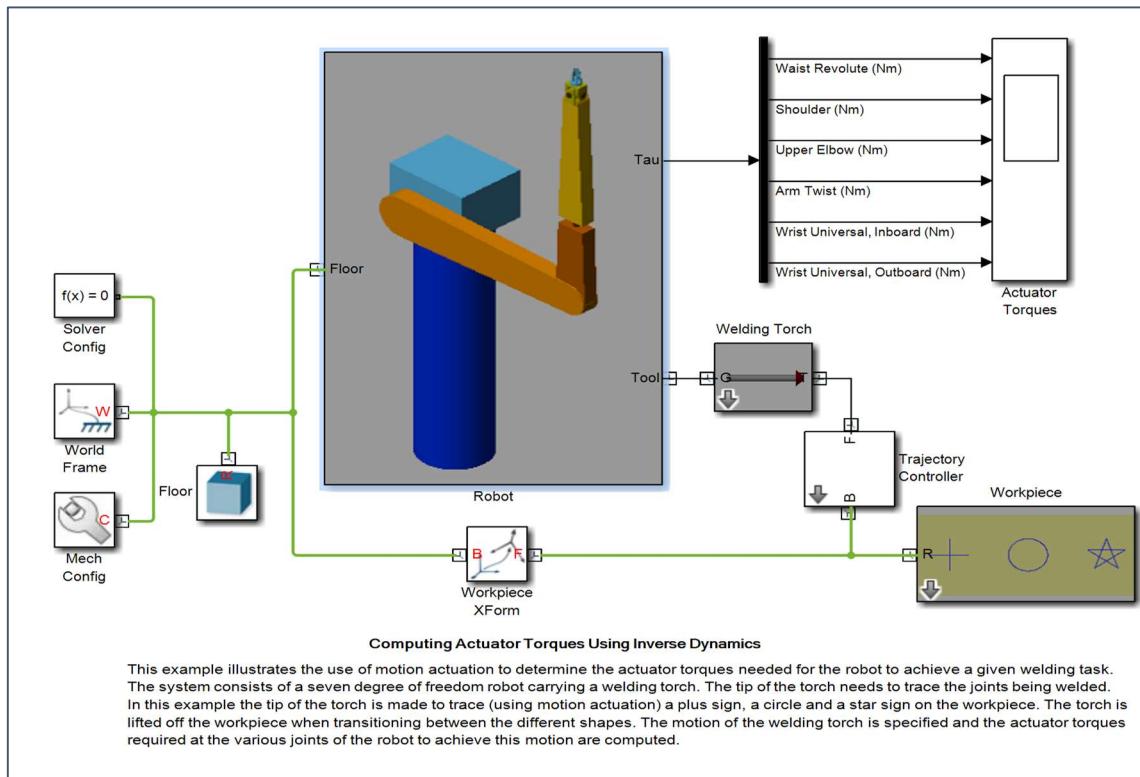
Trong chương này ta tiến hành chuyển mô hình 3D Robot song song Delta từ phần mềm Solidworks vào mô hình mô phỏng trong Simulink. Một số dạng quỹ đạo được thiết kế cho bàn máy động của Robot và được mô phỏng chuyển động. Kết quả của bài toán thiết kế quỹ đạo là quy luật chuyển động của biến khớp ở khâu chủ động đáp ứng quy luật chuyển động của bàn máy động, tức là áp dụng bài toán động học ngược để xử lí. Kết quả mô phỏng chuyển động cho thấy tính đúng đắn của bài toán động học ngược đã giải quyết ở phần trước. Ngoài ra trong chương này ta còn ứng dụng công cụ Simscape Multibody để tự động tính toán momen tại các khớp chủ động tương ứng với các quỹ đạo được thiết, tức là đi giải bài toán động lực học ngược như ở phần trước. Đồ thị momen sẽ cho thấy kết quả tính toán động lực học ngược bằng công cụ này và tính toán theo lí thuyết ở phần trước là giống nhau. Điều đó chứng tỏ mô hình tính toán động lực học và các kết quả tính toán số ở phần trước là đúng đắn.

4.1. Giới thiệu công cụ Simscape Multibody

Simscape Multibody là một công cụ trong Simulink cung cấp một môi trường mô phỏng cho các hệ cơ học nhiều vật như các robot, hệ thống treo trên các phương tiện giao thông, các cơ cấu cơ khí... Chúng ta có thể mô hình hóa các cơ cấu cơ học bằng các khối thể hiện cho các vật, các khâu và các khớp liên kết với nhau. Để thuận tiện hơn cho việc xây dựng các mô hình cơ học ta có thể xây dựng mô hình lắp ghép cơ hệ gồm các vật thể, các khớp liên kết, các ràng buộc chuyển động... và gán các thuộc tính động lực học như khối lượng, momen quán tính trong các phần mềm CAD 3D như Solidworks, Inventor, Creo... sau đó công cụ có thể tự động xây dựng mô hình mô phỏng trong môi trường Simulink, mô hình sẽ mô tả đầy đủ các yếu tố kể trên của cơ hệ đã xây dựng trong môi trường 3D CAD. Chuyển động của cơ hệ khi chạy mô phỏng còn được thể hiện trong một môi trường 3D giúp thể hiện trực quan hoạt động của hệ thống.

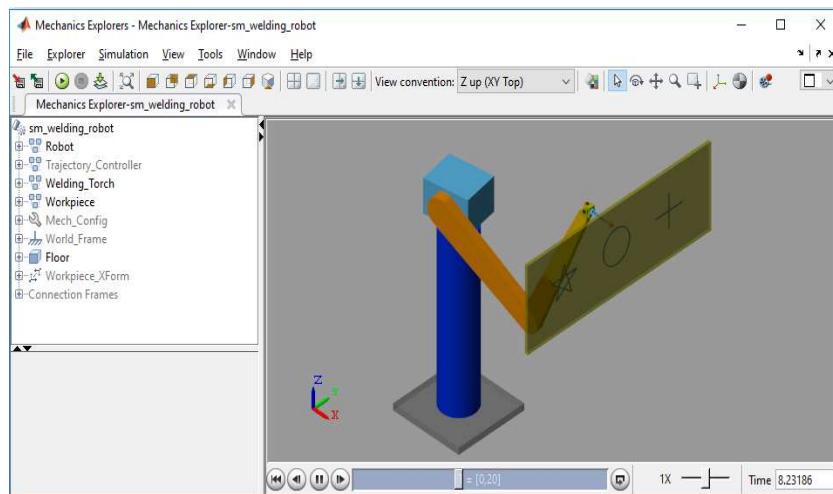
Với Simscape Multibody người dùng còn có thể xây dựng hệ thống điều khiển cho cơ hệ và mô phỏng đánh giá chất lượng hệ thống. Với việc xây dựng trong môi trường Simulink chúng ta còn có thể tham số hóa hệ thống bằng việc sử dụng các công cụ toán học có sẵn trong Simulink đồng thời có thể bổ sung thêm các đối tượng vật lí khác của họ Simscape như các phần tử thủy lực, khí nén (xy lanh, động cơ, van thủy lực), các

phần tử điện (điện trở, tụ, cuộn cảm...) và các hệ thống vật lí khác để xây dựng những hệ thống lớn.

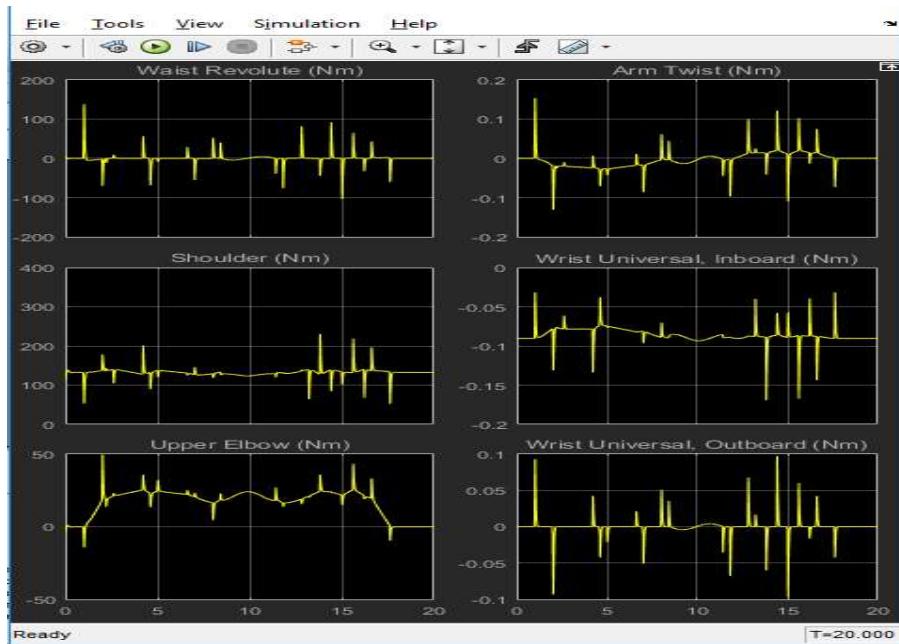


Hình 4.1. Ví dụ mô phỏng Robot với công cụ Simscape Multibody.

Hệ thống gồm một tay máy robot 6 bậc tự do với nhiệm vụ đưa đầu hàn (điểm tác động cuối) chạy theo đường quỹ đạo hình chữ thập, hình tròn và ngôi sao trên bàn làm việc. Khi chạy mô hình trong thời gian 20s, công cụ giúp ta quan sát được chuyển động của Robot và tính toán được momen tại các khớp động như sau:



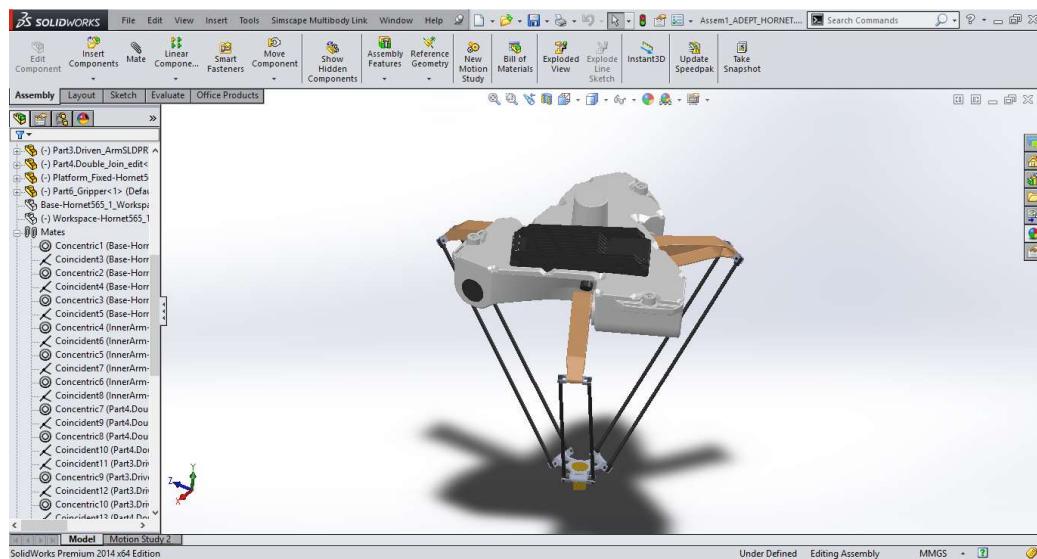
Hình 4.2. Ví dụ môi trường mô phỏng chuyển động của Robot



Hình 4.3. Ví dụ tính toán momen tại các khớp động của Robot.

4.2. Xây dựng mô hình mô phỏng Robot song song Delta bằng công cụ Simscape Multibody

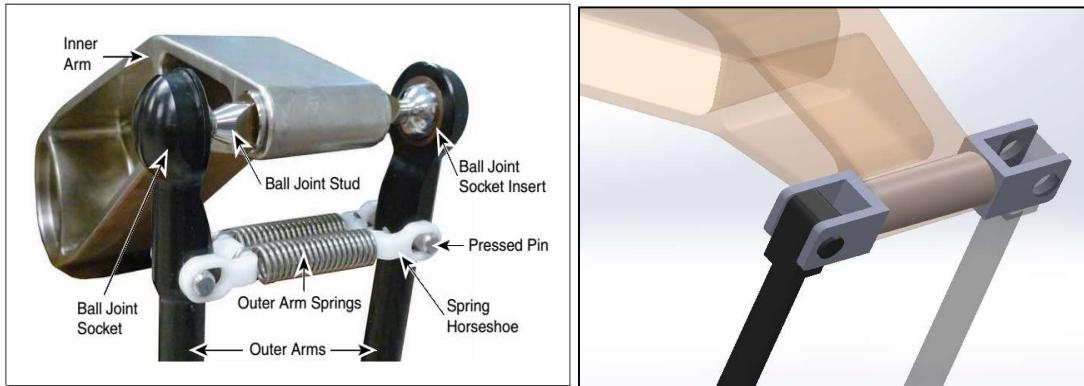
Để xây dựng được mô hình mô phỏng Robot bằng công cụ Simscape Multibody trước tiên ta cần xây dựng mô hình lắp ghép của Robot bằng phần mềm 3D CAD, ở đây ta sử dụng phần mềm Solidworks.



Hình 4.4. Mô hình lắp ghép Robot trong môi trường Assembly của Solidworks.

Trước khi chuyển thành mô hình mô phỏng bằng công cụ Simscape Multibody ở đây ta cần lưu ý hiệu chỉnh mô hình ở liên kết của tay nối với khâu chủ động và tay nối với bàn máy động thông qua một khâu trung gian như sau. Mô hình ban đầu của liên kết này là khớp cầu cùng với một phần tử lò xo cố định một bậc tự do quay quanh chính

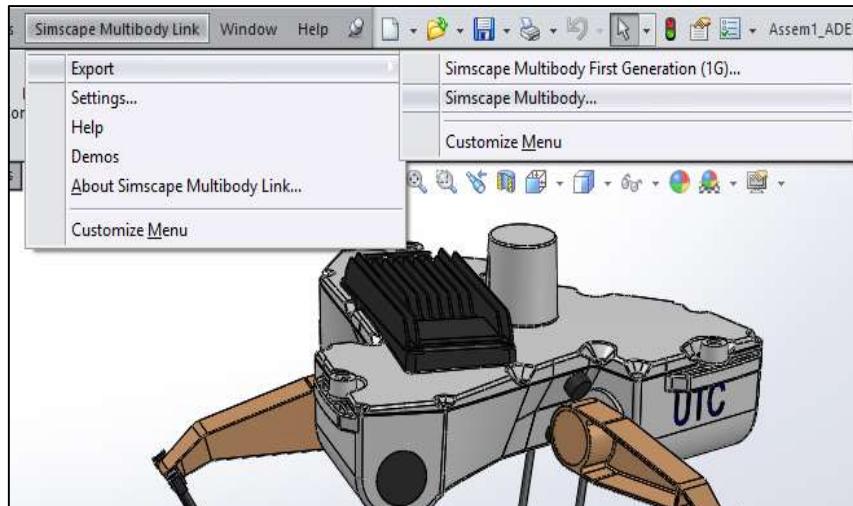
trục của khâu bị động và tạo lực kéo giữ giúp duy trì liên kết. Ta thay liên kết này bằng một liên kết thông qua một thanh ngang với hai khớp quay, một liên kết với khâu chủ động và một liên kết với khâu bị động như **Hình 4.5**.



Hình 4.5. Mô hình thay thế tương đương tại vị trí khớp cầu

Việc thay thế này là hoàn toàn tương đương về mặt động học. Mục đích của việc thay thế này là chuyển khớp cầu thành khớp quay thuận tiện cho việc chuyển mô hình sang Simscape Multibody.

Sau khi xây dựng xong mô hình lắp ghép, ta tiến hành xuất file .xml và chuyển các file 3D các phần tử sang dạng .step. Để làm việc này, ta vào mục *Simscape Multibody Link > Export > Simscape Multibody* sau đó chọn đường dẫn đến thư mục cần lưu như hình.



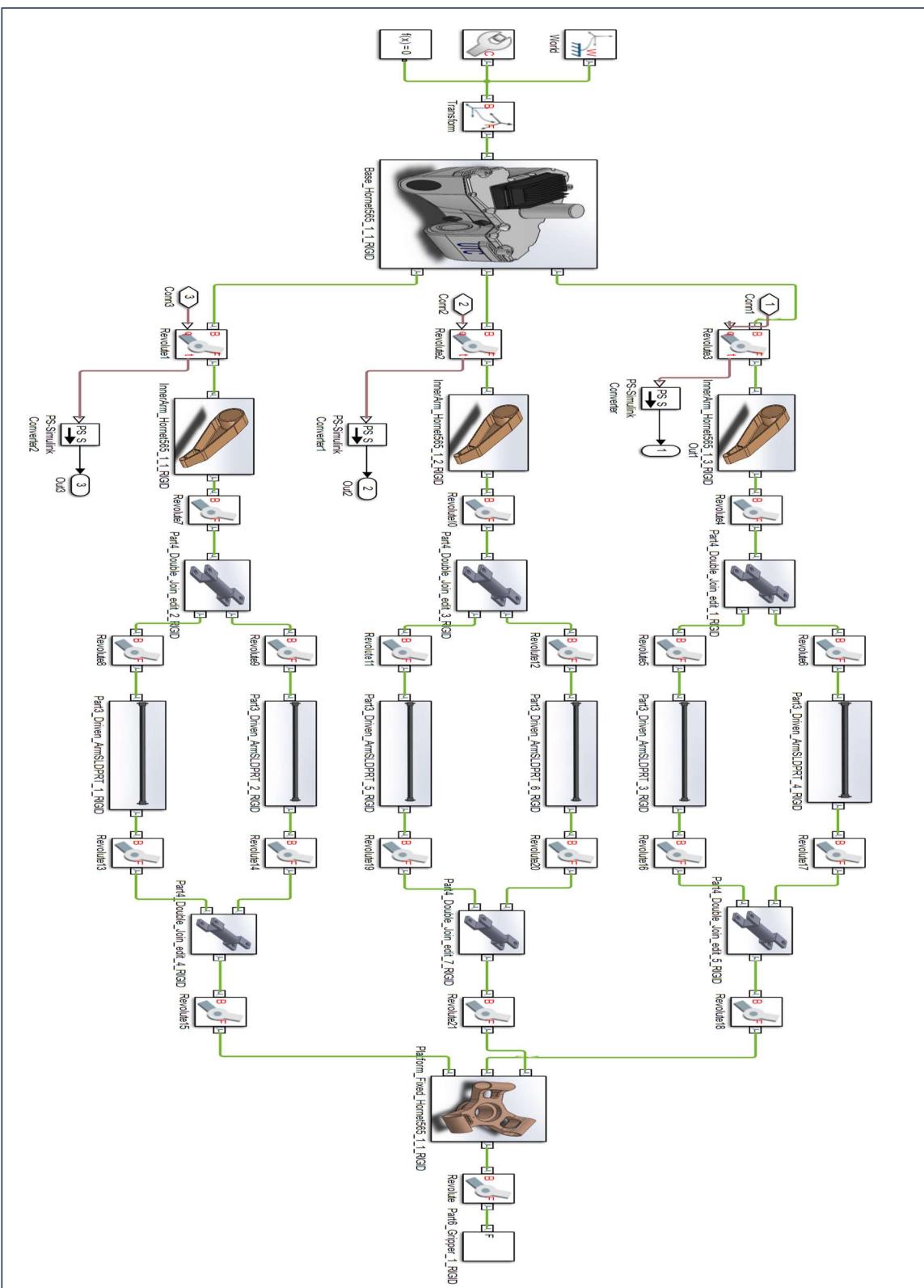
Hình 4.6. Xuất file .xml và .step trong môi trường assembly của Solidworks.

Tiếp theo ta trỏ đến thư mục chứa file .xml và các file .step trong Matlab và gõ dòng lệnh :

```
>> smimport('<name of.xml file>');
```

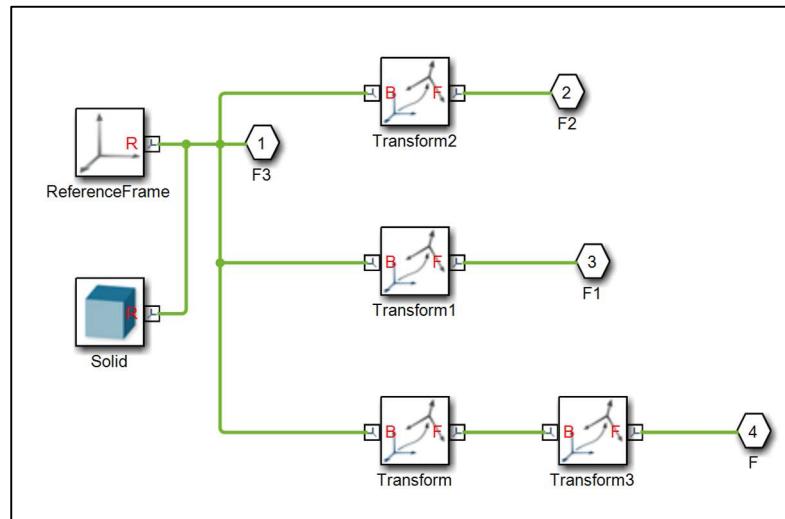
Trong đó <name of.xml file> là tên file .xml ta lưu ở thư mục đó. Sau khi thực hiện lệnh trên Matlab tạo một <name of.xml file>_DataFile.m chứa thông tin về các thông số hình

học, quán tính của cơ hệ và một file .slx chính là mô hình mô phỏng cơ hệ trong môi trường Simulink. Mô hình bao gồm các blocks thể hiện các khâu, các khớp liên kết, các tọa độ khâu và toàn cục... như sau :



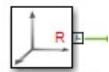
Hình 4.7. Mô hình Simulink mô phỏng chuyển động Robot.

Trong mô hình trên, một block cho mỗi khâu sẽ bao gồm một số thành phần chính như **Hình 4.8**.

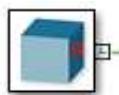


Hình 4.8. Khối mở rộng của bàn máy cố định (Base)

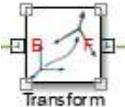
Hình 4.8 mô tả các thành phần chính mô phỏng cho bàn máy cố định trong mô hình Simulink mô phỏng chuyển động của Robot. Cũng như các khối mô phỏng cho các khâu khác, nó bao gồm các thành phần chính như sau:



: Khối *ReferenceFrame* xác định một hệ trục tọa độ mà có thể dùng để tham chiếu cho các hệ tọa độ khác trong mô hình hoặc là hệ trục tọa độ xác định gắn cho một khâu. Cổng *R* cho phép xác định tọa độ của đối tượng (một hệ tọa độ khác) xét trong hệ này nếu nối với cổng *R* với đối tượng đó.

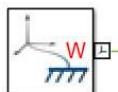


: Khối *Solid* xác định các yếu tố của vật thể rắn trong mô hình mô phỏng, các yếu tố đó bao gồm: hình dáng, khối lượng và quán tính, và một hệ tọa độ gắn cố định với vật thể đó thông qua cổng *R*. Như vậy trong **Hình 4.9** cổng *R* của khối *Solid* nối với cổng *R* của khối *ReferenceFrame* có nghĩa là hệ tọa độ của khối *ReferenceFrame* là hệ tọa độ khâu gắn với bàn máy cố định. Khi kích đúp chuột vào khối *Solid* ta có thể thiết lập các thông số: khối lượng, quán tính, màu sắc hiển thị trên đồ họa, hay thậm chí là tạo một hệ tọa độ khâu mới (khi đó sẽ có thêm cổng *R* kết nối). Mặc định các thông số này sẽ lấy từ dữ liệu trong *<name of .xml file>_DataFile.m* kèm theo khi chuyển mô hình từ môi trường 3D CAD sang Simulink.



: Khối *Transform* xác định các phép biến đổi giữa hai hệ tọa độ (*frame*). Nó cho phép xác định hai phép biến đổi cơ bản giữa hai hệ tọa độ Decart bắt kì đó là phép biến đổi tịnh tiến và phép quay. Các phép biến đổi tịnh tiến và phép quay tọa độ có thể được xác định theo các trục tọa độ và có thể kết hợp đồng thời cả hai phép biến đổi trong một block. Cổng B và F là các cổng kết nối với các hệ tọa độ, cổng B xác định hệ tọa độ tham chiếu (*base frame*) mà hệ tọa độ nối với cổng F (*follower frame*) xác định vị trí gốc tọa độ và hướng các trục so với hệ tham chiếu.

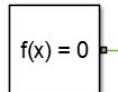
Ngoài ra trong mô hình còn một số khối chức năng chính như sau:



World : Khối *World Frame* xác định hệ tọa độ tổng thể cố định cho toàn cơ hệ. Cổng W là cổng nối với hệ tọa độ được chọn là hệ tọa độ tổng thể của hệ thống.



: Khối *Mechanism Configuration* thiết lập các tham số cho toàn hệ thống đó là vecto gia tốc trọng trường và tham số tuyến tính hóa. Cổng C được kết nối đến hệ tọa độ xác định các tham số đó.



: Khối *Solver Configuration* thiết lập các phương pháp tính toán trong quá trình mô phỏng.

4.3. Mô phỏng chuyển động Robot

Trong phần này ta tiến hành chạy mô phỏng chuyển động của Robot với một số dạng quỹ đạo được thiết kế từ trước cho bàn máy động.

4.3.1. Quỹ đạo đường tròn

Một đường tròn trong mặt phẳng Oxy, tâm $I(x_0, y_0)$, bán kính r có phương trình tham số như sau:

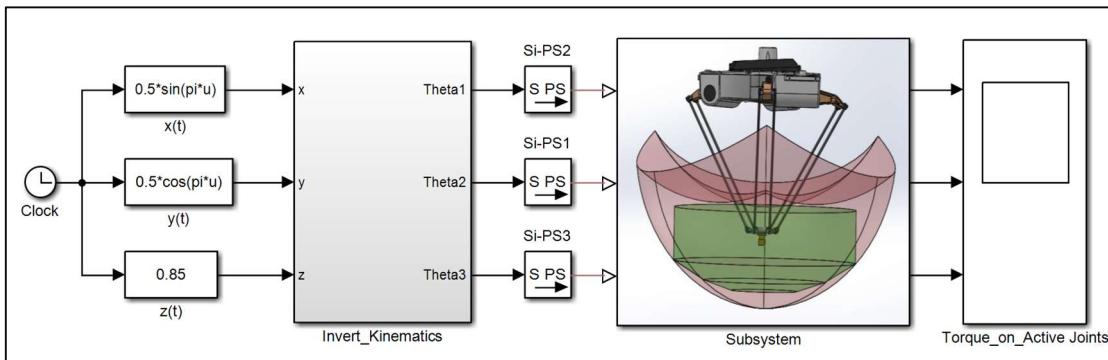
$$\begin{cases} x = x_0 + r\sin(\omega t) \\ y = y_0 + r\cos(\omega t) \end{cases} \quad (4.1)$$

Trong đó t là biến thời gian, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ là tần số góc của chuyển động, $T(s)$ là chu kì chuyển động trên quỹ đạo.

Giả thiết bàn máy động của Robot chuyển động theo một đường tròn bán kính 0.5m, tâm $I(0,0,0.85)$ nằm trong mặt phẳng song song với mặt Oxy, chu kì chuyển động $T = 2s$. Phương trình chuyển động của bàn máy động như sau:

$$\begin{cases} x = 0.5\sin(\frac{2\pi}{2}t) \\ y = 0.5\cos(\frac{2\pi}{2}t) \\ z = 0.85 \end{cases}$$

Mô hình mô phỏng chuyển động của Robot trong Simulink như sau:

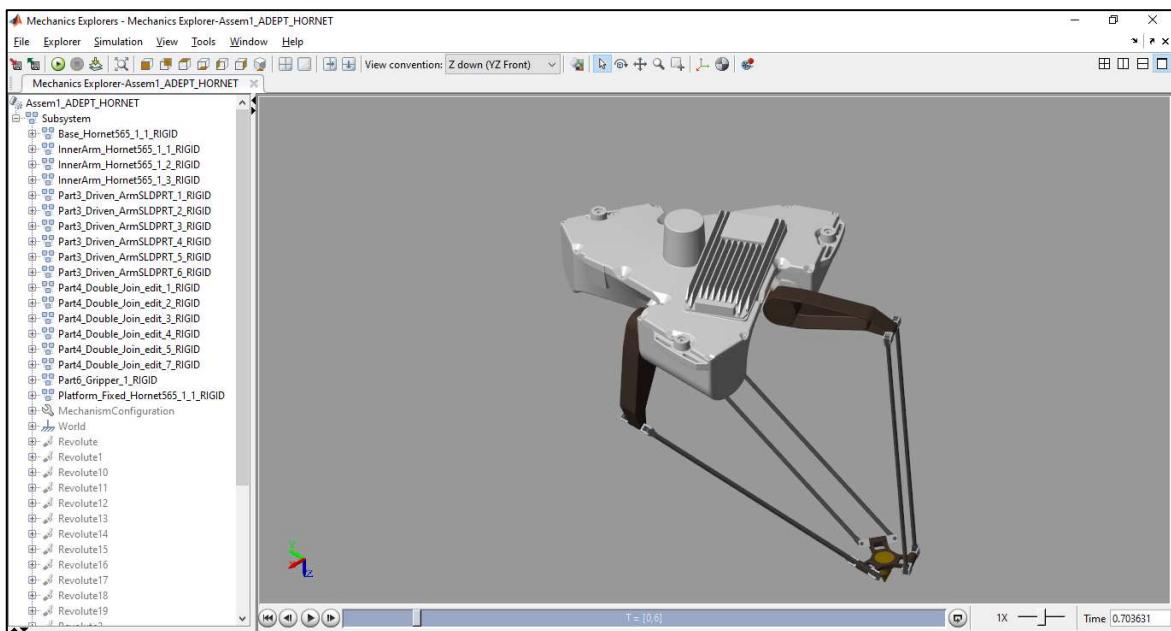


Hình 4.9. Mô hình mô phỏng chuyển động của Robot theo quỹ đạo đường tròn.

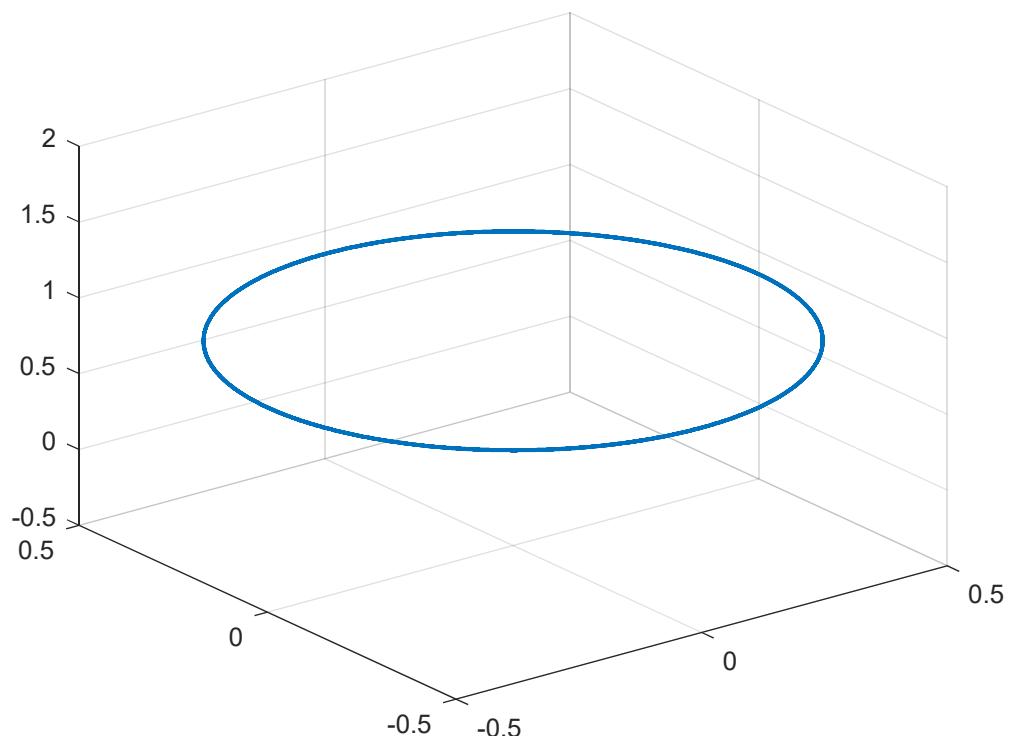
Trong mô hình trên, các tọa độ $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ của bàn máy động được đưa đến khối *Inverse_Kinematics*, một khối Matlab Functions (chi tiết xem ở phần **Phụ lục**), là khối giải bài toán động học ngược để tính toán góc quay của các khớp chủ động.

Khối có tác dụng chuyển đổi các giá trị tính toán số (không có thứ nguyên, unitless) thành các tín hiệu vật lí (mang thứ nguyên của các đại lượng vật lí, *physical signal*), ở đây là góc quay (rad) của khâu chủ động.

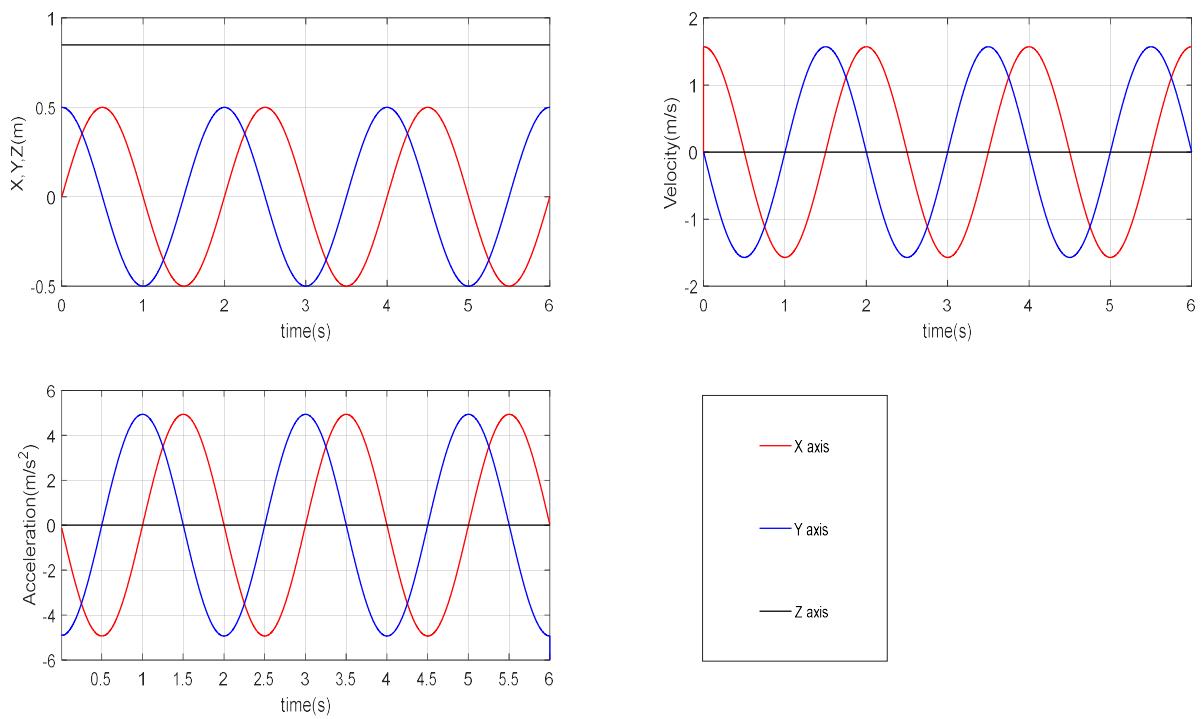
Sau khi xây dựng xong mô hình. Kết quả chạy mô phỏng cho thấy Robot đã chuyển động theo đúng quỹ đạo thiết kế. Điều đó chứng tỏ các kết quả giải bài toán động học thuận và động học ngược ở **Chương 2** là chính xác.



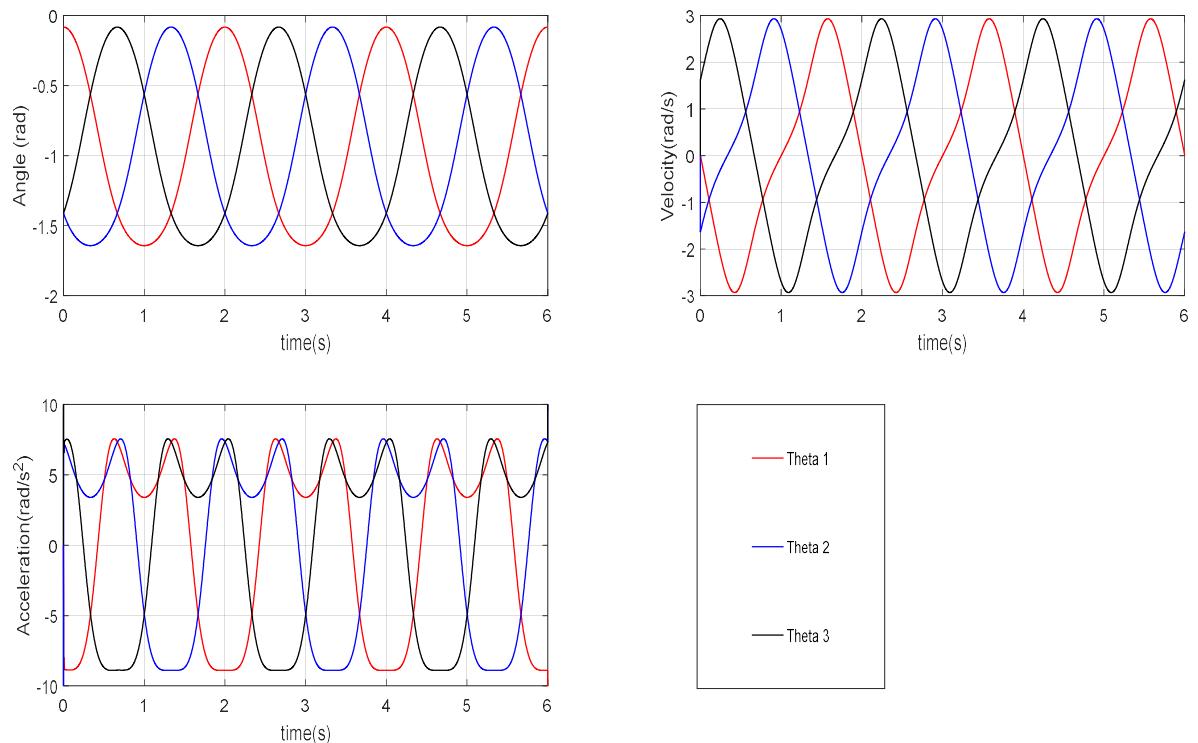
Hình 4.10. Hình ảnh mô phỏng chuyển động của Robot theo quỹ đạo đường tròn.



Hình 4.11. Quỹ đạo chuyển động đường tròn của bàn máy động trong không gian



Hình 4.12. Chuyển động của bàn máy động theo các trục trong không gian



Hình 4.13. Chuyển động của khâu chủ động ứng với quỹ đạo đường tròn.

4.3.2. Quỹ đạo hình chữ U

Robot Delta được sử dụng nhiều trong công nghiệp trong việc gấp đặt các vật thể hay lắp ghép với tốc độ và độ chính xác cao. Với công việc này quỹ đạo dạng chữ U hay được sử dụng để thiết kế chuyển động cho bàn máy động [9].

Giả sử bàn máy động di chuyển từ điểm đầu có tọa độ (x_0, y_0, z_0) đến điểm cuối có tọa độ $(x_0 + dx, y_0 + dy, z_0)$ trong khoảng thời gian từ t_o đến t_f . Trong quá trình chuyển động, ba thời điểm chuyển tiếp t_1, t_2 và t_3 , với $t_0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_f$, được xác định thêm. Từ t_1 đến t_3 bàn máy động di chuyển từ tọa độ (x_0, y_0) đến $(x_0 + dx, y_0 + dy)$. Từ t_0 đến t_2 bàn máy động di chuyển từ tọa độ z_0 đến $z_0 + dz$ và từ t_2 đến t_f di chuyển từ tọa độ $z_0 + dz$ trở lại z_0 .

Để đảm bảo quỹ đạo nằm trong một mặt phẳng ta bổ sung liên hệ bậc nhất giữa các tọa độ y và x với $y = kx$, với mọi $t \in [t_o, t_f]$, k là hằng số. Để đạt được các giá trị vận tốc và gia tốc bằng 0 và liên tục tại các thời điểm chuyển tiếp nhằm tránh sự rung lắc cho cơ cấu trong quá trình chuyển động, phương trình chuyển động của bàn máy động được thiết kế ở dạng các hàm đa thức. Các quỹ đạo được thiết kế thường có dạng đa thức bậc 5 (fifth-order) [17] :

$$s(t) = At^5 + Bt^4 + Ct^3 + Dt^2 + Et + F \quad (4.2)$$

Trong đó $t \in [t_s, t_e]$ với t_s là thời điểm bắt đầu và t_e là thời điểm cuối của hành trình, A, B, C, D, E là các hệ số. Các đạo hàm bậc 1 và bậc 2 thể hiện cho vận tốc và gia tốc chuyển động lần lượt là:

$$\dot{s}(t) = 5At^4 + 4Bt^3 + 3Ct^2 + 2Dt + E \quad (4.3)$$

$$\ddot{s}(t) = 20At^3 + 12Bt^2 + 6Ct + 2D \quad (4.4)$$

Các hệ số A, B, C, D được xác định theo điều kiện biên là các giá trị của tọa độ, vận tốc, gia tốc tại thời điểm đầu và thời điểm cuối. Viết các phương trình trên tại thời điểm đầu $t = t_s$ và thời điểm cuối $t = t_e$ ở dạng ma trận ta được như sau:

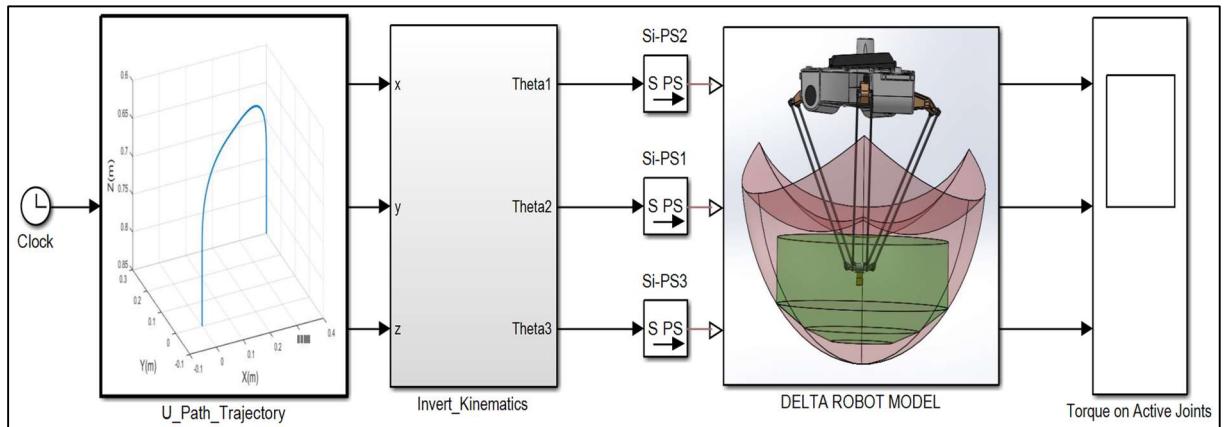
$$\begin{bmatrix} s(t_s) \\ s(t_e) \\ \dot{s}(t_s) \\ \dot{s}(t_e) \\ \ddot{s}(t_s) \\ \ddot{s}(t_e) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_s^5 & t_s^4 & t_s^3 & t_s^2 & t_s & 1 \\ t_e^5 & t_e^4 & t_e^3 & t_e^2 & t_e & 1 \\ 5t_s^4 & 4t_s^3 & 3t_s^2 & 2t_s & 1 & 0 \\ 5t_e^4 & 4t_e^3 & 3t_e^2 & 2t_e & 1 & 0 \\ 20t_s^3 & 12t_s^2 & 6t_s & 2 & 0 & 0 \\ 20t_e^3 & 12t_e^2 & 6t_e & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Thay các giá trị được thiết kế từ trước vào phương trình ma trận ở trên ta sẽ tìm được ma trận gồm các hệ số A, B, C, D, E, F .

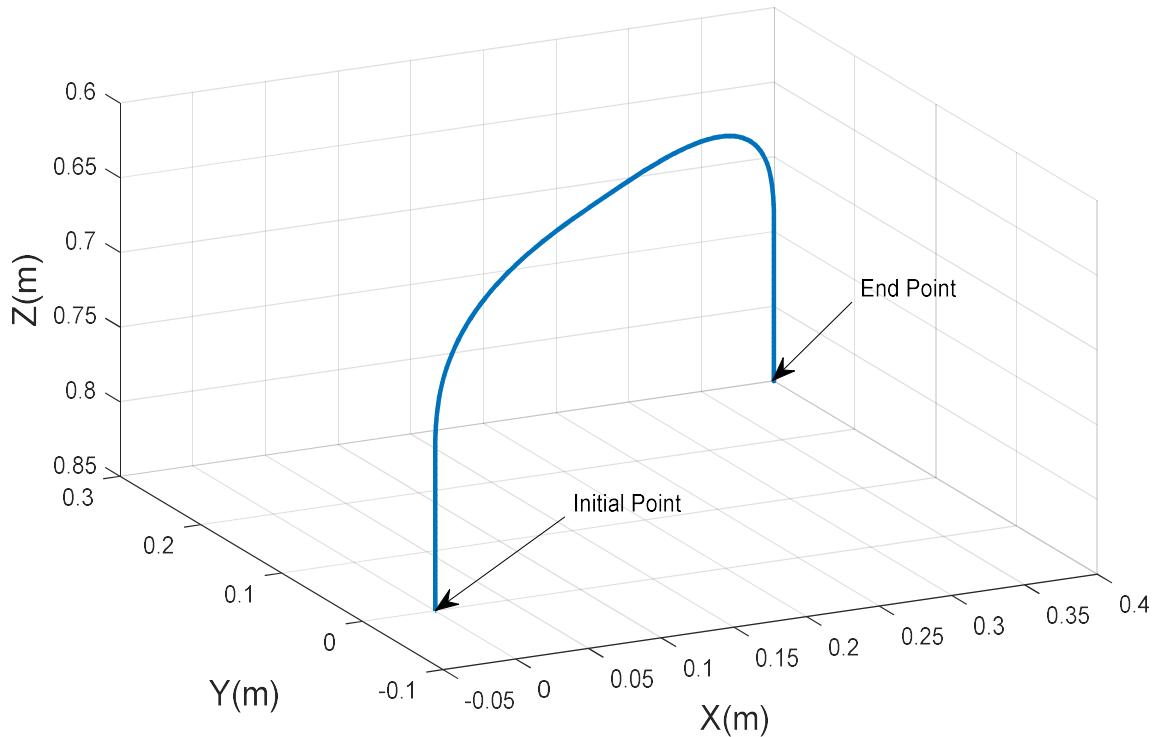
Với bài toán thiết kế quỹ đạo hình chữ U cho Robot Delta ở trên, ta giả thiết các giá trị thiết kế như sau:

Các thời điểm chuyển tiếp của quỹ đạo $(t_0, t_1, t_2, t_3, t_f) = (0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6)$ (s). Điểm xuất phát là điểm có tọa độ $(0, 0, 0.85)$ (m), các số gia của tọa độ trong hành trình $(dx, dy, dz) = (0.4, 0.3, -0.2)$ (m), tức là điểm cuối hành trình có tọa độ $(0.4, 0.3, 0.85)$

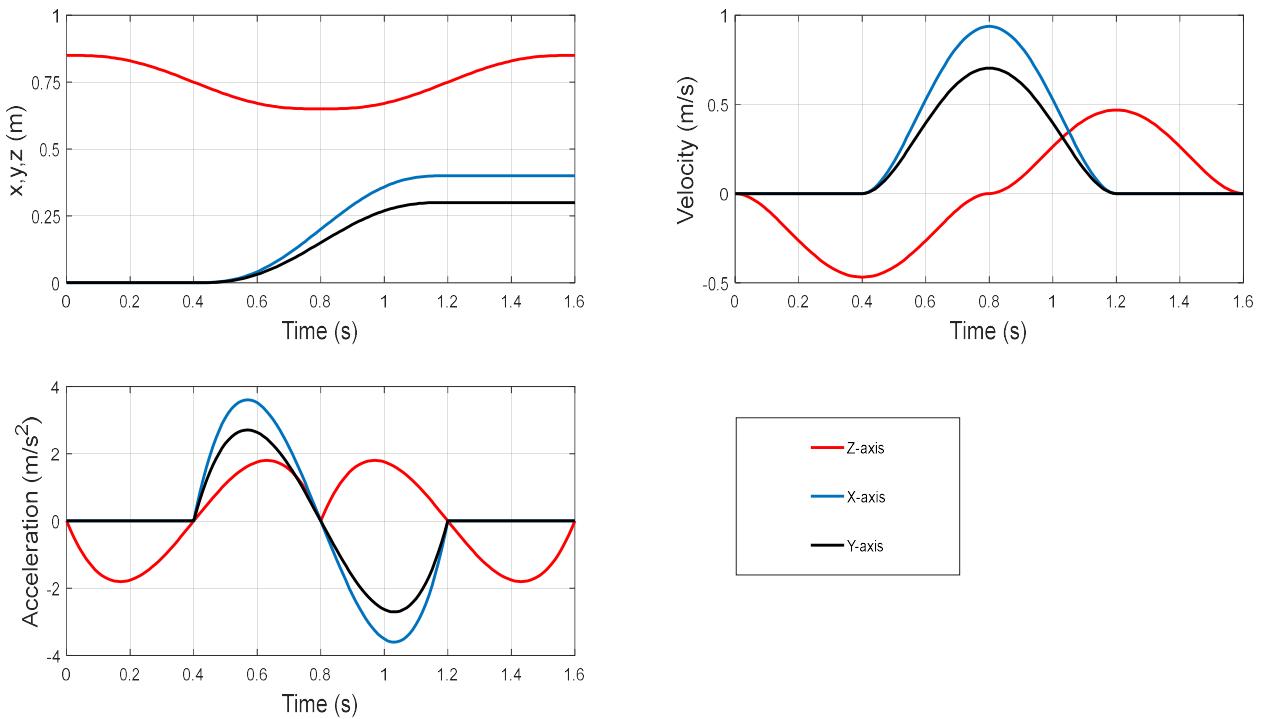
Từ các số liệu thiết kế và các phân tích ở trên, một chương trình Matlab được viết để tính toán xây dựng quỹ đạo hình chữ U cho Robot. Khi chạy chương trình ta thu được các đồ thị thể hiện quỹ đạo chuyển động cho Robot như hình dưới.



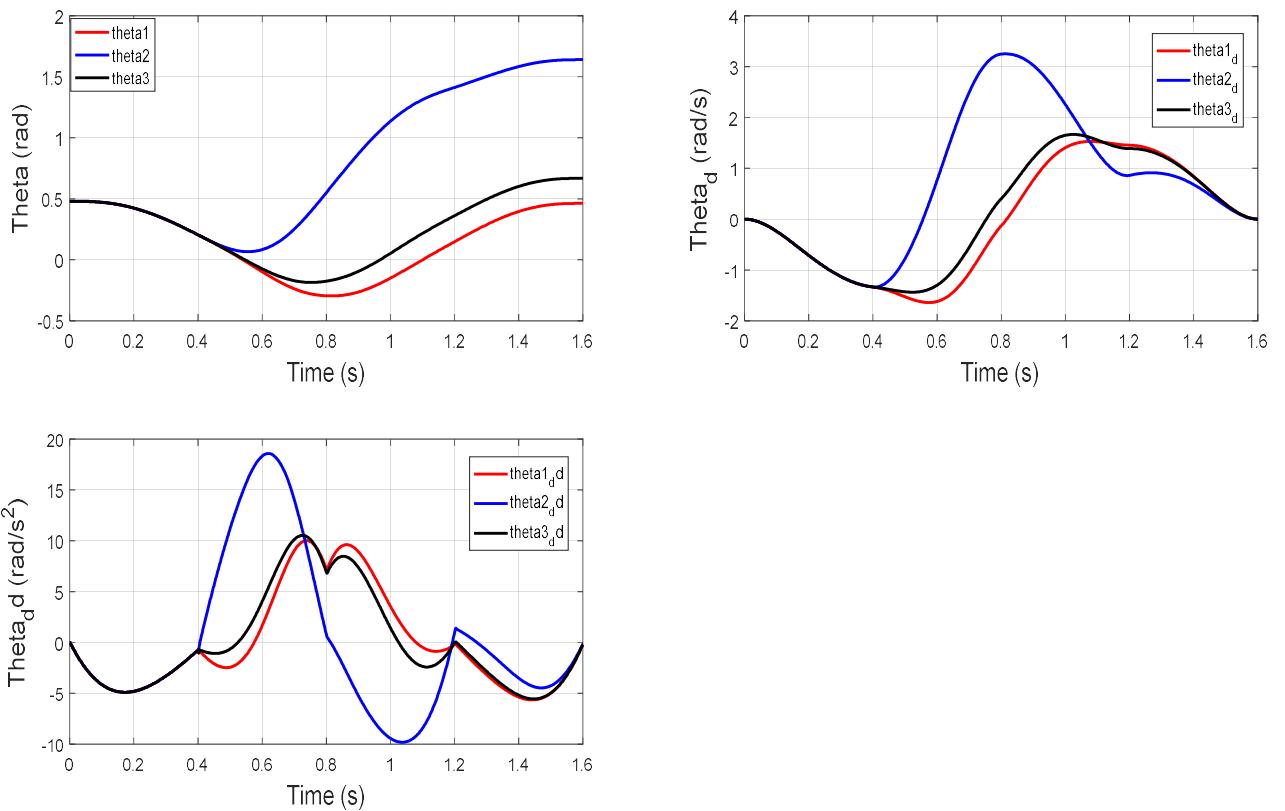
Hình 4.14. Sơ đồ mô phỏng chuyển động của Robot theo quỹ đạo hình chữ U



Hình 4.15. Quỹ đạo thiết kế hình chữ U cho bàn máy động.



Hình 4.16. Chuyển vị, vận tốc và gia tốc theo các trục tọa độ của bàn máy động theo quỹ đạo hình chữ U



Hình 4.17. Góc quay, vận tốc và gia tốc của các biến khớp chủ động với quỹ đạo hình chữ U

4.3.3. Quỹ đạo dạng đường thẳng

Quỹ đạo dạng đường thẳng cũng là một dạng quỹ đạo phổ biến trong các ứng dụng của Robot. Trong phần này ta thiết kế quỹ đạo cho Robot di chuyển theo đường thẳng nối từ điểm đầu đến điểm cuối. Mục tiêu thiết kế vẫn đảm bảo các giá trị vận tốc và gia tốc liên tục bằng 0 ở cuối mỗi hành trình.

Để đảm bảo sự liên tục của vận tốc và gia tốc, trong phần trên ta thiết kế các hàm vị trí theo dạng các đa thức bậc 5. Việc thiết kế các hàm dịch chuyển này tồn tại một số hạn chế [18]:

- Ta cần xác định nhiều giá trị đầu và cuối (vị trí, vận tốc, gia tốc) để xác định các hệ số của hàm vị trí.
- Các giá trị đầu, đặc biệt về gia tốc thường yêu cầu lớn, điều này yêu cầu cơ cấu chấp hành cần cung cấp lực phát động/momen lớn khi khởi động.
- Cần phải tính toán lại các hệ số của đa thức khi các điều kiện biên thay đổi. Để khắc phục những hạn chế này trong phần thiết kế quỹ đạo đường thẳng ta sử dụng hàm vị trí Kane với dạng như sau [18]:

$$s(t) = s_0 + (s_f - s_0) \frac{t-t_0}{t_f-t_0} - \frac{s_f-s_0}{2\pi} \sin \left(2\pi \frac{t-t_0}{t_f-t_0} \right) \quad (4.6)$$

Trong đó $s(t)$ là hàm vị trí, s_0 là vị trí đầu và s_f là vị trí cuối, t là biến thời gian, t_0 là thời điểm bắt đầu và t_f là thời điểm kết thúc hành trình.

Như vậy khi thiết kế quỹ đạo sử dụng hàm vị trí Kane ta chỉ cần thông tin về vị trí đầu, vị trí cuối và thời gian của hành trình. Khảo sát vận tốc và gia tốc của hàm vị trí Kane ta có:

$$\dot{s}(t) = \frac{s_f - s_0}{t_f - t_0} - \frac{s_f - s_0}{t_f - t_0} \cos \left(2\pi \frac{t-t_0}{t_f-t_0} \right) \quad (4.7)$$

Và

$$\ddot{s}(t) = \frac{s_f - s_0}{(t_f - t_0)^2} \sin \left(2\pi \frac{t-t_0}{t_f-t_0} \right) \quad (4.8)$$

Ta dễ dàng nhận thấy các hàm vị trí, vận tốc và gia tốc đều là các hàm liên tục theo thời gian, đồng thời tại $t = t_0$ và $t = t_f$ thì các giá trị vận tốc và gia tốc đều bằng 0.

Giả sử điểm tác động cuối của Robot di chuyển theo một đường thẳng nối hai điểm trong đó điểm đầu ứng với thời điểm $t_0 = 0$ là $(x_0, y_0, z_0) = (-0.4, -0.3, 0.8)$ và điểm cuối ứng với thời điểm $t_f = 2s$ là $(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y, z_0 + \Delta z) = (0.4, 0.3, 0.6)$. Theo phương trình vị trí Kane thì vị trí của điểm tác động cuối theo tọa độ x là:

$$x(t) = -0.4 + 0.8 \frac{t}{2} - \frac{0.8}{2\pi} \sin (\pi t) \text{ (m)} \quad (4.9)$$

Để đảm bảo quỹ đạo là một đường thẳng thì ta phải có quan hệ giữa các tọa độ như sau:

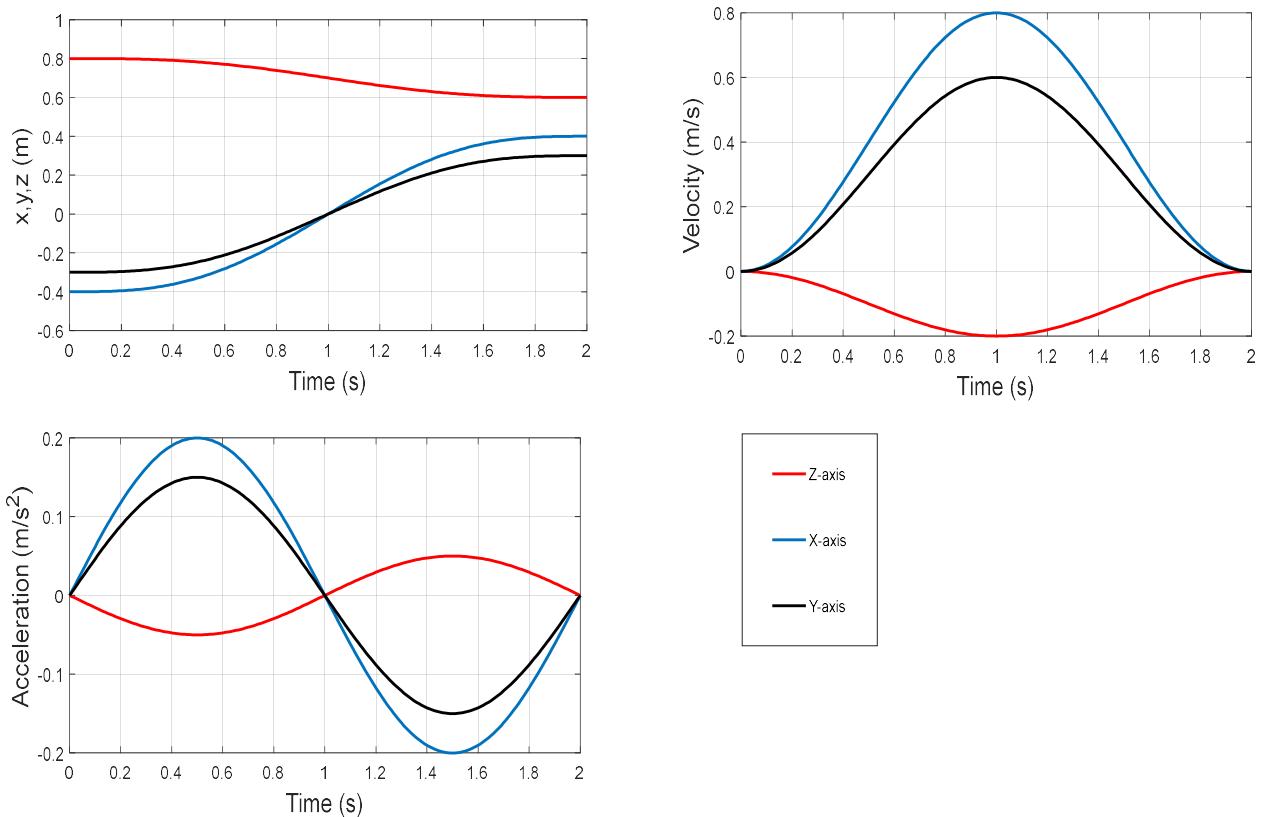
$$\begin{cases} y = a_1x + b_1 \\ z = a_2x + b_2 \end{cases} \quad (4.10)$$

Khi $x = x_0 = -0.4$ thì $y = y_0 = -0.3$; $z = z_0 = 0.8$ và khi $x = x_f = 0.4$ thì $y = y_f = 0.3$; $z = z_f = 0.6$. Khi đó ta có hai hệ phương trình tìm các hệ số a_1, b_1, a_2, b_2 :

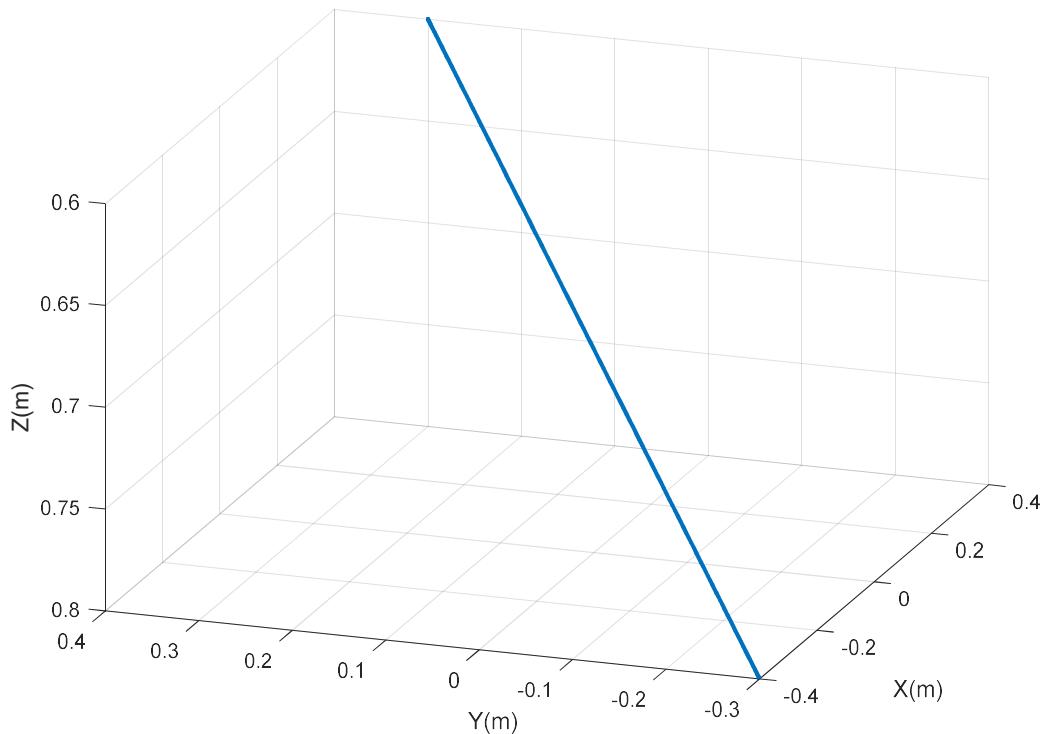
$$\begin{cases} -0.4a_1 + b_1 = -0.3 \\ 0.4a_1 + b_1 = 0.3 \end{cases} \text{ và } \begin{cases} -0.4a_2 + b_2 = 0.8 \\ 0.4a_2 + b_2 = 0.6 \end{cases}$$

Từ đây ta suy ra $a_1 = 0.75; b_1 = 0$ và $a_2 = -0.25; b_2 = 0.7$

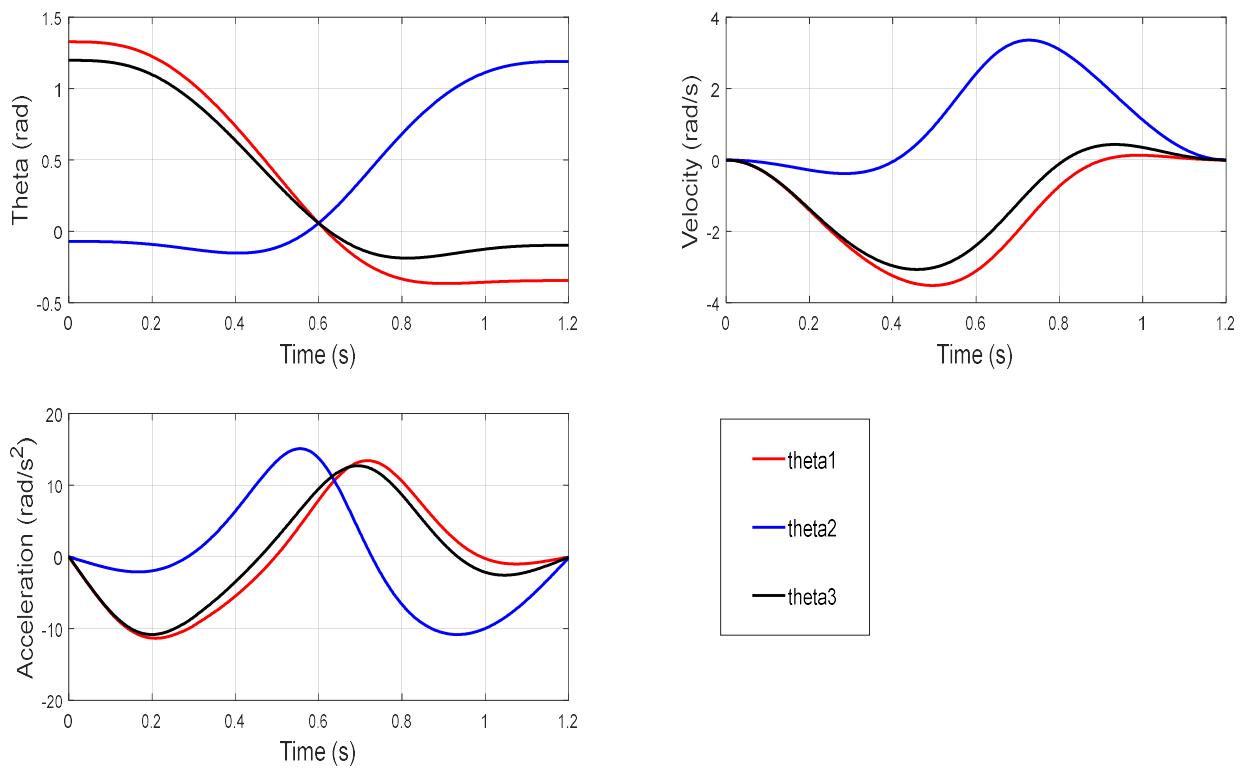
Mô hình mô phỏng chuyển động của Robot theo quỹ đạo đường thẳng tương tự như **Hình 4.14**, sử dụng một khối MatlabFunction để xây dựng quỹ đạo cho Robot (chi tiết khối Function xem ở phần Phụ lục). Hình ảnh quỹ đạo thiết kế và các đồ thị về vận tốc, gia tốc trong quá trình chuyển động được thể hiện ở hình dưới.



Hình 4.18. Đồ thị chuyển vị, vận tốc và gia tốc bàn máy động theo thời gian với quỹ đạo đường thẳng.



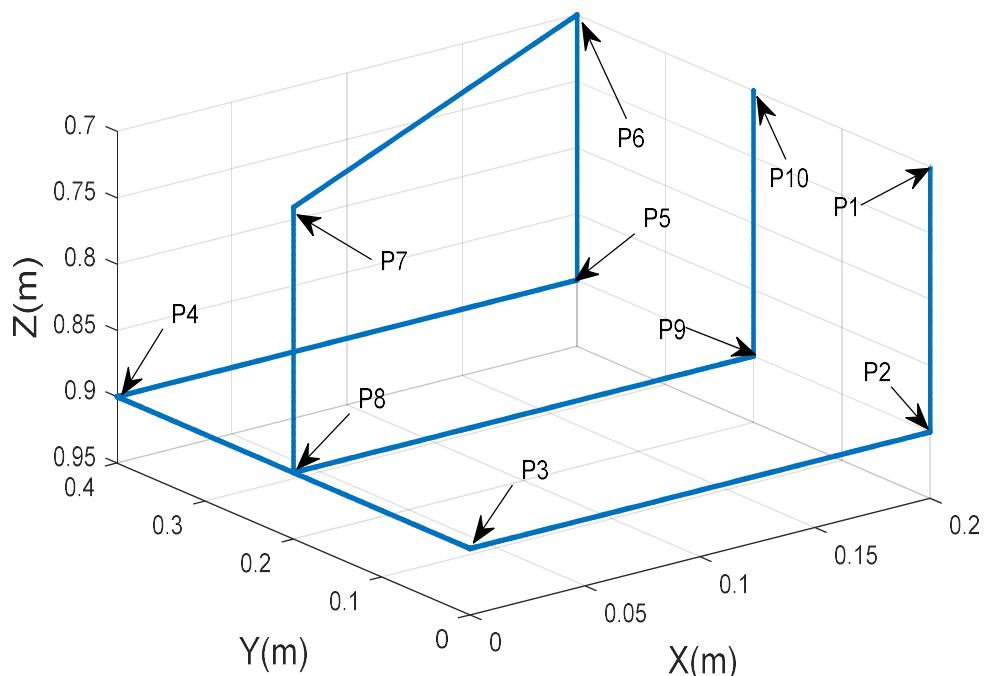
Hình 4.19. Quỹ đạo chuyển động đường thẳng của bàn máy động trong không gian.



Hình 4.20. Góc quay, vận tốc và gia tốc của khâu chủ động ứng với quỹ đạo đường thẳng.

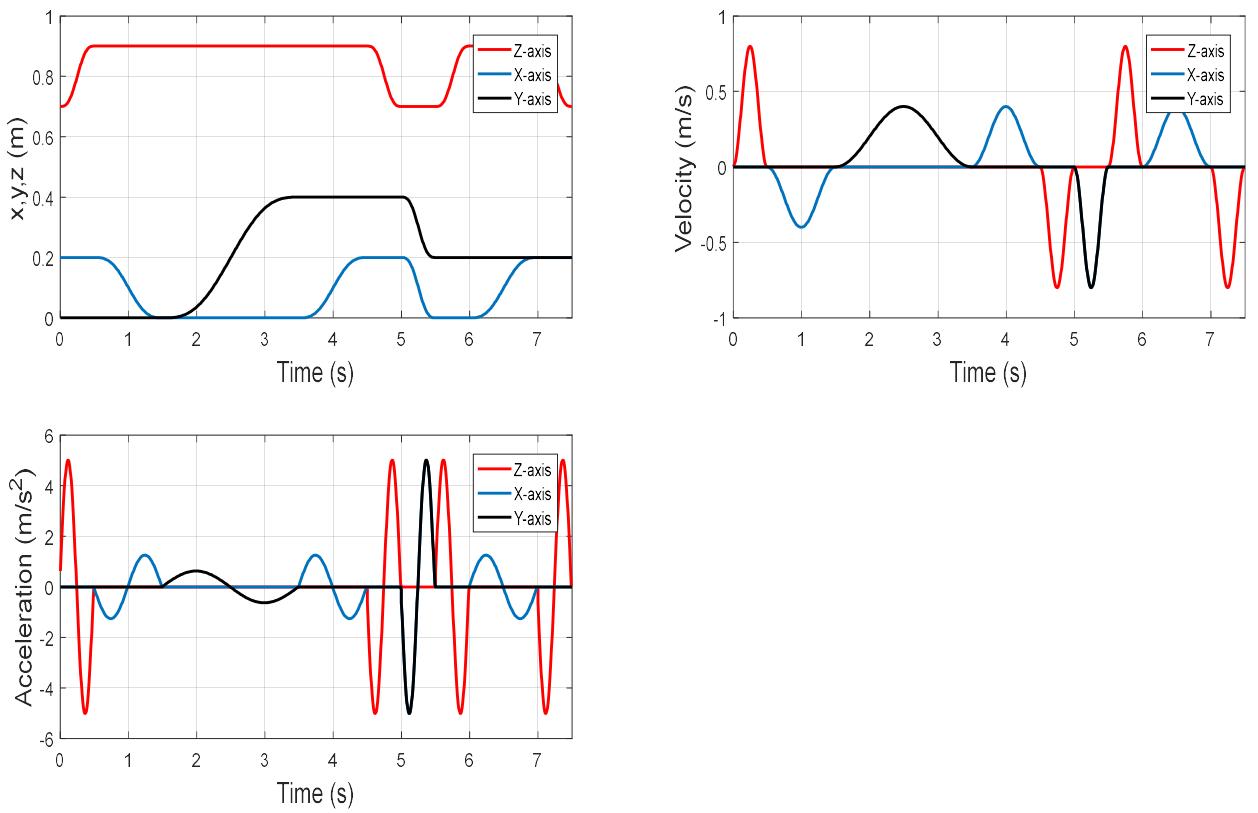
Từ các kết quả trên ta thấy các chuyển động của bàn máy động và của khâu chủ động đều là các hàm liên tục theo thời gian đồng thời các giá trị vận tốc và gia tốc tại đầu và cuối hành trình đều bằng 0, điều này đảm bảo cho tính êm dịu cho chuyển động của Robot.

Dựa vào các kết quả trên ta xây dựng một ví dụ áp dụng đơn giản trong đó bàn máy động thực hiện chuyển động vẽ hình chữ E nằm trong một mặt phẳng.

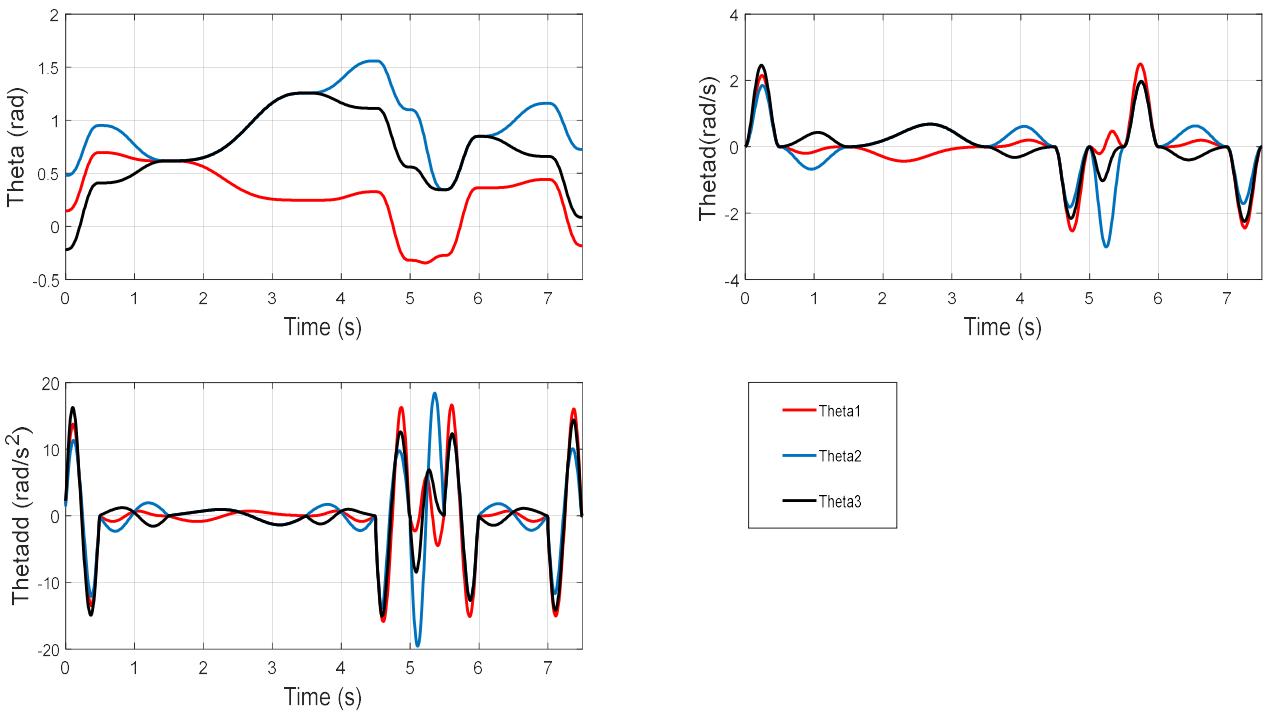


Hình 4.21. Đường di chuyển của bàn máy động vẽ hình chữ E trong mặt phẳng.

Trong ví dụ ứng dụng trên, bàn máy động sẽ lần lượt đi qua các điểm từ P_1 đến P_{10} theo các đường thẳng để từ đó vẽ lên hình chữ E trong mặt phẳng song song với mặt Oxy. Quỹ đạo các đường trong không gian thao tác đều được thiết kế theo quỹ đạo Kane như đã trình bày ở phần trên. Các đồ thị sau thể hiện chuyển vị của bàn máy động trong không gian thao tác.



Hình 4.22. Đồ thị chuyển vị, vận tốc và gia tốc của bàn máy động với quỹ đạo hình chữ E.



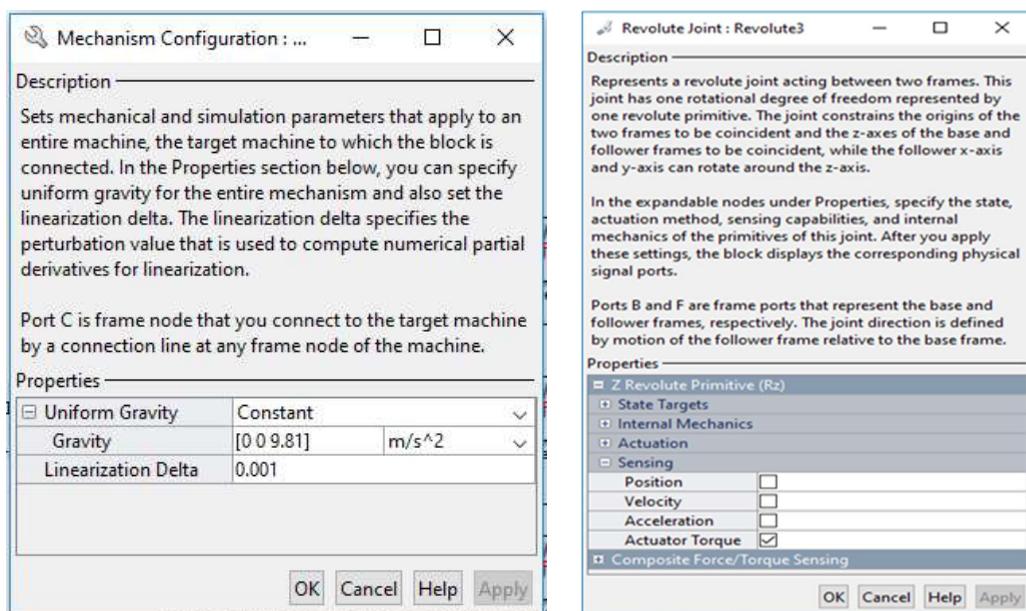
Hình 4.23. Đồ thị góc quay, vận tốc và gia tốc của khâu chủ động với quỹ đạo hình chữ E.

4.4. Tính toán động lực học bằng công cụ Simscape Multibody.

Như đã đề cập ở phần đầu, ngoài tính năng mô phỏng chuyển động của các cơ cấu cơ học, công cụ Simscape Multibody còn có khả năng tính toán các đại lượng động lực học như lực hay momen tác động vào các thành phần của cơ cấu.

Như đã nói ở phần trước, khi chuyển từ mô hình 3D CAD sang mô hình mô phỏng trong Simulink, Matlab sẽ sinh ra một *DataFile.m* chứa các thông tin về kích thước động học, các hệ tọa độ khâu, các thông số khối lượng và quán tính... các dữ liệu này được sử dụng trong việc tính toán các thông số động học và động lực học của cơ cấu. Bây giờ để tính toán động lực học ta cần bổ sung trọng trường vào môi trường mô phỏng. Để thực hiện việc này, trong mô hình Simulink mô phỏng chuyển động ta kích đúp chuột vào

block  , cửa sổ *Mechanism Configuration* hiện ra, tại mục *Gravity*, nhập giá trị gia tốc trọng trường bằng 9.81 m/s^2 theo chiều dương của trục *Oz* như hình dưới.



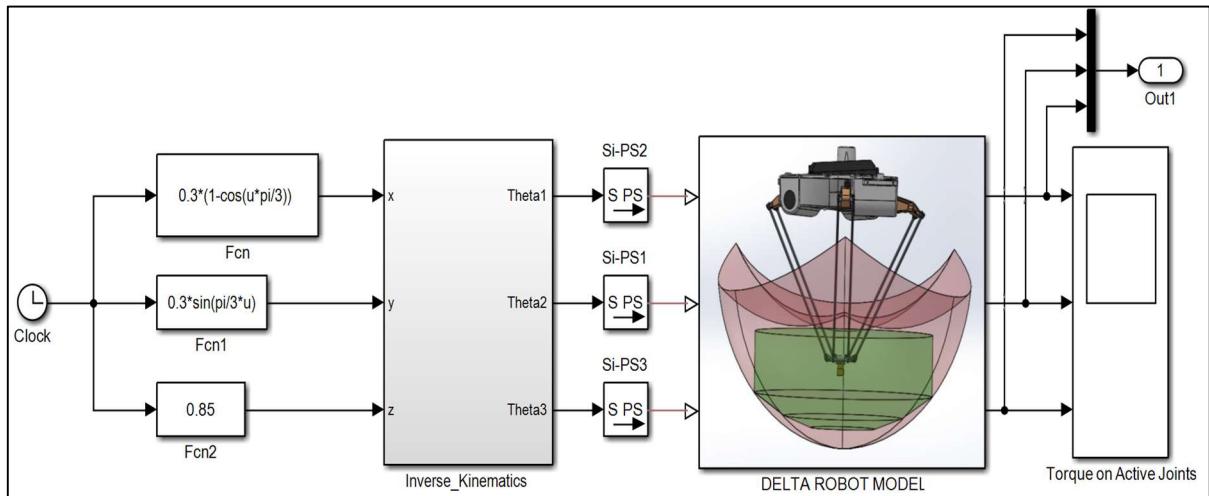
Hình 4.24. Cửa sổ *Mechanism Configuration* thiết lập gia tốc trọng trường cho mô hình mô phỏng Robot và cửa sổ cấu hình khớp quay nối giữa bàn máy cố định và khâu chủ động.

Để lấy được giá trị tính toán momen tác động lên khâu chủ động, ta kích đúp vào block

khớp quay  nối giữa bàn máy cố định và khâu chủ động. Một cửa sổ hiện ra và tại mục *Sensing* ta tích vào ô *Actuator Torque*. Sau đó tại cổng tín hiệu ra, ta sử dụng khối  để chuyển từ tín hiệu vật lí sang các giá trị tính toán số và đưa ra workspace.

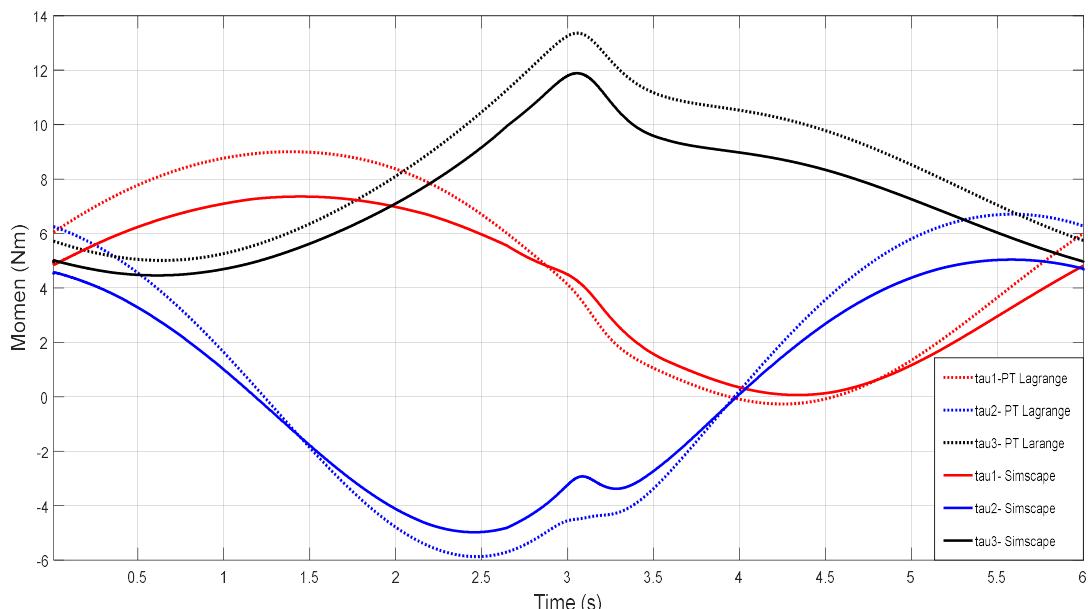
Ta tiến hành tính toán động lực học Robot với bàn máy động chuyển động theo quy luật sau:

$$\begin{cases} x = 0.3 * (1 - \cos(\frac{\pi t}{3})) \\ y = 0.3 * \sin(\frac{\pi t}{3}) \\ z = 0.85 \end{cases}$$



Hình 4.25. Mô hình mô phỏng và tính toán động lực học Robot.

Tiến hành chạy mô phỏng ta sẽ thu được kết quả sau, đồng thời cũng tiến hành tiến hành tính toán động lực học ngược Robot bằng phương pháp sử dụng phương trình Lagrange dạng nhân tử như đã trình bày ở **Chương 3** với cùng dạng chuyển động như trên của bàn máy động ta nhận thấy các kết quả tính toán là tương đồng nhau. Các sai lệch về giá trị là do các thông số về khối lượng và quán tính các khâu khác nhau ở hai mô hình tính toán.



Hình 4.26. Kết quả tính toán momen tại khớp chủ động bằng công cụ Simscape Multibody.

CHƯƠNG 5: ĐIỀU KHIỂN ROBOT.

Tóm tắt:

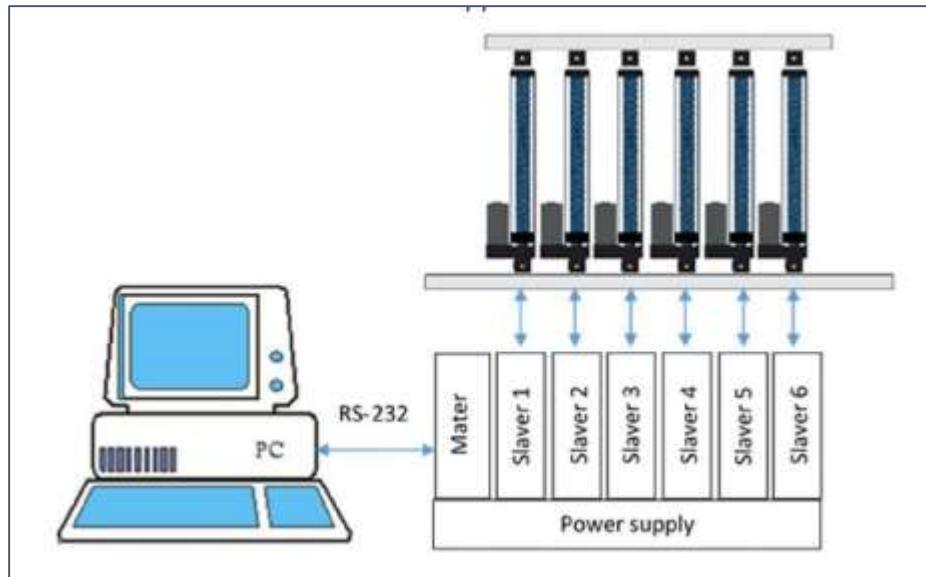
Để thực hiện được các chuyển động trong các ứng dụng thực tế của Robot, các bộ điều khiển cần được thiết kế và xây dựng để điều khiển các đối tượng phát động của Robot (các động cơ điện, xy lanh thủy lực/khí nén..) nhằm thực hiện các chuyển động theo yêu cầu. Với một quỹ đạo được thiết kế từ trước cho điểm tác động cuối của Robot, từ kết quả của bài toán động học ngược ta sẽ tính toán được chuyển động tương ứng tại các khớp chủ động. Các kết quả phân tích động lực học sẽ giúp ta xác định được momen/lực cần thiết đặt lên khâu chủ động. Những thông tin này sẽ được cung cấp cho bộ điều khiển (BDK) để từ đó BDK sẽ tính toán và tạo ra các tín hiệu điều khiển phù hợp cho đối tượng điều khiển.

Bài toán điều khiển Robot có ý nghĩa và tầm quan trọng lớn trong thực tế áp dụng của Robot vì nó quyết định trực tiếp đến chất lượng thực hiện các công việc của Robot, đặc biệt đối với các Robot thực hiện một số nguyên công trong gia công cơ khí như Robot hàn, Robot sơn hay các Robot ứng dụng trong việc lắp ghép với tốc độ và độ chính xác cao. Do vậy việc khảo sát mô phỏng các luật điều khiển trước khi tiến hành áp dụng vào thực tế là một công việc quan trọng nhằm để đánh giá ban đầu tính phù hợp của các BDK ứng với những nhiệm vụ và điều kiện khác nhau. Trong chương này trình bày việc khảo sát điều khiển Robot song song Delta bằng phương pháp điều khiển PD từng khớp độc lập qua đó nhận định được phần nào khả năng của BDK này trong một số trường hợp.

5.1. Hệ thống điều khiển tay máy song song.

Robot song song có đặc trưng gồm nhiều chuỗi động học kín, để di chuyển bàn máy động của Robot theo một quỹ đạo yêu cầu, đòi hỏi đồng thời có các tác động điều khiển tới các khâu dẫn động và chuyển động của các khâu này phải có sự phối hợp chặt chẽ nếu không sẽ xảy ra những “xung đột, giằng xé” giữa các chuỗi động. Với đặc điểm này, thông thường hệ thống điều khiển Robot song song được thiết kế có bộ điều khiển trung tâm để phối hợp chuyển động của các khâu dẫn động. Một số nghiên cứu trong nước được thực hiện đã khảo sát và thực nghiệm chế tạo được các hệ thống điều khiển cho Robot song song trong đó:

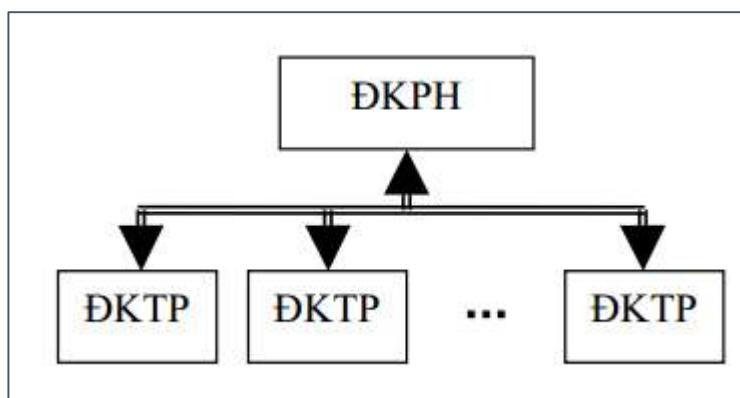
- Công trình của tác giả Hoàng Xuân Vinh [6] đã mô phỏng và thực nghiệm điều khiển Robot song song Hexapod 6 bậc tự do với các giải thuật điều khiển PID, điều khiển mờ trực tiếp (Direct Fuzzy - PD), điều khiển tự chỉnh định Fuzzy – PID cho từng khâu dẫn động. Hệ thống điều khiển được thiết kế như **Hình 5.1**:



Hình 5.1. Sơ đồ hệ thống điều khiển Robot Hexapod 6 bậc tự do [6]

Trong hệ thống này tác giả sử dụng máy tính để tính toán các giá trị vị trí và vận tốc các khâu động sau đó gửi thông tin đến BĐK Master có nhiệm vụ phối hợp và chuyển các tín hiệu kích thích đến các BĐK Slave điều khiển từng chuỗi động của Robot. Trong chế tạo phần cứng, tác giả đã sử dụng 6 bộ vi xử lí (Slave) điều khiển 6 chân động của Robot và 1 bộ xử lí (Master) làm nhiệm giao tiếp với máy tính và chuyển các tín hiệu kích thích đến các Slave.

- Công trình của các tác giả Đinh Công Huân, Vương Thị Diệu Hương, Đỗ Thị Ngọc Oanh, Nguyễn Huy Thụy, Phạm Anh Tuấn [7] đưa ra một giải pháp hoàn chỉnh điều khiển Robot cơ cấu song song Hexapod, phân tích xử lí song song xử lí phân tán và ứng dụng nguyên lý Hardware in the loop trong mô phỏng điều khiển. Mô hình điều khiển cũng tương tự như mô hình ở công trình [6], **Hình 5.2**



Hình 5.2. Sơ đồ cấu trúc điều khiển cho Hexapod [7]

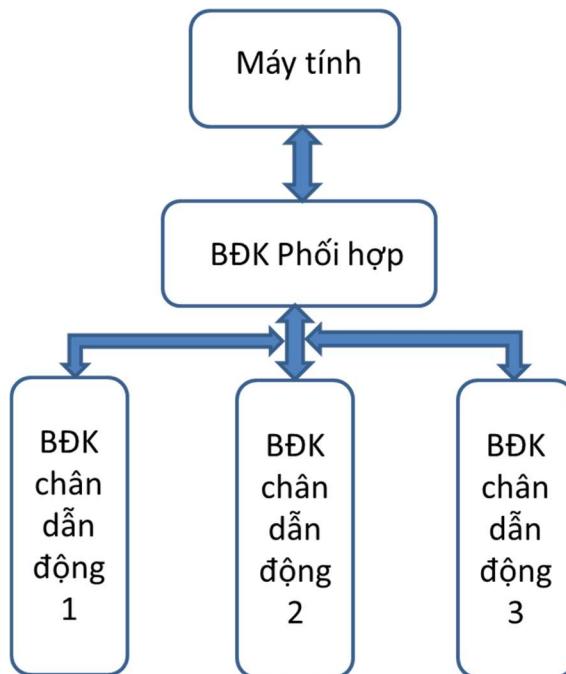
ĐKPH: Điều khiển phối hợp; ĐKTP: Điều khiển thành phần

Trong mô hình trên các bộ ĐKTP chịu trách nhiệm điều khiển bộ phận mình phụ trách để đạt được những yêu cầu cụ bô, đó là những BĐK vị trí có nhiệm vụ đưa các

chân của Robot đến vị trí mong muốn theo một vận tốc nào đó. Bộ ĐKPH sẽ chịu trách nhiệm phối hợp các bộ ĐKTP để đạt được yêu cầu tổng thể, nó sẽ lấy thông tin của toàn bộ là độ dài thực các chân Robot so với độ dài yêu cầu được tính từ máy tính để đưa ra các quyết định điều khiển cho từng bộ ĐKTP. Trong mô hình này nhóm tác giả đã đề xuất sử dụng các thiết bị phần cứng là PLC đóng vai trò là bộ ĐKPH cùng các module điều khiển động cơ và module công suất đóng vai trò là các bộ ĐKTP.

Trên cơ sở trên mô hình điều khiển Robot song song Delta ba bậc tự do được đề xuất ở **Hình 5.3** gồm các thành phần chính là:

- *Máy tính* với nhiệm vụ tính toán động học ngược từ quỹ đạo yêu cầu để đưa ra tín hiệu kích thích điều khiển các chuỗi động.
- *Bộ điều khiển phối hợp* có nhiệm vụ chuyển các tín hiệu kích thích nhận được từ máy tính đến các bộ ĐKTP, đồng thời có thể gửi các tín hiệu đo đặc các thông số trong quá trình điều khiển lên máy tính để phục vụ cho việc kiểm tra, giám sát quá trình điều khiển.
- Các *BĐK chân dẫn động* chứa các giải thuật điều khiển có nhiệm vụ nhận tín hiệu đặt từ bộ điều khiển trung tâm điều khiển chuyển động của các chuỗi động theo yêu cầu, đồng thời gửi các tín hiệu phản hồi các đại lượng điều khiển đến BĐK Phối hợp rồi truyền lên máy tính phục vụ việc theo dõi, giám sát quá trình điều khiển.



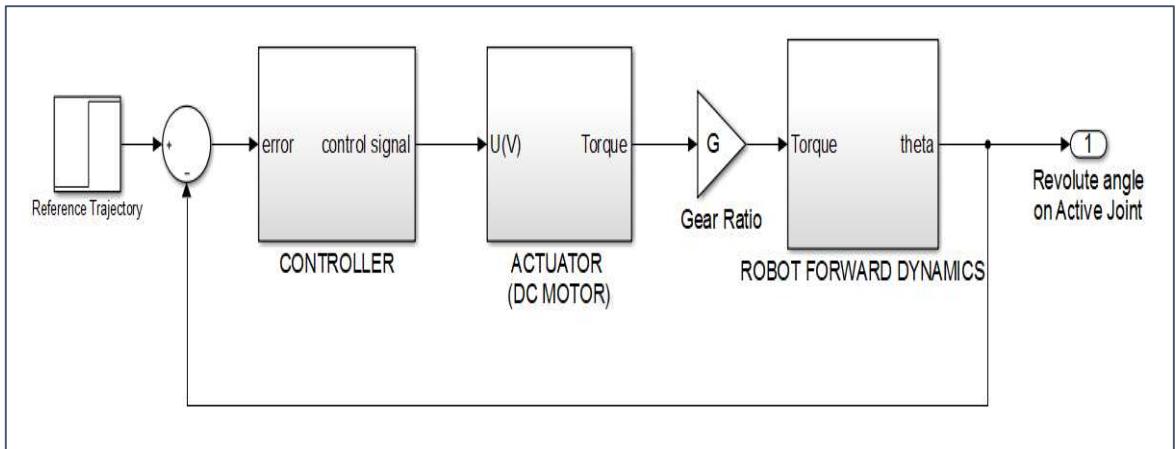
Hình 5.3. Sơ đồ điều khiển Robot song song ba bậc tự do.

5.2. Mô hình mô phỏng điều khiển từng chuỗi động Robot song song Delta.

Khi giải quyết bài toán điều khiển Robot cần xem xét đến mô hình động lực của Robot. Bài toán phân tích động lực học Robot song song Delta đã được trình bày ở

Chương 3, qua đó từ hệ phương trình động lực học thành lập được, để mô phỏng được quá trình điều khiển các khớp chủ động của Robot cần phải giải bài toán động lực học thuận tực là cần xác định góc quay đầu ra của khâu chủ động ứng với momen đặt vào lên khớp chủ động. Việc giải bài toán này từ hệ phương trình động lực học ở **Chương 3** nhìn chung là khó khăn. Tuy vậy với công cụ Simscape Multibody, với tính năng không chỉ tính toán mô phỏng động học cơ cấu mà còn với cả vấn đề động lực học cơ cấu, việc này trở nên đơn giản hơn nhiều. Bằng việc thiết lập cung cấp thông số momen tại khớp chủ động, qua đó máy tính sẽ tự động tính toán các chuyển động của cơ cấu.

Mô hình động lực học điều khiển vòng kín một khớp của Robot có nhiệm vụ điều khiển khâu chủ động của Robot bám theo quy luật chuyển động đã được tính toán từ bài toán động học ngược. Để đảm bảo đưa sai số quỹ đạo trong một giới hạn nào đó, sơ đồ điều khiển vòng kín thường được sử dụng, qua đó các giá trị góc quay của khâu chủ động sẽ được phản hồi trở lại để tính toán sai số so với góc quay yêu cầu, từ sai số này BDK sẽ tính toán đưa ra các tín hiệu điều khiển đến đối tượng chấp hành.



Hình 5.4. Mô hình động lực điều khiển một chuỗi động của Robot.

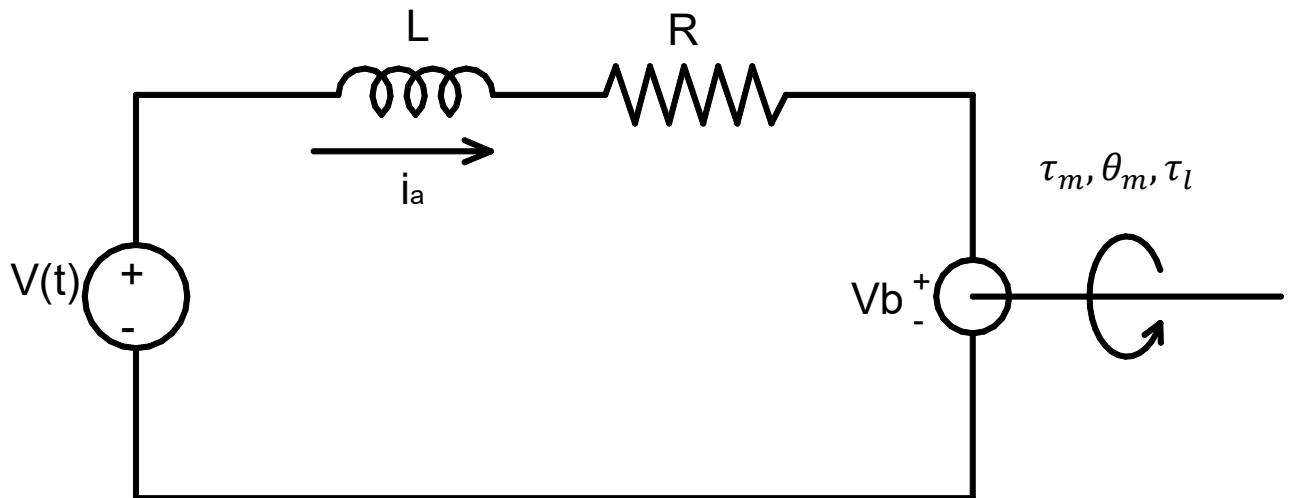
Các thành phần chính trong mô hình động lực điều khiển một khớp của Robot gồm:

- *Controller*: Là bộ điều khiển tính toán tín hiệu điều khiển đối tượng chấp hành
- *Actuator (DC motor)*: Là mô hình động lực đối tượng chấp hành (động cơ điện một chiều)
- *Gear Ratio* : Là tỉ số truyền bộ truyền giảm tốc nối giữa trục Rotor động cơ và trục khớp chủ động vì động cơ điện trước khi được nối đến trục khớp quay thường thông qua một bộ truyền giảm tốc nhằm khuếch đại momen ở trục ra đồng thời giảm thiểu nhiễu tác động lên trục Rotor.
- *Robot Forward Dynamics* : Mô hình động lực học thuận của Robot.

5.3. Mô hình vật lí đối tượng điều khiển

Phần lớn các Robot hiện nay đều sử dụng động cơ điện làm thiết bị phát động bởi nhiều ưu điểm trong đó điểm nổi trội là việc có khả năng điều khiển chính xác các thông số như vị trí, tốc độ quay thông qua việc điều chế các tín hiệu điều khiển như điện áp, dòng

điện hay tần số. Từ kết quả của bài toán động học ngược, vị trí, chuyển động của điểm tác động cuối của Robot đều được suy về chuyển động của cơ cấu chấp hành. Do vậy các bài toán điều khiển chuyển động Robot đều quy về tìm luật điều khiển phù hợp cho cơ cấu chấp hành. Trong nội dung này mô hình động cơ điện một chiều được lựa chọn làm đối tượng điều khiển, *Hình 5.4* mô tả sơ đồ vật lí của một động cơ điện một chiều kích từ bằng nam châm vĩnh cửu và coi từ thông $\emptyset = \text{const}$



Hình 5.5. Mô hình động cơ điện một chiều kích từ bằng nam châm vĩnh cửu

$V(t)$: Điện áp phản ứng (V)

θ_m : Góc quay của Rotor (rad)

L : Điện cảm phản ứng (H)
(Nm)

τ_m : Momen sinh ra trên trục Rotor

V_b : Sức phản điện động (V)

τ_l : Momen của tải trọng (Nm)

i_a : Cường độ dòng điện phản ứng (A)

R : Trở kháng cuộn phản ứng (Ω)

Từ sơ đồ trên ta có phương trình vi phân dòng điện phản ứng theo định luật Ohm:

$$L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = V - V_b \quad (5.1)$$

Với giả thiết từ thông $\emptyset = \text{const}$ thì momen trên trục động cơ xác định như sau:

$$\tau_m = K_m i_a \quad (5.2)$$

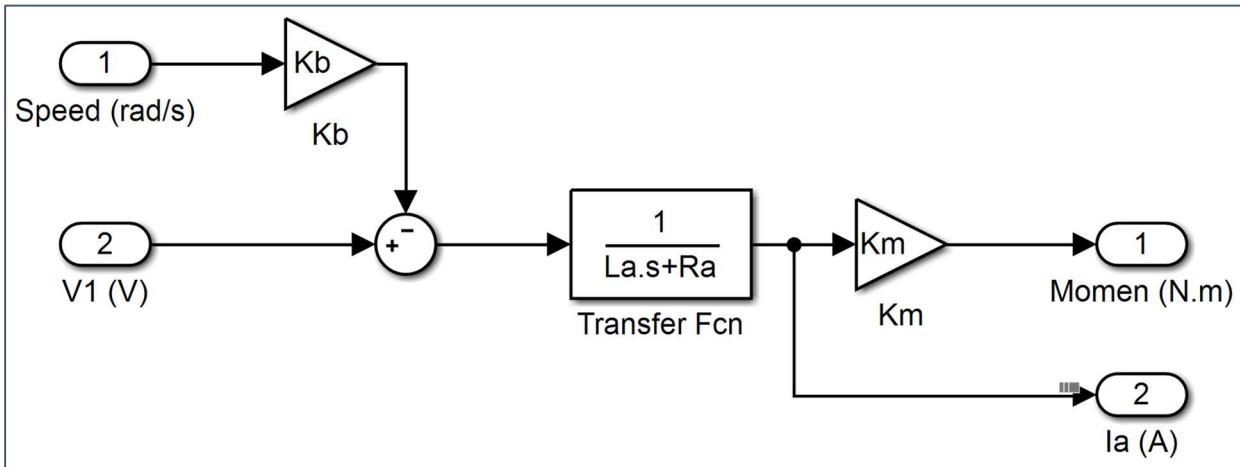
Với K_m (Nm/A) là hằng số momen của động cơ.

Sức phản điện động ở cuộn phản ứng:

$$V_b = K_2 \emptyset \omega_m = K_b \omega_m = K_b \frac{d\theta_m}{dt} \quad (5.3)$$

Với K_b (Vs/rad) là hệ số sức phản điện động và ω_m (rad/s) là tốc độ quay của trục Rotor

Từ các phương trình (5.1) đến (5.3) ta có thể mô hình hóa đối tượng động cơ điện một chiều với đầu vào là điện áp đặt lên động cơ, đầu ra là momen sinh ra trên trục Rotor như sau:



Hình 5.6. Sơ đồ khối mô hình toán học động cơ điện một chiều

Do tính đối xứng của cấu hình Robot nên có thể giả sử, và có thể thực tế, ba khâu chủ động được dẫn động bởi ba động cơ có các thông số như nhau. Các thông số động cơ điện một chiều sử dụng trong mô hình mô phỏng được trình bày ở Bảng 5.1 như dưới.

Bảng 5.1. Các thông số động cơ điện một chiều

Thông số	Giá trị	Đơn vị	Ý nghĩa
L	$6,2 \cdot 10^{-3}$	H	Điện cảm phản ứng
R	1.8	Ω	Điện trở phản ứng
K_m	0.7	Nm/A	Hàng số momen động cơ
K_b	0.4	Vs	Hệ số sức phản điện động
G	5		Tỉ số truyền bộ giảm tốc

5.4. Mô phỏng bộ điều khiển PD từng khớp độc lập Robot.

5.4.1. Điều khiển PD vị trí từng khớp độc lập.

Trong phần này ta sử dụng bộ điều khiển vòng kín PD cho bài toán điều khiển vị trí khớp chủ động của Robot. Theo luật điều khiển PD, tín hiệu điều khiển được xác định như sau:

$$u = K_P(q^* - q) + K_D \frac{d(q^* - q)}{dt} = K_P \cdot e + K_D \frac{de}{dt} \quad (5.4)$$

Trong đó:

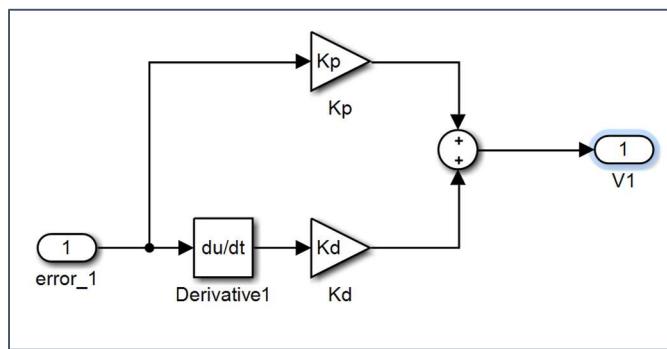
q^* : Là vị trí mong muốn của khớp chủ động.

q : Là vị trí phản hồi theo thời gian của khớp chủ động.

K_p, K_d : Là các hệ số tỉ lệ và vi phân, tham số của bộ điều khiển.

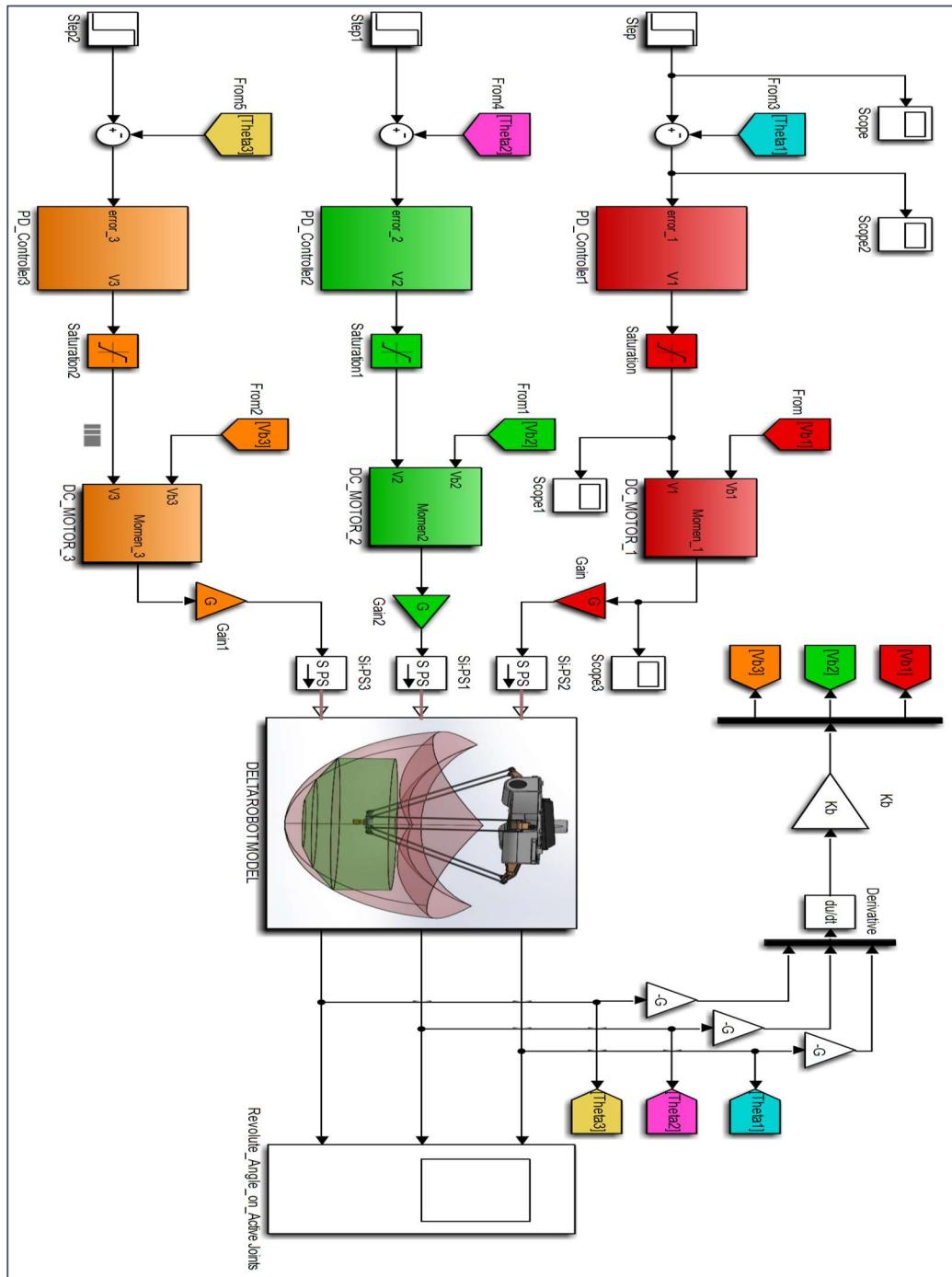
$e = q^* - q$: Là sai số điều khiển theo thời gian.

Mô hình bộ điều khiển PD trong Simulink được xây dựng như hình dưới:



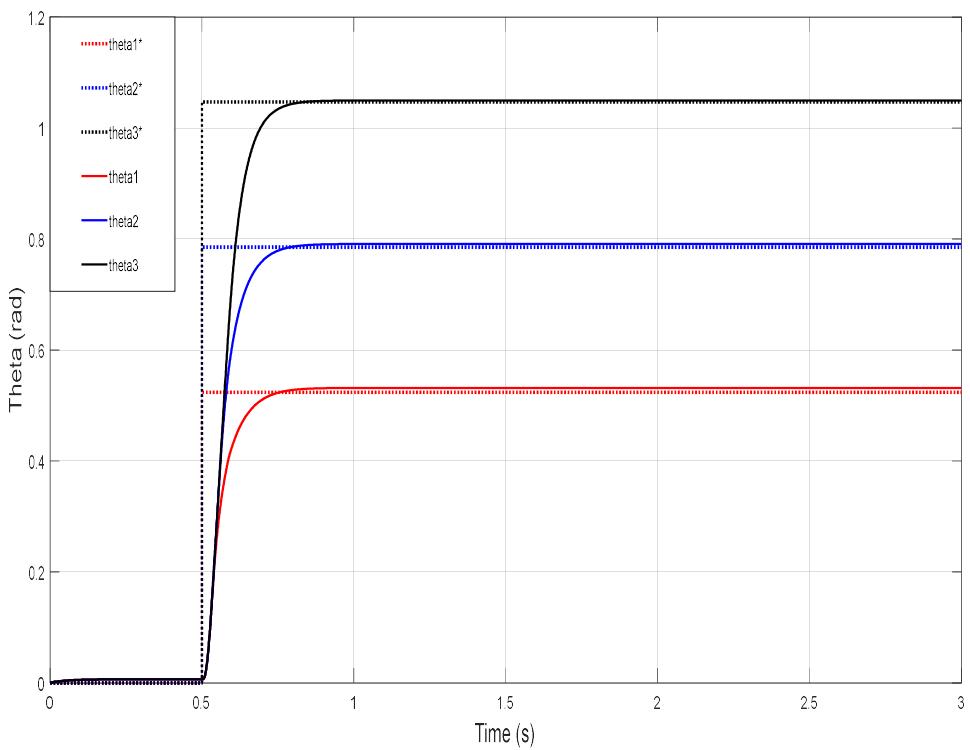
Hình 5.7. Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển PD.

Giả sử cần điều khiển ba khâu chủ động của Robot quay từ vị trí có các tọa độ ban đầu (ứng với thời điểm đâu $t_o = 0$) $\theta_{10} = \theta_{20} = \theta_{30} = 0$ (rad), là góc quay của khâu chủ động so với bàn máy cố định theo quy ước được trình bày như ở **Chương 2**, tương ứng đến các vị trí $\theta_1^* = \frac{\pi}{6}$, $\theta_2^* = \frac{\pi}{4}$, $\theta_3^* = \frac{\pi}{3}$ với bước nhảy tín hiệu đặt tại thời điểm $t_{step} = 0.5s$. Mô hình Simulink mô phỏng mô hình điều khiển PD vị trí của Robot như hình dưới.

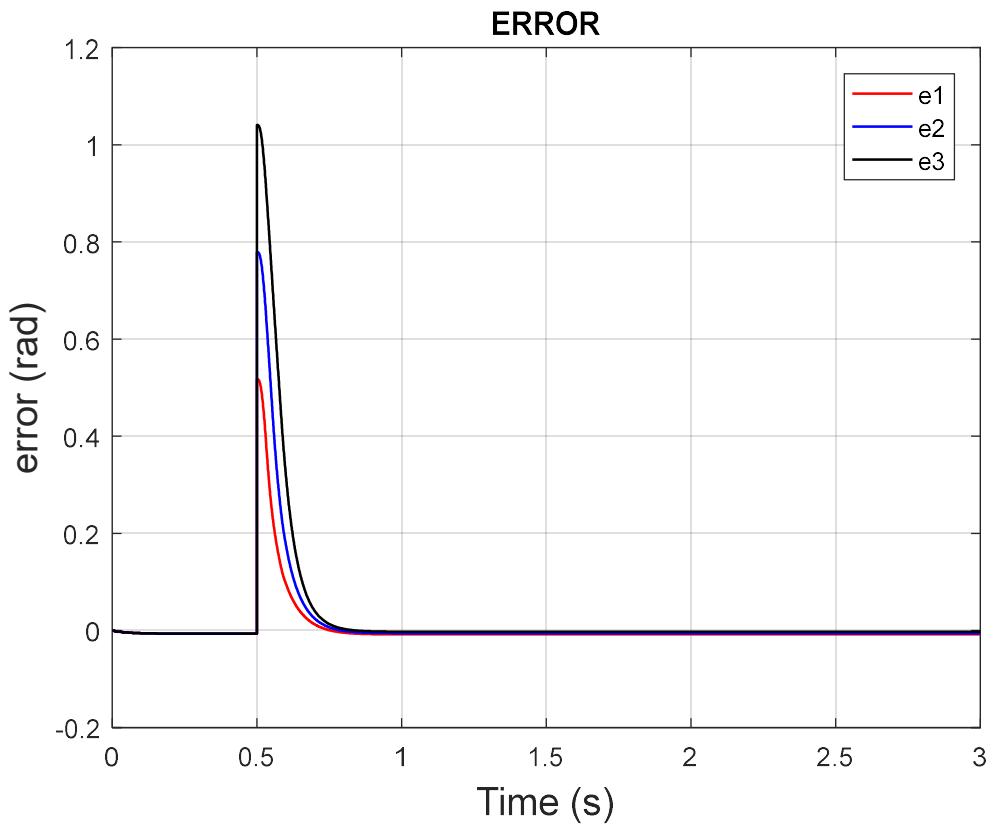


Hình 5.8. Sơ đồ mô phỏng điều khiển PD tùng khớp độc lập điều khiển vị trí của Robot.

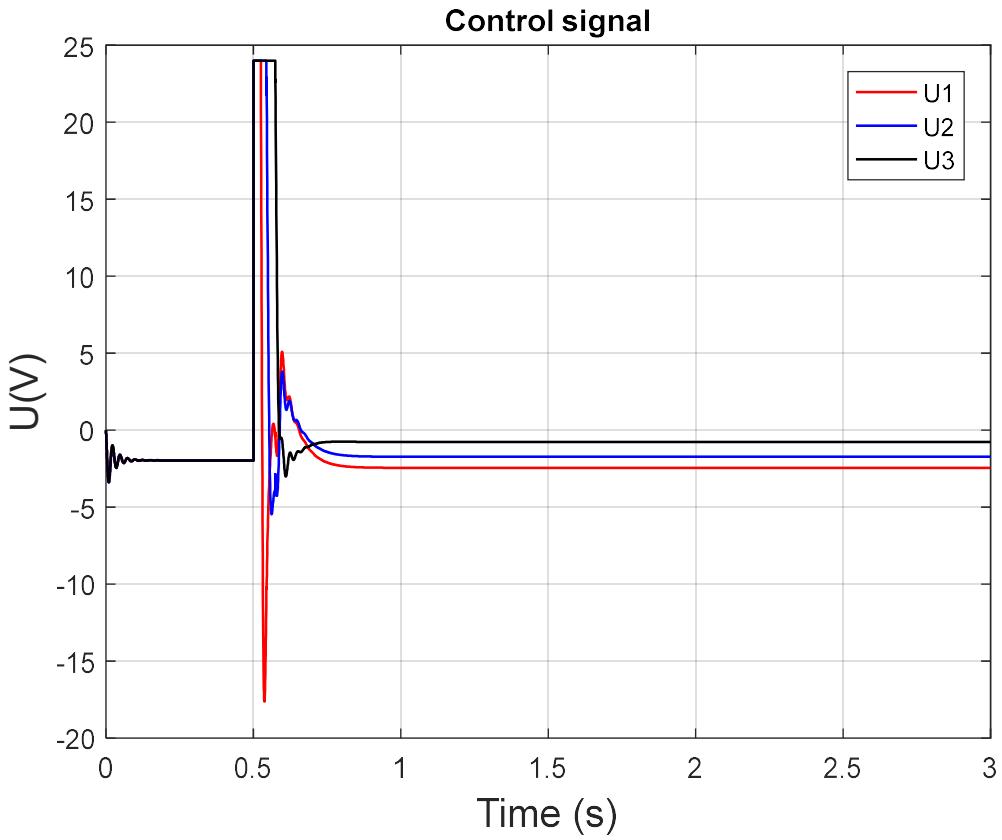
Trong sơ đồ mô phỏng *Hình 5.5* ta đã giả thiết bỏ qua ảnh hưởng của momen quán tính của Rotor động cơ, momen quán tính các bánh răng của bộ truyền giảm tốc và các lực cản do ma sát. Đồng thời sử dụng các khối *Saturation* thể hiện ngưỡng tín hiệu điện áp điều khiển đặt vào động cơ (từ -24 đến 24 V). Các hệ số K_P , K_D được xác định thực nghiệm để tìm được thông số cho chất lượng điều khiển đạt yêu cầu. Theo đó, khi mô phỏng, các hệ số K_P , K_D lần lượt được thiết lập bằng 300 và 15. Các kết quả mô phỏng được thể hiện ở hình dưới



Hình 5.9. Đáp ứng bước nhảy góc quay của khâu chủ động với BĐK PD.



Hình 5.10. Sai số điều khiển đáp ứng bước với BĐK PD.



Hình 5.11. Tín hiệu điều khiển với đáp ứng bước BĐK PD

Như vậy từ kết quả mô phỏng cho thấy BĐK PD từng khớp độc lập cơ bản đáp ứng được yêu cầu của bài toán đặt ra. Thời gian đáp ứng khá nhanh, sai số xác lập còn tồn tại tuy nhiên khá nhỏ. Từ thời điểm 0 đến 0.5s, do ảnh hưởng của trọng lực tác động lên các khâu làm lệch khỏi vị trí ban đầu nên BĐK sinh ra tín hiệu nhỏ để giữ cho Robot ở trạng thái cân bằng.

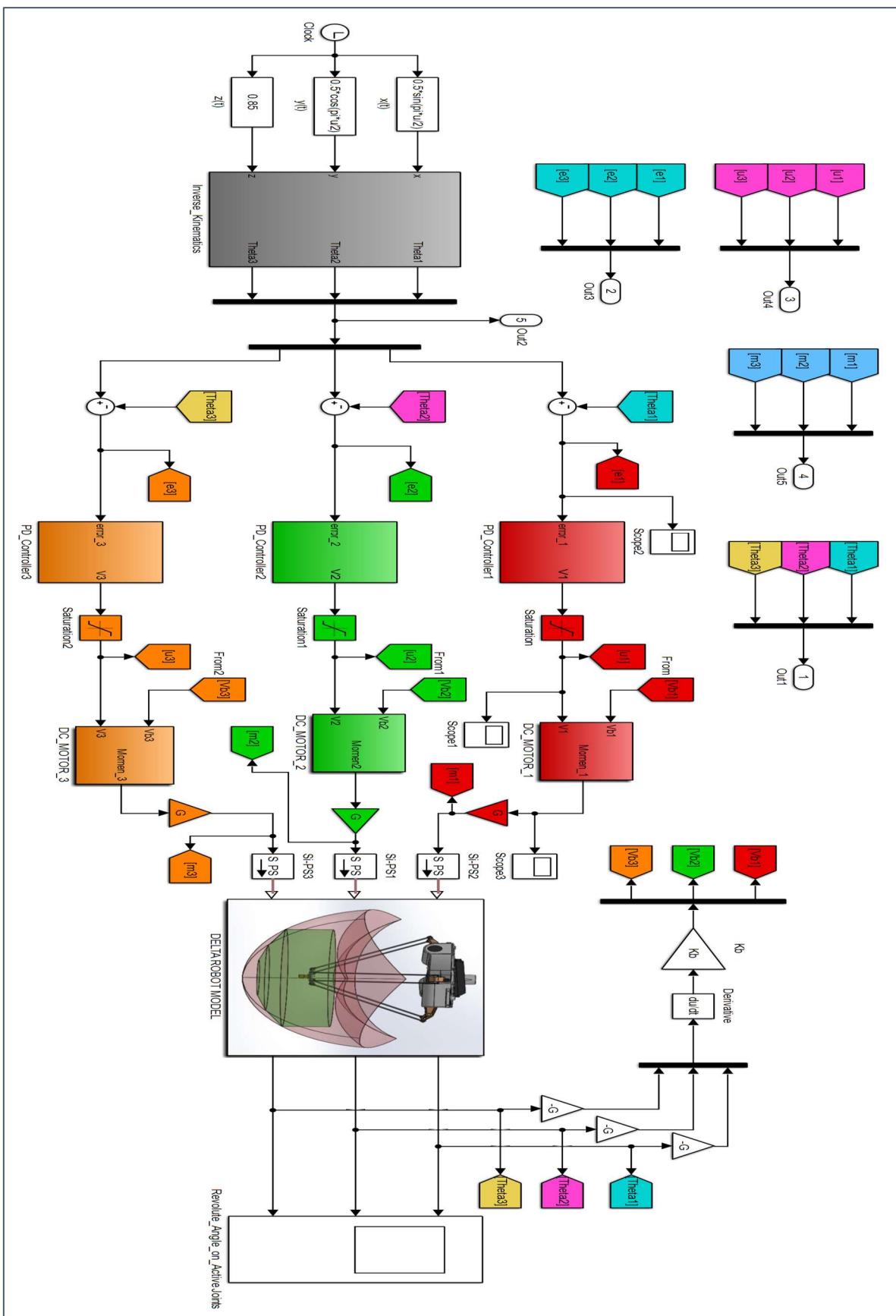
5.4.2. Điều khiển PD bám quỹ đạo.

Trong phần này ta khảo sát bộ điều khiển PD cho nhiệm vụ bám quỹ đạo của Robot. Giải sử cần điều khiển bàn máy động của Robot chuyển động theo một đường tròn nằm trong mặt phẳng song song với giá theo quy luật như ở **Chương 3**:

$$\begin{cases} x = 0.5 \sin\left(\frac{2\pi}{2}t\right) \\ y = 0.5 \cos\left(\frac{2\pi}{2}t\right) \\ z = 0.85 \end{cases}$$

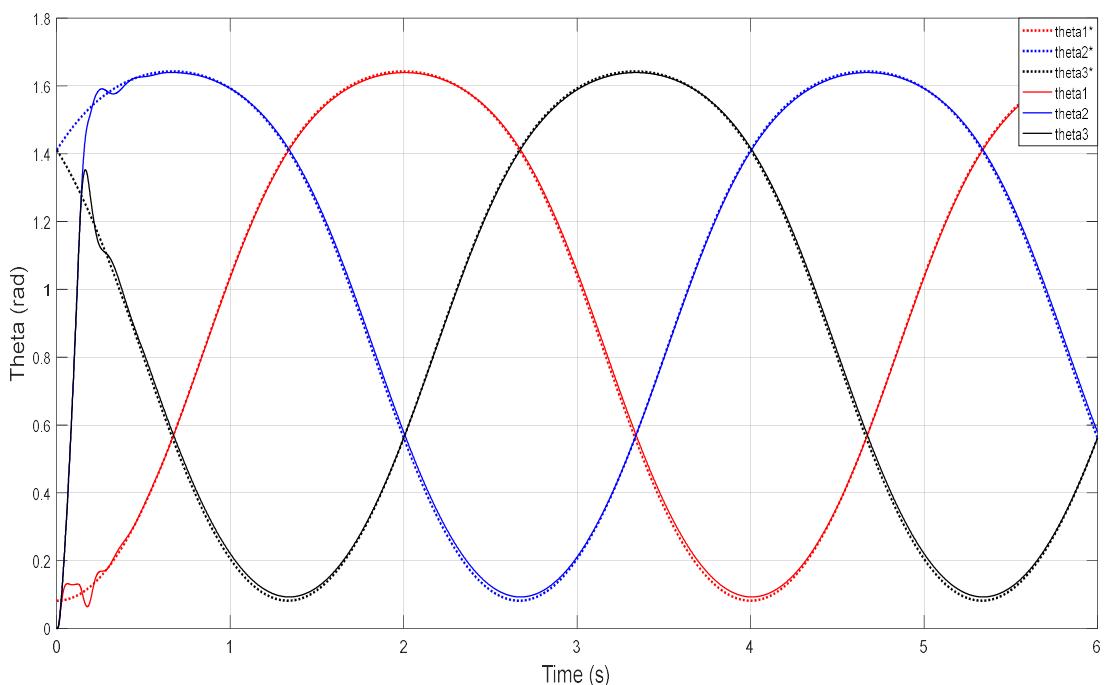
Vị trí ban đầu của Robot như phần trước: $\theta_{10} = \theta_{20} = \theta_{30} = 0$ (rad).

Sơ đồ Simulink mô phỏng nhiệm vụ điều khiển này như hình dưới:

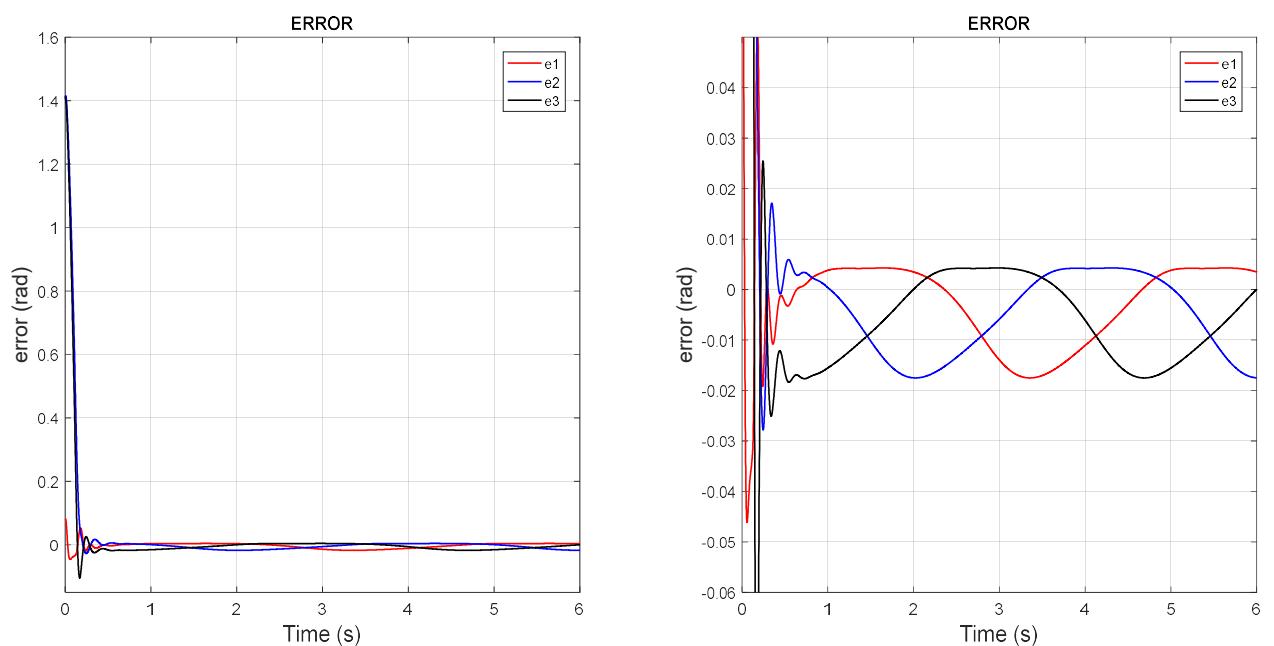


Hình 5.12. Sơ đồ Simulink mô phỏng bộ điều khiển PD cho nhiệm vụ bám quỹ đạo

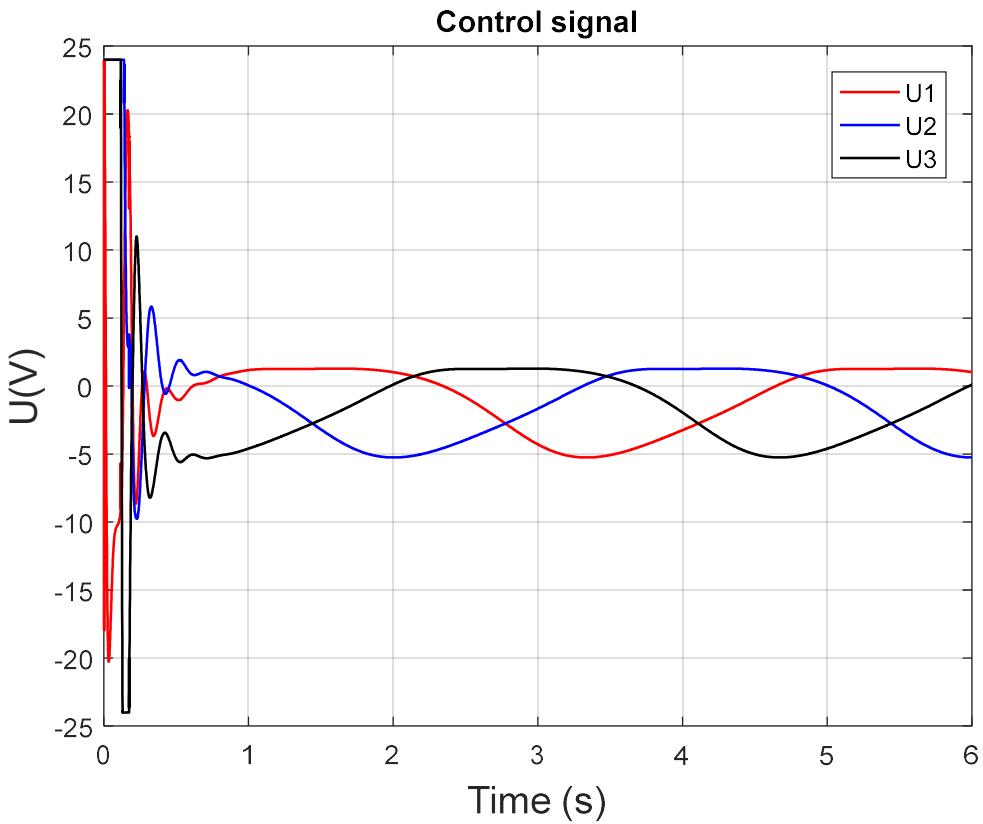
Trong sơ đồ **Hình 5.11**, với kết quả tính toán động học ngược, từ quỹ đạo chuyển động mong muốn của bàn máy động ta xác định được quy luật chuyển động tương ứng của các khâu chủ động. Đây chính là tín hiệu mong muốn đặt lên đầu vào của bộ điều khiển. Các tham số của BĐK lần này được chọn là $K_P = 300, K_D = 5$. Sau đây là một số kết quả tính toán, mô phỏng.



Hình 5.13. Đáp ứng góc quay của khâu chủ động.

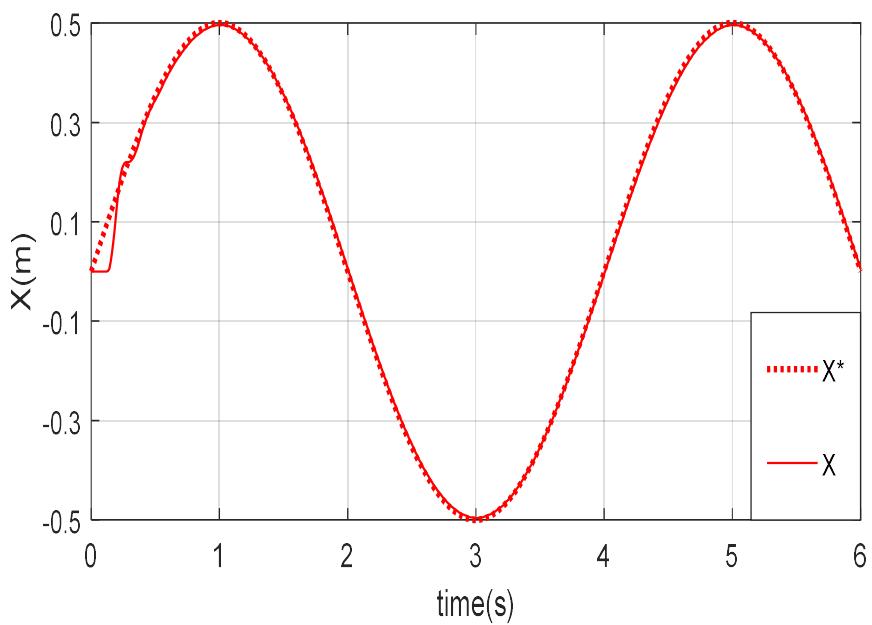


Hình 5.14. Sai số điều khiển với bộ điều khiển PD cho nhiệm vụ bám quỹ đạo
(Hình phóng to bên phải)

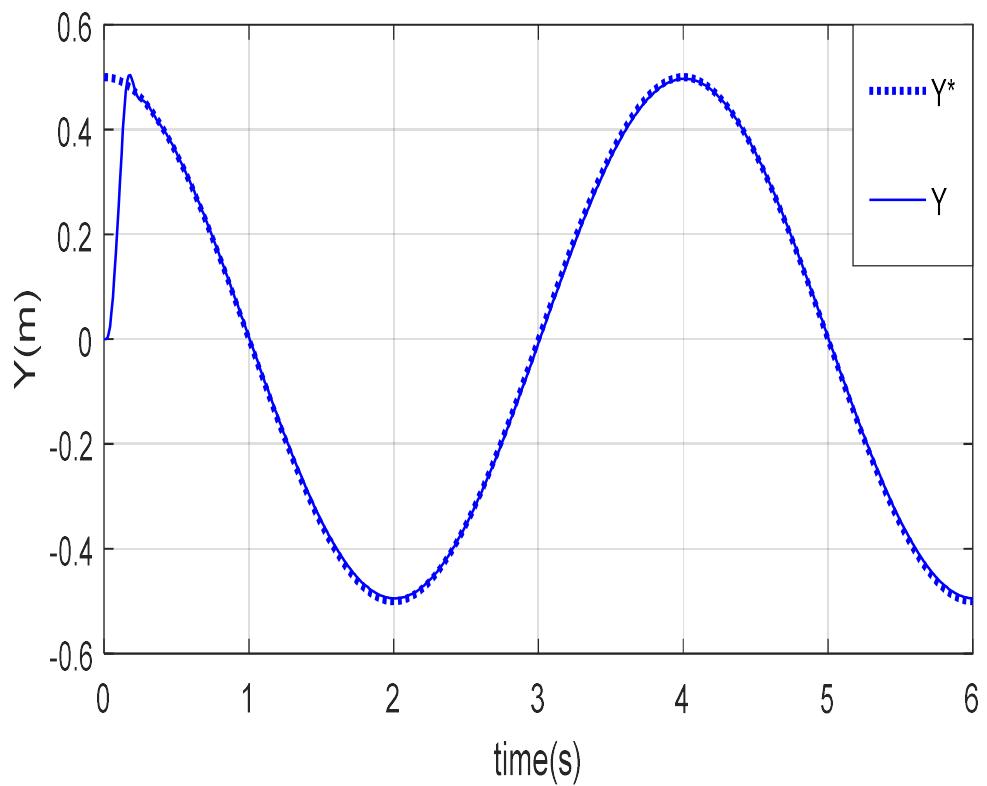


Hình 5.15. Tín hiệu điều khiển đặt lên động cơ với nhiệm vụ bám quỹ đạo.

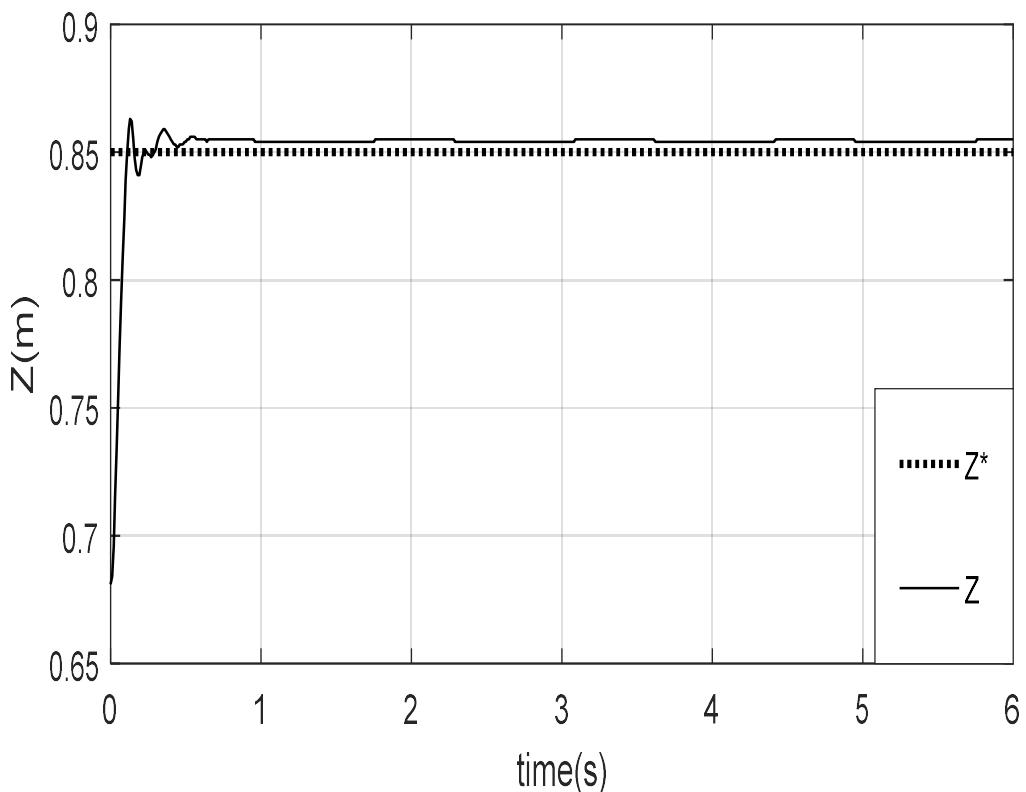
Tiến hành tính toán động học thuận khảo sát chuyển động của bàn máy động ta có các kết quả sau:



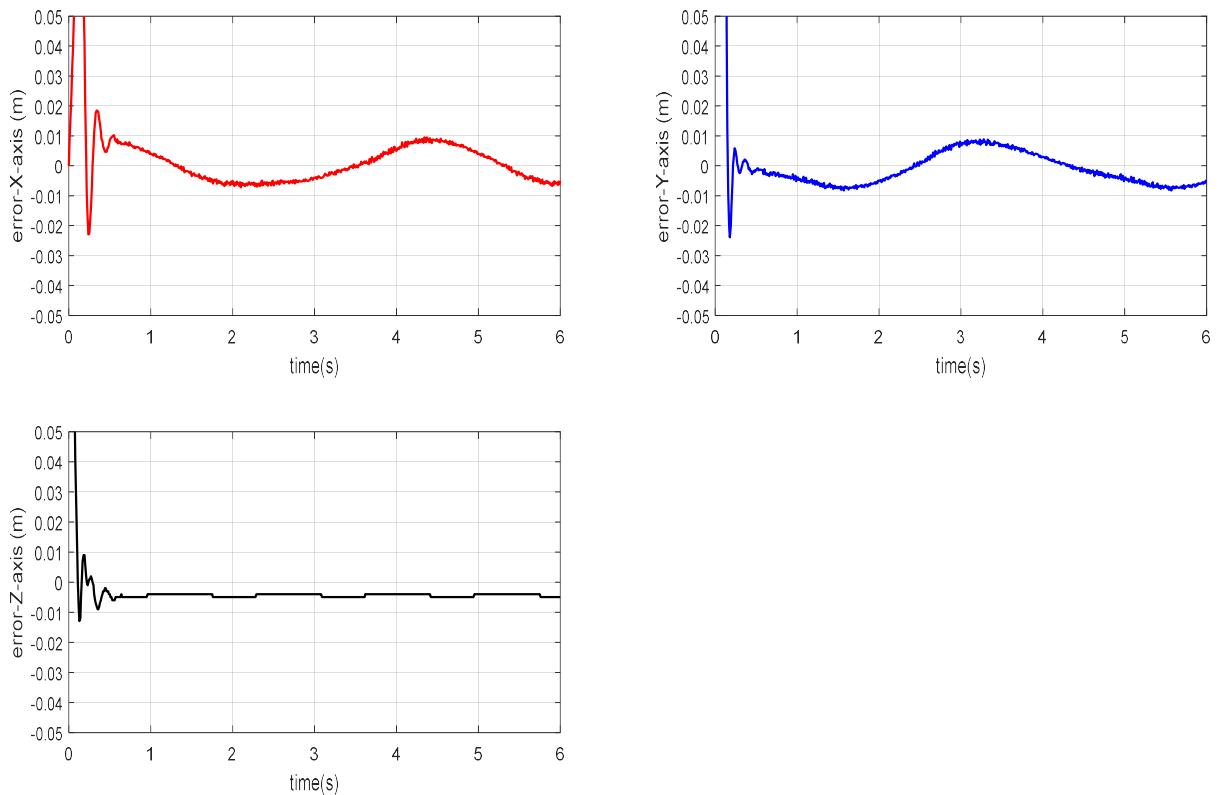
Hình 5.16. Chuyển vị của bàn máy động theo trục Ox .



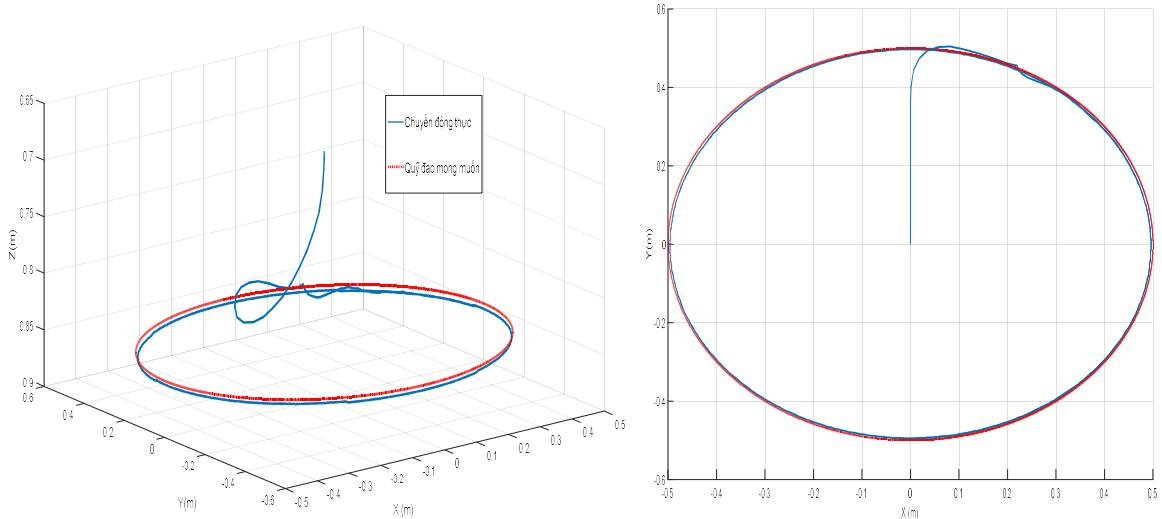
Hình 5.17. Chuyển vị của bàn máy động theo trục Oy .



Hình 5.18. Chuyển vị của bàn máy động theo trục Oz .



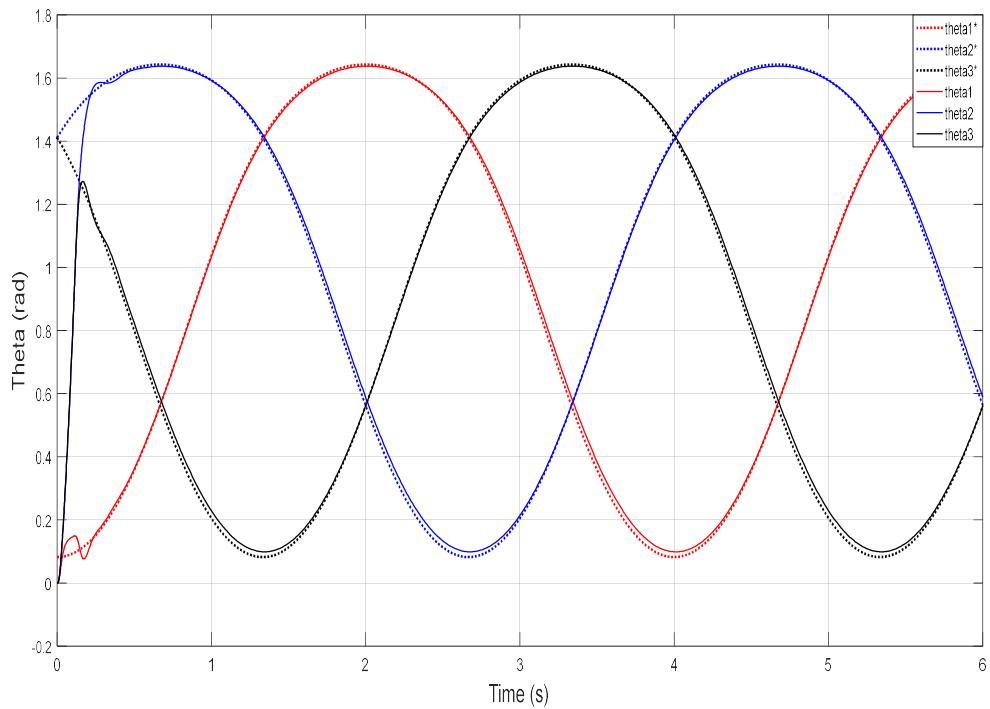
Hình 5.19. Sai số quỹ đạo theo các trục tọa độ.



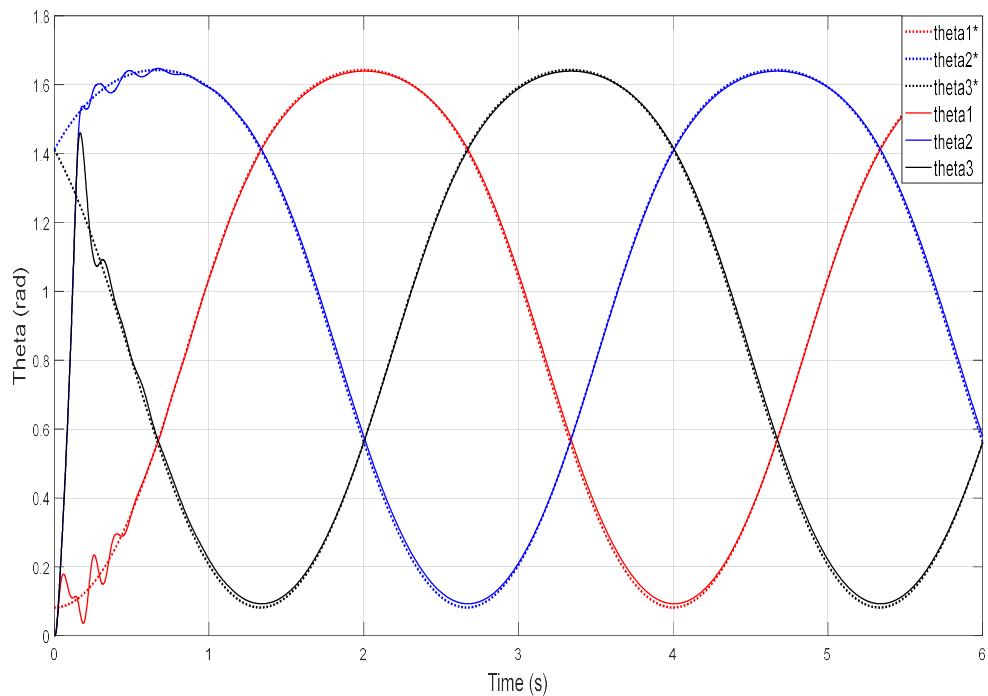
Hình 5.20. Quỹ đạo mong muốn và đường chuyển động thực của bàn máy động trong không gian.

Như vậy chương này đã trình bày được một số kết quả khảo sát chuyển động của Robot với bộ điều khiển PD từng khớp. Từ kết quả cho thấy BĐK PD cho chất lượng điều khiển khá tốt khi chọn được các tham số điều khiển K_p, K_d phù hợp, hệ thống ổn định nhanh, sai số xác lập khá nhỏ, quỹ đạo thực tương đối sát với quỹ đạo mong muốn. Hệ số K_p giúp giảm sai số xác lập nhưng lại làm tăng độ vọt lồ. Hệ số K_d giúp dập tắt sai số điều khiển nhưng khi tăng K_d quá lớn có thể làm mất ổn định vì rất nhạy với những

dao động tần số lớn. Một số kết quả mô phỏng với các giá trị K_P, K_D khác nhau được thể hiện ở **Hình 5.20** và **5.21**



Hình 5.21. Đáp ứng góc quay của khâu chủ động với $K_P = 200, K_D = 5$



Hình 5.22. Đáp ứng góc quay khâu chủ động khi $K_P = 300, K_D = 2$

KẾT LUẬN

Như vậy đề tài đã giải quyết được các vấn đề lí thuyết cơ bản về nguyên lý hình thành cơ cấu, động học, động lực học của Robot song song Delta ba bậc tự do. Cũng như bất kì các mẫu tay máy hay Robot nào khác, đây đều là những cơ sở khoa học cơ bản để tiến hành chế tạo các mô hình thật và áp dụng vào thực tế. Đặc biệt đề tài đã ứng dụng phần mềm tính toán Matlab trên máy tính trong việc giải các bài toán về động học, động lực học và điều khiển Robot cùng với kỹ thuật mô phỏng chuyển động Robot với đồ họa đã giúp thể hiện trực quan chuyển động của Robot, đồng thời giúp kiểm chứng các kết quả tính toán lí thuyết trước đó.

Do thời gian và kiến thức còn nhiều hạn chế nên một số nội dung chuyên sâu hơn trong lĩnh vực động lực học và điều khiển Robot còn chưa được đề cập và giải quyết trong đề tài này. Do vậy một số hướng nghiên cứu và phát triển tiếp theo có thể thực hiện trong thời gian tới như sau:

- Phân tích động lực học ngược Robot song song Delta bằng nguyên lý công ảo.
- Mô phỏng điều khiển mờ trực tiếp (Direct Fuzzy - PD), điều khiển tự chỉnh định Fuzzy – PID cho từng khâu dẫn động Robot song song.
- Thiết kế, chế tạo mô hình Robot song song ba bậc tự do.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

- [1] Phạm Thanh Tùng (2013), *Phân tích động lực học ngược Robot song song*, Luận văn Thạc sĩ khoa học chuyên ngành Cơ kĩ thuật, ĐH Bách khoa Hà Nội.
- [2] GS.TSKH Nguyễn Văn Khang (2007), *Động lực học hệ nhiều vật*, NXB Khoa học kĩ thuật.
- [3] Nguyễn Văn Khang, Nguyễn Thành Công (2012), *Về hai phương pháp giải bài toán động lực học ngược Robot song song*, Hội nghị toàn quốc lần thứ 6 về Cơ điện tử (The 6th Vietnam Conference on Mechatronics), Hà Nội 14-15/12/2012, tr 574-582.
- [4] Trần Thế San (2002), *Cơ sở nghiên cứu & sáng tạo Robot*, NXB Thông kê.
- [5] Nguyễn Phùng Quang (2004), *Matlab & Simulink dành cho kỹ sư điều khiển tự động*, NXB Khoa học kĩ thuật.
- [6] Nguyễn Xuân Vinh (2015), *Tối ưu hóa thiết kế và điều khiển tay máy song song kiểu Stewart Gough Platform*, Luận án Tiến sĩ chuyên ngành Kĩ thuật điện tử, Viện nghiên cứu điện tử, Tin học, Tự động hóa
- [7] Đinh Công Huân, Vương Thị Diệu Hương, Đỗ Thị Ngọc Oanh, Nguyễn Huy Thụy, Phạm Anh Tuấn, *Một giải pháp điều khiển Robot cơ cầu song song*, Phòng Cơ điện tử, Viện cơ học
- [8] Từ Điện Công Thành, Đặng Văn Nghìn, *Bộ điều khiển Parallel Robot*, Bộ môn Cơ điện tử, Khoa Cơ khí, Đại học Bách khoa Tp.HCM

Tiếng Anh

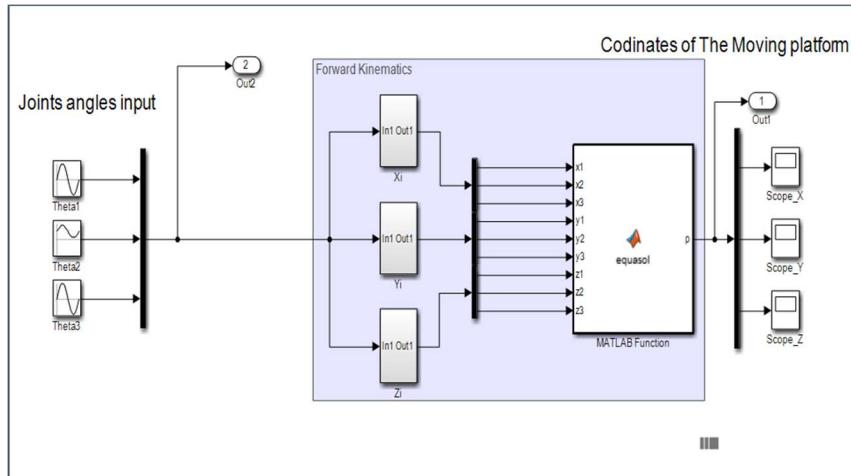
- [9] Yong-Lin Kuo, *Mathematical modeling and analysis of the Delta robot with flexible links*, Journal of Computers and Mathematics with Applications (2016), pp 1973-1989
- [10] Xin-Jun Liu, Jingsong Wang, Kun-ku Oh, Jongwon Kim, *A New Approach to the Design of a Delta Robot with a Desired Workspace*, Journal of Intelligent and Robotics Systems, pp 209-225
- [11] LU Jin-ru, HANG Lu-bin, QIN wei, *Kinematics Analysis of Parallel Mechanism Based on Force Feedback Device*, International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES) (2004), pp 55-61.
- [12] M.A. Laribi, L.Romdhane, S. Zeghloul, *Analysis and Dimensional synthesis of DELTA robot for a precised workspace*, Mechanism and Machine Theory 42 (2007), pp 859-870

- [13] J. Brinker, B. Corves, *A Survey on Parallel Robots with Delta-like Architecture* , The 14th IFToMM World Congress , Taipei, Taiwan, 2015
- [14] P. Guglielmetti, R. Longchamp, *Task space control of the Delta Parallel Robot*, Motion Control for Intelligent Automation (1992)
- [15] Ilian Bonev (2001), *Delta Parallel Robot – The story of success*, online article available at <http://parallemic.org/Reviews/Review002.html>
- [16] Dan B.Marghitu (2009), *Mechanisms and Robot Analysis with Matlab*, Springer.
- [17] Peter Corke (2011), *Robotics Vision and Control*, Springer.
- [18] Serdar Küçük (2012), *Serial and Parallel Robot Manipulators Kinematics, Dynamics Control and Optimization*, published by InTech
- [19] Reymond Clavel (1989), *Device for the movement and positioning of an element in space*, United State Patent.
- [20] Sébastien Briot and Ilian Bonev (2007), *Are parallels more accurate than Serial Robots?*
- [21] Chen-Yu Tzou, Min-Jie Hsu, Jing-Zhe Jian, Yi-Hsing Chien, Wei-Yen Wang, Chen-Chien Hsu (2016), *Mathematical Analysis and Practical Application of a Serial Parallel Robot with Delta-like Architecture*, International Journal of Engineering Research and Science.
- [22] K-S Hsu, M Karkoub, M-C Tsai and M-G Her, *Modeling and index analysis of a Delta-type mechanism*
- [23] *Adept Hornet 565 Robot User's Guide*, available at <http://www.omron-ap.com/products/family/3512/>
- [24] Websites:
<https://www.mathworks.com/>
<http://www.omron-ap.com/>

PHỤ LỤC

Các chương trình Matlab tính toán, mô phỏng Robot song song Delta

1. Chương trình giải bài toán động học thuận (Chương 2)



Hình 2.2. Mô hình Simulink khảo sát động học thuận Robot Delta

Mô hình Simulink **Hình 2.2** được sử dụng để khảo sát bài toán động học thuận của Robot với đầu vào là biến khớp chủ động và đầu ra là tọa độ vị trí bàn máy động. Khối *MatlabFunction* chứa đoạn mã như sau:

```
function p = equasol(x1, x2, x3, y1, y2, y3, z1, z2, z3)
coder.extrinsic('solequa'); % Gọi hàm giải hệ phương trình
động học có tên là solequa
p = zeros(3,1); % Khởi tạo vecto 3x1 lưu giá trị hàm trả về
p = solequa(x1, x2, x3, y1, y2, y3, z1, z2, z3);
```

Để chạy mô hình cần lưu file *solequa.m* trong cùng một folder như sau:

```
function m = solequa(x1, x2, x3, y1, y2, y3, z1, z2, z3)
syms x y z
l2 = 825; % mm
m = zeros(3,1);
eqn1 = (x-x1)^2 + (y-y1)^2 + (z-z1)^2 == l2^2;
eqn2 = (x-x2)^2 + (y-y2)^2 + (z-z2)^2 == l2^2;
eqn3 = (x-x3)^2 + (y-y3)^2 + (z-z3)^2 == l2^2;
solp = solve ([eqn1, eqn2, eqn3], [x, y, z]);
zp = eval(solp.z);
xp = eval(solp.x);
yp = eval(solp.y);
if zp(1) > zp(2) % Kiểm tra điều kiện nghiệm
    m(3) = round(zp(1),2);
    m(1) = round(xp(1),2);
    m(2) = round(yp(1),2);
end
return
```

```

else
    m(3) = round(zp(2),2);
    m(1) = round(xp(2),2);
    m(2) = round(yp(2),2);
    return
end

```

2. Chương trình tính toán động lực học ngược (Chương 3)

Chương trình bao gồm một file chương trình chính có tên *Inverse_Dynamics_Model.m* và hai file hàm có tên là *inverse_kinematic.m* và *differ.m*

➤ Chương trình chính *Inverse_Dynamics_Model.m*

```

clc; close all;
% Khai báo các thông số động học và quán tính của Robot
r1 = 0.225; % đơn vị: m
r2 = 0.075;
r = r2 - r1;
l1 = 0.315;
l2 = 0.825;
phi1 = pi/2;
phi2 = 7*pi/6;
phi3 = 11*pi/6;
phi = [phi1; phi2; phi3];
g=9.8; % đơn vị: m/s^2
mo = 0.504; m1=1.954;m2=0.475; % đơn vị: kg
%-----
step = 0.01;
t = 0:step:10 ; % Thời gian mô phỏng 10s
% Quy đổi cho trước x(t), y(t), z(t)
x = 0.5*cos(t*pi/3);
y = 0.5*sin(t*pi/3);
z = 0*t+0.85;
theta1 = 0*t;% Khởi tạo vecto biến khớp chuỗi
theta2 = 0*t;
theta3 = 0*t;
% Giải bài toán động học ngược để suy ra biến khớp
for i=1:length(t)
    theta1(i) = inverse_kinematic (x(i),y(i),z(i),1);
    theta2(i) = inverse_kinematic (x(i),y(i),z(i),2);
    theta3(i) = inverse_kinematic (x(i),y(i),z(i),3);
end
theta = [theta1;theta2;theta3];
% Tính các đạo hàm của tọa độ và biến khớp
xd = differ(x,step); % Dao ham cap 1
yd = differ(y,step);
zd = differ(z,step);
xdd = differ(xd,step); % Dao ham cap hai
ydd = differ(yd,step);
zdd = differ(zd,step);
% Dao ham bien khop khau chu dong
thetald = differ(theta1,step); % Dao ham cap 1

```

```

theta2d = differ(theta2,step);
theta3d = differ(theta3,step);
theta1dd = differ(theta1d,step); %dao ham cap 2
theta2dd = differ(theta2d,step);
theta3dd = differ(theta3d,step);
thetadd = [theta1dd;theta2dd;theta3dd];
% Giai he vi phan cua ban may dong de tim nhan tu lagrange
% Phuong trinh vi phan ban may dua ve dang A*lamda = B
% trong do A(3x3) va B(3x1) la cac ma tran hoan toan xac dinh
% Suy ra lamda = inv(A)*B
lamda1 = 0*t;
lamda2 = 0*t;
lamda3 = 0*t;
for j = 1:length(t)
% Xay dung ma tran A
A= zeros(3);
    A(1,1)= x(j)+r*cos(phi(1))-l1*cos(theta1(j))*cos(phi(1));%Hang 1
    A(1,2)= x(j)+r*cos(phi(2))-l1*cos(theta2(j))*cos(phi(2));
    A(1,3)= x(j)+r*cos(phi(3))-l1*cos(theta3(j))*cos(phi(3));

    A(2,1)= y(j)+r*sin(phi(1))-l1*cos(theta1(j))*sin(phi(1));%Hang 2
    A(2,2)= y(j)+r*sin(phi(2))-l1*cos(theta2(j))*sin(phi(2));
    A(2,3)= y(j)+r*sin(phi(3))-l1*cos(theta3(j))*sin(phi(3));

    A(3,1)= z(j)-l1*sin(theta1(j));%Hang 3
    A(3,2)= z(j)-l1*sin(theta2(j));
    A(3,3)= z(j)-l1*sin(theta3(j));
% xay dung ma tran B
B = [0;0;0];% Khoi tao
B(1) = 0.5*(mo+3*m2)*xdd(j);
B(2) = 0.5*(mo+3*m2)*ydd(j);
B(3) = 0.5*((mo+3*m2)*zdd(j)+(mo+3*m2)*g);
% Tinh nhan tu lagrange lamda
lamda = inv(A)*B;
lamda1(j) = lamda(1);
lamda2(j) = lamda(2);
lamda3(j) = lamda(3);
end
% Thay cac gia tri tinh momen khop chu dong
tau1 = 0*t;
tau2 = 0*t; tau3 = 0*t;
for i=1:length(t)
    tau1(i)= (m1*1/3+m2)*l1^2*theta1dd(i)-
2*lamda1(i)*l1*((x(i)*cos(phi(1))+y(i)*sin(phi(1))+r)*sin(theta

```

```

a1(i))-
z(i)*cos(theta1(i)))+(0.5*m1+m2)*g*l1*cos(theta1(i));%momen
tren khau 1
end
for i=1:length(t)
    tau2(i)= (m1*1/3+m2)*l1^2*theta2dd(i)-
2*lamda2(i)*l1*((x(i)*cos(phi(2))+y(i)*sin(phi(2))+r)*sin(theta2(i))-
z(i)*cos(theta2(i)))+(0.5*m1+m2)*g*l1*cos(theta2(i));%momen
tren khau 2
end
for i=1:length(t)
    tau3(i)= (m1*1/3+m2)*l1^2*theta3dd(i)-
2*lamda3(i)*l1*((x(i)*cos(phi(3))+y(i)*sin(phi(3))+r)*sin(theta3(i))-
z(i)*cos(theta3(i)))+(0.5*m1+m2)*g*l1*cos(theta3(i));%momen
tren khau 3
end
% Ve cac do thi
figure(1); % Do thi momen ngau luc
plot (t,tau1,'r','LineWidth',2);
grid on;
hold on;
plot (t, tau2,'b','LineWidth',2);
plot (t,tau3,'black','LineWidth',2);
xlabel('Time (s)', 'FontSize',14, 'FontName','time');
ylabel('Momen (Nm)', 'FontSize',14, 'FontName','time');
legend('tau1','tau2','tau3');

figure (2); % Do thi goc quay khau chu dong
plot (t,theta1,'r','LineWidth',2);
grid on;
hold on
plot (t,theta2,'b','LineWidth',2);
plot (t,theta3,'black','LineWidth',2);
xlabel('Time (s)', 'FontSize',14, 'FontName','time');
ylabel('Theta', 'FontSize',14, 'FontName','time');
legend('theta1','theta2','theta3');
% Tinh toan cong suat tren cac khau chu dong
P1 =0*t; P2 = 0*t; P3 = 0*t;
for i=1:length(t)
P1(i) = tau1(i)*theta1d(i);
P2(i) = tau2(i)*theta2d(i);
P3(i) = tau3(i)*theta3d(i);
end
figure(3); % Do thi momen ngau luc
plot (t,P1,'r','LineWidth',2);
grid on;
hold on;
plot (t, P2,'b','LineWidth',2);

```

```

plot (t,P3,'black','LineWidth',2);
xlabel('Time (s)', 'FontSize',14, 'FontName','time');
ylabel('Power(W)', 'FontSize',14, 'FontName','time');
legend('P1','P2','P3');

```

➤ Hàm *Inverse_kinematic.m*, hàm này dùng để giải bài toán động học ngược

```

%Phương trình động học ngược : a*cos(theta)+b*sin(theta) = c
function theta = inverse_kinematic(x,y,z,i)
% Biến i để chỉ ra kết quả giải cho biến khớp chủ động nào
1,2,3
% Khai báo các thông số động học của Robot
r1 = 0.225;
r2 = 0.075;
r = r2 - r1;
l1 = 0.315;
l2 = 0.825;
phi1 = pi/2;
phi2 = 7*pi/6;
phi3 = 11*pi/6;
phi = [phi1; phi2; phi3];
%-----
a = 2*l1*(r+x*cos(phi(i))+y*sin(phi(i)));
b = 2*z*l1;
c = x^2 + y^2 + z^2 + r^2 + l1^2 -
l2^2+2*r*(y*sin(phi(i))+x*cos(phi(i)));
anfa = asin(a/(sqrt(a^2+b^2)));
theta = asin(c/(sqrt(a^2+b^2)))- anfa;
end

```

➤ Hàm *differ.m*, hàm này dùng để tính xấp xỉ đạo hàm của một hàm số theo thời gian.

```

function y = differ(u, step)
% u là hàm cần tính đạo hàm, step là bước chia thời gian;
y = diff(u)/step;
y(length(u)) = y(length(u)-1);
end

```

3. Các chương trình xây dựng quỹ đạo mô phỏng chuyển động Robot (Chương 4)

3.1. Quỹ đạo hình chữ U

Khối MatlabFunction **Hình 4.14**:

```

function [x,y,z] = fcn(t)
to = 0; tf = 1.6; % Thoi gian chuyen dong
t1 = 0.4;t2=0.8;t3 = 1.2; % Cac thoi diem chuyen tiep
xo =0; yo = 0; zo = 0.85;
xe =0.4; ye =0.3; ze = 0.65;
x = 0*t;

```

```

y = 0*t;
z = 0*t;
% Tinh ma tran Cz2
Az2 = [ze;zo;0;0;0;0];
Bz2 = [t2^5 t2^4 t2^3 t2^2 t2 1; tf^5 tf^4 tf^3 tf^2 tf 1;
5*t2^4 4*t2^3 3*t2^2 2*t2 1 0; 5*tf^4 4*tf^3 3*tf^2 2*tf 1 0;
20*t2^3 12*t2^2 6*t2 2 0 0; 20*tf^3 12*tf^2 6*tf 2 0 0];
Cz2 = Bz2\Az2;% ma tran he so da thuc quy dao tu t2 den tf
%Tinh ma tran Cz1
Az1 = [zo;ze;0;0;0;0];
Bz1 = [to^5 to^4 to^3 to^2 to 1; t2^5 t2^4 t2^3 t2^2 t2 1;
5*to^4 4*to^3 3*to^2 2*to 1 0; 5*t2^4 4*t2^3 3*t2^2 2*t2 1 0;
20*to^3 12*to^2 6*to 2 0 0; 20*t2^3 12*t2^2 6*t2 2 0 0];
Cz1 = Bz1\Az1;% ma tran he so da thuc quy dao tu t0 den t2
%Quy dao theo toa do z
if (to<=t) && (t<=t2) % Quy dao tu t0 den t2
    z=
Cz1(1)*t^5+Cz1(2)*t^4+Cz1(3)*t^3+Cz1(4)*t^2+Cz1(5)*t+Cz1(6);
end
if (t2<=t) && (t<=tf) % Quy dao tu t2 den tf
    z=
Cz2(1)*t^5+Cz2(2)*t^4+Cz2(3)*t^3+Cz2(4)*t^2+Cz2(5)*t+Cz2(6);
end
%Xay dung quy dao toa do x
Ax = [xo;xe;0;0;0;0];
Bx = [t1^5 t1^4 t1^3 t1^2 t1 1; t3^5 t3^4 t3^3 t3^2 t3 1;
5*t1^4 4*t1^3 3*t1^2 2*t1 1 0; 5*t3^4 4*t3^3 3*t3^2 2*t3 1 0;
20*t1^3 12*t1^2 6*t1 2 0 0; 20*t3^3 12*t3^2 6*t3 2 0 0];
Cx = Bx\Ax;% ma tran he so da thuc quy dao tu t1 den t3
%Quy dao toa do x
if (to<=t) && (t<=t1)
    x = 0;
end
if (t1<=t) && (t<=t3)
    x=
Cx(1)*t^5+Cx(2)*t^4+Cx(3)*t^3+Cx(4)*t^2+Cx(5)*t+Cx(6);
end
if (t3<=t) && (t<=tf)
    x = 0.4;
end
y = (ye-yo)/(xe-xo)*x; %Quy dao toa do y

```

3.2. Quỹ đạo đường thẳng

Khối MatlabFunction xây dựng quỹ đạo đường thẳng:

```

function [x,y,z] = fcn(t)
% Thong so quy dao
to = 0; % Thoi diem bat dau chuyen dong
tf = 1.2; % Thoi gian chuyen dong
xo = -0.4; yo =-0.3; zo=0.8; % Toa do diem dau
xf = 0.4; yf = 0.3; zf = 0.6; % Toa do diem cuoi

```

```

% Quy dao Kane
x = xo + (xf-xo)*(t-to)/(tf-to)-((xf-xo)/(2*pi))*sin(2*pi*(t-
to)/(tf-to));
% Tinh cac he so lien he tuyen tinh giua toa do y, z theo x
% yo = a1*xo + b1;
% yf = a1*xf + b1;
% zo = a2*xo + b2;
% zf = a2*xf + b2;
A1 = [xo 1; xf 1];
B1 = [yo; yf];
K1 = inv(A1)*B1;
B2 = [zo; zf];
K2 = inv(A1)*B2;
y = K1(1)*x+K1(2);
z = K2(1)*x+K2(2);

```