

HOẠCH ĐỊNH QUỸ ĐẠO CHO ROBOT UP6 TRÁNH VẬT CẢN THEO GIẢI THUẬT PROBABILISTIC ROADMAP CÓ XEM XÉT ĐỘ UYỂN CHUYỂN CỦA CÁC GÓC KHỚP

PATH PLANNING FOR UP6 ROBOT TO AVOID OBSTACLES USING THE
PROBABILISTIC ROADMAP ALGORITHM WITH CONSIDERATION OF THE
JOINT FLEXIBILITY.

Ngô Xuân Khoát¹, Lưu Hoàng Minh², Ngô Mạnh Dũng³

¹Khoa Điện Điện Tử, Trường Cao đẳng Kỹ thuật Công nghệ Bà Rịa – Vũng Tàu

²Nhóm NC AIT, Trường Đại học Giao thông Vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

³Khoa Điện Điện Tử, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

TÓM TẮT

Hoạch định quỹ đạo cho cánh tay robot tránh vật cản hoạt động trong môi trường 3D là bài toán đang được quan tâm để giải quyết cho robot tự hành sẽ được ứng dụng rất nhiều trong đời sống. Với sự phát triển của hệ thống Camera Stereo thì việc xác định được 6DOF của đối tượng đã được giải quyết khá tốt, do đó nếu cánh tay robot tự hoạch định được quỹ đạo để di chuyển tránh vật cản, tiếp cận đối tượng, gấp và đưa đối tượng về vị trí xác định trước trong môi trường 3D đang được quan tâm nghiên cứu và phát triển để hoàn thiện quy trình cho Robot tự hành [1, 2]. Trong bài báo này, tác giả đề xuất giải pháp hoạch định quỹ đạo, tránh vật cản cố định cho cánh tay robot UP6-6DOF dựa trên giải thuật Probabilistic Roadmap (PRM) [3, 4] có xem xét đến sự uyển chuyển của các góc khớp để nâng cao độ bền cơ cũng như giảm sự rung lắc điểm làm việc EE (End-Effector) của cánh tay Robot. Trong phương pháp hoạch định quỹ đạo dựa trên PRM, đầu tiên bản đồ (Roadmap) dưới dạng lưới hình lập phương được xây dựng trong hệ trục tọa độ (x, y, z) đã loại bỏ vật cản được minh họa trong hình 1. Sau khi xác định được 6DOF của đối tượng từ hệ thống Camera gọi là điểm F (Finish) và với vị trí hiện tại của điểm EE gọi là điểm S (Start), dựa trên thuật toán tối ưu quãng đường di chuyển của điểm EE men theo các E (Edge) trong bản đồ Roadmap để di chuyển từ điểm S đến điểm F, ta tìm được quỹ đạo trong không gian 3D (x, y, z) được minh họa trong hình 4. Thông qua bài toán động học ngược trong phần mềm RoboDK, ta dễ dàng thu thập được tập nghiệm $(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)$ theo thời gian của cánh tay robot UP6 thỏa mãn điểm EE của robot di chuyển dọc theo quỹ đạo vừa xây dựng được. Tuy nhiên, quỹ đạo xây dựng trong Roadmap sẽ có điểm gãy trong không gian 3D tại các Nút N (Node), thông thường tại các Nút thì trong không gian tập nghiệm góc khớp cũng xảy ra điểm gãy [5]. Do đó, trong không gian tập nghiệm thì bộ điều khiển động lực của các góc khớp không được trơn tru và uyển chuyển tại các điểm gãy này. Hệ quả gây ra rung lắc điểm EE và giảm tuổi thọ của các cơ cấu cơ khí. Để cải thiện chất lượng điều khiển Robot, một đoạn chương trình được phát triển để dò ra các điểm gãy trong không gian nghiệm góc khớp, sau đó giải thuật Cubic Spline interpolation not-a-knot [6] được áp dụng tại các điểm gãy này với độ trơn tru hàm bậc 3 để các bộ góc khớp của UP6 được mềm mại và uyển chuyển hơn.

Giải thuật đã được triển khai mô phỏng cho tay máy Robot UP6 trên phần mềm Matlab kết hợp với phần mềm RoboDK đã cho kết quả quỹ đạo của điểm EE được uyển chuyển và mềm mại hơn trong môi trường 3D cũng như trong môi trường tập nghiệm của các bộ góc khớp giúp nâng cao tuổi thọ của các kết cấu cơ và giảm thiểu sự rung lắc của điểm EE.

Từ khóa: *Bản đồ (Roadmap) trong hoạch định quỹ đạo; Giải thuật Probabilistic Roadmap (PRM); Cubic spline; Interpolation; Not-a-knot.*

ABSTRACT

In this paper, the author proposes a trajectory planning solution for avoiding fixed obstacles for the UP6-6DOF robot arm based on the Probabilistic Roadmap (PRM) algorithm [3, 4]. The algorithm considers the flexibility of joint angles to enhance mechanical durability and reduce vibration at the robot arm's End-Effector (EE) working point. In the trajectory planning method based on PRM, a grid-based roadmap is first constructed in the coordinate system (x, y, z) , eliminating the obstacles depicted in Figure 1. After determining the 6DOF of the object (referred to as the Finish point) from the Stereo Camera system and considering the current position of the EE (Start point), the algorithm optimally calculates the EE's path following the edges in the roadmap to move from the Start point to the Finish point. This results in a trajectory in 3D space (x, y, z) , as illustrated in Figure 4. Through inverse kinematics problems in the RoboDK software, time-dependent motion data of the UP6 robot arm satisfying the EE point moving along the constructed trajectory can be easily obtained. However, the trajectories constructed in the roadmap may have not smooth in 3D space at Nodes (N), typically resulting in joint angle discontinuities in its space at these Nodes [5]. Consequently, the control system of joint angles is not smooth, which leads to vibrations at the EE point and reduces the lifespan of mechanical structures. A program segment is developed to identify discontinuity points in the joint angle space to improve the robot control quality. Subsequently, the Cubic Spline interpolation not-a-knot algorithm [6] is applied at these points with third-degree smoothness to make the UP6 joint angles smoother and more flexible. The algorithm is implemented and simulated for the UP6 robot arm using Matlab in conjunction with RoboDK software, producing trajectories with smoother and more flexible EE points in both 3D environments and test spaces of joint angles. This approach enhances the lifespan of mechanical structures and minimizes EE point vibrations.

Keywords: *Roadmap; Probabilistic Roadmap (PRM); Cubic spline; Interpolation; Not-a-knot.*



1. TỔNG QUAN

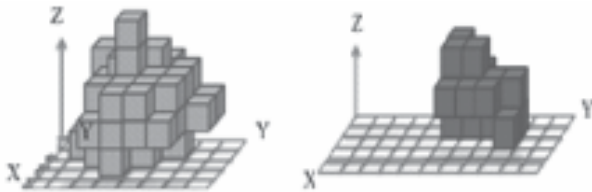
Ngày nay, với sự phát triển rất nhanh của cảm biến camera, cũng như tốc độ tính toán của máy tính, và giải thuật xử lý hình ảnh đã giúp cho hệ thống cảm biến này nhận dạng được 6DOF của đối tượng với độ chính xác cao và thời gian xử lý tốt đủ để ứng dụng vào điều khiển online trong lĩnh vực Robot thông minh [1, 7]. Robot thông minh là robot có khả năng tự vận động và thực hiện nhiệm vụ một cách độc lập thông qua các cảm biến và phần mềm trí tuệ nhân tạo. Ví dụ như robot thông minh phân loại sản phẩm trên băng chuyền. Dựa vào cảm biến camera xử lý ảnh ở phía đầu băng chuyền, sản phẩm được phân loại và xác định vị trí 6-DOF trên băng truyền. Kết hợp với sự tịnh tiến thẳng đều thì vị trí cho đầu gắp Robot tiếp cận đối tượng và gắp đối tượng được ước lượng. Như vậy, vị trí đầu S và vị trí cuối F được xác định, do đó cần một phần mềm thông minh tự hoạch định một quỹ đạo đường đi tối ưu giữa điểm đầu S và điểm cuối F, có thể có thêm các điều kiện như tránh vật cản,... thì lúc đó, chúng ta đã khá hoàn thiện một hệ thống Robot thông minh cho phân loại sản phẩm. Ngoài ra, Robot thông minh còn được ứng dụng nhiều trong lĩnh vực quân sự, y tế, kinh tế biển, khai thác dầu khí,... và mang lại nhiều lợi ích cho đời sống xã hội, và dần thay thế sức lao động của con người trong môi trường độc hại, nguy hiểm [4]. Các giải thuật được triển khai nhiều cho môi trường 3D trong công nghiệp được kể đến như là giải thuật Probabilistic Roadmap (PRM) [3], hay rapidly exploring random tree [8], hoặc artificial potential field [9], non-uniform rational B-splines [10]. Trong số đó, giải thuật Probabilistic Roadmap là giải thuật đơn giản, hiệu quả, và được ứng dụng nhiều nhất. Trong hoạch định quỹ đạo, đối với các robot có bậc tự do thấp như Mobile robot thì việc hoạch định quỹ đạo được thiết lập trên

mặt phẳng 2D, đã có nhiều giải pháp được đề xuất cho loại Robot này. Tuy nhiên, với robot có bậc tự do cao, ví dụ như cánh tay UP6 có 6 bậc tự do thì việc hoạch định quỹ đạo được thiết lập trong môi trường 3D vẫn đang là thách thức và tiếp tục được nghiên cứu, phát triển [13, 14, 15]. Trong bài báo này, nhóm tác giả đề xuất phân hoạch định quỹ đạo cho cánh tay Robot UP6 hoạt động trong môi trường có vật cản cố định và biết trước. Nếu quỹ đạo hoạch định trong miền không gian của hệ trục tọa độ x, y, z thì bộ thông số vị trí của điểm EE di chuyển trong không gian 3D (x, y, z) theo thời gian xuất phát từ điểm bắt đầu S đến điểm kết thúc F mà không va chạm vào vật cản. Còn nếu xét trong không gian bộ nghiệm của các khớp (Joint) thì quỹ đạo hoạch định chính là bộ nghiệm của các góc khớp theo thời gian để làm cho điểm EE di chuyển trên quỹ đạo từ điểm S tới điểm F trong miền không gian 3D. Trong bài báo này, ứng dụng giải thuật Probabilistic Roadmap (PRM) [3, 12] để hoạch định quỹ đạo cho cánh tay Robot trong môi trường 3D, được mô tả như trong Hình 4. Giải thuật này được giới thiệu lần đầu tiên bởi Kavralli và các cộng sự [3]. Ý tưởng chính của giải thuật này là xây dựng một bản đồ gồm những cấu hình tự do của robot, và kết nối chúng lại với nhau, từ đó truy vấn và tìm ra một quỹ đạo đi từ điểm đầu S đến điểm cuối F với trọng số đánh giá là quỹ đạo di chuyển giữa điểm S và F là ngắn nhất.

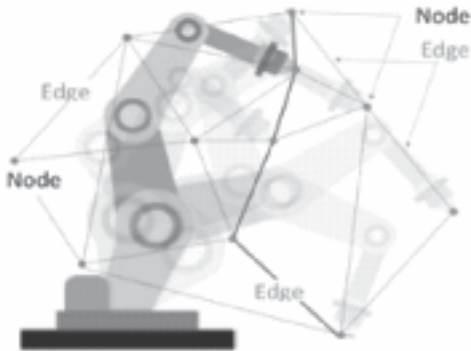
2. HOẠCH ĐỊNH QUỸ ĐẠO CHO CÁNH TAY UP-6 BẰNG PHƯƠNG PHÁP PROBABILISTIC ROADMAP (PRM)

Nếu xem không gian làm việc của cánh tay robot làm việc trong môi trường 3D three-dimensional space (R^3), có miền không gian hoạt động là (W), trong không gian hoạt động này chứa vật cản cố định gọi là (W_0). Vậy, miền không gian tự do là vùng không gian ($W_{free}=W-$

Wo). Trong hoạch định quỹ đạo cho cánh tay robot thì chúng ta sử dụng miền không gian tự do W_{free} , hoặc sử dụng thêm vùng không gian bộ nghiệm giá trị của các góc khớp cánh tay robot hay còn gọi là vùng không gian C_{free} , nếu tay máy có n khớp thì một điểm trong vùng không gian C_{free} được xác định bởi (q_1, q_2, K, q_n) hay nói cách khác là tập hợp các bộ nghiệm góc khớp của cánh tay Robot trong vùng không gian C_{free} đều ánh xạ tương thích với một điểm thích hợp của điểm cuối EE của cánh tay Robot trong vùng W_{free} .



Hình 1. Vùng làm việc khả dĩ của Robot và vật cản cố định được xây dựng trong hệ trục tọa độ (x, y, z) .



Hình 2. Xây dựng Bản đồ Roadmap vô hướng của cánh tay robot bao gồm tập nút N và tập cạnh E .

Hoạch định quỹ đạo theo giải thuật Probabilistic Roadmap (PRM), thông thường bước đầu chúng ta cần phải xác định được quỹ đạo tốt nhất và chọn làm quỹ đạo di chuyển cho điểm EE trong vùng không gian W_{free} trong Hình 4. Quỹ đạo được chọn bao gồm tập hợp các điểm nút N và tập cạnh E nối vị trí đầu S và vị trí cuối F trong vùng không gian W_{free} sẽ được trình bày chi tiết trong phần hoạch định

quỹ đạo theo phương pháp giữa Probabilistic Roadmap. Kết hợp với bài toán động học ngược trong quá trình ta chuyển đổi quỹ đạo trên từ *miền không gian W_{free} về tập giá trị tập hợp bộ biến góc khớp trong miền không gian C_{free} chứa toàn bộ nghiệm góc khớp để vận hành từ điểm q_s tới q_f trong miền không gian C_{free} .

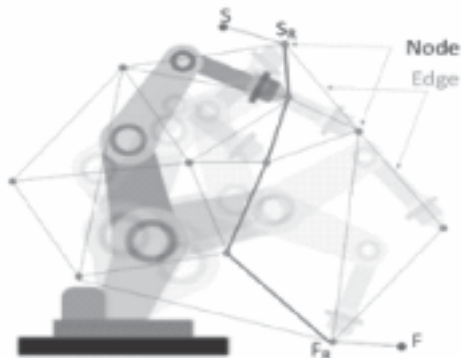


Hình 3. Miền không gian C_{free} chứa toàn bộ nghiệm góc khớp để vận hành từ điểm q_s tới q_f .

Với cánh tay Robot UP6 thì q_s và q_f được biểu diễn như sau:

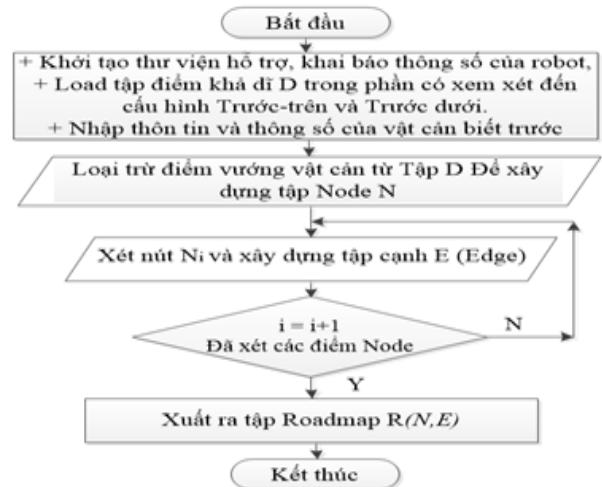
$$\begin{aligned} q_s &= (\theta_{s1}, \theta_{s2}, \theta_{s3}, \theta_{s4}, \theta_{s5}, \theta_{s6}) \\ q_f &= (\theta_{f1}, \theta_{f2}, \theta_{f3}, \theta_{f4}, \theta_{f5}, \theta_{f6}) \end{aligned} \quad (1)$$

Giải thuật hoạch định quỹ đạo cho cánh tay Robot UP6 có điểm làm việc EE di chuyển từ điểm S tới điểm F để không chạm vào vật cản ứng dụng giải thuật Probabilistic Roadmap (PRM) được chia ra làm hai giai đoạn như sau: Giai đoạn học tập (Learning Phase) và giai đoạn truy vấn (Query Phase). Giai đoạn học tập: Trong giai đoạn này, bản đồ Roadmap cho cánh tay robot được xây dựng. Roadmap là bản đồ vô hướng $R = (N, E)$, trong đó N là tập hợp các nút (node) và E (edge) là các cạnh kết nối giữa hai nút, được minh họa như trong Hình 2, và quá trình thực hiện được diễn tả trong lưu đồ giải thuật Hình 4. Tập N là tập điểm EE của robot được xây dựng trong mạng lưới phân phối đồng nhất của hệ trục tọa độ (x, y, z) thỏa mãn hai điều kiện sau: Thứ nhất là các nút này phải phải tồn tại ít nhất một bộ nghiệm trong bài toán động học ngược của robot khi gán điểm $EE_i = N_i$. Thứ hai là các nút N không bị va chạm với vật cản (collision-free configurations).



Hình 4. Thêm cạnh nối S, F với Roadmap để hoạch định quỹ đạo theo Probabilistic Roadmap (PRM).

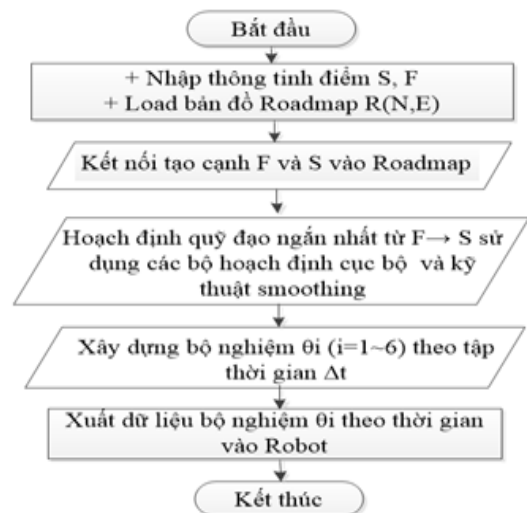
Tập cạnh E (Edge): Bao gồm các cạnh E được hình thành bằng cách kết nối giữa hai nút lân cận khả dĩ và cũng cần thỏa mãn hai điều kiện sau: Thứ nhất là cạnh này không đi xuyên qua vật cản, thứ hai là toàn bộ tọa độ theo vị trí (x, y, z) của cạnh này khi gán cho điểm EE của cánh tay phải tồn tại ít nhất một bộ nghiệm trong bài toán động học ngược, điều này khẳng định đây có thể là một phần của quỹ đạo tương lai. Tiếp theo phần mở rộng bản đồ Roadmap có thể xem xét là khi các nút gần với vật cản, thì lưới phân phối đồng nhất của hệ trục tọa độ (x, y, z) được phân chia nhỏ hơn để bổ sung thêm các điểm nút tại vùng lân cận này. Với giải thuật này thì robot di chuyển uyển chuyển hơn khi gần tiếp xúc với vật cản. Giai đoạn truy vấn và hoạch định quỹ đạo. Trong giai đoạn này, quỹ đạo được hoạch định dựa trên giải thuật Probabilistic Roadmap, sau khi xác định được tọa độ điểm đầu S và tọa độ điểm kết thúc F cạnh E_s và cạnh E_f sẽ được xây dựng theo giải thuật nối S với F vào nút N của bản đồ Roadmap thông qua điều kiện cạnh E_s và cạnh E_f được chọn là ngắn nhất được miêu tả trong Hình 4. Bài toán hoạch định quỹ đạo từ điểm S đến F thông qua các cạnh E và nút N dựa theo kỹ thuật smoothing và chỉ tiêu đánh giá ước lượng quỹ đạo nào có tổng chiều dài là ngắn nhất.



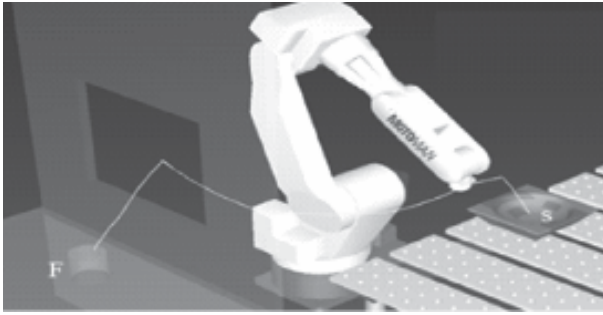
Hình 5. Lưu đồ giải thuật xây dựng bản đồ Roadmap



Hình 6a. Bản đồ Roadmap được mô phỏng cho UP6.



Hình 6b. Lưu đồ xây dựng quỹ đạo bằng giải thuật Probabilistic Roadmap (PRM).



Hình 7. Mô phỏng quỹ đạo được lựa chọn Robot UP6.

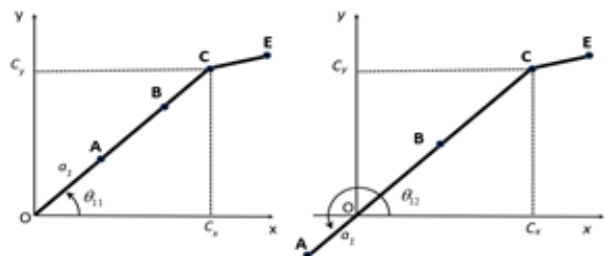
3. BÀI TOÁN ĐỘNG HỌC THUẬN VÀ ĐỘNG HỌC NGƯỢC CHO CÁN TAY ROBOT UP6

Đối với bài toán động học thuận cho cánh tay 6-DOF, người ta thường dùng nguyên tắc Denavit-Hartenberg (D-H) để tính toán tìm vị trí điểm làm việc EE khi ta biết bộ nghiệm góc khớp θ_i khá dễ dàng [17]. Trái lại, bài toán động học ngược là một bài toán khó, vì đây là bài toán đa nghiệm và có nhiều đề xuất phương pháp giải cho bài toán này. Trong bài báo này, nhóm tác giả sử dụng phương pháp giải bài toán động học ngược theo hai giai đoạn và có sử dụng thêm các chỉ thị về vị trí đã được G. Lee & M. Ziegler đề xuất [18]. Với giải pháp hai giai đoạn, thì ở giai đoạn 1 bài toán giúp ta tìm ra được bốn bộ nghiệm khả dĩ cho ba khớp đầu. Trong giai đoạn 2, dựa trên từng bộ nghiệm đã biết ở giai đoạn 1 và kết hợp với góc hướng roll, pitch, yaw của điểm EE, ta tiếp tục thu được các bộ nghiệm cho ba khớp cuối.

Do đó, từ một yêu cầu 6-DOF trong hệ trục tọa độ (x, y, z) ban đầu cho điểm EE. Bài toán động học ngược cho ta nhiều nhất là 8 bộ nghiệm, hay còn gọi là 8 kiểu cấu hình cánh tay thỏa mãn yêu cầu của điểm EE. Nếu bài toán vô nghiệm tức là điểm EE nằm ngoài vùng hoạt động của cánh tay. Bài toán động học ngược theo vị trí: Xét hình chiếu cánh tay trên mặt

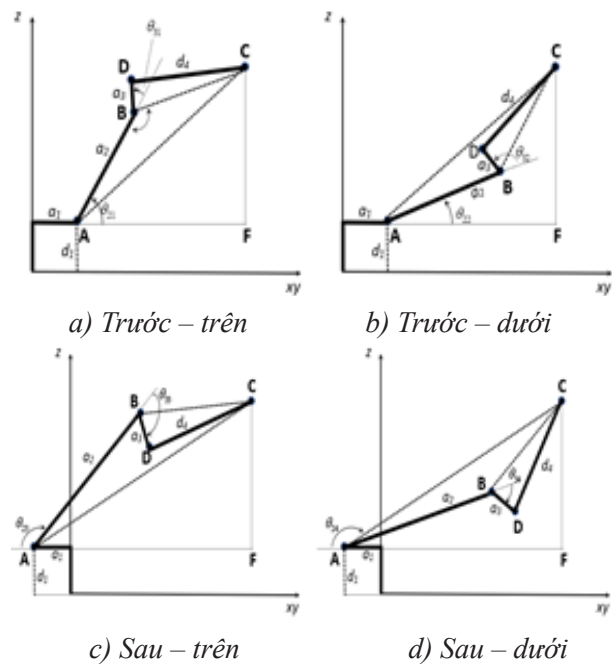
phẳng Oxy như hình Hình 6, ta sẽ có 2 nghiệm góc khớp q_{11} và q_{12} tương ứng với 1 vị trí điểm C trên mặt phẳng Oxy. Theo [18] xác định được góc khớp q_1 như sau:

$$\begin{aligned} \tan(\theta_1) &= \frac{p_y}{p_x} \rightarrow \Rightarrow \theta_{11} = \text{Atan} 2(p_y, p_x) \\ &\Rightarrow \theta_{12} = \text{Atan} 2(p_y, p_x) + \pi \end{aligned} \quad (2)$$



Hình 8. Góc khớp θ_1 theo vị trí điểm C trên mặt phẳng xy

Xét trên mặt phẳng (z, xy), với mỗi giá trị góc khớp q_1 ta sẽ có 2 cặp nghiệm q_2, q_3 tạo thành 4 cấu hình cánh tay như Hình 7 các bộ nghiệm theo vị trí trên và dưới.



Hình 9. Các cấu hình động học Trước, sau – Trên, dưới



Cấu hình 1 (Trước-trên):

$$\begin{aligned}\theta_{11} &= A \tan 2(p_y, p_x) \\ \theta_{21} &= \widehat{CAF} + \widehat{BAC} \\ \theta_{31} &= \widehat{DBC} - (\pi - \widehat{ABC})\end{aligned}\quad (3)$$

Cấu hình 2 (Trước-dưới):

$$\begin{aligned}\theta_{11} &= A \tan 2(p_y, p_x) \\ \theta_{22} &= \widehat{CAF} - \widehat{BAC} \\ \theta_{32} &= \widehat{DBC} + (\pi - \widehat{ABC})\end{aligned}\quad (4)$$

Cấu hình 3 (Sau-trên):

$$\begin{aligned}\theta_{12} &= A \tan 2(p_y, p_x) + \pi \\ \theta_{23} &= \pi - (\widehat{CAF} + \widehat{BAC}) \\ \theta_{33} &= \widehat{DBC} + (\pi - \widehat{ABC})\end{aligned}\quad (5)$$

Cấu hình 4 (Sau-dưới):

$$\begin{aligned}\theta_{12} &= A \tan 2(p_y, p_x) + \pi \\ \theta_{24} &= \pi - (\widehat{CAF} - \widehat{BAC}) \\ \theta_{34} &= \widehat{DBC} - (\pi - \widehat{ABC})\end{aligned}\quad (6)$$

Có thể thấy rằng bài toán động học ngược theo 1 vị trí của điểm EE ta đã xác định được 04 bộ nghiệm của tập hợp 3 góc khớp q_1, q_2, q_3 tạo ra.

Bài toán động học ngược theo góc hướng: Để xác định các góc khớp q_4, q_5, q_6 , ta sử dụng góc hướng biết trước của điểm EE. Trong trường hợp này, ta có nhiều phương pháp miêu tả góc hướng của cánh tay theo từng khâu, trong đó phương pháp xoay Euler và Roll-Pitch-Yaw (RPY) được sử dụng phổ biến. Phần này sử dụng phương pháp xoay RPY để biểu diễn các ma trận xoay của các khớp và tọa độ đầu cuối của cánh tay [18].

Ma trận hàm truyền cho cánh tay R_6^0 được biểu diễn như sau:

$$R_6^0 = R_1^0 R_2^1 R_3^2 R_4^3 R_5^4 R_6^5 = R_3^0 \cdot R_6^3 \quad (7)$$

Trong đó:

$$\begin{aligned}R_1^0 &= \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & s\theta_1 \\ s\theta_1 & 0 & -c\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & R_2^1 &= \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ R_3^2 &= \begin{bmatrix} c\theta_3 & 0 & s\theta_3 \\ s\theta_3 & 0 & -c\theta_3 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & R_4^3 &= \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & -s\theta_4 \\ s\theta_4 & 0 & c\theta_4 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \\ R_5^4 &= \begin{bmatrix} c\theta_5 & 0 & s\theta_5 \\ s\theta_5 & 0 & -c\theta_5 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & R_6^5 &= \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 \\ s\theta_6 & c\theta_6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

Ma trận xoay theo góc quay RPY biểu diễn theo 3DOF góc xoay của điểm cuối EE được thể hiện như sau:

$$R_{(\phi, \theta, \psi)} = R_z(\phi) \cdot R_y(\theta) \cdot R_x(\psi) \quad (8)$$

Trong đó:

$$\begin{aligned}R_{(\phi, \theta, \psi)} &= \begin{bmatrix} c\phi c\theta & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi \\ s\phi c\theta & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\psi \end{bmatrix} \\ R_z(\phi) &= \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 \\ s_\phi & c_\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & R_y(\theta) &= \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & s_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \\ R_x(\psi) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\psi & -s_\psi \\ 0 & s_\psi & c_\psi \end{bmatrix}\end{aligned}$$

Vì 3-DOF góc xoay của điểm EE đã biết, dễ dàng ta xác định được ma trận $R_{(f, q, y)}$

Mặt khác, ta có:

$$R_6^0 = R_{(\phi, \theta, \psi)} \rightarrow R_6^3 = (R_3^0)^{-1} R_{(\phi, \theta, \psi)} \quad (9)$$

Trong đó, là ma trận được biểu diễn thông qua các góc khớp thông qua q_4, q_5, q_6 .

$$R_6^3 = \begin{bmatrix} c\theta_4 c\theta_5 c\theta_6 - s\theta_4 s\theta_6 & -c\theta_4 c\theta_5 s\theta_6 - s\theta_4 c\theta_6 & c\theta_4 s\theta_5 \\ s\theta_4 s\theta_5 c\theta_6 + c\theta_4 s\theta_6 & -s\theta_4 c\theta_5 s\theta_6 + c\theta_4 c\theta_6 & s\theta_4 s\theta_5 \\ -s\theta_5 c\theta_6 & s\theta_5 s\theta_6 & c\theta_5 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Nên ta có thể xác định được các góc khớp còn lại q_4, q_5, q_6 .

Từ các phương trình trên theo [18] tính được:

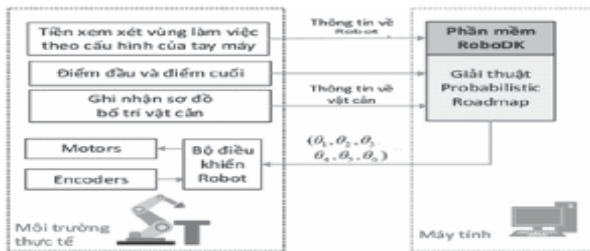
$$\theta_5 = A \tan 2 \left[\sqrt{1 - R_6^3(3,3)^2}, R_6^3(3,3) \right] \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{Trường hợp 1: } sq_5 > 0 \\ \theta_{61} &= A \tan 2 \left[R_6^3(3,2), -R_6^3(3,1) \right] \\ \theta_{51} &= A \tan 2 \left[\sqrt{1 - R_6^3(3,3)^2}, R_6^3(3,3) \right] \\ \theta_{41} &= A \tan 2 \left[R_6^3(2,3), -R_6^3(1,3) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

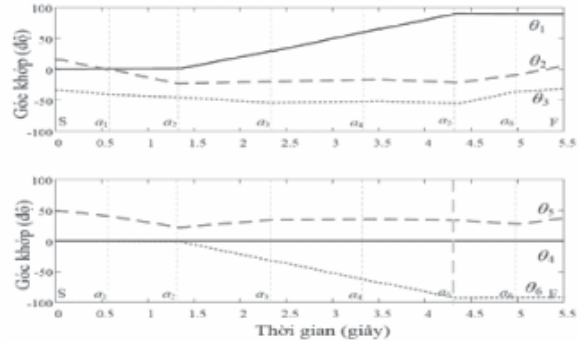
$$\begin{aligned} \text{Trường hợp 2: } sq_5 < 0 \\ \theta_{62} &= A \tan 2 \left[-R_6^3(3,2), R_6^3(3,1) \right] \\ \theta_{52} &= A \tan 2 \left[\sqrt{1 - R_6^3(3,3)^2}, R_6^3(3,3) \right] \\ \theta_{42} &= A \tan 2 \left[R_6^3(2,3), R_6^3(1,3) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

Như vậy, với cánh tay UP6 có 6-DOF và điểm EE biết trước trong vùng không gian W_{free} , ta có thể xây dựng được tập nghiệm q trong miền không gian C_{free} .

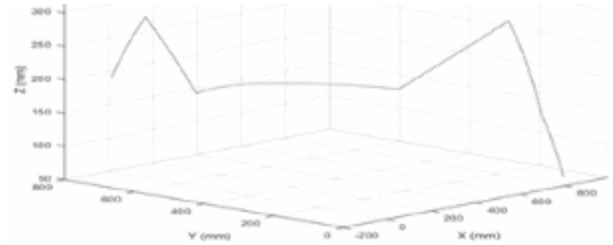
Kết hợp với phần mềm mô phỏng cho cánh tay Robot UP6 trên phần mềm RoboDK, và Matlab [19], ta dễ dàng thu được tập nghiệm nghiệm q trong miền không gian C_{free} được trình bày trong sơ đồ khối ở Hình 11.



Hình 10. Giải pháp điều khiển robot tránh vật cản thông qua huấn luyện robot trong môi trường ảo



Hình 11. Giá trị tập nghiệm q trong miền không gian C_{free} khi di chuyển điểm EE theo quỹ đạo 3D.



Hình 12. Quỹ đạo điểm EE của cánh tay robot di chuyển trong miền không gian W_{free}

4. MỀM HÓA TẬP NGHIỆM “ q ” TRONG MIỀN KHÔNG GIAN C_{free} DỰA TRÊN GIẢI THUẬT CUBIC SPLINE INTERPOLATION

Với giá trị tập nghiệm góc khớp q trong miền không gian C_{free} ở Hình 11, dễ dàng ta truy được điểm gãy của từng tập nghiệm q_i , với $i = 1:6$ theo đoạn chương trình được diễn giải trong Hình 13. Sau khi biết được điểm gãy, ta lựa chọn chiều dài tại điểm gãy về hai phía của đoạn thẳng và triển khai phương pháp nội suy spline đa thức bậc 3 được trình bày trong Hình 15.

Bài toán nội suy hàm số f tại điểm gãy của tập nghiệm q_i dựa trên hàm spline bậc 3 thuộc lớp C^2 được xem xét như sau: Nếu tại điểm gãy của q_i , ta phân bổ tập rời rạc $x_k = [x_0, x_1, \dots, x_N]$, với các giá trị trong tập x_k được sắp xếp theo thứ tự tăng dần và tương ứng với

từng giá trị của x_k : $f_k = y_k = [y_0, y_1, \dots, y_N]$ theo [20] thì luôn luôn tồn tại hàm bậc 3 $S_j(x)$ liên tục trong khoảng $x \in [x_j, x_{j+1}]$ với điều kiện (14, 15) được thỏa mãn:

$$\begin{cases} S_j(x_{j+1}) = S_{j+1}(x_{j+1}) \\ S'_j(x_{j+1}) = S'_{j+1}(x_{j+1}) \\ S''_j(x_{j+1}) = S''_{j+1}(x_{j+1}) \end{cases} (0 \leq j \leq N-2) \quad (14)$$

Và kèm thêm điều kiện biên thỏa điều kiện not-a-knot:

$$\begin{cases} S''_0(x) = S''_1(x) \\ S''_{N-2}(x) = S''_{N-1}(x) \end{cases} \quad (15)$$

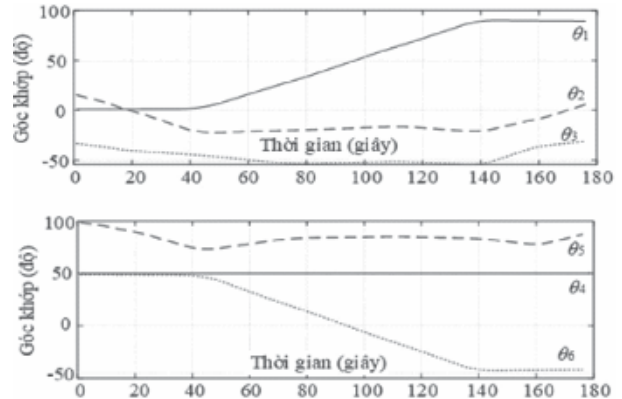
Như vậy, từ điều kiện (15, 16), ta xây dựng được các hàm $S_j(x)$ trên mỗi khoảng $[x_j, x_{j+1}]$, trong đó $j = 0, 1, 2, \dots, n$ là hàm nội suy spline bậc 3 của hàm f . Kết quả thu được sau khi mềm hóa giá trị tập nghiệm góc khớp q trong miền không gian C_{free} ở Hình 11 được thể hiện trong Hình 15 và quỹ đạo điểm EE của cánh tay Robot di chuyển trong miền không gian W_{free} sau khi mềm hóa được trình bày trong Hình 16.

```
% Tìm các điểm gãy
for k=1:176;
    ss=(1:176);
    slopes = diff(theta(k));
    angle = atan(slopes);
    change_angle = diff(angle);
    % Tìm các điểm gãy khúc
    n = find(abs(change_angle) > 6)+1; % tìm các điểm gãy
    s = [1; ss(1:end), 176]; % với 6 degree là ngưỡng lấy=====
    ss(k)=s;
end
% Chia các khoảng điểm gãy thành n phần
n=3; %n>=2*****
indices=[];
for i=1:(length(s)-1)
    if (s(i+1)-s(i))-1 >=n
        for j=1:(n-1)
            value = round((s(i+1)-s(i)-1)/n); % lấy 2 điểm
            indices=[indices, value];
        end
    end
end
indices=indices(2:end-1); %loại bỏ giá trị đầu và cuối
s = [1 indices 176];
slm(k)=s;
```

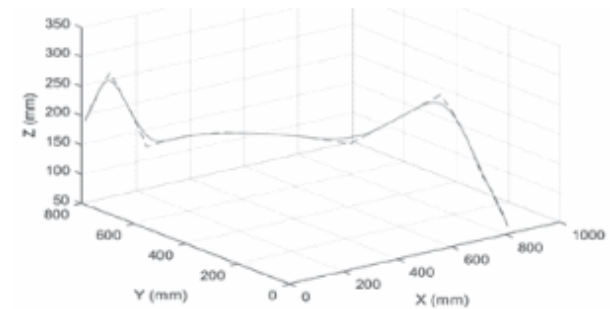
Hình 13. Điểm gãy q trong miền không gian C_{free}

```
%figure(1);
%plot(xs,theta(k),xm,thetam(k));
%legend('Before', 'After');
%hold on
spline_result = spline(xm, thetas(k));
x_spline = linspace(1, 176, 176); % điểm trên trục x
theta_spline(k) = ppval(spline_result, x_spline); % tính
%figure(2); %toán giá trị y cho các điểm x_spline
%plot(xm, thetas(k), x_spline(k), y_spline(k));
%legend('Piecewise linear', 'Spline');
%hold on
end
%subplot(2,1,1);
%plot(xs,theta_spline(1), xs,theta_spline(2), xs,theta_spline(3));
%subplot(2,1,2);
%plot(xs,theta_spline(4), xs,theta_spline(5), xs,theta_spline(6));
%plot(x_spline, theta(5), x_spline, theta_spline(5));
legend('Piecewise linear', 'Spline');
```

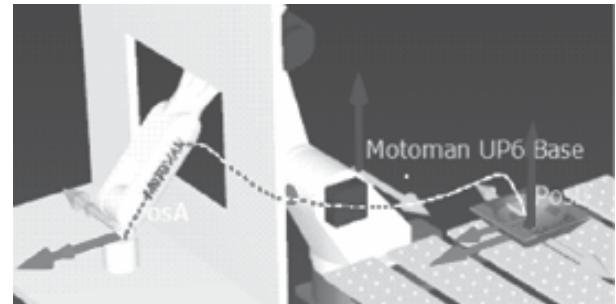
Hình 14. Mềm hóa tập q , trong miền không gian C_{free}



Hình 15. Giá trị tập nghiệm góc khớp q trong miền không gian C_{free} sau khi được mềm hóa.



Hình 16. Quỹ đạo điểm EE di chuyển trong miền không gian W_{free} sau khi mềm hóa.



Hình 17. Mô phỏng điểm EE của UP6 di chuyển trong miền không gian W_{free} sau khi mềm hóa.

5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, tác giả đã trình bày kết quả mô phỏng Hoạch định quỹ đạo cho Robot UP6 tránh vật cản theo giải thuật probabilistic roadmap có xem xét độ uyển chuyển của các góc khớp dựa trên phương

pháp nội suy spline đa thức bậc 3. Giải thuật đã được triển khai mô phỏng cho tay máy Robot UP6 trên phần mềm Matlab kết hợp với phần mềm RoboDK. Kết quả cho thấy sau khi triển khai mềm hóa giá trị tập nghiệm q_i , với $i = 1:6$ trong miền không gian C_{free} , ta cũng thu được sự uyển chuyển và mềm mại hơn của điểm EE trong môi trường 3D được thể hiện trong Hình 17, và đặc biệt không có điểm gãy trong miền không gian C_{free} sẽ giúp cho các góc khớp nâng cao tuổi thọ và các kết cấu khác của cánh tay Robot cơ và giảm thiểu sự rung lắc của điểm EE trong miền không gian W_{free} .

Lời cảm ơn:

Tác giả xin cảm ơn Trường Đại học Giao thông Vận tải Thành phố Hồ Chí Minh; Trường Cao đẳng Kỹ thuật Công nghệ Bà Rịa – Vũng Tàu; và Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG – HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 02/11/2023

Ngày phản biện: 28/11/2023

Tài liệu tham khảo:

- [1]. J. Vidal, C.-Y. Lin, R. Marti, "6D Pose Estimation Using An Improved Method Based On Point Pair Features", in 2018 4th international conference, automation and robotics, pp. 405-409, IEEE, 2018.
- [2]. T.-T. Le, T.-S. Le, Y.-R. Chen, J. Vidal and C.-Y. Lin, "6D Pose Estimation With Combined Deep Learning And 3D Vision Techniques For A Fast And Accurate Object Grasping", R&A Systems, vol. 141, p. 103775, 2021.
- [3]. L.E. Kavraki, P. Svestka, J.C. Latombe, & M.H. Overmars, "Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces", IEEE transactions on Robotics and Automation, vol. 12, pp. 566-580, 1996.
- [4]. D. Baek, M. Hwang, H. Kim, D. S. Kwon, "Path planning for automation of surgery robot based on probabilistic roadmap and reinforcement learning". In 2018 15th international conference on ubiquitous robots, IEEE, pp. 342-347, June, 2018.
- [5]. N. X. Khoát, P. P. Tùng, L. H. Minh, N. M. Dũng, N. Q. Chí, "Path planning for UP6 arm avoiding obstacles based on probabilistic roadmap algorithm with considering UP6 configuration limits", 5th Conference On Transportation, Science and Technology CTST 2023, 15 May 2023.
- [6]. C. de Boer, "Convergence of cubic spline interpolation with the not-a-knot condition", University of Wisconsin-Madison, Technical Summary Report #2876, October 1985.
- [7]. N. X. Khoát, N. M. Dũng, N. X. Vinh, "Limiting the solution sets of the inverse kinematics problem for a 6-DOF manipulator by considering the working area with configurations". The 6th Vietnam International Conference and Exhibition On Control And Automation, Nov, 2022.
- [8]. S. M. LaValle, J. J. Kuffner, "Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning". Technical Report, Computer Science Department, Iowa State University, 2008.
- [9]. T.Xu, H. Zhou, S. Tan, Z. Li, X. Ju, Y. Peng "Mechanical arm obstacle avoidance path planning based on improved artificial potential field method". Industrial Robot: the international journal of robotics research and application, 49(2), pp. 271-279, 2022.
- [10]. G. J. Giezeman, "PlaGeo a library for planar geometry". Dept. Comput. Sci., Utrecht Univ., Utrecht, the Netherlands. 1993.
- [11]. M. H. Overmars, P. Svestka. "A probabilistic learning approach to motion planning", Utrecht University, Padua 14 P.O. Box 80.089, Netherlands, Book, 1994.
- [12]. Y. Yu, K.Gupta, "Sensor-based probabilistic roadmaps: experiments with an eye-in-hand system", Advanced Robotics, vol. 14(6), pp. 515-536, 2000.
- [13]. T. C. Lai, S. R. Xiao, H. Aoyama, C. C. Wong, "Path planning and obstacle avoidance approaches for robot arm". In 2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan, IEEE, SICE, pp. 334-337. September 2017.
- [14]. P.J. Laumond, M. Taïx, P. Jacobs, "A motion planner for car-like robots based on a mixed global/local approach". Int. Conference Intelligent Robots and Systems. IEEE, (pp. 765-773), July-1990.
- [15]. S. Berchtold, B. Glavina, "A scalable optimizer for automatically generated manipulator motions" In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'94 – IEEE, Vol. 3, pp. 1796-1802, September 1994.
- [16]. R. Zhao, "Trajectory planning and control for robot manipulations". The sis.hal.science University Paul Sabatier – Toulouse, 26 Oct 2016.
- [17]. U. Abubakar, W. Zhongmin, G. Ying, "Kinematic Analysis and Simulation of a 6-DOF Industrial Manipulator". International Journal of Science and Research (IJSR), ISSN, 2014.
- [18]. S.S.G. Lee, M. Ziegler, "A Geometric Approach in Solving the Inverse Kinematics of Puma Robots". IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, volume: AES-20, pp. 695 – 706, 1984.
- [19]. N.X. Khoát, P.P.Tùng, L.H.Minh, N.M. Dũng, N.Q.Chí, "Path planning for UP6 arm avoiding obstacles based on probabilistic roadmap algorithm with considering UP6 configuration limits". 5th Conference On Transportation, Science and Technology CTST 2023, 15 May 2023.
- [20]. C. Boor, "Convergence of cubic spline interpolation with the not-a-knot condition". Technical Summary Report-University of Wisconsin-Madison, October 1985.