



ỨNG DỤNG CÁNH TAY ROBOT TRONG MỎ HẦM LÒ: CƠ SỞ ĐIỀU KHIỂN VÀ GIẢI PHÁP TRÁNH VA CHẠM

Đoàn Công Luận

Trường Đại học Mỏ - Địa chất, 18 Phố Viên, Đông Ngạc, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 28/4/2025

Ngày nhận bài sửa: 15/7/2025

Ngày chấp nhận đăng: 20/7/2025

Tác giả liên hệ:

Email: doancongluan@humg.edu.vn

TÓM TẮT

Trong bối cảnh ngành công nghiệp khai khoáng ngày càng phát triển, khai thác mỏ hầm lò đang đóng vai trò trọng yếu. Tuy nhiên, môi trường làm việc trong mỏ hầm lò lại tiềm ẩn nhiều nguy cơ mất an toàn, với đặc điểm không gian chật hẹp, nhiều vật cản, độ ẩm cao, bụi bẩn ... gây khó khăn lớn cho quá trình tự động hóa. Trước những thách thức trên, việc ứng dụng robot gắn cánh tay máy nổi lên như một giải pháp khả thi nhằm nâng cao năng suất, giảm thiểu rủi ro và hỗ trợ quá trình khai thác an toàn.

Bài báo này trình bày cơ sở lý thuyết về điều khiển và tránh va chạm cho cánh tay robot trong môi trường hầm lò. Mô hình động học được xây dựng dựa trên phương pháp Denavit-Hartenberg, kết hợp giữa động học thuận và nghịch để mô tả chuyển động của robot và đánh giá nguy cơ va chạm. Hệ thống cảm biến thị giác được tích hợp để phát hiện vật cản và xác định khoảng cách trong môi trường làm việc. Trên cơ sở đó, một thuật toán điều khiển tránh va chạm chủ động được đề xuất và triển khai thử nghiệm trên robot Niryo Ned 2 trong môi trường mô phỏng. Kết quả cho thấy phương pháp đạt hiệu quả tốt trong việc điều hướng và tránh vật cản, mở ra tiềm năng ứng dụng thực tế trong các mỏ hầm lò hiện đại.

Từ khóa: cánh tay robot, mỏ hầm lò, tránh va chạm, động học robot, cảm biến thị giác.

@ Hội Khoa học và Công nghệ Mỏ Việt Nam

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Mỏ hầm lò là một trong những môi trường làm việc nguy hiểm và khắc nghiệt nhất, với cấu trúc phức tạp trong không gian chật hẹp, và nhiều rủi ro về an toàn như sập lò, cháy nổ, khí độc và bụi bẩn [1]. Trong bối cảnh đó, việc ứng dụng các hệ thống robot tự động có gắn các cánh tay máy nổi lên như một giải pháp đầy tiềm năng nhằm nâng cao năng suất, giảm rủi ro cho người lao động, giải quyết tình trạng thiếu hụt nhân lực.

Mặc dù mang lại nhiều lợi ích, việc triển khai robot trong mỏ hầm lò đối mặt với nhiều thách thức lớn về va chạm do mật độ thiết bị cao và điều kiện không gian luôn biến đổi. Các yếu tố như bụi, độ ẩm, nhiệt độ cao, rung động và nhiễu tín hiệu ảnh hưởng đến hiệu suất cảm biến, làm suy giảm khả năng định vị, điều hướng và kiểm soát robot. Điều này đòi hỏi các hệ thống robot không chỉ có khả năng tự hành mà còn phải tích hợp công nghệ cảm

biến bền bỉ, thuật toán điều hướng thông minh và khả năng tương tác an toàn với con người.

Trước những yêu cầu và thách thức nêu trên, bài báo này tập trung vào giải pháp cơ khí trong thao tác cánh tay máy hiệu quả trong thực hiện tác vụ và tránh va chạm hiệu quả trong môi trường hầm lò. Nghiên cứu bao gồm các nội dung về động học robot tích hợp cảm biến thông minh và điều khiển cánh tay tránh vật cản, với minh họa mô phỏng sử dụng cánh tay robot Niryo Ned 2.

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ sở điều khiển cánh tay robot

Để một cánh tay robot có thể thực hiện các thao tác chính xác và tránh va chạm trong môi trường phức tạp như mỏ hầm lò, việc hiểu rõ và áp dụng các nguyên lý động học của cánh tay máy là vô cùng cần thiết. Bên cạnh đó, khả năng nhận biết môi trường thông qua cảm biến đóng vai trò then



chốt trong việc cung cấp dữ liệu đầu vào cho các thuật toán điều khiển và tránh va chạm.

2.1.1. Mô hình động học cánh tay robot

Mô hình động học là nền tảng toán học để mô tả mối quan hệ giữa các khớp của robot và vị trí, hướng của cơ cấu chấp hành cuối (end-effector) trong không gian dựa vào thông số kết cấu và động học của các khâu, khớp trên cánh tay.

Để xây dựng mô hình toán học cho cánh tay robot, đặc biệt trong bài toán phân tích động học, nhiều phương pháp đã được nghiên cứu và áp dụng nhằm mô tả chính xác mối quan hệ hình học giữa các khâu trong chuỗi khớp. Các phương pháp phổ biến bao gồm: phương pháp Denavit-

Hartenberg (D-H) [2], phương pháp tích các ma trận mũ (Product of Exponentials – PoE) [3], lý thuyết trục vít (Screw Theory) [4], và các tiếp cận dựa trên đại số hình học [5] hoặc học máy [6]. Trong đó, phương pháp D-H được sử dụng rộng rãi nhờ tính đơn giản, trực quan và khả năng hệ thống hóa quá trình thiết lập mô hình động học thông qua bốn tham số đặc trưng của mỗi khâu trên cánh tay máy. Phương pháp này cho phép xây dựng chuỗi ma trận chuyển đổi đồng nhất giữa các khung tọa độ liên tiếp, từ đó xác định được vị trí và hướng của bộ phận chấp hành cuối trong không gian; rất phù hợp cho cánh tay máy với số bậc tự do hữu hạn, giúp đơn giản hóa việc triển khai trong mô phỏng và điều khiển.



Hình 1. Không gian làm việc trong mỏ hầm lò và mô hình cánh tay robot di động

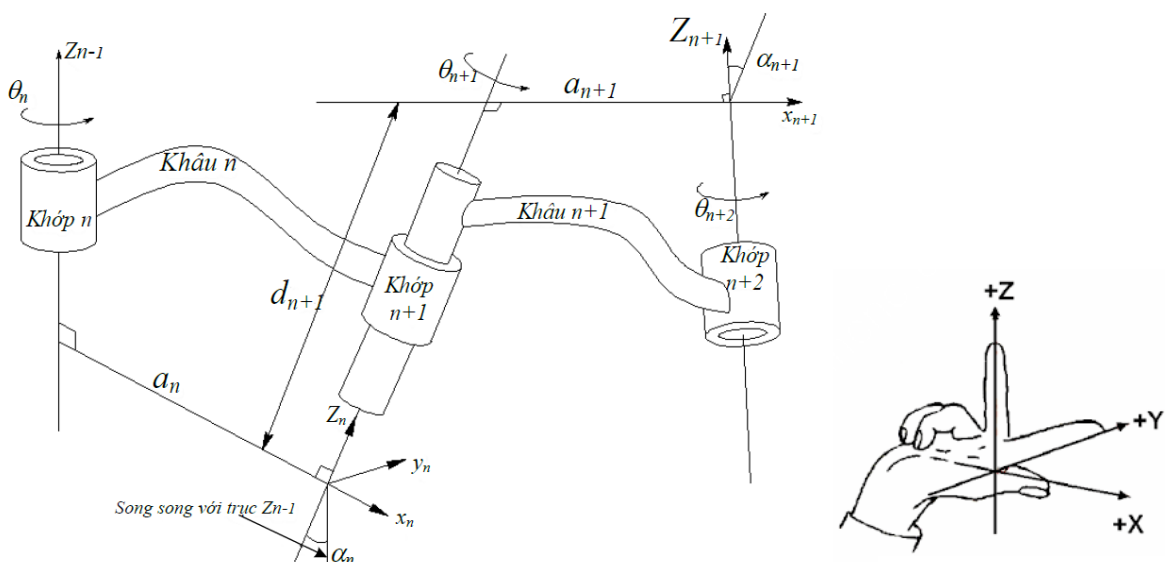
Để thực hiện giải thuật D-H, các hệ trục tọa độ sẽ được gán lên từng khâu của cánh tay robot (Hình 2), trong đó:

- Góc tọa độ được đặt ở cuối khâu;
- Trục x chọn theo chiều dài của khâu – trùng với trục của khâu;
- Trục z chọn theo trục của khớp nối với khâu kế tiếp, z trùng với đường tâm của trục quay nếu

là khớp quay, z trùng với phương của rãnh trượt nếu khớp là khớp trượt;

- Trục y được xác định từ x và z theo quy tắc bàn tay phải (tọa độ theo y không được sử dụng trong giải thuật D-H);

- Hệ trục tọa độ của khâu không được sử dụng để xác định chuyển vị của khâu mà được sử dụng để xác định các chuyển vị của khâu kế tiếp



Hình 2. Mô tả cấu trúc của một khâu trên cánh tay robot tổng quát theo phương pháp D-H



Dựa vào quy tắc gắn trục tọa độ này, trên khâu thứ n của cánh tay robot (Hình 2) ta sẽ xác định được cấu trúc robot và bộ 4 tham số Denavit-Hartenberg của khâu $N+1$ như sau:

- Khâu $n+1$ là khâu chuyển động theo khớp $n+1$ nằm trên khâu N ;
- a_{n+1} – chiều dài của khâu $n+1$ hay là khoảng cách từ gốc hệ trục tọa độ n tới hệ trục tọa độ $n+1$ theo phương trục x ;
- α_{n+1} là góc quay của trục z_{n+1} so với trục z_n theo trục x_{n+1} với chiều dương là chiều ngược chiều kim đồng hồ

Bảng 1. Bảng Denavit-Hartenberg của khâu thứ $n+1$ với giả định khớp $n+1$ là khớp quay

Khớp	a	α	d	θ	Biến số
n	...	...	...	...	...
$N+1$	a_{n+1}	α_{n+1}	d_{n+1}	θ_{n+1}	θ_{n+1}
$N+2$	...	...	...	...	...

Khi khâu $N+1$ di chuyển tịnh tiến một khoảng d_{n+1} theo trục z_{n+1} hoặc quay một góc θ_{n+1} quanh trục z_{n+1} thì tọa độ điểm cuối của khâu $n+1$ sẽ được xác định theo công thức:

$${}^{n+1}u_{n+1} = A_{n+1} \times {}^{n+1}u_0 \quad (1)$$

Trong đó:

${}^{n+1}u_0$ – là tọa độ ban đầu của điểm cuối của khâu $N+1$ trong hệ trục tọa độ $n+1$;

$${}^{n+1}u_0 = [x_0 \quad y_0 \quad z_0 \quad 1]^T$$

${}^{n+1}u_{n+1}$ – là tọa độ của điểm cuối của khâu $N+1$ trong hệ trục tọa độ $n+1$ sau khi khâu $N+1$ quay một góc θ_{n+1} quanh trục z_{n+1}

$${}^{n+1}u_{n+1} = [x_{n+1} \quad y_{n+1} \quad z_{n+1} \quad 1]^T$$

A_{n+1} – là ma trận chuyển vị của khâu tương ứng với sự biến đổi của các biến khớp

$$A_{n+1} = \begin{bmatrix} c_{n+1} & \gamma_{n+1}s_{n+1} & \sigma_{n+1}s_{n+1} & a_{n+1}c_{n+1} \\ s_{n+1} & \gamma_{n+1}c_{n+1} & -\sigma_{n+1}c_{n+1} & a_{n+1}s_{n+1} \\ 0 & \sigma_{n+1} & \gamma_{n+1} & d_{n+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Với $c_{n+1} = \cos \theta_{n+1}$; $s_{n+1} = \sin \theta_{n+1}$; $\gamma_{n+1} = \cos \alpha_{n+1}$; $\sigma_{n+1} = \sin \alpha_{n+1}$

Tổng quát với một cánh tay robot có n khâu, chuyển vị của điểm cuối cùng trên cánh tay robot có thể được chuyển đổi về gốc của cánh tay thông qua ma trận chuyển vị tổng quát 0T_n là tích số của các ma trận chuyển vị thành phần của từng khâu riêng lẻ A_i :

$${}^0T_n = A_1 A_2 \dots A_i \dots A_n \quad (2)$$

• d_{n+1} là khoảng cách từ gốc hệ trục tọa độ n tới hệ trục tọa độ $n+1$ theo phương của trục z_n

• θ_{n+1} là góc xoay của trục x_{n+1} so với trục x_n với tâm quay là trục z_n

Trong 4 tham số này thì a và α là các thông số kết cấu, không thay đổi trong suốt quá trình cánh tay vận hành, nếu khớp $n+1$ là khớp trượt ta có d_{n+1} là biến số, nếu $n+1$ là khớp quay ta có θ_{n+1} là biến số.

Tùy theo điểm trên cánh tay robot cần xét mà ta có thể lấy ma trận chuyển vị tổng 0T_n hoặc ma trận chuyển vị trung gian 0T_i .

2.1.2. Động học thuận và nghịch cánh tay robot

Động học thuận là quá trình tính toán vị trí và hướng của cơ cấu chấp hành cuối khi biết tất cả các giá trị biến khớp:

$${}^0u = {}^0T_n \times {}^nu \quad (3)$$

Khi nạp thông số điều khiển cho cánh tay robot, mô hình trên sẽ tính toán trước vị trí của điểm cuối cùng trên cánh tay (hoặc điểm trung gian) từ đó làm cơ sở đối sánh xem vị trí sẽ hướng tới của cánh tay robot có phải là điểm có chướng ngại vật hay không để phòng tránh va chạm.

Tuy vậy, việc tránh va chạm theo mô hình động học thuận tương đối thụ động do phải lọc từng thông số biến khớp, do vậy mô hình đề xuất để điều khiển cánh tay robot là sử dụng động học nghịch.

Với giả thiết robot đã xác định được vị trí của chướng ngại vật thông qua hệ thống cảm biến thông minh gắn trên robot ${}^0u^*$, căn cứ theo vị trí hiện tại của cơ cấu chấp hành cuối đã xác định ${}^nu^*$ tập hợp các biến khớp có thể khiến cánh tay robot va chạm với vị trí chướng ngại vật sẽ được xác định từ công thức của động học thuận như sau:

$$\begin{aligned} {}^0u^* = {}^0T_n \times {}^nu^* &\Rightarrow {}^0T_n^{-1} \times {}^0u^* = {}^0T_n^{-1} \times {}^0T_n \times {}^nu^* \\ &\Leftrightarrow {}^0T_n^{-1} \times {}^0u^* = {}^nu^* \end{aligned} \quad (4)$$

Với ${}^0T_n^{-1}$ là ma trận nghịch đảo của ma trận chuyển vị tổng

Giải phương trình 4 sẽ tìm được bộ thông số biến khớp để phát sinh va chạm, từ đó loại bỏ bộ thông số này trong quá trình tự động điều khiển và

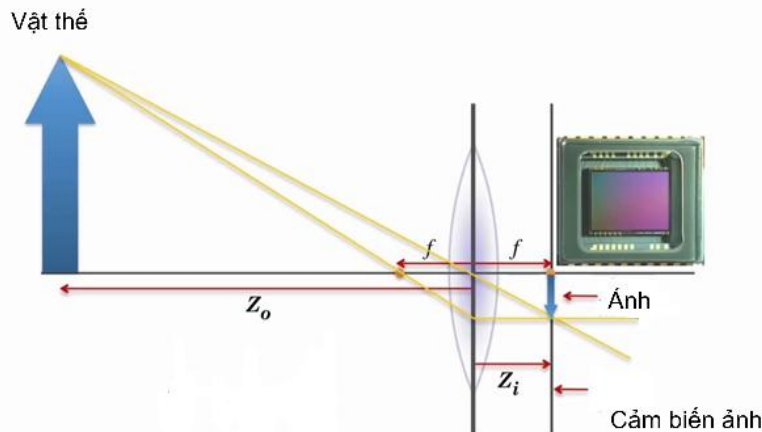


vận hành robot sẽ giải quyết được vấn đề và chạm xảy ra khi cánh tay robot thực thi nhiệm vụ.

2.1.3 Xác định chương ngại vật với cảm biến gắn trên cánh tay máy

Trong môi trường hầm lò có cấu trúc phức tạp, thường xuyên biến đổi, việc nhận biết và xác định chính xác khoảng cách từ robot tới vật thể đóng vai trò then chốt trong điều hướng và thao tác an toàn của cánh tay robot. Một số loại cảm biến thường

được dùng để xác định khoảng cách trong không gian 2 và 3 chiều là LiDAR, cảm biến siêu âm, cảm biến tiệm cận, camera RGB đơn và camera RGB song song. Trong số các giải pháp này, camera RGB nổi bật nhờ tính linh hoạt, an toàn, chi phí thấp, khả năng thu nhận cùng lúc nhiều trường thông tin bao gồm có hình ảnh vật thể và khoảng cách tới vật thể nhờ áp dụng các thuật toán thị giác máy tính kết hợp với các mô hình học sâu (Deep learning) [7, 8].



Hình 3. Mô hình camera đơn trong xác định khoảng cách tới vật thể

Khi biết kích thước vật thể h_v , dựa vào tiêu cự của camera và kích thước cũng như độ phân giải của cảm biến ảnh ta có thể xác định được khoảng cách từ máy ảnh tới vật thể theo công thức:

$$z_o = \frac{h_v \cdot f \cdot h_s}{h_a \cdot H} \quad (5)$$

Với:

f – tiêu cự của camera, mm;

h_s – độ phân giải theo chiều cao của cảm biến ảnh, pixel;

h_a – chiều cao ảnh của vật thể trên cảm biến ảnh, pixel;

H – chiều cao của cảm biến ảnh, mm.

2.2. Mô phỏng mô hình với cánh tay máy NIRYO NED 2

Niryo Ned 2 là một cánh tay robot được thiết kế đặc biệt cho mục đích giáo dục và nghiên cứu, mô phỏng theo kết cấu của các cánh tay robot công nghiệp (Hình 4) với 6 trục (6 bậc tự do đều là các khớp quay). Trong đó khớp số 1, 4 và 6 là các khớp quay đồng trục; khớp 2,3 và 5 là khớp quay với trục z xoay góc 90° so với trục của khâu. Cánh tay robot có tải trọng 300g, độ chính xác $\pm 0.5\text{mm}$ [9].



Hình 4. Cánh tay Niryo Ned 2 và tích hợp camera lên cánh tay máy

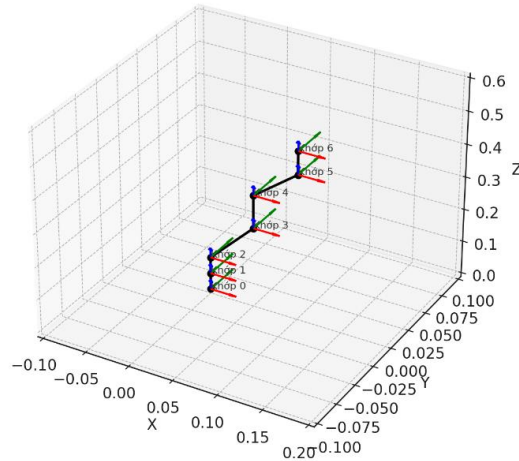
Ned 2 được xây dựng trên nền tảng Raspberry Pi 4, sử dụng bộ xử lý ARM V8 64-bit hiệu suất cao và 4GB RAM. Niryo Ned 2 chạy hệ điều hành Ubuntu và ROS (Robot Operating System) Noetic,

một giải pháp mã nguồn mở cung cấp nhiều thư viện cho phép phát triển các chương trình robot từ đơn giản đến phức tạp.



Dựa vào lý thuyết phương pháp Denavit-Hartenberg ở phần trên, ta gắn các hệ trục tọa độ tương ứng lên từng khâu của cánh tay robot, theo quy tắc: hệ trục tọa độ gốc gắn tại đế của cánh tay robot, hệ trục tọa độ của khâu sẽ đặt ở cuối khâu,

trục z trùng với trục quay của khớp, trục x trùng với trục của khâu; trong trường hợp khớp quay đồng trục, ưu tiên chọn trục z theo trục quay, trục x sẽ chọn vuông góc với z tại gốc tọa độ (Hình 5).



Hình 5. Gắn hệ trục tọa độ lên cánh ray Niryo Ned 2
trục x – màu đỏ; trục y – màu xanh lá; trục z – màu xanh dương

Căn cứ theo hệ trục tọa độ đã xây dựng cho cánh tay, ta lập được bảng Denavit-Hartenberg cho cánh tay Niryo Ned 2 theo thông số kỹ thuật mà nhà sản xuất công bố (Bảng 2).

Bảng 2. Bảng Denavit-Hartenberg của cánh tay Niryo Ned 2

Khớp	a (m)	α (rad)	d (m)	θ (rad)	Biến số
1	0	$\pi/2$	0	θ_1	θ_1
2	0	$-\pi/2$	0	θ_2	θ_2
3	0	$\pi/2$	0,128	θ_3	θ_3
4	0	$-\pi/2$	0	θ_4	θ_4
5	0	$\pi/2$	0,105	θ_5	θ_5
6	0	0	0,056	θ_6	θ_6

Thay giá trị từ Bảng 2 vào công thức ta xác định được các ma trận chuyển vị thành phần theo từng khâu, cụ thể:

$$A_1 = {}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = {}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & -\sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = {}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0,128 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = {}^3T_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & -\sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & \cos \theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = {}^4T_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & \sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & -\cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0,105 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_6 = {}^5T_6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0,056 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ma trận chuyển vị tổng quát là tích của các ma trận chuyển vị thành phần (khâu), nhân theo chiều từ phải sang trái:

$${}^0T_6 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 = {}^0T_1 \times {}^1T_2 \times {}^2T_3 \times {}^3T_4 \times {}^4T_5 \times {}^5T_6$$

Dạng tổng quát của ma trận chuyển vị tổng 0T_6 là ma trận cỡ 4x4:

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Trong đó:

n_x, n_y, n_z là ba thành phần của vector $\vec{n}$
 o_x, o_y, o_z là ba thành phần của vector $\vec{o}$
 a_x, a_y, a_z là ba thành phần của vector $\vec{a}$
 Với $\vec{n}, \vec{o}$ và $\vec{a}$ là ba vector của hệ trục tọa độ chỉ ra hướng của khâu cuối so với hệ trục tọa độ gốc, còn được biết tới dưới tên gọi ma trận quay.



P_x, P_y, P_z là tọa độ không gian của điểm đầu mút của cơ cấu chấp hành cuối so với gốc hệ trục tọa độ gốc (hệ trục tọa độ gắn tại đế của cánh tay robot).

Trong thành phần của các tham số n_i, o_i, a_i, P_i có chứa các biến số góc quay θ_i

Trong trường hợp ta gắn thêm cơ cấu chấp hành (end-effector) vào điểm cuối của khâu thứ 6, một điểm P_6 ở trên khâu gắn thêm có tọa độ trong hệ trục tọa độ 6 là $P_6 = [xP_6 \ yP_6 \ zP_6]^T$ sẽ có tọa độ so với hệ trục tọa độ gốc ở đế của robot là:

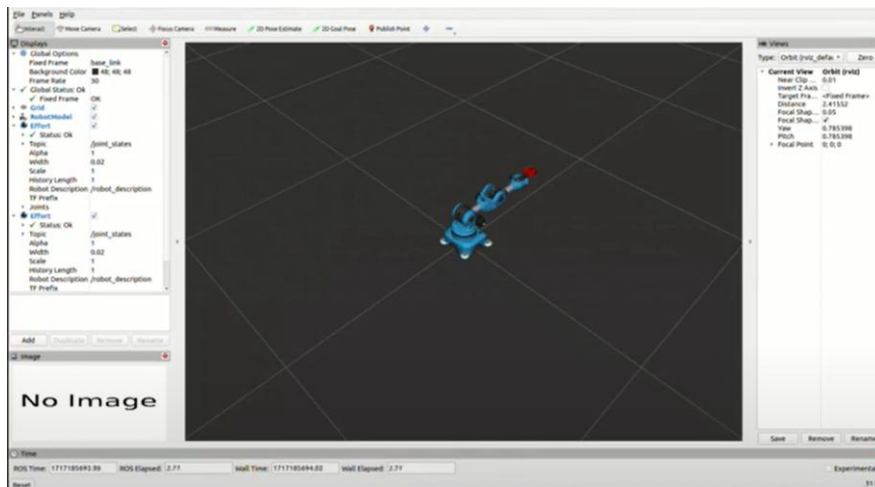
$${}^0P_6 = {}^0T_6 \times P_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} xP_6 \\ yP_6 \\ zP_6 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Đối với bài toán tránh va chạm, để cơ cấu chấp hành và cánh tay robot không va chạm với các vật

thể, chi tiết trong không gian đường lò, được tổng quát bằng tập hợp các điểm có tọa độ tổng quát P^* so với hệ trục tọa độ gốc của cánh tay robot, ta xác định ma trận nghịch đảo của 0T_6 để sử dụng mô hình động học ngược:

$$\begin{bmatrix} xP_6 \\ yP_6 \\ zP_6 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} xP_0^* \\ yP_0^* \\ zP_0^* \\ 1 \end{bmatrix}$$

Do mức độ phức tạp của ma trận, nên việc giải thuật ma trận tổng và ma trận nghịch đảo có thể được tiến hành dưới sự trợ giúp của các phần mềm hỗ trợ tính toán như MATLAB, C, C++, Python. Hình 5 mô tả việc sử dụng Python và ROS trong mô phỏng và điều khiển động học cánh tay robot Niryo Ned 2.



Hình 5. Mô phỏng điều khiển Niryo Ned 2 trong môi trường mã nguồn mở ROS với Python

3. KẾT LUẬN

➤ Bài báo đã trình bày phương pháp xây dựng mô hình động học và thuật toán điều khiển cánh tay robot có thể sử dụng trong môi trường mở hầm lò phức tạp, trong đó trọng tâm là khả năng tránh va chạm thông qua tích hợp cảm biến và xử lý hình ảnh. Mô hình áp dụng phương pháp Denavit–Hartenberg để xây dựng động học robot, sử dụng camera RGB để xác định vật cản và triển khai thuật toán điều khiển nghịch để loại bỏ các cấu hình dẫn đến va chạm. Thử nghiệm mô phỏng trên cánh tay robot Niryo Ned 2 cho thấy tính khả thi và hiệu quả

của giải pháp trong việc thao tác chính xác và tránh va chạm trong không gian hẹp, nhiều vật cản như mỏ hầm lò.

➤ Trong các nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả sẽ mở rộng mô hình điều khiển sang môi trường thực tế và đánh giá các chỉ tiêu hiệu suất như độ chính xác, thời gian phản hồi, hiệu quả năng lượng và khả năng thích nghi với môi trường khắc nghiệt hơn. Kết quả kỳ vọng sẽ góp phần phát triển các hệ thống robot tự động hóa hiệu quả và an toàn hơn trong lĩnh vực khai thác mỏ ngầm □

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Tiến, V.Đ., *Bài giảng cơ sở khai thác mỏ hầm lò*. 2001, Hà Nội: Trường Đại học Mỏ - Địa Chất. 111.
- [2]. Corke, P.I., *A simple and systematic approach to assigning Denavit–Hartenberg parameters*. IEEE transactions on robotics, 2007. 23(3): p. 590-594.
- [3]. Park, F.C., *Computational aspects of the product-of-exponentials formula for robot kinematics*. IEEE transactions on automatic control, 1994. 39(3): p. 643-647.



- [4]. Davidson, J.K., K.H. Hunt, and G.R. Pennock, *Robots and screw theory: applications of kinematics and statics to robotics*. J. Mech. Des., 2004. 126(4): p. 763-764.
- [5]. Duleba, I. and M. Opalka, *A comparison of Jacobian-based methods of inverse kinematics for serial robot manipulators*. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2013. **23**(2).
- [6]. Xu, S., et al., *Learning-based kinematic control using position and velocity errors for robot trajectory tracking*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020. **52**(2): p. 1100-1110.
- [7]. Alphonse, P.J.A. and K.V. Sriharsha, *Depth perception in single rgb camera system using lens aperture and object size: a geometrical approach for depth estimation*. SN Applied Sciences, 2021. **3**(6): p. 595.
- [8]. Doan, L.C., H.T. Tran, and D. Nguyen. *Bayesian Approach for Static Object Detection and Localization in Unmanned Ground Vehicles*. in *International Conference on Intelligence of Things*. 2023. Springer.
- [9]. Niryo, *Niryo Documentation*. <https://docs.niryo.com/robots/ned2/>.

LỜI CẢM ƠN

Nội dung bài báo được hỗ trợ từ đề tài nghiên cứu cấp cơ sở của Trường Đại học Mỏ - Địa Chất, mã số T25-06.

ROBOTIC ARM APPLICATIONS IN UNDERGROUND MINING: CONTROL FUNDAMENTAL AND COLLISION AVOIDANCE STRATEGIES

Luan Cong Doan

Hanoi University of Mining and Geology, 18 Vien Str., Ha Noi, Vietnam

ARTICLE INFOR

TYPE: Research Article

Received: 28/4/2025

Revised: 15/7/2025

Accepted: 20/7/2025

Corresponding author:

Email: doancongluan@humg.edu.vn

ABSTRACT

With the continued expansion of the mining industry, underground mining has become increasingly vital. However, underground environments are among the most hazardous and complex workplaces, characterized by confined spaces, dense obstacles, high humidity, and pervasive dust-factors that significantly hinder automation and pose substantial safety risks. In light of these challenges, robotic systems equipped with articulated arms have emerged as a promising solution to improve operational efficiency, enhance worker safety, and support intelligent mining operations.

This study proposes a collision avoidance framework for robotic manipulators operating in underground settings. The kinematic model of the robotic arm is formulated using the Denavit–Hartenberg convention, incorporating both forward and inverse kinematics to enable precise motion planning and obstacle assessment. A visual sensing system based on RGB cameras is integrated to detect obstacles and estimate distances in real time. Building on this sensor data, a proactive control algorithm is developed to avoid potential collisions and ensure safe arm movement. The proposed approach is implemented and evaluated through simulations on the Niryo Ned 2 robotic arm within the Robot Operating System (ROS) environment. Simulation results demonstrate the effectiveness and feasibility of the method in constrained and dynamic underground scenarios, indicating strong potential for real-world deployment in modern mining automation systems.

Keywords: *robotic arm, underground mining, collision avoidance, robot kinematics, visual sensing.*

@ Vietnam Mining Science and Technology Association