



NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG LẬP BẢN ĐỒ 3D KHÔNG GIAN ĐƯỜNG LÒ SỬ DỤNG CAMERA STEREO TÍCH HỢP TRÊN ROBOT DI ĐỘNG

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: 15/6/2026

Ngày nhận bài sửa: 17/7/2026

Ngày chấp nhận đăng: 24/7/2026

Tác giả liên hệ:

Email: doancongluan@humg.edu.vn

TÓM TẮT

Trong khai thác mỏ hầm lò, việc xây dựng bản đồ ba chiều (3D) không gian đường lò có vai trò quan trọng trong khảo sát hiện trạng, giám sát điều kiện làm việc và hỗ trợ định hướng cho các hệ thống robot tự hành. Tuy nhiên, các phương pháp sử dụng thiết bị quét laser (LiDAR) thường có chi phí đầu tư cao và khó triển khai rộng rãi. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu mô phỏng hệ thống lập bản đồ 3D đường lò sử dụng camera stereo tích hợp trên robot di động bốn bánh (UGV). Hệ thống được triển khai trên nền tảng Robot Operating System (ROS) kết hợp với môi trường mô phỏng Gazebo. Mô hình đường lò được thiết kế chính xác bằng phần mềm NX để làm cơ sở đối chiếu hình học. Dữ liệu ảnh stereo thu nhận từ robot di chuyển được xử lý bằng thuật toán khớp khối bán toàn cục (SGBM) để tính toán ma trận độ lệch điểm ảnh (disparity), tạo ảnh chiều sâu, xây dựng đám mây điểm (Point Cloud) và tạo bản đồ 3D của không gian đường lò. Kết quả thử nghiệm thực quan cho thấy hệ thống tái lập thành công biên dạng hình học vòm và nền đường lò dưới dạng đám mây điểm tích lũy. Kết quả thực nghiệm mô phỏng cho thấy thuật toán StereoSGBM đảm bảo khả năng xử lý thời gian thực, đáp ứng tốt dải tần số hoạt động cần thiết để vận hành robot. Bài báo cũng phân tích các giới hạn kỹ thuật của hệ thống như sai số lũy tiến từ bộ đo dữ liệu hành trình thô (odometry), sự phân mảnh đám mây điểm tại các bề mặt nhẵn thiếu vân (textureless), đồng thời đề xuất hướng tích hợp thuật toán ICP hoặc RTAB-Map SLAM trong các nghiên cứu tiếp theo.

Từ khóa: camera stereo, robot di động, bản đồ 3D, ROS, Point Clouds, Gazebo

@ Hội Khoa học và Công nghệ Mỏ Việt Nam

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, cùng với xu hướng phát triển mỏ thông minh (Smart Mining), việc ứng dụng robot và các hệ thống cảm biến thông minh trong khảo sát, giám sát và quản lý sản xuất tại mỏ hầm lò đang được quan tâm nhằm nâng cao năng suất, giảm thiểu rủi ro và hạn chế sự hiện diện của con người trong môi trường nguy hiểm [1]. Một trong những yêu cầu quan trọng đối với các hệ thống robot tự hành là khả năng nhận biết môi trường và xây dựng bản đồ ba chiều (3D) của không gian đường lò để phục vụ định vị, điều hướng và giám sát hiện trạng khai thác [2-4].

Hiện nay, Tại các mỏ hầm lò Việt Nam hiện nay, công tác trắc địa và thành lập bản đồ 3D chủ yếu vẫn dựa vào máy toàn đạc điện tử hoặc hệ thống quét laser (LiDAR) đo điểm [5-7]. Mặc dù LiDAR (kết hợp IMU) mang lại độ chính xác rất cao, nhưng chi phí thiết bị đắt đỏ và quy trình bảo quản thiết bị quang học nghiêm ngặt khiến việc triển khai đại trà trên các robot tự hành liên tục gặp khó khăn. Do đó, việc nghiên cứu ứng dụng camera stereo – một giải pháp có chi phí thấp hơn đáng kể – đóng vai trò như một phương án dự phòng hoặc bổ sung thông tin hình ảnh để tái tạo không gian 3D đường lò là một định hướng phù hợp với điều kiện đầu tư của các mỏ hầm lò trong nước [8].

Camera stereo là một trong những cảm biến thị giác có khả năng thu nhận đồng thời thông tin hình ảnh và chiều sâu của môi trường thông qua hai camera đặt song song. Từ dữ liệu thu nhận, hệ thống có thể xây dựng ảnh chiều sâu, tạo đám mây điểm (Point Cloud) và tái tạo mô hình ba chiều của không gian làm việc nhờ các thuật toán so khớp, khôi phục tiên tiến [9]. So với LiDAR, camera stereo có ưu điểm về chi phí đầu tư thấp, kích thước nhỏ gọn, tiêu thụ năng lượng ít và dễ dàng tích hợp trên các nền tảng robot di động [10]. Nhờ đó, cảm biến này đang được ứng dụng ngày càng rộng rãi trong các bài toán nhận biết môi trường, lập bản đồ và điều hướng robot.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả xây dựng một hệ thống robot di động tích hợp camera stereo phục vụ lập bản đồ 3D không gian mô phỏng hầm lò trên nền tảng Robot Operating System (ROS) và môi trường mô phỏng Gazebo [11]. Robot được thiết kế để di chuyển trong mô hình đường lò, thu nhận dữ liệu từ camera stereo và xử lý nhằm tạo đám mây điểm, từ đó tái tạo mô hình ba chiều của không gian khảo sát [12]. Thông qua các kết quả mô phỏng, bài báo đánh giá khả năng ứng dụng của camera stereo trong xây dựng bản đồ 3D phục

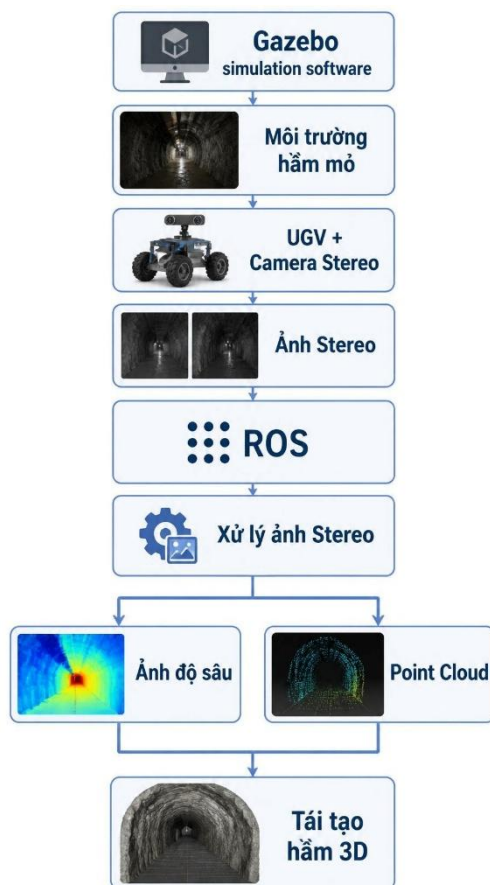
vụ khảo sát đường lò, đồng thời tạo tiền đề cho các nghiên cứu tiếp theo về robot tự hành, định vị và lập bản đồ đồng thời (SLAM) trong môi trường mô phỏng hầm lò [13].

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Kiến trúc hệ thống nghiên cứu

Hệ thống nghiên cứu được xây dựng nhằm mô phỏng quá trình khảo sát và lập bản đồ 3D không gian đường lò bằng robot di động tích hợp camera stereo. Toàn bộ quá trình được thực hiện trên nền tảng Robot Operating System (ROS) kết hợp với môi trường mô phỏng Gazebo.

Hệ thống nghiên cứu gồm bốn thành phần chính: (i) môi trường mô phỏng đường lò được xây dựng trong Gazebo, (ii) robot di động UGV tích hợp camera stereo, (iii) nền tảng ROS dùng để thu nhận và truyền dữ liệu cảm biến, và (iv) hệ thống xử lý dữ liệu nhằm tạo bản đồ ba chiều. Trong quá trình mô phỏng, robot UGV di chuyển trong môi trường đường lò và thu nhận cặp ảnh từ camera stereo. Dữ liệu ảnh được truyền qua ROS để thực hiện tính toán ảnh chiều sâu (Depth Image), chuyển đổi thành đám mây điểm (Point Cloud) và tái tạo mô hình không gian ba chiều của đường lò. Quy trình nghiên cứu được thể hiện trong Hình 1.



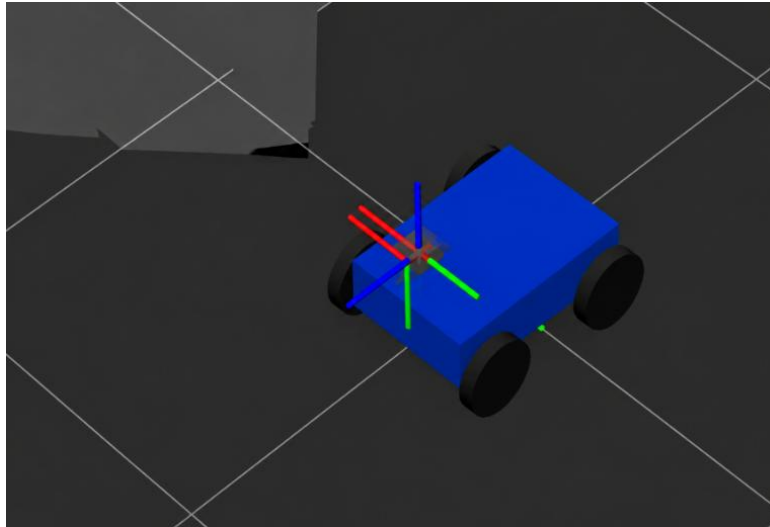
Hình 1. Sơ đồ tổng thể hệ thống xây dựng bản đồ 3D



2.2. Mô hình robot và môi trường mô phỏng

Trong nghiên cứu này, một robot di động bốn bánh (UGV) được xây dựng trên nền tảng ROS. Robot được trang bị hệ thống camera stereo lắp đặt phía trước nhằm thu nhận dữ liệu hình ảnh trong quá trình di chuyển (hình 2). Robot được mô

phỏng cơ bản gồm thân dạng hình hộp (màu xanh), di chuyển trên 4 bánh xe (màu đen), camera 3D stereo được mô tả đơn giản bằng khối hình vuông màu xám đặt cố định trên thân robot. Các thanh ngắn màu đỏ, xanh lá, xanh lam mô tả hệ trục tọa độ Oxyz của camera với màu đỏ tương ứng trục x, màu xanh lá là trục y và màu xanh lam là trục z.

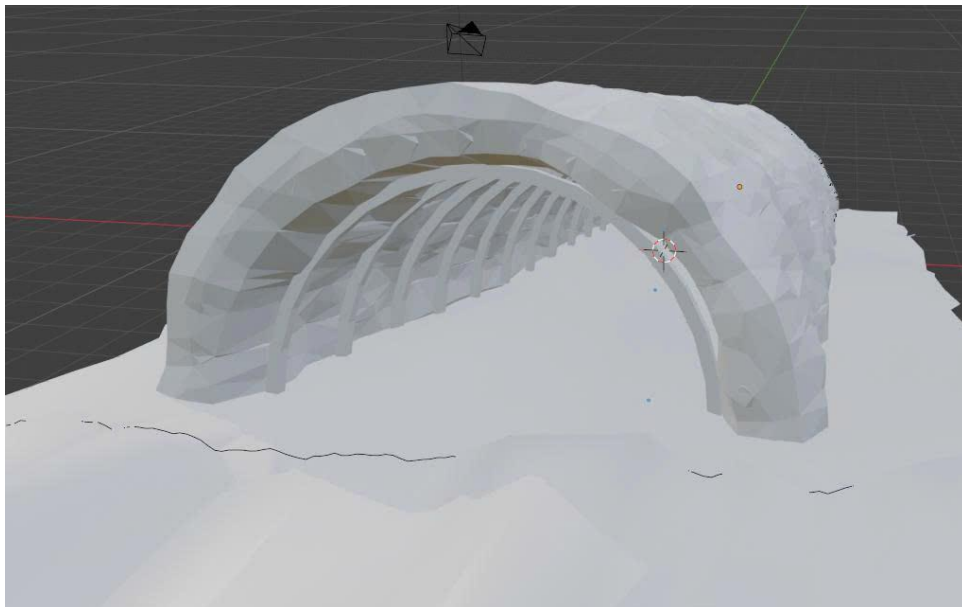


Hình 2. Mô hình robot UGV tích hợp camera stereo trong môi trường mô phỏng ROS/Gazebo

Môi trường khảo sát được xây dựng trên Gazebo với hình dạng mô phỏng đường lò mỏ hầm lò, bao gồm các đoạn đường cong, mặt nền không bằng phẳng và các vật cản nhằm mô phỏng điều kiện làm việc thực tế (hình 3). Mô hình đường lò được xây dựng bằng phần mềm NX chuyên dùng trong thiết kế 3D, đảm bảo độ chính xác về hình dạng và các kích thước, khoảng cách, tạo điều kiện

để kiểm tra độ chính xác trong kết quả đo quét về sau. Việc mô phỏng cho phép đánh giá khả năng hoạt động của hệ thống trong môi trường tương tự điều kiện khai thác dưới hầm lò trước khi triển khai các thí nghiệm trực tiếp.

Các mô hình robot và môi trường mô phỏng được xây dựng dưới dạng mô hình 3D và tích hợp trong Gazebo thông qua tệp URDF.



Hình 3. Mô hình đường lò phục vụ khảo sát và lập bản đồ

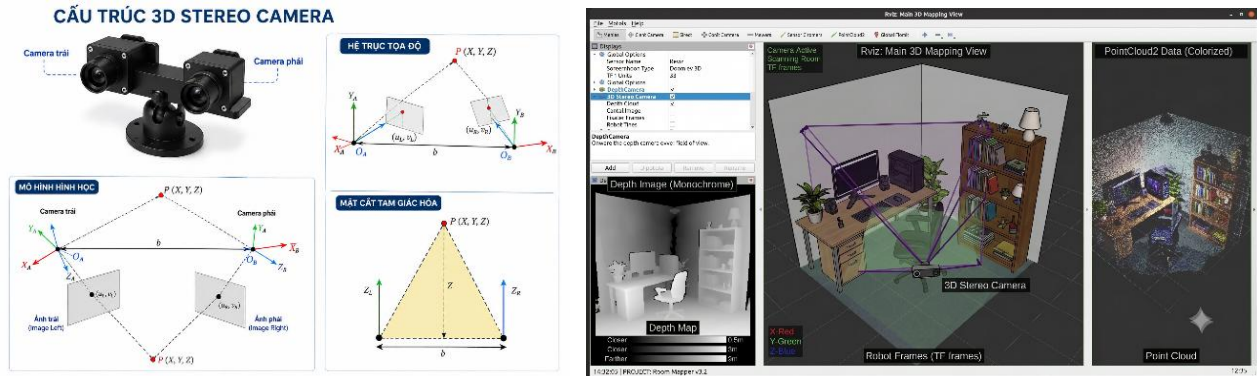
2.3. Quy trình thu nhận và thuật toán xử lý dữ liệu 3D

Camera stereo gồm hai camera được bố trí song song với khoảng cách cơ sở (baseline) cố định nhằm ghi nhận đồng thời hai ảnh của cùng một phối cảnh quan sát, hình 4. Từ cặp ảnh thu được, hệ thống tiến hành tính toán thông tin chiều sâu dựa trên sai khác vị trí của các điểm ảnh tương ứng.

Trong ROS, dữ liệu từ camera stereo được xuất bản dưới dạng các chủ đề (topics) bao gồm

ảnh RGB, ảnh chiều sâu và dữ liệu camera. Các dữ liệu này được đồng bộ theo thời gian trước khi đưa vào quá trình xử lý và xây dựng đám mây điểm.

Ảnh RGB cung cấp thông tin màu sắc của môi trường, trong khi ảnh chiều sâu phản ánh khoảng cách từ camera đến các bề mặt quan sát. Hai loại dữ liệu này là cơ sở để xây dựng mô hình không gian ba chiều của đường đi.



Hình 4. Dữ liệu ảnh RGB và ảnh chiều sâu thu nhận từ camera stereo

2.3.1. Thu nhận và đồng bộ hóa dữ liệu từ Camera Stereo

Trong môi trường mô phỏng Gazebo, camera stereo lắp đặt trên robot di động liên tục xuất bản các gói dữ liệu ảnh thô dưới dạng các chủ đề (topics) ROS bao gồm: ảnh trái /camera/left/image_raw, ảnh phải /camera/right/image_raw, và thông tin hiệu chuẩn thấu kính /camera/left/camera_info, /camera/right/camera_info. Để đảm bảo tính nhất quán của dữ liệu khi robot di chuyển, một bộ lọc đồng bộ hóa thời gian thực (message_filters::TimeSynchronizer) được thiết lập nhằm khớp chính xác thời điểm thu nhận (timestamp) của cặp ảnh trái-phải trước khi đưa vào luồng tính toán.

2.3.2. Thuật toán so khớp stereo và tính ảnh chiều sâu

Từ cặp ảnh đã được đồng bộ và hiệu chỉnh méo, thuật toán so khớp khối bán toàn cục (Semi-Global Block Matching - SGBM) được áp dụng để xác định ma trận độ lệch (disparity map). Dựa trên nguyên lý tam giác lượng, tọa độ chiều sâu của từng điểm ảnh được tính toán theo công thức:

$$Z_c = \frac{f \cdot b}{d(u, v)} \quad (1)$$

Trong đó:

- f là tiêu cự hiệu chuẩn của camera, pixel
- b là khoảng cách cơ sở giữa hai tâm thấu kính, m.
- $d(u, v)$ là giá trị độ lệch điểm ảnh tương ứng giữa ảnh trái và ảnh phải.

2.3.3. Khởi tạo đám mây điểm (Point Cloud)

Ảnh chiều sâu kết hợp với thông tin màu sắc RGB từ camera trái được chuyển đổi ngược về tọa độ không gian 3D cục bộ của camera (Camera Frame - $\{C\}$) thông qua nút (node) xử lý trung gian depth_image_proc/point_cloud_xyzrgb trong ROS:

$$X_c = \frac{(u - u_0) \cdot Z_c}{f} \quad (2)$$

$$Y_c = \frac{(v - v_0) \cdot Z_c}{f} \quad (3)$$

Trong đó (u_0, v_0) là điểm chính quang học của thấu kính, kết quả đầu ra của giai đoạn này là đám mây điểm cục bộ ${}^C P_t$ tại mỗi thời điểm t .

$${}^C P_t = \{X_c, Y_c, Z_c, R, G, B\}^T$$

với $\{R, G, B\}^T$ là thông tin về màu sắc tại điểm đang xét.



2.3.4. Thuật toán ghép nối bản đồ toàn cục (Point Cloud Registration)

Để tạo lập bản đồ 3D đường lò thống nhất, các đám mây điểm cục bộ $^C P_t$ được chuyển đổi về hệ tọa độ bản đồ toàn cục (World hoặc Global, ký hiệu $\{W\}$) dựa trên ma trận chuyển đổi động học robot $^W T_R(t)$ được cung cấp từ cây tọa độ TF của robot (/tf topic):

$$^W P_t = ^W T_R(t) \times ^R T_C \times ^C P_t \quad (4)$$

Bản đồ 3D hoàn chỉnh sau khi được ghép nối sẽ được trực quan hóa thời gian thực trên RViz.

2.4. Đánh giá hiệu năng của hệ thống

Hiệu năng tính toán của hệ thống được đánh giá định lượng thông qua hai chỉ số cốt lõi:

- Tần số khung hình (FPS): Tốc độ xuất bản dữ liệu đám mây điểm tích lũy của thuật toán (đơn vị: Hz).
- Độ trễ hệ thống (Δt): Khoảng thời gian từ khi cảm biến camera stereo thu nhận ảnh trong Gazebo cho đến khi đám mây điểm tương ứng được xử lý và hiển thị thành công trong ROS: Trong đó là mốc thời gian vật lý của

cảm biến được ghi nhận trong phần đầu tin nhắn ROS.

$$\Delta t = t_r - t_s \quad (5)$$

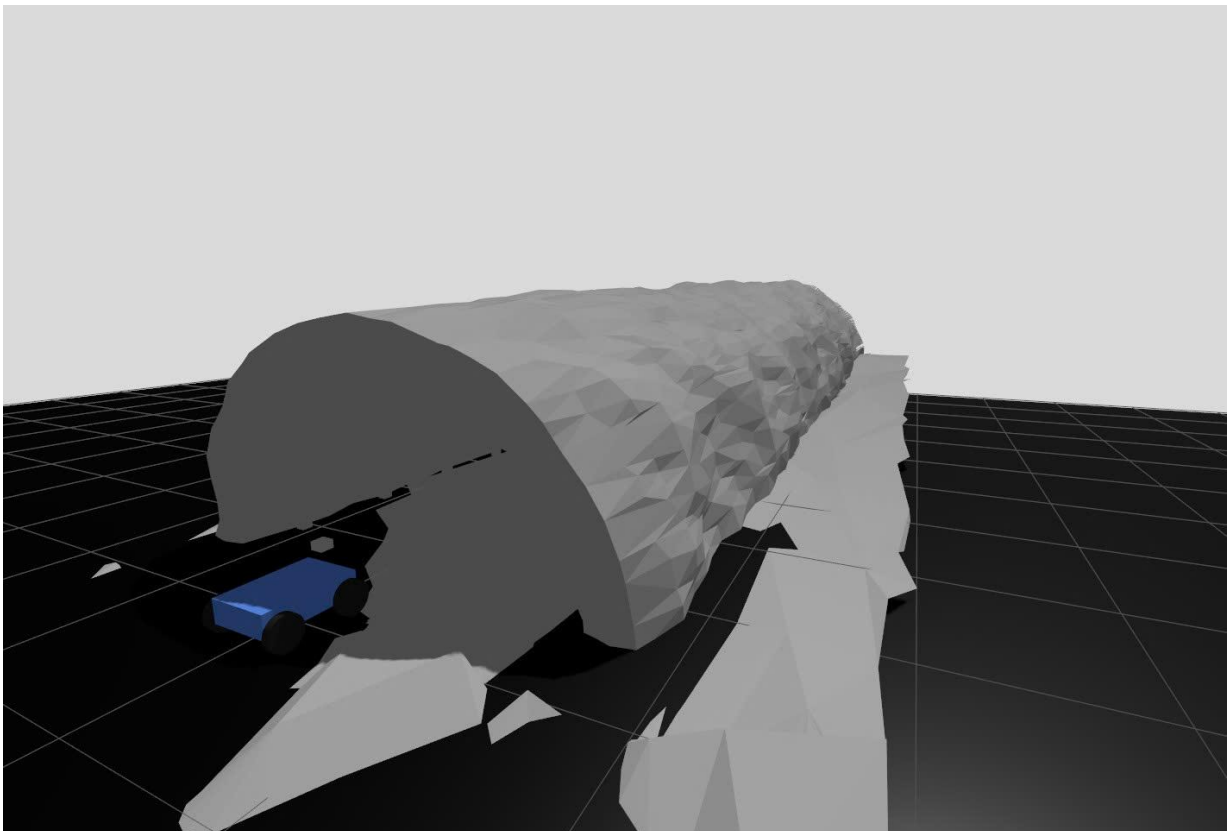
Với t_r là mốc thời gian hệ thống nhận được đám mây điểm hoàn chỉnh trên Rviz và t_s là mốc thời gian vật lý của cảm biến ghi nhận được hình ảnh thực tế của vật thể (lấy theo tin nhắn trong ROS)

Ngoài hiệu năng, tính liên tục và độ bao phủ của bản đồ được đánh giá bằng phương pháp định tính có cấu trúc. Khả năng tái tạo hình học được phân loại theo từng khu vực đặc trưng của đường lò (đoạn thẳng, đoạn cong, vùng có vật cản) để xác định các giới hạn hoạt động của thuật toán dưới tác động của hiện tượng khuất tầm nhìn và thiếu vân bề mặt.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả xây dựng môi trường mô phỏng và cấu hình hệ thống

Quá trình thử nghiệm được triển khai trong môi trường mô phỏng Gazebo với mô hình đường lò hầm lò có kích thước thực tế được thiết kế từ phần mềm NX. Robot di động bốn bánh (UGV) được đặt tại tọa độ gốc của môi trường mô phỏng để bắt đầu hành trình khảo sát.



Hình 6. Mô hình môi trường đường lò và robot UGV trong Gazebo.

Đường lò mô phỏng có dạng vòm đặc trưng của mô hầm lò với bề mặt tường đá nhám, gồ ghề góc cạnh nhằm tái hiện sát thực tế độ tương phản tĩnh học của đá hầm lò. Robot UGV (màu xanh) được cấu hình di chuyển với vận tốc tuyến tính không đổi dọc theo trục tâm đường lò để đảm bảo camera stereo thu nhận dữ liệu ảnh với tần số chống chập lớn giữa các khung hình liên tiếp.



Hình 7. Dữ liệu RGB và ảnh chiều sâu thu nhận từ camera stereo.

Hình 7 thể hiện bản đồ 3D tích lũy của đường lò thu nhận được. Kết quả trực quan hóa cho thấy hệ thống có khả năng tái tạo thành công hình học tổng thể của đường lò:

- Biên dạng vòm lò: Phần vòm cong phía trên được mô tả rõ nét thông qua các khung vòm (vì chống) đám mây điểm mật độ cao.
- Nền lò: Bề mặt bằng phẳng phía dưới robot di chuyển được tái tạo ổn định, không có hiện tượng nhiễu điểm nhờ bộ lọc nhiễu khoảng cách đã thiết lập.

Tuy nhiên, độ chính xác hình học tuyệt đối cần phải có các nghiên cứu kế tiếp để đánh giá và kiểm nghiệm.

Quan sát kỹ Hình 7, có thể thấy bản đồ đám mây điểm xuất hiện các khe hở dạng sọc chu kỳ dọc theo trục di chuyển của robot (hiện tượng phân mảnh đám mây điểm). Dưới góc độ thuật toán thị giác máy tính, hiện tượng này được giải thích do hai nguyên nhân chính:

3.2. Kết quả lập bản đồ 3D trong không gian đường lò

Dữ liệu ảnh stereo trái/phải sau khi đi qua luồng xử lý đồng bộ và tính toán độ lệch bằng thuật toán SGBM được chuyển đổi thành đám mây điểm (Point Cloud) và hiển thị trực quan trên công cụ RViz.

1. Hạn chế về tần số cập nhật dữ liệu của luồng xử lý Stereo SGBM: Thuật toán SGBM đòi hỏi tài nguyên tính toán lớn trên CPU. Khi robot di chuyển liên tục, việc tính toán ma trận độ lệch điểm ảnh bị trễ nhịp so với tốc độ dịch chuyển của robot, tạo ra các khoảng trống dữ liệu giữa các khung hình.
2. Đặc tính thiếu vãn bề mặt: Trên các mảng tường lò phẳng và đồng nhất màu sắc trong Gazebo, thuật toán so khớp stereo không tìm đủ các điểm đặc trưng tương đồng giữa ảnh trái và ảnh phải, dẫn đến việc không thể tính toán giá trị chiều sâu tại các vùng này và tạo ra các lỗ thủng hình học trên bản đồ.

Trong phạm vi nghiên cứu bước đầu này, hệ thống tập trung đánh giá hiệu năng thuật toán xử lý ảnh thời gian thực (tần số FPS và độ trễ) và trực quan hóa định tính hình học vòm lò. Việc đánh giá định lượng độ lệch hình học tuyệt đối (ví dụ: đối sánh Cloud-to-Mesh - C2M hoặc tính toán sai số bình phương trung bình gốc RMSE giữa đám mây



điểm thu được và mô hình CAD thiết kế trên NX) chưa được thực hiện chi tiết do giới hạn về mô phỏng nhiều cảm biến trong Gazebo chưa phản ánh hoàn toàn đúng nhiều quang học thực tế. Phương pháp đánh giá định lượng C2M sẽ được ưu tiên thực hiện trong pha thử nghiệm vật lý tiếp theo, nơi các thông số biến dạng quang học được phản ánh chân thực nhất.

Bảng 1. Hiệu năng tính toán của thuật toán StereoSGBM ở các độ phân giải khác nhau

Độ phân giải thử nghiệm	Số chu kỳ kiểm thử	Độ trễ xử lý trung bình Δt , ms	Độ lệch chuẩn	Tần số khung hình đạt được (FPS)
640x480 (VGA)	100	19,48	$\pm 6,4$ ms	51,34 Hz
1280x720 (HD)	50	57,92	$\pm 6,0$ ms	17,27 Hz

Kết quả thực nghiệm cho thấy sự đánh đổi rõ rệt giữa độ phân giải ảnh và tốc độ xử lý:

- Ở độ phân giải VGA (640 x 480), thuật toán hoạt động cực kỳ ổn định với tần số khung hình đạt 51,34 Hz và độ trễ chỉ 19,48 ms. Tốc độ này vượt xa yêu cầu thời gian thực tiêu chuẩn (10 Hz) đối với robot di động.
- Khi nâng lên độ phân giải HD (1280 x 720) nhằm thu được đám mây điểm chi tiết hơn, độ trễ xử lý tăng gấp 3 lần lên 57,92 ms, kéo theo tần số khung hình giảm xuống còn 17,27 Hz. Mặc dù tốc độ xử lý giảm, tần số này vẫn hoàn toàn đáp ứng tốt cho khả năng định vị và lập bản đồ thời gian thực của robot UGV khi di chuyển ở vận tốc thấp (0,2 m/s).

Mặc dù hệ thống camera stereo đã chứng minh được tính khả thi vượt trội như một giải pháp thay thế chi phí thấp cho LiDAR trong môi trường mô phỏng, nghiên cứu vẫn tồn tại một số giới hạn kỹ thuật cần được giải quyết trước khi ứng dụng vào thực tế:

1. *Hạn chế về nguồn sáng và đặc tính bề mặt đường lờ, vách đá:* Khác với LiDAR, camera stereo phụ thuộc hoàn toàn vào điều kiện chiếu sáng. Trong thực tế, hầm lò thường thiếu sáng, bề mặt vách đá có màu sắc đồng nhất và kết cấu lặp lại (textureless), khiến thuật toán SGBM dễ thất bại do khó trích xuất điểm đặc trưng. Giải pháp thiết kế cho robot thực tế là tích hợp hệ thống đèn LED ma trận công suất cao, kết hợp bộ phát tia hồng ngoại (IR projector) sẵn có trên camera stereo để chủ động tạo ra các vân đốm (pattern) nhân tạo, giúp thuật toán nội suy chiều sâu hoạt động chính xác hơn.
2. *Sai số lũy tiến (Drift Error) trong di chuyển:* Nền đường lờ thường mấp mô và nhiều bùn nước,

3.3. Đánh giá hiệu năng tính toán của thuật toán

Để đánh giá khả năng vận hành thời gian thực của hệ thống, một thử nghiệm đo đặc hiệu năng độc lập (Offline Benchmarking) đối với thuật toán khớp ảnh bán toàn cục StereoSGBM đã được thực hiện trên cấu hình máy tính thử nghiệm (Intel Core i7 – 2.4GHz, RAM 32GB). Kết quả đo đặc định lượng được thống kê chi tiết trong Bảng 1.

gây rung lắc mạnh và hiện tượng trượt, làm sai lệch dữ liệu của bộ đo khoảng cách bánh xe (Odometry), từ đó dẫn đến sai số lũy tiến khi ghép nối bản đồ. Để khắc phục, hệ thống thực tế cần sử dụng cơ cấu di chuyển bánh xích nhằm tăng độ bám đường, đồng thời tích hợp khối đo lường quán tính (IMU). Việc ứng dụng bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) để dung hợp dữ liệu IMU với Visual Odometry sẽ giúp triệt tiêu đáng kể sai số trôi.

3. *Yêu cầu về an toàn phòng nổ và chống chịu môi trường:* Môi trường mỏ hầm lò có nồng độ bụi cao, ẩm ướt và đặt ra yêu cầu cực kỳ nghiêm ngặt về an toàn phòng nổ. Do đó, trong giai đoạn chế tạo thực tế, toàn bộ mô đun camera và máy tính nhúng phải được đóng gói trong các vỏ hộp đạt tiêu chuẩn phòng nổ chuyên dụng. Ngoài ra, ống kính camera cần được bổ sung cần gạt nước tự động hoặc phủ lớp vật liệu chống bám bụi, đọng sương để đảm bảo độ trong suốt của dữ liệu hình ảnh.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thiết lập và kiểm chứng thành công quy trình lập bản đồ 3D không gian đường lờ hầm lò sử dụng camera stereo tích hợp trên robot di động (UGV) trong môi trường mô phỏng ROS và Gazebo. Hệ thống cho thấy khả năng tái tạo trực quan và chính xác biên dạng hình học vòm hầm lò và nền lò dưới dạng đám mây điểm tích lũy. Về hiệu năng tính toán, thuật toán StereoSGBM đạt tốc độ tối đa 51,34 Hz (độ trễ 19,48 ms) ở độ phân giải VGA và duy trì mức 17,27 Hz (độ trễ 57,92 ms) ở cấu hình HD, đáp ứng tốt yêu cầu xử lý thời gian thực cho robot di chuyển. Tuy nhiên, bản đồ vẫn tồn tại hiện tượng trôi sai số lũy tiến do ghép nối bằng dữ liệu hành trình thô (odometry) và xuất hiện các lỗ khuyết hình học tại vùng bề mặt nhẵn thiếu

vân bề mặt. Mặc dù giải pháp sử dụng camera stereo không thể thay thế hoàn toàn hệ thống LiDAR đắt đỏ trong các yêu cầu trắc địa có độ chính xác siêu cao, nhưng kết quả mô phỏng khẳng định đây là một phương án khả thi, chi phí thấp, đóng vai trò cung cấp dữ liệu hình học trực quan giúp robot tự hành nhận thức môi trường và định hướng an toàn trong không gian hầm lò chật hẹp. Các giới hạn về nhiều hành trình và điều kiện ánh sáng đã được định hướng giải quyết bằng các

giải pháp tích hợp phần cứng (IMU, nguồn sáng chủ động) và thuật toán SLAM trong mô hình vật lý sắp tới. Trong các nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả sẽ tích hợp thuật toán ICP hoặc hệ thống RTAB-Map SLAM để triệt tiêu sai số trôi, đồng thời tiến hành so sánh sai số định lượng tuyệt đối Cloud-to-Mesh (C2M) với mô hình thiết kế NX gốc trước khi triển khai thử nghiệm trên mô hình vật lý và thiết bị thực tế đáp ứng các tiêu chuẩn an toàn phòng nổ hầm lò.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K. Ebadi *et al.*, "Present and future of slam in extreme underground environments," *arXiv preprint arXiv:2208.01787*, 2022.
- [2] J. N. Bakambu and V. Polotski, "Autonomous system for navigation and surveying in underground mines," *Journal of Field Robotics*, vol. 24, no. 10, pp. 829-847, 2007.
- [3] F. Pomerleau, F. Colas, and R. Siegwart, "A review of point cloud registration algorithms for mobile robotics," *Foundations and trends® in Robotics*, vol. 4, no. 1, pp. 1-104, 2015.
- [4] L. C. Doan, "Robotic arm applications in underground mining: Control fundamental and collision avoidance strategies," *Mining Industry Journal*, vol. 34, no. 5, pp. 29-35, 2025.
- [5] C. Van Le, C. X. Cao, S. S. Tong, and H. Van Dinh, "Research to establish 3D model of mine industrial site area from terrestrial laser scanning and Unmanned aerial vehicle data," *Journal of Mining and Earth Sciences Vol*, vol. 63, no. 5, pp. 25-36, 2022.
- [6] N. V. Nghĩa and V. N. Dũng, "Nghiên cứu khả năng ứng dụng máy quét laser 3D mặt đất trong quản lý xây dựng-khai thác mỏ hầm lò," *Khoa học kỹ thuật Mỏ-Địa chất*, vol. 57, pp. 65-73, 2016.
- [7] N. Q. Tuấn, Đ. Q. Tuấn, and T. C. T. M. Hương, "KHOA HỌC CÔNG NGHỆ."
- [8] A. Kamran-Pishhesari, A. Moniri-Morad, and J. Sattarvand, "Applications of 3d reconstruction in virtual reality-based teleoperation: A review in the mining industry," *Technologies*, vol. 12, no. 3, p. 40, 2024.
- [9] H. Hirschmuller, "Stereo processing by semiglobal matching and mutual information," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 30, no. 2, pp. 328-341, 2008.
- [10] A. Jacobson, F. Zeng, D. Smith, N. Boswell, T. Peynot, and M. Milford, "Semi-supervised slam: Leveraging low-cost sensors on underground autonomous vehicles for position tracking," in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2018: IEEE, pp. 3970-3977.
- [11] M. Quigley *et al.*, "ROS: an open-source Robot Operating System," in *ICRA workshop on open source software*, 2009, vol. 3, no. 3.2: Kobe, Japan, p. 5.
- [12] P. J. Besl and N. D. McKay, "Method for registration of 3-D shapes," in *Sensor fusion IV: control paradigms and data structures*, 1992, vol. 1611: Spie, pp. 586-606.
- [13] M. Labbé and F. Michaud, "RTAB-Map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation," *Journal of field robotics*, vol. 36, no. 2, pp. 416-446, 2019.

SIMULATION STUDY AND PERFORMANCE EVALUATION OF 3D ROADWAY MAPPING USING A MOBILE ROBOT-INTEGRATED STEREO CAMERA

Cong Luan Doan

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

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 15/6/2026

Revised: 17/7/2026



Accepted: 24/7/2026

Corresponding author

Email: doancongluan@humg.edu.vn

ABSTRACT

Three-dimensional (3D) mapping of underground mine environments plays a vital role in mine surveying, infrastructure inspection, autonomous navigation, and operational safety. However, conventional 3D mapping systems based on laser scanners (LiDAR) provide high accuracy but are often associated with high investment costs and complex deployment in harsh underground mining conditions. This study presents a simulation-based framework for evaluating a stereo-vision system integrated into an Unmanned Ground Vehicle (UGV) for 3D roadway mapping. The simulation platform was developed using the Robot Operating System (ROS) and Gazebo, incorporating a high-fidelity tunnel model designed in NX software. Stereo image pairs captured by the navigating robot were processed using the Semi-Global Block Matching (SGBM) algorithm to compute disparity maps and generate 3D point clouds, which were then registered into a global map frame. The qualitative experimental results demonstrate that the proposed system successfully reconstructs the overall geometric characteristics of the tunnel vault and floor as accumulated point clouds. Furthermore, a standalone quantitative benchmark indicates that the StereoSGBM algorithm achieves outstanding real-time processing capabilities, comfortably satisfying the minimum real-time frequency requirements for low-speed autonomous mining robots. Finally, the study identifies current technical limitations, such as cumulative drift from raw wheel odometry and point cloud fragmentation on textureless rock surfaces, and outlines future research directions involving Iterative Closest Point (ICP) registration and RTAB-Map SLAM integration to eliminate cumulative drift.

Keywords: stereo camera, UGV, 3D mapping, SGBM algorithm, ROS, Point cloud, Gazebo simulation

@ Vietnam Mining Science and Technology Association