

LẬP BẢN ĐỒ VÀ SO SÁNH CHẤT LƯỢNG BẢN ĐỒ 2D VÀ 3D ĐƯỢC TẠO RA TỪ ROBOT DI ĐỘNG

MAPPING AND COMPARISON THE QUALITY OF 2D AND 3D MAP FROM MOBILE ROBOT

Lưu Trọng Hiếu, Nguyễn Hữu Cường*

Trường Bách khoa, Trường Đại học Cần Thơ, Việt Nam¹

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: nhcuong@ctu.edu.vn

(Nhận bài / Received: 13/6/2024; Sửa bài / Revised: 25/8/2024; Chấp nhận đăng / Accepted: 26/9/2024)

Tóm tắt - Nghiên cứu trình bày giải pháp lập bản đồ và so sánh chất lượng bản đồ 2D và 3D được tạo ra từ robot di động trong không gian kín. Một robot di động có tích hợp một máy tính nhúng và các cảm biến lidar và máy ảnh số RGBD được phát triển trong nghiên cứu này. Quá trình SLAM được tiến hành thông qua ROS2 từ đó giúp người điều khiển có thể quan sát được trạng thái hoạt động của robot. Thí nghiệm được tiến hành trên hai bản đồ riêng biệt với tính chất khác nhau bao gồm có góc khuất và không gian mở. Kết quả cho thấy, có sự khác biệt trong cả hai thí nghiệm. Nghiên cứu chỉ ra rằng, tạo bản đồ bằng lidar cho độ chính xác cao với tỉ lệ đúng đạt 97%. Trong trường hợp bản đồ 3D, nghiên cứu chỉ ra rằng, có sai biệt lớn khi robot chuyển động thẳng và chuyển động tròn với tỉ lệ chính xác lần lượt là 89% và 64%. Kết quả nghiên cứu này hỗ trợ việc sử dụng cảm biến hiệu quả hơn cho các nghiên cứu sau.

Từ khóa - SLAM robot; máy ảnh độ sâu RGBD; cảm biến lidar; bản đồ 2D và 3D; ROS2

1. Giới thiệu

Robot di động là một hệ cơ khí có khả năng tự di chuyển trong các loại môi trường và địa hình khác nhau tùy theo chức năng và nhiệm vụ của người điều khiển. Trong lĩnh vực này, bài toán tự định vị và xây dựng bản đồ (simultaneous localization and mapping - SLAM) vẫn còn thu hút nhiều nhóm tập trung nghiên cứu. Trên thế giới, xu hướng giải quyết bài toán SLAM được các nhóm đề xuất thông qua hệ điều hành ROS2 (The Robot Operating System (ROS)) [1-4]. Trong đó, các nhóm sử dụng robot di động được thương mại hóa trên thị trường như Pioneer hoặc Turtlebot, điều này không phù hợp với điều kiện kinh tế tại Việt Nam khi giá các robot di động này tương đối cao so với mặt bằng chung trong nước.

Trong nước, chủ đề robot di động vẫn hấp dẫn nhiều nhà khoa học tập trung nghiên cứu. Thật vậy, [5] giải quyết bài toán mô hình hóa bánh xe và ổn định bánh xe đa hướng [6]. Trong bài toán SLAM, mô hình hóa và định hướng cho robot sử dụng 4 bánh chủ động [9], nghiên cứu robot di động để tự động hóa trong nhà kho [10] và tự động hóa trong nhà lưới [11], đề ra chiến thuật cho robot di động có thể di chuyển toàn bộ bản đồ quan sát [12] cũng được các nhóm tác giả tập trung nghiên cứu.

Với sự phát triển của các thiết bị điện tử hiện đại, quá trình tạo bản đồ đã phát triển từ góc nhìn 2 chiều (2D) sang góc nhìn 3 chiều (3D) nhằm giúp người điều khiển có thể quan sát chi tiết và trực quan hơn. Trong lĩnh vực robot di động, những nghiên cứu tiên phong có thể bao gồm [13, 14].

Abstract - The study introduces a method for mapping and compares the quality of 2D and 3D maps created by mobile robots indoor environment. A mobile robot integrating an embedded computer, lidar sensors, and an RGBD camera was developed in this study. The SLAM process is conducted through ROS2 which helps the controller observe the robot's working status. The experiment was conducted on two separate maps with different properties including hidden corners and open spaces. The results showed that, there were differences in both experiments. The result shows that creating maps using lidar is highly accurate with an accuracy rate of 97%. In the case of 3D maps, the study shows that, there is a large difference when the robot moves in a straight line and a circular motion with an accuracy rate of 89% and 64%, respectively. The results of this study support more effective use of sensors for future research.

Key words - SLAM robot; depth camera RGBD; Lidar sensor; 2D and 3D map; ROS2

Sử dụng máy ảnh có độ sâu RGBD (bao gồm 1 cảm biến thường red-green-blue và cảm biến độ sâu depth) để dựng phục đối tượng cần quan sát đã được nghiên cứu trong nhiều năm qua. Với sự ra đời của máy ảnh số từ Intel D453i, có tích hợp thêm cảm biến góc IMU, việc dựng bản đồ 3D cho robot trở nên khả thi hơn rất nhiều. Tuy nhiên, độ chính xác của bản đồ sau khi được dựng vẫn cần được xem xét cẩn thận. Nghiên cứu này trình bày giải pháp xây dựng một SLAM robot có thể tạo bản đồ 2D và 3D dựa trên hai thiết bị bao gồm cảm biến Lidar (light detection and ranging) và máy ảnh số D453i. Robot di động được thiết kế dạng vi sai gồm 2 bánh chủ động và một bánh đa hướng giúp robot có thể di chuyển linh hoạt trong môi trường trong nhà. Robot được điều khiển thông qua một máy tính nhúng LattepanadaV3 có thể thực hiện điều khiển chuyển động, tạo bản đồ 2D từ Lidar và tạo bản đồ 3D từ máy ảnh độ sâu. Để đánh giá độ chính xác và chất lượng của bản đồ tạo ra, hai thí nghiệm được tiến hành với hai tính chất khác nhau bao gồm vùng có chướng ngại vật và vùng trống. Sau khi kết thúc quá trình SLAM tạo bản đồ, độ chính xác của bản đồ được tạo từ cảm biến được đánh giá.

2. Phương pháp

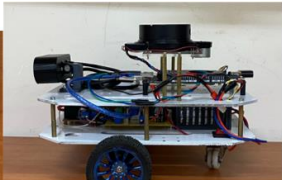
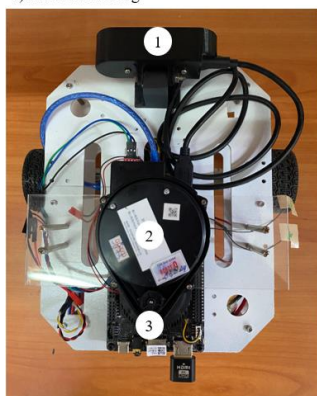
2.1. Thiết kế phần cứng

Robot trong nghiên cứu này được thiết kế dựa theo mô hình điều khiển vi sai với hai bánh được điều khiển bởi hai động cơ riêng biệt cùng một bánh lái phụ (Hình 1). Do đó,

¹ College of Engineering, Can Tho University, Vietnam (Trong Hieu Luu, Huu Cuong Nguyen)

robot có thể thay đổi hướng nhờ việc thay đổi tốc độ của hai động cơ, có thể di chuyển linh hoạt đa hướng và bán kính xoay bằng không. Đây là một ưu điểm lớn của truyền động bằng hệ vi sai trong robot di động.

a) Hình chiếu đứng

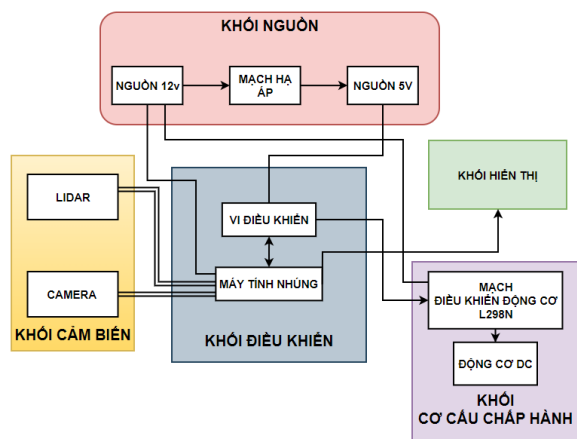


b) Hình chiếu bằng



c) Hình chiếu cạnh

Hình 1. Robot di động sử dụng trong nghiên cứu bao gồm (1) máy ảnh Intel D453i, (2) Lidar-006, (3) máy tính nhúng lattepanda



Hình 2. Sơ đồ tổng quát của hệ thống

Sơ đồ tổng quát của hệ thống được trình bày tại Hình 2. Robot sử dụng khối pin lipo 3S 12V và mạch hạ áp L2596 để tạo nguồn nuôi nguồn và động cơ. Trọng tâm của robot là khối điều khiển bao gồm một vi điều khiển Arduino nano được kết nối với máy tính nhúng Lattepada. Vi điều khiển có chức năng điều khiển khối cơ cấu chấp hành thông qua mạch lái L298. Trong khi đó, máy tính nhúng thu nhận tín hiệu môi trường từ hệ cảm biến bao gồm lidar và camera 3D.

Sau khi lắp đặt hoàn chỉnh, thông số kỹ thuật của robot sau khi được thiết kế và lắp đặt được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của robot

Đặc điểm	Đơn vị đo
Kích thước	250x200x100 (mm)
Khối lượng	3,2 (kg)
Nguồn	12 (V)
Thời gian hoạt động	2 tiếng
Vận tốc	0,5 (m/s)

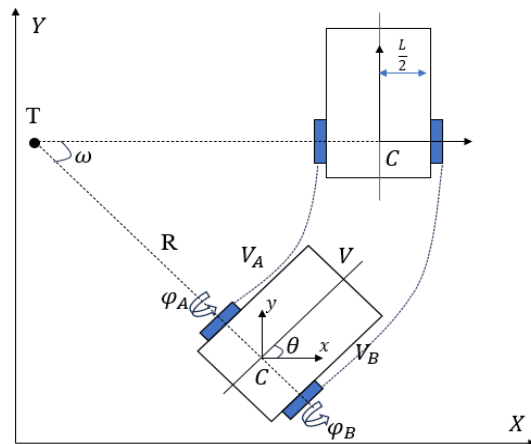
2.2. Mô hình động học của robot truyền động vi sai

Mô hình động học của robot di động sử dụng hệ vi sai được trình bày tại Hình 3.

Hình 3 miêu tả mô hình động học của robot hai bánh hệ vi sai trong hệ tọa độ quán tính (X, Y) . Giả sử robot đang ở vị trí (x, y) với hướng trong hệ tọa độ quán tính là θ . Gọi T là tâm quay tức thời của robot trong hệ tọa độ quán tính, ta miêu tả được tư thế của robot trong không gian $(x, y, \theta)^T$. Như vậy, tâm quay tức thời và vận tốc của robot theo thời gian được miêu tả như sau:

$$T = (x - R \sin \theta, y + \cos \theta) \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = R_z(\theta) \begin{bmatrix} V \\ 0 \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ 0 \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$



Hình 3. Mô hình động học của robot sử dụng hệ vi sai

Trong truyền động vi sai, robot có 2 bánh được điều khiển độc lập bằng cách điều khiển tốc độ quay của từng bánh. Với V, ω lần lượt là vận tốc dài và vận tốc góc của robot. Gọi vận tốc góc của bánh xe trái (A) và phải (B) lần lượt là $\dot{\varphi}_A, \dot{\varphi}_B$ và vận tốc dài của bánh xe trái và phải lần lượt là V_A, V_B . Mối liên hệ giữa vận tốc và tâm quay tức thời được miêu tả qua phương trình sau:

$$V_A = \omega(R - L/2) \quad (3)$$

$$V_B = \omega(R + L/2) \quad (4)$$

Giả sử bán kính của hai bánh xe r là như nhau, khi đó, mối liên hệ giữa vận tốc góc và vận tốc dài của các bánh xe với vận tốc chung của robot được miêu tả theo phương trình sau:

$$V = \frac{V_A + V_B}{2} = \frac{r\dot{\varphi}_A + r\dot{\varphi}_B}{2} \quad (5)$$

$$\omega = \frac{r\dot{\varphi}_A - r\dot{\varphi}_B}{L} \quad (6)$$

2.3. Quá trình SLAM bản đồ 2D và 3D

Khi robot bắt đầu quá trình SLAM, máy tính nhận lệnh điều khiển dưới dạng gói tin msg từ người điều khiển. Tín hiệu phản hồi từ vi điều khiển là dữ liệu encoder, robot tính toán vị trí và vận tốc của mình trong không gian. Để trực quan hóa vị trí của robot, nhóm tác giả sử dụng rqt_graph. Đây là một plugin GUI cho phép người điều khiển có thể thấy tất cả các nút đang chạy cũng như giao tiếp với từng nút cụ thể, từ đó có thể can thiệp điều khiển robot khi cần thiết.

2.3.1. Tạo bản đồ 2D

Quá trình tạo bản đồ 2D từ lidar được trình bày tại Hình 4. Nhóm tác giả đã sử dụng kỹ thuật tạo bản đồ dựa trên [7] do Steve Macenski và Ivona Jambrecic đề xuất. Phương

pháp này trình bày giải pháp máy ảnh và lỗ kim (pinhole model) dưới dạng thuật toán đồng thuận ngẫu nhiên (Random sample consensus - RANSAC) khi miêu tả xác suất vị trí một điểm trong không gian ba chiều lên mặt phẳng chiếu của nó. Phương pháp này có thể được tóm gọn lại như sau:

- Chọn ngẫu nhiên một tập dữ liệu từ lidar $\{x_i\} \subset X$ (7)

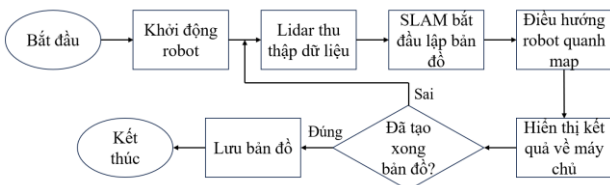
• Ước lượng mô hình tuyến tính $\theta = (m, b)$ với m là độ dốc và b là hệ số góc

- Tính toán sai số của mô hình $e_i = \text{distance}(x_i, \theta)$
 $e_i = \text{distance}(x_i, \theta)$ (8)

- Xác định điểm phù hợp $\text{Inliers} = \{x_i \in X | e_i < \epsilon\}$.
 $\text{Inliers} = \{x_i \in X | e_i < \epsilon\}$. (9)

• Quá trình tìm điểm phù hợp được lặp lại cho đến khi tìm được giá trị Inliers tốt nhất là tham số cuối cùng của mô hình.

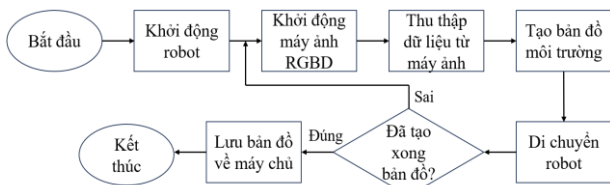
$$\theta^* = \text{argmax} |\text{Inliers}(\theta)| \quad (10)$$



Hình 4. Quá trình tạo bản đồ 2D bằng Lidar

Dựa trên tham số này, bản đồ số 2D có tham số tối ưu nhất được tạo ra. Kỹ thuật SLAM này cho phép người sử dụng có thể tích hợp các nghiên cứu sâu hơn sau khi tiến hành quét bản đồ như định vị (navigation), ra quyết định dựa trên cây hành vi (behavior tree). Trong kỹ thuật này, lidar sẽ thu thập dữ liệu đám mây điểm mô tả môi trường xung quanh. Dữ liệu này sẽ được sử dụng kết hợp với SLAM_toolbox để thực hiện quá trình định vị và xây dựng bản đồ. Robot sẽ được điều hướng quanh môi trường thông qua điều khiển từ bàn phím, để quét bản đồ. Kết quả của quá trình quét sẽ được hiển thị trên máy tính để người điều hướng có thể quan sát. Khi bản đồ được quét hoàn thành sẽ tiến hành lưu lại và robot có thể tự động điều hướng trong bản đồ đã quét. Quá trình quét sẽ diễn ra liên tục cho đến khi bản đồ được tạo hoàn chỉnh.

3.2.3. Tạo bản đồ 3D



Hình 5. Quá trình tạo bản đồ 3D bằng máy ảnh D435i

Quá trình tạo bản đồ bằng máy ảnh 3D được trình bày tại Hình 5. Nhóm nghiên cứu sử dụng kỹ thuật tạo bản đồ 3D bằng kỹ thuật tái định vị biến chiếu sáng trong môi trường trong nhà [8]. Đây là kỹ thuật mới để tạo bản đồ hình ảnh ba chiều, phù hợp với thiết bị máy ảnh RGBD đi kèm do cảm biến hồng ngoại vẫn có thể hoạt động tốt trong trường hợp thiếu sáng. Máy tính nhúng khởi động robot và chạy các gói điều khiển robot, camera và RTAB-Map. Máy

ảnh sẽ thu thập dữ liệu hình ảnh, độ sâu môi trường xung quanh và góc quay, gia tốc của robot. Dữ liệu này sẽ được RTAB-Map kết hợp để thực hiện quá trình định vị và xây dựng bản đồ. Robot sẽ được điều khiển quanh môi trường thông qua điều khiển từ bàn phím, để quét bản đồ. Kết quả của quá trình quét sẽ được hiển thị trên máy tính để người điều hướng có thể quan sát. Khi bản đồ được quét hoàn toàn sẽ tiến hành lưu lại. Quá trình quét sẽ diễn ra liên tục cho đến khi bản đồ được tạo hoàn chỉnh.

Để xây dựng bản đồ 3D, nhóm đã sử dụng giải thuật RTAB-Map, theo phương pháp này bao gồm các bước sau đây [15]:

- Cập nhật vị trí chuyển động của robot thông qua ma trận quay liên tiếp

$$T_t^0 = T_1^0 T_2^1 \dots T_t^{t-1} \quad (11)$$

Trong đó, T_t^0 là ma trận quay biểu diễn tư thế của robot từ vị trí cuối so với vị trí ban đầu theo thời gian t .

- Phương trình xác suất bản đồ likelihood nhằm tính toán xác suất một điểm trong môi trường thuộc về nhóm hoặc khu vực quan sát nào

$$P_{(\text{quansat}|\text{mohinh})} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (12)$$

- Bộ lọc Kalman để khử nhiễu mô trường và dự đoán trạng thái vị trí và hướng của robot

$$x_t = F_{t-1}x_{t-1} + B_{t-1}u_{t-1} + w_{t-1} \quad (13)$$

$$z_k = H_t x_t + v_t$$

Trong đó,

- x_t là ma trận trạng thái ở thời điểm t ,
- F_{t-1} là ma trận biến đổi thuần nhất tại $t-1$,
- B_{t-1} là ma trận kiểm soát (điều khiển),
- H_t là ma trận quan sát và v_t là sai số đo lường,
- v_t là sai số đo lường.

Các phương trình này được lặp lại cho đến khi robot di động hoàn thành quá trình tạo bản đồ, từ đó người điều khiển có thể dễ dàng quan sát quá trình tạo bản đồ của robot từ máy tính điều khiển.

3. Kết quả

3.1. Xây dựng bản đồ 2D và 3D

Thí nghiệm được tiến hành tại phòng thí nghiệm hệ thống thông minh, Trường Đại học Cần Thơ. Mê cung được tạo bằng bia cứng có kích thước 3,3m x 2,3m. Để đánh giá trực quan, nhóm tiến hành tạo 2 mê cung khác nhau với 2 đặc điểm: có che khuất và không gian mở.

3.1.1. Trường hợp bản đồ có che khuất

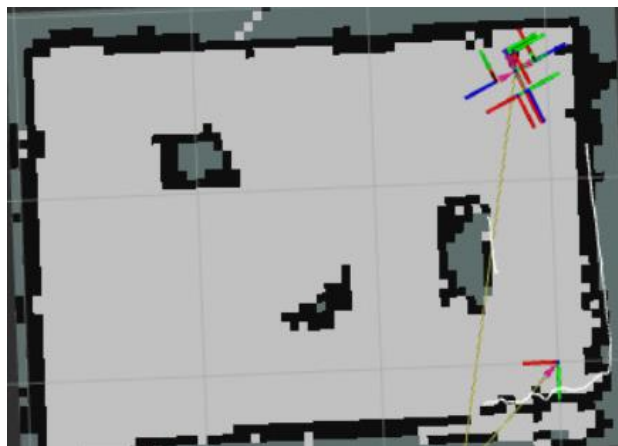
Mê cung cho trường hợp 1 được miêu tả tại Hình 6a. Mê cung có nhiều góc che khuất với các chướng ngại vật bị che khuất. Quá trình SLAM diễn ra trong hơn 15 phút do bản đồ có nhiều góc cạnh, robot di chuyển chậm để quá trình SLAM 2D và SLAM 3D được diễn ra chính xác. Kết quả cho thấy robot có thể tạo được cả 2 bản đồ 2D (Hình 6b) và 3D (Hình 6c). Bản đồ 3D cũng cho thấy, quá trình di chuyển của robot trong suốt quá trình tạo bản đồ. Trong trường hợp này, chúng ta có thể trực quan hóa được hình dạng của bản đồ trên máy tính điều khiển.



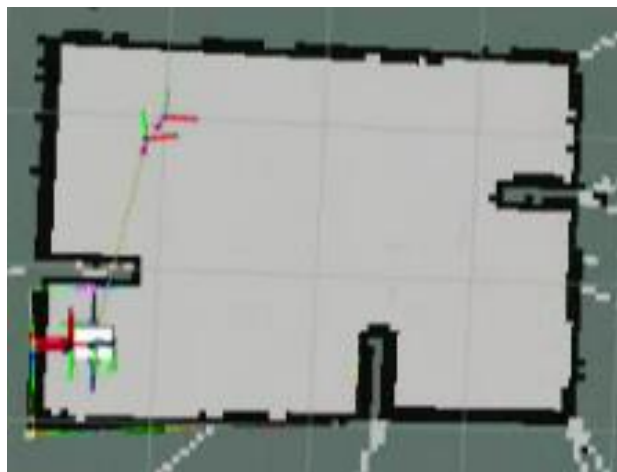
a) Bản đồ cho thí nghiệm 1



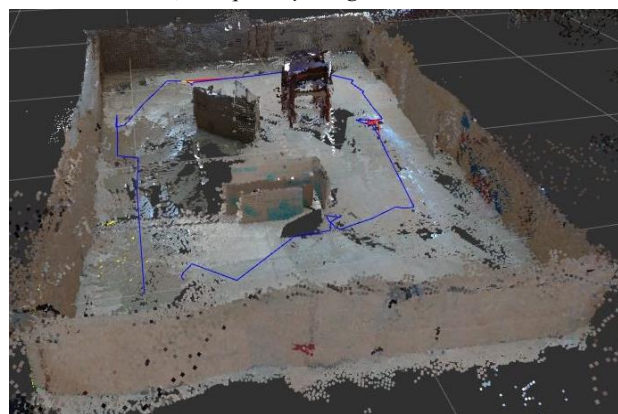
a) Bản đồ cho thí nghiệm 02



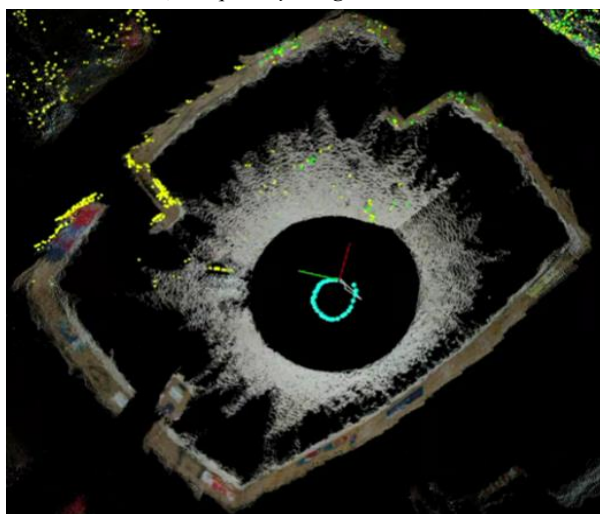
b) Kết quả xây dựng bản đồ 2D



b) kết quả xây dựng bản đồ 2D



c) Kết quả xây dựng bản đồ 3D



c) kết quả xây dựng bản đồ 3D

Hình 6. Thí nghiệm tạo bản đồ 1.

3.1.2. Trường hợp bản đồ trống

Thí nghiệm 2 được bố trí như Hình 7a. Theo đó bản đồ là một vùng trống, robot không tốn nhiều thời gian để di chuyển và xây dựng bản đồ. Kết quả cho thấy robot thành công tạo ra bản đồ 2D (Hình 7b), tuy nhiên trong bản đồ 3D (Hình 7c), bản đồ có độ méo tương đối cao. Bên cạnh đó, vùng gần robot cũng không quan sát được. Nguyên nhân chính cho vấn đề này là trong bản đồ này, robot tiến hành chuyển động quay, nên quá trình dựng ảnh 3D từ đám mây ảnh (point cloud) trong chuyển động tròn cho kết quả kém, từ đó ta có kết quả kém trong quá trình dựng ảnh 3D tại môi trường hờ.

Hình 7. Thí nghiệm tạo bản đồ 2.

3.2. Đánh giá độ chính xác bản đồ 2D và 3D

Để đánh giá độ chính xác bản đồ được tạo, sau khi kết thúc quá trình SLAM, các tệp dữ liệu định dạng *.pgm và *.yaml được nhóm khởi nhằm lưu thông tin chiều dài rộng của bản đồ. Với độ phân giải 0,05pixel/m thực tế, nhóm có thể đo đạc được kích thước của mê cung, từ đó đánh giá độ chính xác của vùng quan sát. Độ chính xác được thể hiện tại Bảng 2.

Bảng 2. So sánh kết quả tạo bản đồ

	Lidar	Máy ảnh RGB-D
Thí nghiệm 01	3,2m × 2,25m	2,9m × 2,05m
Độ chính xác	97% × 98%	88% × 89%
Thí nghiệm 02	3,2m × 2,2m	2,2m × 1,6m
Độ chính xác	97% × 97%	67% × 64%

Kết quả cho thấy, bản đồ tạo từ Lidar cho độ chính xác cao với sai số tầm 3% trong cả 2 thí nghiệm. Trong khi đó máy ảnh độ sâu RGBD cho kết quả khác biệt nhiều trong 2 thí nghiệm, cụ thể sai số tầm 12% cho thí nghiệm 1 và 26% cho thí nghiệm 2. Từ đó cho thấy, quá trình tạo bản đồ khi robot chuyển động tròn cho sai số lớn (thí nghiệm 2) so với khi robot chuyển động thẳng (thí nghiệm 1).

3.3. So sánh với các nghiên cứu khác

Nhóm tác giả [8] trình bày giải pháp tự động hóa và tránh vật cản trong nhà kho dựa trên xác suất va chạm. Nghiên cứu chỉ ra vùng an toàn dựa trên xác suất từ đó tạo quỹ đạo cho robot di chuyển. Tuy nhiên, do không có cảm biến để cảm nhận về môi trường, lỗi vận hành cho robot vẫn có thể xảy ra. Nhóm tác giả [9] trình bày giải pháp điều khiển SLAM robot 4 bánh chủ động dựa trên hệ điều hành ROS2 với tín hiệu từ lidar. Mặc dù, nghiên cứu này đã thành công tạo dựng bản đồ trong môi trường chưa biết trước, trực quan hóa vùng quan sát xung quanh vẫn là giới hạn của nghiên cứu. Thêm vào đó, nhóm tác giả [10] mô phỏng chuyển động của robot di động khi tuần tra trong nhà kín sử dụng Lidar trên hệ điều hành ROS2. Nghiên cứu chỉ xây dựng giải pháp cục bộ cho bản đồ 2D sử dụng hàm Gmapping và vẫn chưa ứng dụng vào mô hình thực. Bên cạnh đó, nhóm [11] đề xuất giải pháp và chiến thuật di chuyển cho robot lau nhà có thể di chuyển hết các vị trí trong bản đồ. Nghiên cứu cho thấy, robot có thể di chuyển gần hết vùng bản đồ cục bộ với tỉ lệ 86%. Khác với những nghiên cứu trên, nhóm đề xuất giải pháp trực quan hóa hình ảnh vùng quan sát bằng máy ảnh số RGBD, để từ đó hỗ trợ người điều khiển có cái nhìn tốt hơn về bản đồ kín chưa biết trước. Nghiên cứu chỉ ra rằng, mặc dù robot có thể hoàn thành quá trình SLAM thành công khi tạo ra được các bản đồ 2D và 3D, độ chính xác của bản đồ 3D vẫn còn thấp, đặc biệt trong trường hợp môi trường mở. Từ đó, nhóm đề xuất chỉ nên sử dụng cảm biến lidar để tạo bản đồ. Nhóm cũng đề xuất sử dụng máy ảnh RGBD cho các điều kiện môi trường hơi thiếu sáng như tuần tra phòng nhà kho trong điều kiện tối, phát hiện người đột nhập hoặc đếm số lượng hàng trong kho.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã thiết kế thành công robot di động dựa trên thuật toán SLAM để xây dựng bản đồ 2D và 3D phục vụ nghiên cứu trong phòng thí nghiệm. Kết quả nghiên cứu cho thấy, bản đồ 2D cảm biến Lidar cho độ chính xác cao với tỉ lệ 97% cho cả khi chuyển động tròn và thẳng khi bản đồ có vùng khuất hoặc dạng bản đồ mở. Trong khi đó, tạo bản đồ bằng máy ảnh RGB-D chỉ cho kết quả tốt khi sử dụng trong trường hợp robot chuyển động thẳng; trường hợp khi robot chuyển động tròn khi bản đồ mở, tỉ lệ chính xác của bản đồ chỉ đạt 66%. Nghiên cứu chỉ

ra rằng, máy ảnh RGBD có thể hỗ trợ 1 phần để trực quan hóa vùng quan sát, và hệ đa cảm biến cho robot di động trong bài toán SLAM là rất cần thiết.

Lời cảm ơn: Nhóm nghiên cứu cảm ơn 2 sinh viên Nguyễn Dương Linh và Hồng Thuận Phát ngành kỹ thuật cơ điện tử K45 đã tham gia gia công chế tạo robot trong nghiên cứu này.

Nghiên cứu này được tài trợ bởi trường Đại học Cần Thơ, mã số T2023-112.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] I. Z. Ibragimov and I. M. Afanasyev, "Comparison of ROS-based visual SLAM methods in homogeneous indoor environment", *14th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC)*, 2017, pp. 1-6.
- [2] Y. Abdelrasoul, A. B. S. H. Saman, and P. Sebastian, "A quantitative study of tuning ROS gmapping parameters and their effect on performing indoor 2D SLAM", *2nd IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation (ROMA)*, 2016, pp. 1-6.
- [3] S. Park and G. Lee, "Mapping and localization of cooperative robots by ROS and SLAM in unknown working area", *56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, 2017, pp. 858-861.
- [4] M. Rojas-Fernández, D. Mújica-Vargas, M. Matuz-Cruz, and D. López-Borreguero, "Performance comparison of 2D SLAM techniques available in ROS using a differential drive robot", *International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP)*, 2018, pp. 50-58.
- [5] T.V. Nguyen, C. T. Pham, and T. M. Pham, "Modelling and Controlling a Non-holonomic Wheeled Mobile Robot with Lateral Slip", *Viet Nam science journal*, Vol 4, no 1, pp. 1-6, 2015.
- [6] N. C. Tran and T. T. V. Nguyen, "Control stability multi-directional mobile robot" (in Vietnamese), *The 22st National Conference on Electronics, Communications and Information Technology (REV-ECIT 2019)*, Hanoi, 2019, pp. 144-149.
- [7] S. Macenski and I. Jambrecic, "SLAM toolbox: SLAM for the dynamic world", *The Journal of open source software*, Vol 6, no 61, 2021.
- [8] M. Labbé and F. Michaud, "Multi-Session Visual SLAM for Illumination-Invariant Re-Localization in Indoor Environments", in *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 9, 2022.
- [9] T. H. Luu, C. T. Vo, N. M. N. Trinh, and K. N. Nguyen, "Design ros-based slam mobile robot four wheels drive", *Thai Nguyen journal of science and technology*, vol. 227, no. 011, pp. 42-49, 2022.
- [10] Nong. M. N, Do. N. T, Vu. V. Q, and Ngo. N. V, "A method of obstacle avoidance for amr robot in warehouse automation", *Thai Nguyen journal of science and technology*, vol. 228, no. 02, pp. 62-69, 2022.
- [11] T. L. H. Pham and T. D. Nguyen, "Constructing local orbit for self-operating robot in agricultural green house based on ros", *Vietnam journal of agricultural science*, vol. 21, no. 10, pp. 1282-1293, 2023.
- [12] T. M. Thi and T. H. Nguyen, "The development of mapping, covering and control strategies for a vaccum cleaner robot", *JST: smart systems and devices*, vol. 31, no. 1, pp. 059-067, 2021.
- [13] J. Wang, B. Tao, Z. Gong, W. Yu, and Z. Yin, "A Mobile Robotic 3-D Measurement Method Based on Point Clouds Alignment for Large-Scale Complex Surfaces", in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-11, 2021.
- [14] S. Jiang, S. Wang, S. Wang, Z. Yi, M. Zhang, and Xi. Lv, "Autonomous navigation system of greenhouse mobile robot based on 3D lidar and 2D lidar Slam". *Journal of Front. Plant Sci.*, Vol 13, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.815218>
- [15] 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". *J Field Robotics*. Vol. 36, no. 2, pp. 416-446, 2019. <https://doi.org/10.1002/rob.21831>