



2D Image Recognition Data and Encoders Fusion by Extended Kalman Filter to Improve Positioning Accuracy for Differential Drive Mobile Robot

Ly Trịnh Thị Khánh, Sáng Đặng Văn, Phong Lưu Thành,
Hà Trịnh Thanh and Thái Nguyễn Hồng

EasyChair preprints are intended for rapid
dissemination of research results and are
integrated with the rest of EasyChair.

May 3, 2024

Kết hợp dữ liệu nhận dạng ảnh 2D và bộ mã hoá bằng bộ lọc Kalman mở rộng nhằm nâng cao độ chính xác định vị cho rô bốt tự hành vi sai

Trịnh Thị Khánh Ly¹, Đặng Văn Sáng², Lưu Thành Phong²
Trịnh Thanh Hà², Nguyễn Hồng Thái^{2*}

¹*Khoa Điều khiển và Tự động hóa, trường Đại học Điện lực*

²*Khoa Cơ điện tử, trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội*

*Email: thai.nguyenhong@hust.edu.vn

Tóm tắt: Bài báo đề xuất phương pháp kết hợp dữ liệu nhận dạng ảnh 2D và bộ mã hoá tốc độ của bánh dẫn động nhằm cải thiện độ chính xác định vị và mượt chuyển động của rô bốt tự hành vi sai (RTVS). Đầu tiên, phương pháp định vị vị trí của RTVS bằng dữ liệu bộ mã hoá vận tốc ở các bánh xe dẫn động thông qua phương trình động học và dữ liệu nhận dạng ảnh 2D thông qua các mốc định vị được mã hóa gắn phía trên trần nhà. Tiếp theo là thuật toán kết hợp dữ liệu nhận dạng ảnh và bộ mã hoá chuyển động bánh xe bằng bộ lọc Kalman mở rộng. Để xác minh tính hiệu quả của phương pháp được đề xuất, thuật toán kết hợp dữ liệu đã được cài đặt lên một RTVS với ba kịch bản thí nghiệm. Kết quả thực nghiệm cho thấy sai số định vị khi sử dụng phương pháp đề xuất không vượt quá 0,032 (m) và giảm 60% so với sử dụng dữ liệu nhận dạng ảnh để định vị.

Từ khóa: RTVS, nhận dạng ảnh 2D, bộ mã hoá, định vị, bộ lọc Kalman mở rộng.

1. Đặt vấn đề

Ngày nay rô bốt đang nổi lên như một công cụ hỗ trợ kỹ thuật quan trọng cho quá trình chuyển đổi số các ngành công nghiệp và dịch vụ truyền thống [1, 2]. Đặc biệt, các rô bốt tự hành (RTH) di chuyển bằng bánh xe đã và đang được nghiên cứu phát triển vào các ứng dụng khác nhau như: Canh tác nông nghiệp [3]; Hậu cần vận chuyển vật liệu trong các dây chuyền sản xuất công nghiệp [4-6]; Rô bốt khoan lỗ nổ mìn trong thi công các đường hầm [7], v.v.. Tuy nhiên, để các RTH có thể chuyển động bám quỹ đạo và di chuyển hoàn toàn tự động thì vấn đề định vị luôn là một bài toán quan trọng, bởi đây là dữ liệu phản hồi vị trí của RTH trong môi trường về bộ điều khiển để bộ điều khiển ra quyết định hiệu chỉnh, điều khiển cho RTH bám theo quỹ đạo mong muốn. Theo Borenstein [8] để định vị RTH trong môi trường chuyển động hiện tại có hai giải pháp phổ biến đó là sử dụng phép đo lường tương đối và đo lường tuyệt đối hoặc kết hợp hai phương pháp này. Trong đó các cảm biến dùng trong đo lường tuyệt đối thường được dùng để xác định thông tin trong hệ quy chiếu toàn cục, còn các cảm biến dùng trong đo lường tương đối cung cấp thông tin môi trường trong hệ quy chiếu của RTH. Các loại cảm biến dùng trong đo lường tuyệt đối phổ biến thường dùng có thể kể đến như: bằng tia hồng ngoại [9], bằng cảm biến siêu âm [10], nhận dạng tần số vô tuyến RFID [11, 12] hay máy quét laser [13] v.v.. các loại cảm biến này thường bị nhiễu bởi môi trường bên ngoài, chẳng hạn như hiện tượng Non-line-of-sight (NLOS), trễ tín hiệu, hấp thụ tín hiệu của môi trường dẫn đến sai lệch về mặt tính toán, đo lường. Khi sử dụng các loại cảm biến đo lường tương đối vị trí định vị tức thời luôn được ước lượng từ vị trí trước đó và các chuyển vị đo được so với vị trí trước đó. Điều đó dẫn đến có sự tích lũy các sai số khác nhau như: sai số đo lường, sai lệch vị trí, nhiễu từ môi trường v.v. thường xuất hiện làm gây ra sai số của RTH khi chuyển động. Do đó, để định vị RTH người ta thường kết hợp phép đo tương đối và tuyệt đối với các loại cảm biến khác nhau như: sử dụng dữ liệu cảm biến IMU kết hợp với bộ mã hóa tốc độ bánh xe [14], hay sử dụng dữ liệu cảm biến IMU kết hợp với máy quét Lidar 3D [15] v.v.. Ưu điểm của phương pháp này là hiệu chỉnh lẫn nhau giữa dữ liệu toàn cục và cục bộ nhằm cải thiện độ chính xác định vị cho RTH. Để định vị cho RTH trong nghiên cứu này chúng tôi sử dụng phép đo tuyệt đối dựa trên dữ liệu nhận dạng ảnh 2D kết hợp với phép đo tương đối dựa trên bộ mã hóa của các bánh xe dẫn động vi sai của rô bốt tự hành vi sai (RTVS). Điểm khác biệt của nó so với các nghiên cứu trước đây là các mốc định vị (MĐV) được bố trí trên trần nhà và chỉ cần nhận dạng

ảnh 2D nên cấu trúc phần cứng đòi hỏi không cao. Điều đó sẽ làm giảm giá thành cho các RTH mà vẫn đáp ứng được yêu cầu của thực tiễn.

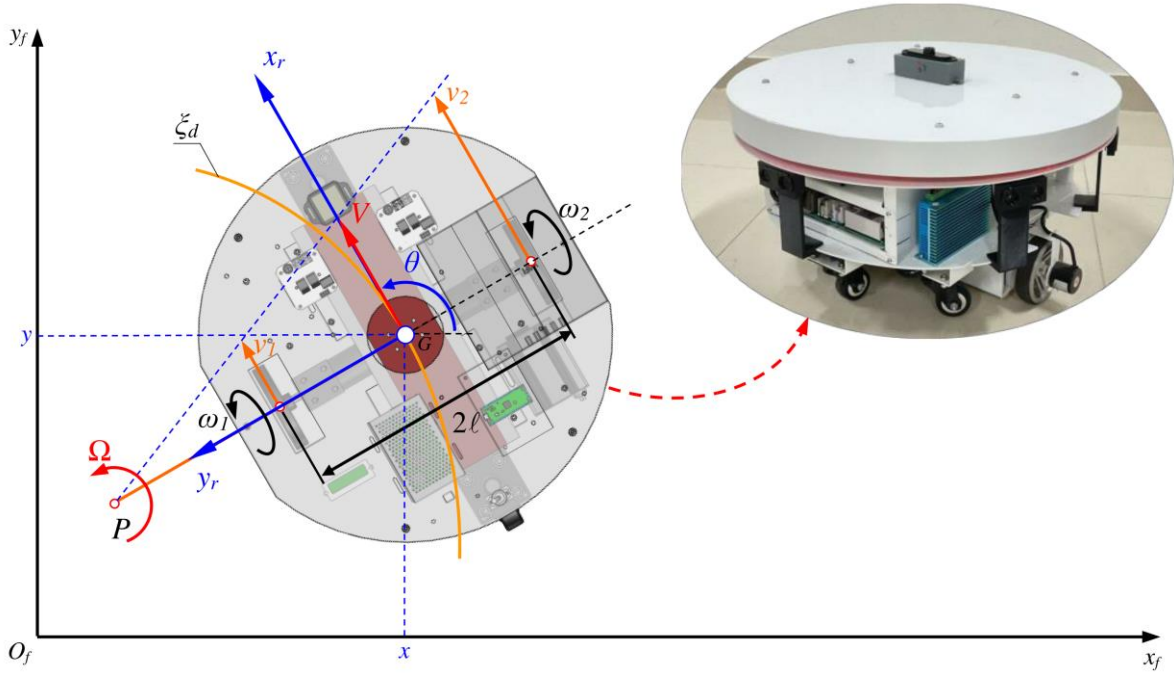
Cấu trúc còn lại của bài viết được cấu trúc theo các phần sau. Đầu tiên, phương pháp định vị bằng bộ mã hóa ở các bánh xe dẫn động vi sai và dữ liệu nhận dạng ảnh 2D được trình bày. Thứ hai, trình bày thuật toán Kalman mở rộng để hợp dữ liệu nhận dạng ảnh và dữ liệu từ bộ mã hóa. Thứ ba, thực nghiệm để **xác minh** tính khả thi của thuật toán được đề xuất và thảo luận đánh giá. Cuối cùng là tóm tắt các kết quả của nghiên cứu và định hướng nghiên cứu trong tương lai.

2. Phương pháp định vị cho RTVS

2.1. Định vị RTVS bằng dữ từ bộ mã hóa vận tốc hai bánh xe dẫn động

Xét một RTVS di chuyển theo quỹ đạo ζ_d với giả thiết bánh xe lăn không trượt và không có trượt ngang trong môi trường chuyển động gắn với hệ quy chiếu cố định $\mathcal{G}_f \{O_f x_f y_f z_f\}$ như mô tả trong Hình 1. Với các quy ước như trên Hình 1, ta có mối quan hệ giữa vận tốc (V_G, Ω) của RTVS với vận tốc góc (v_1, v_2) của hai bánh xe dẫn động được cho bởi [16-18]:

$$\begin{cases} V_G = \frac{v_2 + v_1}{2} = r \left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2} \right) \\ \Omega = \frac{v_2 - v_1}{2\ell} = r \left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2\ell} \right) \end{cases} \quad (1)$$



Hình 1. Mối quan hệ động học của RTVS trong môi trường chuyển động

trong đó r , ℓ lần lượt là bán kính bánh xe và khoảng cách giữa tâm hình học tới bánh xe vi sai, V_G và $\Omega = \dot{\theta}$ là vận tốc và vận tốc góc của RTVS với $v_1 = r\omega_1$ và $v_2 = r\omega_2$ lần lượt là vận tốc góc của hai bánh xe dẫn động vi sai, còn θ là góc định hướng của RTVS.

Như vậy mô hình động của học RTVS trong $\mathcal{G}_f$ được cho bởi:

$$\dot{\mathbf{q}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) & \dot{y}(t) & \dot{\theta}(t) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \cos \theta(t) & \sin \theta(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} V_G(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Xét véc tơ trạng thái $\mathbf{s} = [x \ y \ \theta]^T$ là các các tham số cần ước lượng của RTVS. Thay (1) vào (2), vận tốc của RTVS tại thời điểm t được xác định bởi [14]:

$$\dot{\mathbf{s}}_t = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) & \dot{y}(t) & \dot{\theta}(t) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \frac{r(\omega_1 + \omega_2)}{2} \cos \theta & \frac{r(\omega_1 + \omega_2)}{2} \sin \theta & \frac{r(\omega_2 - \omega_1)}{2\ell} \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

Như vậy, vị trí và tư thế của RTVS được xác định bởi:

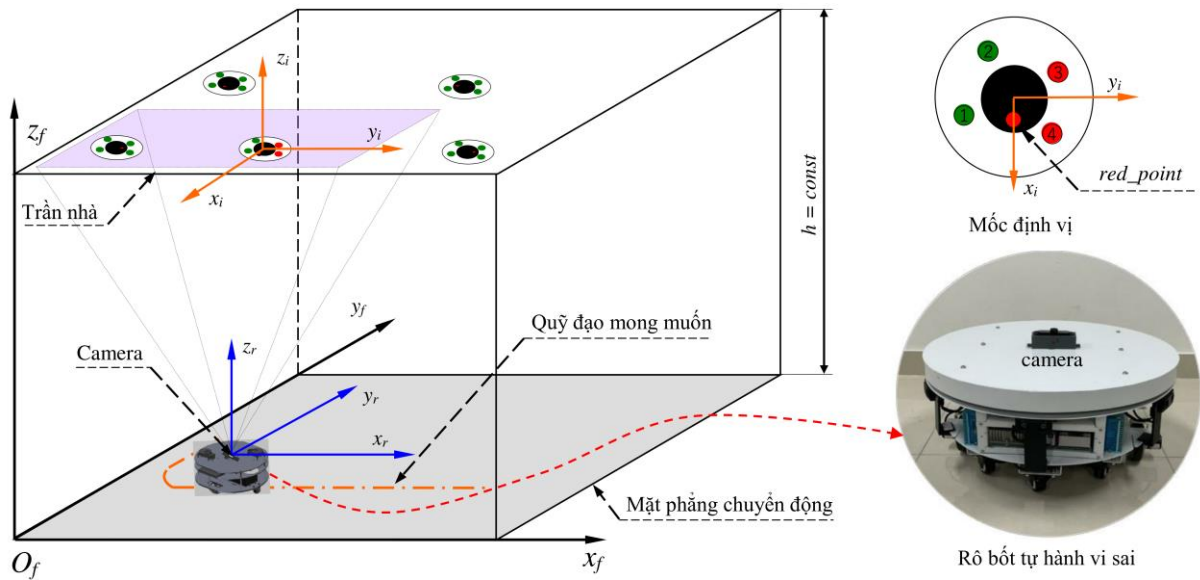
$$\mathbf{s}_t = [x_t \ y_t \ \theta_t]^T = [x_{t-1} + \Delta d \cos(\theta_{t-1} + \Delta\theta) \ y_{t-1} + \Delta d \sin(\theta_{t-1} + \Delta\theta) \ \theta_{t-1} + \Delta\theta]^T \quad (4)$$

Với $\Delta d = r \left(\frac{\omega_2(t) + \omega_1(t)}{2} \right) \Delta t$, $\Delta\theta = r \left(\frac{\omega_2(t) - \omega_1(t)}{2\ell} \right) \Delta t$, còn Δt là thời gian lấy mẫu. Trong đó

$\omega_1(t), \omega_2(t)$ được xác định từ bộ mã hóa gắn trên hai bánh xe dẫn động vi sai. Như vậy, hoàn toàn có thể định vị RTVS từ dữ liệu bộ mã hóa trên hai bánh xe dẫn động và điểm chuẩn “0” xuất phát ban đầu.

2.2. Định vị RTVS bằng dữ liệu nhận dạng ảnh 2D

RTVS được định vị bằng dữ liệu nhận dạng ảnh thông qua quan sát các mốc định vị (MĐV) được gắn cố định trên trần nhà của môi trường chuyển động. Để quan sát các MĐV, một camera 2D được gắn phía trên của RTVS như mô tả trong Hình 2. Thông tin về các MĐV bao gồm: tọa độ trong hệ quy chiếu gốc $\mathcal{G}_f$ và đặc điểm nhận dạng của MĐV. RTVS được định vị trong quá trình di chuyển bám theo quỹ đạo thông qua ba bước xử lý đó là: (i) phát hiện MĐV và trích xuất thông tin MĐV thông qua nhận dạng bằng nhận dạng ảnh 2D và so sánh dữ liệu lưu trong bộ nhớ; (ii) xác định vị trí của RTVS dựa trên dữ liệu MĐV; (iii) định vị vị trí của RTVS trong hệ quy chiếu gốc $\mathcal{G}_f$.



Hình 2. Minh họa định vị vị trí của RTVS trong môi trường chuyển động bằng camera

Xét trong hệ quy chiếu động $\mathcal{G}_r \{O_r, x_r, y_r, z_r\}$ gắn tại vị trí tâm hình học G của RTVS. Tại G gắn một camera có hệ tọa độ camera $\mathcal{G}_c \{O_c, x_c, y_c, z_c\}$ trùng với hệ tọa độ $\mathcal{G}_r$ để quan sát MĐV. Các MĐV trên trần nhà ứng với tọa độ (x_i, y_i, z_i) hoàn toàn xác định trong hệ quy chiếu gốc $\mathcal{G}_f$ và được lưu

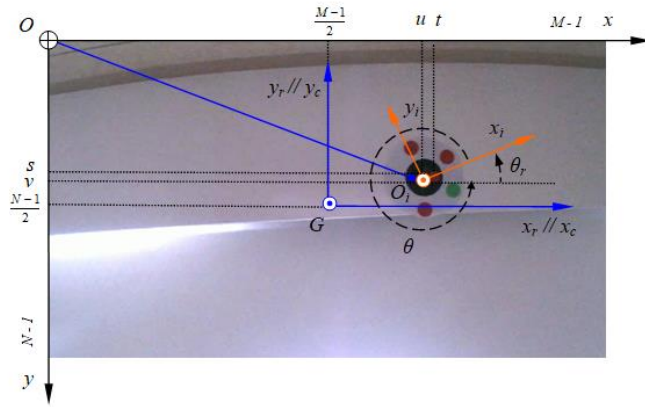
trong bộ nhớ của RTVS. Khi xét trong hệ tọa độ mặt phẳng ảnh $\mathcal{G}\{Oxyz\}$ với trục z có chiều hướng vào mặt phẳng ảnh như được mô tả trên Hình 3, góc θ_r là góc xoay tương đối quanh trục z của hệ tọa độ camera $\mathcal{G}_c$ so với hệ tọa độ MĐV $\mathcal{G}_i$ và được cho bởi công thức:

$$\theta_r = \text{atan2}\left(\frac{t-u}{s-v}\right) \quad (5)$$

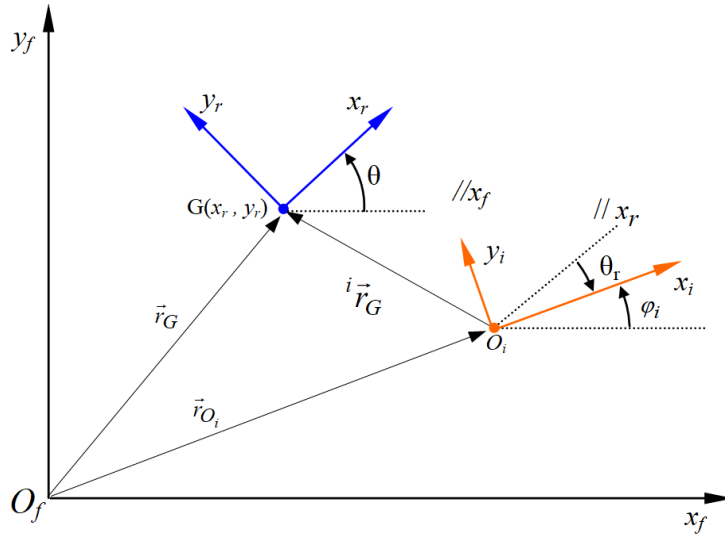
với (s, t) là tọa độ điểm *red_point* xác định hướng trục x_i gắn trên vật mốc, (u, v) là tọa độ xác định tâm MĐV.

Khi RTVS di chuyển bám quỹ đạo, vị trí của RTVS luôn được so sánh với hệ quy chiếu $\mathcal{G}_i\{O_i x_i y_i z_i\}$ gắn với MĐV thứ i là:

$${}^c \mathbf{r}_G = {}^c \mathbf{r}_{O_i} + \mathbf{R}_1 {}^i \mathbf{r}_G \quad (6)$$



Hình 3. Mô tả vị trí của RTVS so với tọa độ MĐV quan sát được



Hình 4. Định vị vị trí của RTVS trong $\mathcal{G}_f$

Từ (6) ta có:

$${}^i \mathbf{r}_G = \mathbf{R}_1^{-1} [{}^c \mathbf{r}_G - {}^c \mathbf{r}_{O_i}] \quad (7)$$

trong đó ${}^i \mathbf{r}_G = [x_{ri} \ y_{ri} \ 1]^T$ là vị trí tâm hình học G của RTVS so với hệ quy chiếu của MĐV $\mathcal{G}_i$;

${}^c \mathbf{r}_{O_i}$ là vị trí của tâm MĐV thứ i trong hệ quy chiếu mặt phẳng ảnh $\mathcal{G}$;

$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_r(t) & -\sin \theta_r(t) & 0 \\ \sin(\theta_r(t)) & \cos \theta_r(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ là ma trận biến đổi từ $\mathcal{G}_r$ về $\mathcal{G}_i$; ${}^c \mathbf{r}_G = \begin{bmatrix} {}^c x_G & {}^c y_G & 1 \end{bmatrix}^T$ là vị trí tâm

hình học G trong hệ $\mathcal{G}_c$ trùng với điểm G trong hệ $\mathcal{G}_r$.

Từ vị trí của MĐV đã được xác định trong hệ $\mathcal{G}_f$ thì vị trí của RTVS được xác định trong $\mathcal{G}_f$ như mô tả trên Hình 4 và xác định bởi:

$${}^f \mathbf{r}_G = {}^f \mathbf{r}_{O_i} + {}^f \mathbf{R}_{2i} {}^i \mathbf{r}_G \quad (8)$$

với ${}^f \mathbf{R}_{2i} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i & -\sin \varphi_i & 0 \\ \sin \varphi_i & \cos \varphi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ là ma trận biến đổi từ $\mathcal{G}_i$ về $\mathcal{G}_f$.

Hình 4 mô tả góc tư thế θ của RTVS trong hệ $\mathcal{G}_f$ và xác định bởi:

$$\theta = \varphi_i - \theta_r \quad (9)$$

trong đó φ_i là góc cho trước tương ứng trục x giữa hệ quy chiếu vật mốc $\mathcal{G}_i$ và hệ quy chiếu gốc $\mathcal{G}_f$.

Như vậy, hoàn toàn có thể xác định vị trí của RTVS trong hệ quy chiếu $\mathcal{G}_f$ gắn với môi trường chuyển động thông qua dữ liệu ảnh 2D.

3. Kết hợp dữ liệu nhận dạng ảnh 2D và bộ mã hóa bằng bộ lọc Kalman mở rộng

Thuật toán Kalman mở rộng được sử dụng để ước lượng vị trí và tư thế của RTVS bằng cách kết dữ liệu định vị bằng nhận dạng ảnh 2D và dữ liệu vận tốc góc hai bánh xe dẫn động thu được bằng bộ mã hoá tốc độ. Thuật toán Kalman mở rộng được xây dựng và được triển khai như mô tả trong Bảng 1.

Bảng 1. Thuật toán kết hợp dữ liệu bằng bộ lọc Kalman mở rộng

EKF_algorithm ($\mathbf{s}_{t-1}, \omega_{1t}, \omega_{2t}, \mathbf{P}_{t-1}, \mathbf{z}_t, \Delta t$)	
1	$\Delta \theta = (r(\omega_2(t) - \omega_1(t)))(2\ell)^{-1} \Delta t$, $\Delta d = (r(\omega_1(t) + \omega_2(t)))(2^{-1}) \Delta t$ // Ước lượng
2	$\mathbf{s}_t^- = \mathbf{s}_{t-1} + \begin{bmatrix} \Delta d \cos(\theta_{t-1} + \Delta \theta) \\ \Delta d \sin(\theta_{t-1} + \Delta \theta) \\ \Delta \theta \end{bmatrix}$, $\mathbf{F}_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\Delta d \sin(\theta_{t-1} + \Delta \theta) \\ 0 & 1 & \Delta d \cos(\theta_{t-1} + \Delta \theta) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
3	$\mathbf{G}_t = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{t-1} + \Delta \theta) & -\Delta d \sin(\theta_{t-1} + \Delta \theta) \\ \sin(\theta_{t-1} + \Delta \theta) & \Delta d \cos(\theta_{t-1} + \Delta \theta) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$; $\mathbf{P}_t^- = \mathbf{F}_t \mathbf{P}_{t-1} \mathbf{F}_t^T + \mathbf{G}_t \mathbf{M}_t \mathbf{G}_t^T$
4	$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\theta \end{bmatrix}$; $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
// Update	
5	$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_t^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_t^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$
6	$\mathbf{s}_t = \mathbf{s}_t^- + \mathbf{K}_t (\mathbf{z}_t - \mathbf{H} \mathbf{s}_t^-)$, $\mathbf{P}_t = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_t \mathbf{H}) \mathbf{P}_t^-$
7	Return $\mathbf{s}_t, \mathbf{P}_t$

trong đó $\mathbf{s}_t, \mathbf{P}_t$ tương ứng là ước lượng vị trí, tư thế của RTVS và ma trận hiệp phương sai trạng thái, $\mathbf{K}_t$ là ma trận hệ số Kalman, $\mathbf{R}$ là ma trận hiệp phương sai nhiễu của phép đo, $\mathbf{z}_t = {}^f \mathbf{r}_G(t)$ là vị trí và

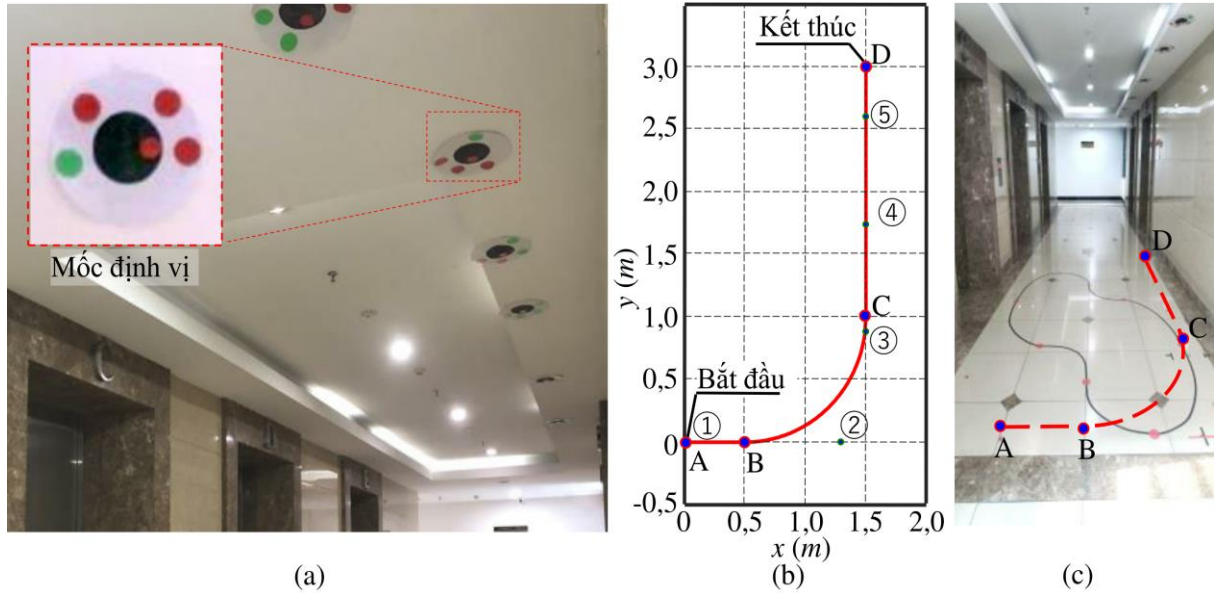
tư thế của RTVS xác định bởi dữ liệu nhận dạng ảnh, $\mathbf{M}_t$ ma trận hiệp phương sai nhiều quá trình, $\omega_1(t)$, $\omega_2(t)$ là các dữ liệu vận tốc góc hai bánh xe thu được từ bộ mã hóa tốc độ ở hai bánh xe dẫn động vi sai.

4. Thực nghiệm xác minh và thảo luận

4.1. Thiết lập kịch bản thực nghiệm

Để minh họa và kiểm chứng thuật toán đã trình bày trên mục 3 trong nội dung này tiến hành cài đặt kịch bản thực nghiệm như sau:

a) *Quỹ đạo chuyển động*: Quỹ đạo chuyển động mong muốn của RTVS được thiết kế theo đường chữ L bao gồm hai đoạn thẳng $AB = 0,5 \text{ m}$ và $CD = 2 \text{ m}$ liên kết với nhau bởi cung tròn có bán kính $R = 1 \text{ m}$ như mô tả trên Hình 5b, còn môi trường thực nghiệm kịch bản thí nghiệm được thể hiện trên ảnh chụp ở Hình 5c.



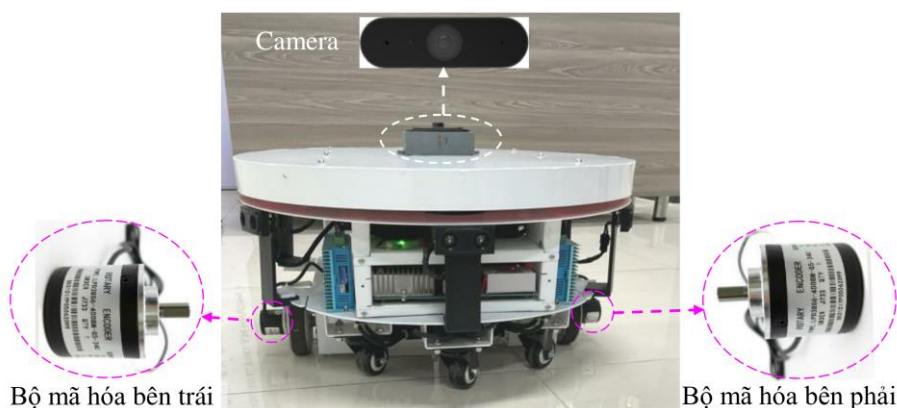
Hình 5. Cài đặt kịch bản thực nghiệm với (a) là sơ đồ bố trí thực tế mốc định vị, (b) là quỹ đạo mong muốn và (c) là hiện trường thực nghiệm

b) *Mốc định vị*: Để định vị RTVS theo quỹ đạo mong muốn thông qua phương pháp đo lường tuyệt đối bằng công nghệ nhận dạng ảnh, chúng tôi tiến hành bố trí dọc theo quỹ đạo 5 mốc định vị ở phía trên trần nhà như mô tả trên Hình 5a. Các mốc này có vị trí tương ứng với các vị trí đánh số ① đến ⑤ ở trên Hình 5b, trong đó các dữ liệu định vị vị trí tâm mốc được liệt kê tại Bảng 2. Mỗi mốc được bố trí với khoảng cách sao cho trong trường quan sát của camera luôn có tối thiểu một MĐV giúp RTVS có thể định vị mà không bị mất dấu trong quá trình chuyển động. Khoảng cách giữa các MĐV được tính toán dựa trên trường nhìn của camera và khoảng cách giữa camera với mặt trần. Với khoảng cách thực tế giữa camera với mặt trần là $2,8 \text{ m}$ thì khoảng cách tối đa giữa hai MĐV theo chiều ngang và chiều dọc lần lượt là $1,6 \text{ m}$ và $0,8 \text{ m}$.

Bảng 2. Cơ sở dữ liệu tọa độ mốc định vị

1	2	3	4	5
$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,310 \\ 0,000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,500 \\ 0,865 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,500 \\ 1,720 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,500 \\ 2,580 \end{bmatrix}$

c) **Thiết bị đo trên RTVS:** Để quan sát các MĐV, camera được dùng trong thí nghiệm là loại 2MP CMOS có thông số kỹ thuật chính: độ phân giải 640×480 pixel, số khung hình/s là 25 và trường quan sát $58^\circ \times 32^\circ$ và được bố trí phía trên RTVS như mô tả trên ảnh chụp Hình 6. Trong khi cảm biến xác định vận tốc góc của hai bánh xe dẫn động vì sai là encoder với độ phân giải 400 xung/vòng và tần số 20 K/s được bố trí trên hai trục bánh xe dẫn động vì sai như mô tả trên ảnh chụp Hình 6.



Hình 6. Ảnh chụp mô tả vị trí camera và bộ mã hoá tốc độ trên RTVS

4.2. Kết quả thực nghiệm và thảo luận

4.2.1. Định vị bằng dữ liệu nhận dạng ảnh

Trên cơ sở các dữ liệu đã thiết lập theo kịch bản thí nghiệm được mô tả chi tiết trong mục 4.1 và thuật toán định vị được trình bày trong mục 2, Hình 7 dưới đây mô tả các kết quả định vị so sánh giữa giá trị thu được từ nhận dạng ảnh với quỹ đạo mong muốn trong 4 lần thử nghiệm. Trong đó, đường màu đỏ nét liền là giá trị mong muốn, còn đường màu đen nét đứt là giá trị định vị RTVS thông qua nhận dạng ảnh.

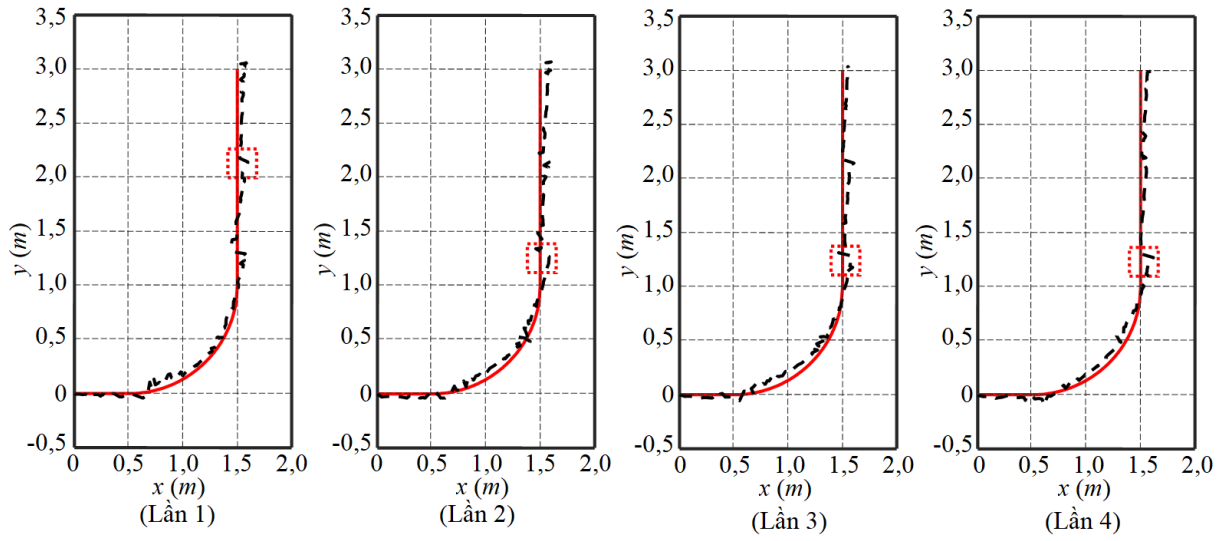
Từ Hình 7 cho thấy quỹ đạo chuyển động thực của RTVS luôn bám theo quỹ đạo mong muốn với một sai số nhất định. Những vị trí sai số lớn nhất được đánh dấu bằng các hình vuông nét đứt trên Hình 7, còn giá trị sai số được thống kê trong bảng 3 dưới đây.

Bảng 3. Dữ liệu sai số định vị lớn nhất bằng nhận dạng ảnh so với giá trị mong muốn

Sai số	Đơn vị	Lần 1	Lần 2	Lần 3	Lần 4	Trung bình
e_x	m	0,097	0,081	0,106	0,098	0,095
e_y	m	0,086	0,066	0,091	0,093	0,084

Từ kết quả thực nghiệm trên Hình 7 và bảng 3 cho thấy giá trị sai số lớn nhất trung bình là $0,095\ m$ đối với trục x và $0,084\ m$ đối với trục y , sai số này hoàn toàn chấp nhận được đối với RTH. Tuy nhiên, sai số vị trí trong các lần thực nghiệm là không đồng nhất nguyên nhân gây ra là do các yếu tố sau đây:

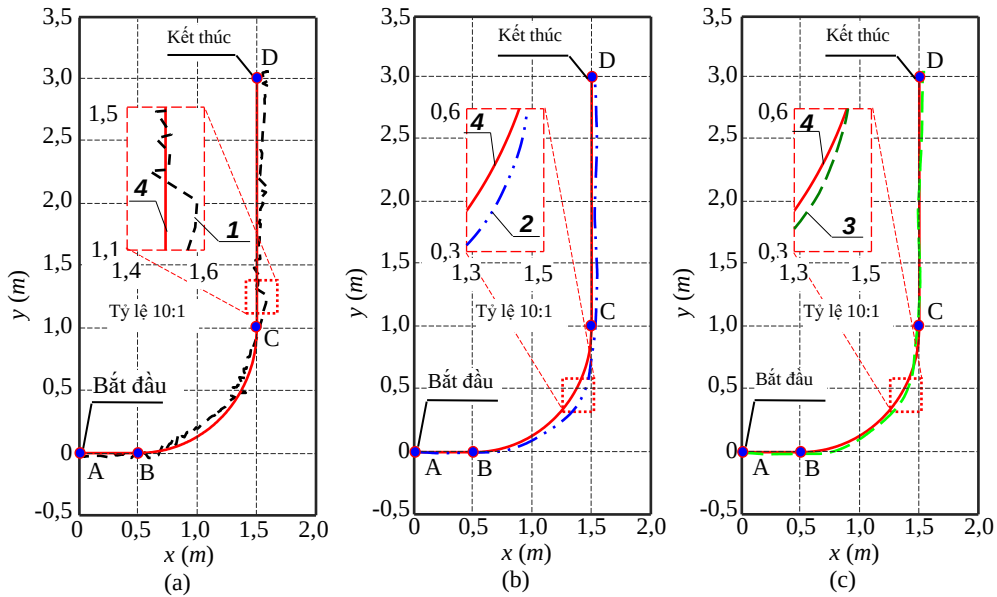
- Yếu tố đầu tiên phải kể đến đó là sự biến dạng ảnh tại các vùng biên ảnh của trường quan sát do biến dạng bán kính và biến dạng tiếp tuyến, điều này được thể hiện ở Hình 5 và Hình 7 khi MĐV ở các vị trí biên của trường quan sát thì xảy ra sai số lớn nhất.
- Yếu tố thứ hai là sai số của các MĐV khi thực nghiệm bố trí MĐV. Vì vậy, từ Hình 7 dễ thấy sai số lớn nhất hầu hết đều xảy ra tại vị trí MĐV thứ 3 và 4.
- Yếu tố thứ 3 phải kể đến là sai số lắp của camera và rung động khi RTVS chuyển động dẫn đến sai số là không thể tránh khỏi.



Hình 7. So sánh giữa giá trị thực nghiệm và giá trị mong muốn

Như vậy, để khắc phục và làm mượt chuyển động của RTVS khi dữ liệu định vị phản hồi về bộ điều khiển. Dưới đây là các kết quả khi kết hợp dữ liệu nhận dạng ảnh và dữ liệu của bộ mã hoá thông qua bộ lọc Kalman mở rộng.

4.2.2 Kết quả thực nghiệm khi kết hợp dữ liệu nhận dạng ảnh và bộ mã hoá vận tốc góc bánh xe vi sai



Hình 8. Kết quả định vị cho RTVS với (a) sử dụng dữ liệu nhận dạng ảnh 2D, (b) sử dụng dữ liệu từ bộ mã hóa hai bánh xe dẫn động và (c) kết hợp dữ liệu bằng bộ lọc Kalman mở rộng.

Để minh họa và xác minh tính hiệu quả của đề xuất bởi bài viết, Hình 8 trên đây trình bày kết quả thực nghiệm định vị cho RTVS với từng phương án độc lập đó là: (i) sử dụng dữ liệu nhận dạng ảnh đường số 1 màu đen trên Hình 8a; (ii) dữ liệu bộ mã hoá vận tốc góc hai bánh xe đường số 2 màu xanh đậm hình 8b và (iii) kết hợp dữ liệu nhận dạng ảnh và bộ mã hóa tốc độ đường số 3 màu xanh lá cây như mô tả trên Hình 8c, còn đường số 4 màu đỏ là quỹ đạo mong muốn.

Từ những kết quả thực nghiệm trên đây cho thấy việc kết hợp dữ liệu nhận dạng ảnh và bộ mã hoá thông qua thuật toán Kalman mở rộng đã cải thiện được chất lượng bám quỹ đạo của RTVS. Điều đó được thể hiện trên Hình 8c với đường cong chuyển động thực mượt hơn và sai số lớn nhất 0,032 m, trong khi định vị bằng dữ liệu nhận dạng ảnh và bộ mã hoá vận tốc góc lần lượt có giá trị 0,081 m và 0,06 m. Ngoài ra, giải pháp đề xuất của bài báo này còn khắc phục được sai số tích lũy của bộ mã hoá.

5. Kết luận

Từ những thảo luận, đánh giá dựa trên dữ liệu tính toán lý thuyết, xác minh bằng thực nghiệm trên một mẫu RTVS nghiên cứu này đã đề xuất được phương pháp kết hợp dữ liệu nhận dạng ảnh 2D và dữ liệu từ bộ mã hoá vận tốc góc của hai bánh xe dẫn động nhằm cải thiện độ chính xác bám quỹ đạo và làm mượt chuyển động của RTVS. Ngoài ra, phương pháp được đề xuất bởi nghiên cứu này có ưu điểm không đòi hỏi cấu trúc phần cứng cao bởi sử dụng dữ liệu nhận dạng ảnh 2D dẫn đến giảm giá thành của RTVS mà vẫn đáp ứng được yêu cầu thực tiễn. Điều đó được xác minh bởi kết quả thực nghiệm trên một mẫu RTVS với sai số định vị không vượt quá 0,032 m giảm 60% so với chỉ sử dụng dữ liệu nhận dạng ảnh 2D. Do đó, kết quả của nghiên cứu này có thể được sử dụng để cài đặt cho các RTH trong thực tiễn hoạt động trong môi trường trong nhà với mục đích dịch vụ hậu cần công nghiệp.

Mặc dù vậy, nghiên cứu này cũng có điểm hạn chế đó là dữ liệu thực nghiệm mới chỉ được thực hiện ở phòng thí nghiệm và chưa xét đến các yếu tố nhiễu của môi trường như cường độ ánh sáng thay đổi, sự không đồng nhất của mặt đường di chuyển. Do đó, đây cũng sẽ là công việc trong tương lai của chúng tôi để có thể đưa kết quả nghiên cứu này vào thực tiễn.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Bách khoa Hà Nội (HUST) trong đề tài mã số T2023-PC-011.

Tài liệu tham khảo

- [1] Puente-Castro, Alejandro, et al. A review of artificial intelligence applied to path planning in UAV swarms. *Neural Computing and Applications* (2022), pp. 1-18.
- [2] Benotsmane, Rabab, György Kovács, and László Dudás. Economic, social impacts and operation of smart factories in Industry 4.0 focusing on simulation and artificial intelligence of collaborating robots. *Social Sciences* 8.5 (2019), pp. 143.
- [3] Trinh Thi Khanh Ly. Neural controller design of unmanned ground vehicle with four-wheel independent drive in agricultural farming. *The Asia Meeting on Environment and Electrical Engineering* (2023), pp. 1-8.
- [4] Trinh Thi Khanh Ly, et al. Dynamic modelling and numerical simulation of industrial AGVs when taking into account the payload and friction between the wheel and the road surface. *The Asia Meeting on Environment and Electrical Engineering* (2023), pp. 1-8.
- [5] Nguyen Thi Thanh, et al. Dynamics simulation of a mecanum-wheeled omnidirectional mobile robots. *Advances in Engineering Research and Application*. ICERA 2023, pp. 1-14.
- [6] Trinh Thi Khanh Ly, et al. A Neural Network Controller Design for the Mecanum Wheel Mobile Robot. *Engineering, Technology & Applied Science Research* 13.2 (2023), pp. 10541-10547.
- [7] Nguyen Hong Thai, Nguyen Quang Thai. A kinematic control algorithm for blasthole drilling robotic arm in tunneling. *Sci. Technol. Dev. J.* 20 (K5) (2017), pp 13-22.
- [8] Borenstein, Johann, H. R. Everett, Liqiang Feng, *Where am I? Sensors and methods for mobile robot positioning.*, University of Michigan (1996).
- [9] Shen, Mingqi, et al. A new positioning method based on multiple ultrasonic sensors for autonomous mobile robot. *Sensors*, 20, (1), (2019).

- [10] Jing, Liu, and Po Yang. A localization algorithm for mobile robots in RFID system. In *2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, (September, 2007), pp. 2109-2112.
- [11] Chae, Heesung, and Kyuseo Han. Combination of RFID and vision for mobile robot localization. In *2005 International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*, (December, 2005), pp. 75-80.
- [12] Wang, Yun-Ting, et al. A single LiDAR-based feature fusion indoor localization algorithm. *Sensors*, 18, (4), (2018).
- [13] Fan, Qigao, et al. Data fusion for indoor mobile robot positioning based on tightly coupled INS/UWB. *The Journal of Navigation*, 70, (5), (2017), pp. 1079-1097.
- [14] Trịnh Thị Khanh Ly, et al. Autonomous mobile robot localization by using IMU and Encoder data fusion technique by Kalman filter. *Advances in Engineering Research and Application*. ICERA 2023, pp. 1-13.
- [15] Lin Yang, et al. 3D LiDAR Point Cloud Registration Based on IMU Preintegration in Coal Mine Roadways. *Sensors* 23.7 (2023), pp. 3473.
- [16] Nguyen Hong Thai, Trịnh Thị Khanh Ly. NURBS curve trajectory tracking control for differential-drive mobile robot by a linear state feedback controller. In *International Conference on Engineering Research and Applications* (2021), pp. 685-696.
- [17] Nguyen Hong Thai, et al. NURBS curve trajectory tracking control for differential-drive mobile robot by a linear state feedback dynamic controller. In *Regional Conference in Mechanical Manufacturing Engineering* (2021), pp. 610-623.
- [18] Nguyen Hong Thai, et al. Obstacle Avoidance Algorithm for Autonomous Mobile Robots in the Indoor Environment. In *International Conference on Engineering Research and Applications* (2022), pp. 752-763).

Hà nội, ngày 29 tháng 04 năm 2024

Kính gửi Ban biên tập Hội nghị Cơ học toàn quốc - Kỷ niệm 45 năm thành lập Viện Cơ học

Nhóm giả xin trân trọng cảm ơn Ban biên tập đã cho phép các tác giả gửi bản thảo sửa đổi với tiêu đề “*Kết hợp dữ liệu nhận dạng ảnh 2D và bộ mã hoá bằng bộ lọc Kalman mở rộng nhằm nâng cao độ chính xác định vị cho rô bốt tự hành vi sai*” **ID 04**, để đăng trên tuyển tập công trình **Hội nghị Cơ học toàn quốc – Kỷ niệm 45 năm thành lập Viện Cơ học**.

Lời đầu tiên cho phép các tác giả gửi đến ban biên tập và các chuyên gia phản biện lời cảm ơn sâu sắc. Nhóm tác giả đánh giá cao những nhận xét sâu sắc và có giá trị của các chuyên gia phản biện về bản thảo của chúng tôi và biết ơn các chuyên gia phản biện đã tận tình đọc bài báo của chúng tôi một cách cẩn thận.

Các tác giả xin tiếp thu, bổ sung và làm rõ hầu hết các gợi ý, ý kiến nhận xét của các chuyên gia phản biện để nâng cao chất lượng học thuật của bản thảo. Những thay đổi đó được **đánh dấu bằng màu vàng** trong bản thảo sửa đổi. Phản hồi từng điểm đối với nhận xét của người đánh giá được trình bày cụ thể dưới đây.

Nhận xét của người đánh giá	Phản hồi của nhóm tác giả
Phản biện 1:	
Phần gợi ý đề xuất của phản biện	
Câu 1: Sai số cỡ 32 cm dường như là khá cao. Thay vì dùng các mốc định vị trên trần, nếu sử dụng camera gắn trên trần liệu định vị có được đơn giản và chính xác hơn nhiều ?	Các tác giả xin trân trọng cảm ơn đề xuất này của chuyên gia phản phản biện. Sau đây chúng tôi xin trả lời về những vấn đề mà chuyên gia phản biện quan tâm: 1. Đầu tiên sai số của nhóm tác giả đạt được cỡ 0,032 m ~ 3,2 cm như trình bày trong bản thảo mà không phải 32 cm như phản biện đề cập. Đây có thể có chút nhầm lẫn nào đó mà chuyên gia phản biện có thể xem lại bản thảo một lần nữa. Với sai số này có thể coi là tương đối nhỏ khi định vị

	rôbốt tự hành trong nhà. 2. Về gợi ý mà chuyên gia phản biện đề xuất “Thay vì dùng các mốc định vị trên trần, nếu sử dụng camera gắn trên trần liệu định vị có được đơn giản và chính xác hơn nhiều” nó hoàn toàn đúng nhưng mà hạn chết rất lớn là chỉ phù hợp với phòng thí nghiệm mà không thể triển khai trong thực tế. Vì lý do này mà chúng tôi, bảo lưu ý kiến của mình.
Phần làm rõ thêm các câu hỏi thảo luận tại hội nghị	
Câu 1: Dán mốc có cần xác định hướng, vị trí trước, camera 2D, mốc dán trên trần ?	Về vấn đề này ngoài việc đã trả lời tại hội nghị, chúng tôi xin bổ sung làm rõ như sau: 1. Mốc định vị được dán theo quỹ đạo chuyển động sao cho hợp với trục x của hệ quy chiếu gắn với môi trường chuyển động, một góc 90° và các vị trí cách nhau từ 0.8 ~ 1.6 m, các mốc này khác nhau nhằm định vị tọa độ mốc chuẩn. 2. Camera 2D trên thân rôbốt được đặt tại hệ quy chiếu động của rôbốt.
Câu 2: Giá thành của camera khi triển khai phương pháp định vị trên ?	Trong thực nghiệm nhóm tác giả sử dụng camera 2D CMOS HD. Đây là mẫu camera giá rẻ phổ biến trên thị trường với chi phí thấp hơn rất nhiều các cảm biến khác. Do vậy, giá thành rôbốt sẽ giảm đi đáng kể, đây chính là mục đích chính để nhóm tác giả đề xuất nghiên cứu này.
Câu 3: Góc nhìn camera có ảnh hưởng tới thuật toán và kết quả định vị hay không ?	Ngoài những vấn đề đã trao đổi thảo luận tại hội nghị, chúng tôi bổ sung làm rõ như sau: 1. Góc nhìn camera có ảnh hưởng trực tiếp tới thuật toán và kết quả định vị. Đây chính là các yếu tố nhiễu không chắc chắn, và cần phải ước lượng và xử lý số liệu trong quá trình thực nghiệm. 2. Bên cạnh đó, góc nhìn camera có thể có những sai số do biến dạng của ảnh. Đây là nhiễu Gaussian cơ bản, trong quá trình thực nghiệm được hiện hiệu chỉnh nhằm đảm bảo kết quả định

	vị trí bị ảnh hưởng bởi nhiễu và nâng cao độ chính xác cao.
--	---

Ngoài các ý kiến trên, các lỗi chính tả, hành văn đã được nhóm tác giả rà soát và hiệu chỉnh.

Các tác giả mong nhận được ý kiến phản hồi từ Ban biên tập trong thời gian sớm nhất có thể về trạng thái bản thảo sửa đổi của chúng tôi và sẵn sàng trả lời bất kỳ các câu hỏi thảo luận bổ sung của người đánh giá về bản thảo đã được sửa đổi của chúng tôi để được rõ ràng hơn.

Tác giả liên lạc

Nguyễn Hồng Thái