

DESIGN AND MANUFACTURING OF MECANUM WHEELS BY 3D PRINTING FOR MOBILE ROBOT

Nguyen Von Dim*, Tran Xuan Trong

TNU - University of Information and Communication Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Received: 18/3/2022</p> <p>Revised: 12/5/2022</p> <p>Published: 19/5/2022</p>	<p>3D printing is an advanced manufacturing technology used to fabricate parts by layering materials directly from CAD (Computer-Aided Design) data. FDM (Fused Deposition Modeling) method is one of the most popular methods for engineering applications. On the other hand, mobile robots that move omnidirectionally with mecanum wheels have been widely used in industrial production, storage, transportation, and social services. However, the disadvantage of the mecanum multi-directional wheel is the complicated design structure, many individual parts, which make it difficult to fabricate. The article presents the design proposal for manufacturing by 3D printing (Design for Additive Manufacturing) for the mecanum omnidirectional wheel completely by FDM 3D printing technology, using PLA (Polylactic Acid) plastic as the fabrication material. The wheel is designed by the method of modeling, simulation on the computer combined with the experimental method. Then, the mecanum wheel fabricated by 3D printing was tested for application to mobile robots. Experimental results showed that the 3D printed mecanum wheels met the requirements of flexible and efficient movement when following complex trajectories.</p>
<p>KEYWORDS</p> <p>Omnidirectional wheels</p> <p>Mecanum wheel</p> <p>Mobile robot</p> <p>3D printing</p> <p>Design for Additive Manufacturing</p>	

THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO BÁNH XE ĐA HƯỚNG MECANUM BẰNG CÔNG NGHỆ IN 3D ỨNG DỤNG CHO ROBOT TỰ HÀNH

Nguyễn Văn Dim*, Trần Xuân Trọng

Trường Đại học Công nghệ Thông tin và Truyền thông – ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<p>Ngày nhận bài: 18/3/2022</p> <p>Ngày hoàn thiện: 12/5/2022</p> <p>Ngày đăng: 19/5/2022</p>	<p>Công nghệ in 3D là một công nghệ sản xuất tiên tiến được sử dụng để chế tạo các chi tiết bằng cách xếp từng lớp vật liệu trực tiếp từ dữ liệu thiết kế CAD (Computer Aided Design). Trong đó, phương pháp FDM (Fused Deposition Modeling) là một trong những phương pháp phổ biến nhất cho các ứng dụng kỹ thuật. Mặt khác, các robot tự hành di chuyển đa hướng bằng bánh xe mecanum đã được sử dụng rộng rãi trong sản xuất công nghiệp, lưu trữ, vận chuyển và các dịch vụ xã hội. Tuy nhiên, nhược điểm của bánh xe đa hướng mecanum là kết cấu thiết kế phức tạp, nhiều chi tiết riêng lẻ dẫn đến khó chế tạo. Nội dung bài báo trình bày về đề xuất thiết kế cho chế tạo bằng in 3D (Design for Additive Manufacturing) đối với bánh xe đa hướng mecanum hoàn toàn bằng công nghệ in 3D FDM, sử dụng vật liệu chế tạo là nhựa PLA. Bánh xe được thiết kế bằng phương pháp mô hình hóa, mô phỏng trên máy tính kết hợp phương pháp thực nghiệm. Sau đó, bánh xe mecanum đã chế tạo bằng in 3D được thử nghiệm ứng dụng cho robot tự hành. Kết quả thực nghiệm khi dùng bánh xe mecanum in 3D đáp ứng yêu cầu di chuyển linh hoạt và hiệu quả khi đi theo các quỹ đạo phức tạp.</p>
<p>TỪ KHÓA</p> <p>Bánh xe đa hướng</p> <p>Bánh xe mecanum</p> <p>Robot tự hành</p> <p>In 3D</p> <p>Thiết kế cho chế tạo</p>	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5716>

* Corresponding author. Email: nvdim@ictu.edu.vn

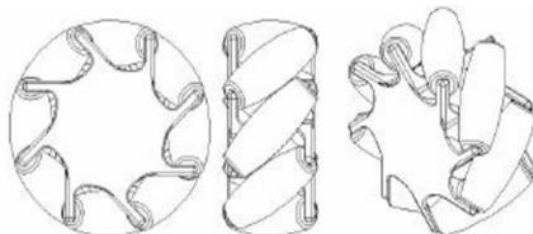
1. Giới thiệu

Gần đây, có nhiều nghiên cứu tập trung vào các cơ cấu chạy đa hướng có bánh xe. Đặc biệt, các robot di chuyển đa hướng bằng bánh xe mecanum đã được sử dụng rộng rãi trong sản xuất công nghiệp, lưu trữ, vận chuyển, dịch vụ xã hội và các lĩnh vực khác [1]. So với các phương tiện thông thường, robot đa hướng có nhiều ưu điểm hơn về khả năng di chuyển trong không gian hẹp và môi trường đông đúc. Chúng có khả năng dễ dàng thực hiện các nhiệm vụ nhất định trong không gian với chướng ngại vật tĩnh, chướng ngại vật động hoặc các khu vực hẹp [2].

Bánh xe đa hướng gồm 3 loại chính: Bánh xe Omni (dẫn động Holonomic) có trục bánh chính đặt vuông góc với trục của các con lăn, loại này kết cấu phức tạp, độ nhạy với điều kiện mặt sàn cao, lực kéo yếu [3]-[5]. Bánh xe dẫn động xoay tạo bởi bánh xe chính và một trục xoay hướng bánh xe, loại này khó lập trình và điều khiển, ma sát tiếp xúc lớn khi điều khiển [5]. Bánh xe mecanum tạo bởi các con lăn có trục đặt nghiêng góc với bánh xe chính, nhờ vậy bánh xe có ưu điểm thiết kế gọn nhẹ, khả năng tải cao, dễ điều khiển [1]. Với các đặc tính trên bánh xe mecanum giúp cho các hệ thống hoạt động trên nó có khả năng đa hướng và cực kỳ linh hoạt, dễ dàng thực hiện một số nhiệm vụ trong không gian chật chội với chướng ngại vật tĩnh, chướng ngại vật động hoặc các khu vực hẹp trong các xưởng sản xuất, nhà kho, bệnh viện [6]. Tuy nhiên, nhược điểm của bánh xe đa hướng mecanum là kết cấu thiết kế phức tạp, nhiều chi tiết riêng lẻ dẫn đến khó chế tạo [7]. Do đó, để khắc phục các vấn đề này của bánh xe mecanum, bài báo này trình bày đề xuất thiết kế cho chế tạo bằng in 3D (Design for Additive Manufacturing) đối với bánh xe đa hướng mecanum hoàn toàn bằng công nghệ in 3D FDM (Fused Deposition Modeling) [8]. Cụ thể, thiết kế mới của chúng tôi đề xuất là sử dụng hình tròn cho các con lăn và hiệu chỉnh theo cách mà các con lăn được kết nối với tâm của bánh xe và vật liệu PLA được sử dụng cho bánh xe mecanum.

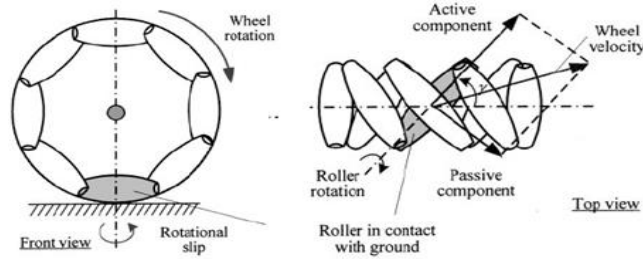
2. Đặc tính của bánh xe mecanum

Bánh xe mecanum dựa trên nguyên lý của một bánh xe trung tâm với các con lăn được đặt nghiêng một góc theo chu vi của bánh xe [1]. Góc giữa trục con lăn và trục bánh xe trung tâm có thể có giá trị bất kỳ, nhưng trong trường hợp của mecanum thông thường là 45° (Hình 1).



Hình 1. Bánh xe mecanum [1]

Các con lăn được định hình sao cho hình chiếu cạnh của bánh xe là hình tròn. Các con lăn trên chu vi vành bánh xe dịch một phần của lực theo hướng quay của bánh xe thành một lực pháp tuyến theo hướng bánh xe. Tùy thuộc vào từng hướng và tốc độ của mỗi bánh xe riêng biệt, hợp của tất cả các lực tạo ra một vector lực tổng hợp theo bất kỳ hướng nào, do đó cho phép phần khung để di chuyển tự do theo hướng của vector lực tổng hợp, mà không cần thay đổi hướng của bánh xe. Bánh xe mecanum có 3 bậc tự do, bao gồm chuyển động quay tròn của bánh xe, chuyển động quay tròn của con lăn và chuyển động trượt quay quanh trục thẳng đứng thông qua điểm tiếp xúc (như trên Hình 2). Trên bánh xe mecanum, vận tốc bánh xe có thể được chia thành các thành phần theo hướng hoạt động và theo hướng bị động. Thành phần theo hướng hoạt động là hướng vuông góc với trục con lăn tiếp xúc với mặt đất, thành phần bị động dọc theo trục của con lăn [3].



Hình 2. Bậc tự do của bánh xe mecanum [3]

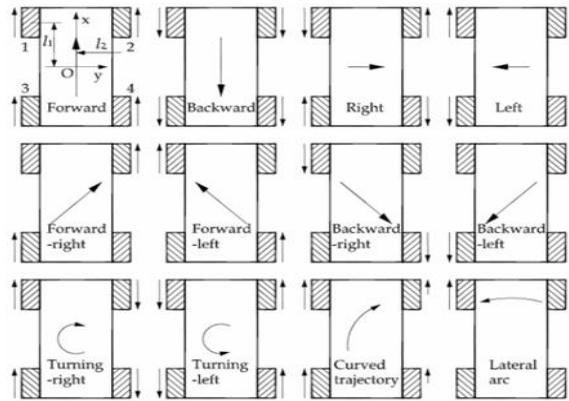
Khi bánh xe quay, vec tơ lực dọc theo bánh xe và vec tơ lực vuông góc được tạo ra. Điều khiển chuyển động quay của mỗi bánh xe có thể thay đổi hướng di chuyển của bánh xe.

Hơn nữa, khi bánh xe mecanum quay, ít nhất một con lăn (tối đa là hai con lăn) tiếp xúc với mặt đất. Chỉ một bề mặt nhỏ (theo lý thuyết, chỉ là một điểm) của con lăn là tiếp xúc với mặt đất. Diện tích của bề mặt tiếp xúc này cắt ngang qua con lăn, phụ thuộc vào hướng quay của con lăn. Hướng của lực kéo được tạo ra theo hướng đi ngang của bề mặt tiếp xúc. Nó có nghĩa là, nếu chúng ta nhìn vào bánh xe từ phía trên xuống, lực kéo sẽ vuông góc với trục con lăn [3].

3. Thiết kế và chế tạo bánh xe mecanum

3.1. Tính toán và thiết kế bánh xe mecanum

Thông thường, các robot sử dụng bánh xe mecanum có hình vuông hoặc hình chữ nhật, với hai bánh xe ở mỗi bên của khung xe. Sử dụng bánh xe mecanum cung cấp chuyển động đa hướng cho xe mà không cần hệ thống lái. Khi bánh xe mecanum hoạt động, các con lăn trên chu vi bánh xe chuyển một phần lực theo hướng quay của bánh xe với lực pháp tuyến so với hướng của bánh xe. Chuyển động của robot dùng bánh xe mecanum theo hướng và vận tốc góc như thể hiện Hình 3 [5].

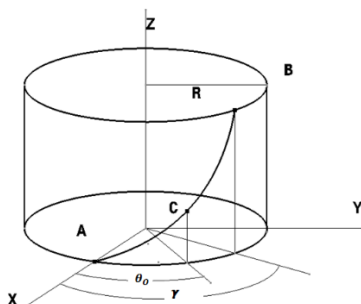


Hình 3. Chuyển động của robot dùng bánh mecanum theo hướng và vận tốc góc [5]

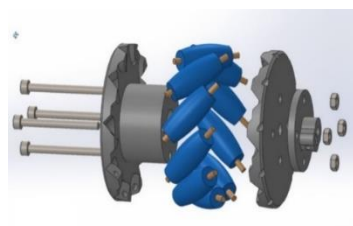
Để đảm bảo tính liên tục của chuyển động, số lượng lớn con lăn nhỏ trên mỗi bánh xe cần phải được tính toán. Tính liên tục chuyển động được xác định bằng phương trình dưới đây:

$$\varepsilon = \frac{N(y - 2\theta_0)R}{2\pi R} = \frac{N}{2\pi}(y - 2\theta_0) \tag{1}$$

Trong phương trình (1), thông số ($R, N, \varepsilon, y, \theta_0$) gồm: R là bán kính của bánh xe; N là số con lăn mong muốn, y là góc của đường xoắn ốc quay quanh trục z của bánh xe, và θ_0 là giá trị ban đầu của góc giữa chuyển động bắt đầu của điểm C dọc theo đường xoắn ốc như trên Hình 4.



Hình 4. Cấu hình sơ đồ con lăn [9]



Hình 5. Thiết kế bánh xe mecanum đề xuất

Trong công thức (1), giá trị $\varepsilon < 1$ cho biết con lăn sẽ quá nhỏ so với số con lăn trong bánh xe (chiều dài của con lăn quá ngắn và sẽ không hoạt động). Tuy nhiên, trong trường hợp $\varepsilon > 1$, tính liên tục của chuyển động có thể được đảm bảo, nhưng giá trị lý tưởng sẽ là $\varepsilon = 1$, vì trong trường hợp này chiều dài con lăn thỏa mãn tất cả các đặc tính mong muốn của bánh xe. Khi đó, giá trị của ε phải càng gần với 1 càng tốt, vì khi ε tăng, chiều dài của con lăn tăng lên làm cho bánh xe dày hơn và đường sinh có xu hướng dao động làm cho đường cong không đủ. Trong bài báo này, thiết kế mới của chúng tôi được đề xuất là sử dụng hình tròn cho các con lăn và hiệu chỉnh theo cách mà các con lăn được kết nối với tâm của bánh xe. Hình 5 minh họa cho thiết kế mới được đề xuất. Trong thiết kế này, hình tròn đang được sử dụng để xác định hình dạng của các con lăn. Các tọa độ điểm A, B và C trên Hình 4 được xác định như sau:

$$A(R, 0, 0), B(R\cos\gamma, R\sin\gamma, R\gamma), C(R\cos\theta, R\sin\theta, R\theta)$$

Các vector \overrightarrow{AB} và \overrightarrow{AC} được xác định như sau :

$$\overrightarrow{AB} = \begin{bmatrix} R(\cos\gamma - 1) \\ R\sin\gamma \\ R\gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\overrightarrow{AC} = \begin{bmatrix} R(\cos\theta - 1) \\ R\sin\theta \\ R\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Vector đơn vị song song với vector \overrightarrow{AB} được xác định như sau :

$$\vec{u} = \frac{\overrightarrow{AB}}{|\overrightarrow{AB}|} = \frac{\overrightarrow{AB}}{R\sqrt{2-2\cos\gamma+\gamma^2}} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{Trong đó : } u_1 = \frac{\cos\gamma-1}{D} u_2 = \frac{\sin\gamma}{D} u_3 = \frac{\gamma}{D}$$

$$\text{Và } D = \sqrt{2 - 2\cos\gamma + \gamma^2}$$

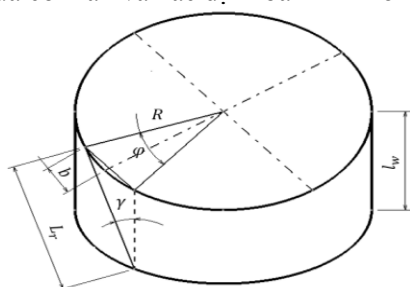
Từ đó, xác định độ cong của con lăn. Cần phải xoay vec tơ \overrightarrow{AC} quanh vector \vec{u} một góc τ . Góc này sẽ tạo ra một số đường tiếp xúc xung quanh vec tơ \vec{u} [9]. Phương trình xác định bề mặt của con lăn là:

$$\begin{aligned} x &= x(\theta, \tau) = R + P'_1 \\ y &= y(\theta, \tau) = R + P'_2 \\ z &= z(\theta, \tau) = P'_3 \end{aligned} \quad (5)$$

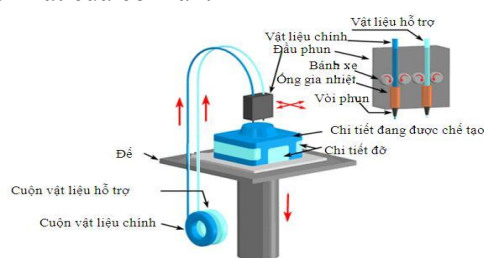
Trong đó,

$$\begin{aligned} P'_1 &= [\cos\tau + u_1^2(1 - \cos\tau)]P_1 + [u_2u_1(1 - \cos\tau) - u_3\sin\tau]P_2 \\ &\quad + [u_3u_1(1 - \cos\tau) + u_2\sin\tau]P_3 \\ P'_2 &= [\cos\tau + u_1^2(1 - \cos\tau)]P_2 + [u_2u_1(1 - \cos\tau) + u_3\sin\tau]P_1 \\ &\quad + [u_3u_1(1 - \cos\tau) - u_1\sin\tau]P_3 \\ P'_3 &= [\cos\tau + u_3^2(1 - \cos\tau)]P_3 + [u_3u_1(1 - \cos\tau) - u_2\sin\tau]P_1 \\ &\quad + [u_3u_2(1 - \cos\tau) + u_1\sin\tau]P_2 \end{aligned}$$

Để có được hình dạng tròn cho con lăn có hiệu quả tốt nhất có thể, sử dụng phương trình bề mặt của con lăn và xác định bán kính lớn nhất và nhỏ nhất của con lăn.



Hình 6. Thông số bánh xe [5]



Hình 7. Nguyên lý in 3D công nghệ FDM

Các thông số của bánh xe được xác định thông qua các thông số L_r, α, l_w như trên Hình 6. Trong đó, L_r là chiều dài con lăn; α là góc giữa trục con lăn và trục trung tâm; l_w bề rộng của bánh xe. Thông qua các thông số này, có thể xác định bán kính lớn nhất và nhỏ nhất của con lăn. Khi biết số lượng con lăn N , chiều dài con lăn có thể xác định bằng công thức sau [10]:

$$L_r = 2R \frac{\sin \frac{\varphi}{2}}{\sin \alpha} = 2R \frac{\sin \frac{\pi}{N}}{\sin \alpha} \quad (6)$$

$$\varphi = \frac{2\pi}{N}$$

Bề rộng của bánh xe sẽ được xác định :

$$l_w = L_r \cos \alpha = 2R \frac{\sin \frac{\pi}{N}}{\tan \alpha} \quad (7)$$

Từ đó, bán kính lớn nhất của con lăn được xác định như sau [4]:

$$r_{max} = R - \left(\frac{L_r \sin \alpha}{2 \tan \frac{\pi}{2}} \right) \quad (8)$$

Và bán kính nhỏ nhất của con lăn được xác định như sau:

$$r_{min}^2 + (2R - 2r_{max})r_{min} + R^2 (\sin \frac{\varphi}{2})^2 + r_{max}^2 - 2Rr_{max} = 0 \quad (9)$$

Qua tính toán, các thông số bánh xe mecanum đề xuất gồm:

Số lượng con lăn $N = 10$; Góc giữa trục con lăn và trục bánh xe $\alpha = 45^\circ$; Bán kính bánh xe $R = 40 \text{ mm}$; Bán kính con lăn ở tâm $r_{max} = 7 \text{ mm}$; Bán kính con lăn ở đầu $r_{min} = 5 \text{ mm}$; Chiều dài con lăn $L_r = 31 \text{ mm}$; Bề rộng bánh xe $l_w = 36 \text{ mm}$. Bánh xe mecanum đề xuất được thiết kế trên phần mềm SolidWorks như thể hiện trên Hình 5.

3.2. Chế tạo bánh xe mecanum bằng công nghệ in 3D FDM

Công nghệ in 3D FDM (như trên Hình 7) chế tạo chi tiết bằng cách đun nhựa nóng chảy rồi hoá rắn từng lớp tạo nên cấu trúc chi tiết dạng khối. Vật liệu sử dụng ở dạng sợi có đường kính từ $1,75 - 3 \text{ mm}$, được dẫn từ một cuộn nhựa tới đầu đùn, chuyển động điều khiển bằng động cơ bước hoặc servo. Khi sợi được cấp tới đầu đùn nó được làm nóng, sau đó được đẩy ra qua vòi đùn lên mặt phẳng [8].

File thiết kế bánh xe mecanum được lưu dưới định dạng STL và được tạo chương trình in 3D bằng phần mềm Simplify 3D. Bánh xe mecanum được chế tạo bằng máy in 3D công nghệ FDM bằng máy in 3D Creality CR10S. Vật liệu sử dụng cho chế tạo bánh xe mecanum bằng in 3D FDM là nhựa polylactide (PLA). Nhựa PLA là nhựa polyester nhiệt dẻo phân hủy sinh học có nguồn gốc từ các nguồn tài nguyên tái tạo như tinh bột ngô, rễ sắn. Nhựa PLA có nhiệt độ chuyển pha $60 - 65^\circ\text{C}$, nhiệt độ nóng chảy $173 - 178^\circ\text{C}$ và mô đun kéo căng $2,7-16 \text{ MPa}$ [11]. PLA có thể chịu được nhiệt độ 110°C [12], PLA có khả năng in dễ dàng do đó được sử dụng rộng rãi trong in 3D [13].

Các thông số thiết lập cho quá trình in 3D bánh xe mecanum bao gồm: Đường kính đầu in: $0,4\text{ mm}$; Chiều dày lớp in: $0,2\text{ mm}$; Tốc độ in: 60 mm/s ; Đường sợi nhựa: $1,75\text{ mm}$; Kiểu đường dẫn: Rectilinear; Nhiệt độ in: 205°C . Chi tiết của bánh xe mecanum được in thành công trên máy in 3D-FDM với các thông số in như đã đề cập ở trên. Bánh xe mecanum đã được lắp ráp hoàn thiện như thể hiện trên Hình 8.



Hình 8. Bánh xe mecanum được chế tạo hoàn thiện bằng in 3D FDM

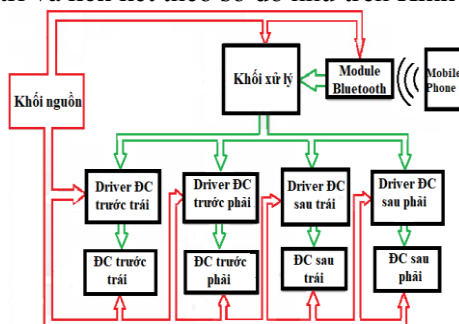


Hình 9. Robot tự hành sử dụng bánh xe mecanum được chế tạo bằng in 3D FDM

4. Ứng dụng cho robot tự hành

Để kiểm nghiệm khả năng di chuyển đa hướng của bánh xe mecanum đã chế tạo, nhóm tác giả đã đề xuất ứng dụng cho robot tự hành có kết cấu như trên Hình 9.

Hệ thống điều khiển robot tự hành gồm các khối chức năng sau: Khối nguồn cung cấp nguồn điện cho toàn hệ thống; Khối xử lý làm nhiệm vụ tính toán, xử lý, lưu trữ thông tin và đưa ra tín hiệu điều khiển; Các driver điều khiển động cơ theo tín hiệu điều khiển của khối xử lý; Module bluetooth truyền nhận thông tin điều khiển theo chuẩn Bluetooth giữa khối xử lý và điện thoại; Các động cơ điện chuyển đổi điện thành cơ năng dưới sự điều khiển của các Driver. Trong đó, các khối chức năng được bố trí và liên kết theo sơ đồ như trên Hình 10.



Hình 10. Các khối điều khiển của robot tự hành

Căn cứ vào sơ đồ khối, thông số kỹ thuật, yêu cầu bài toán, tính ổn định và chi phí hệ thống điều khiển, chúng tôi chọn các thiết bị, linh kiện chính chế tạo hệ thống điều khiển robot tự hành gồm: Robot sử dụng bánh xe mecanum được dẫn động bằng bốn động cơ bước NEMA 17 với bốn driver điều khiển DRV8825. Arduino Mega 2560 làm nhiệm vụ tính toán, điều khiển, lưu trữ thông tin trong hệ thống. Ngoài ra, để cấp nguồn cho các động cơ bước và robot, chúng tôi sử dụng pin Li-Po 3S cấp điện áp 12V . Robot được điều khiển không dây thông qua module truyền thông Bluetooth HC-05.

5. Kết quả và bàn luận

Bảng 1. Kết quả thực nghiệm thời gian chuyển hướng và bán kính quay vòng của robot tự hành sử dụng loại bánh xe khác nhau

Đối tượng thử nghiệm		Thời gian chuyển hướng 180° trung bình	Bán kính quay vòng trung bình
Robot dùng bánh xe mecanum	Bề mặt bê tông	1,1 s	11 cm
	Bề mặt gạch hoa	1,4 s	12 cm
Robot dùng bánh xe thường	Bề mặt bê tông	1,6 s	19 cm
	Bề mặt gạch hoa	1,7 s	20 cm

Để đánh giá hoạt động của robot tự hành sử dụng bánh xe mecanum được chế tạo bằng phương pháp in 3D, nhóm tác giả đã tiến hành so sánh quá trình chuyên hướng của robot tự hành sử dụng bánh xe thông thường và robot tự hành sử dụng bánh xe mecanum có các thông số cơ bản tương tự nhau gồm: Chiều dài cơ sở thân xe 20 cm, chiều rộng thân xe 15 cm, trọng lượng xe 800 g, đường kính bánh xe 80 mm. Kết quả thử nghiệm thể hiện trên Bảng 1.

Với kết quả thực nghiệm cho thấy, robot tự hành sử dụng bánh xe mecanum có thời gian chuyển hướng và bán kính quay xe nhỏ hơn so với xe sử dụng bánh xe thông thường. Sự khác biệt khi sử dụng hai loại bánh xe này là do các bánh xe thông thường không có khả năng điều khiển các bậc tự do một cách độc lập, bởi vì các bánh xe thường không thể di chuyển theo hướng song song với trục của bánh xe. Đây được gọi là những ràng buộc phi holonomic của bánh xe mà khiến cho robot không di chuyển vuông góc hướng chuyển động của nó được.

6. Kết luận

Bài báo đã đề xuất thiết kế cho chế tạo bánh xe mecanum bằng phương pháp in 3D FDM với vật liệu nhựa PLA. Kết quả thực nghiệm cho thấy, Robot sử dụng bánh xe mecanum in 3D đã chế tạo đã giữ được hướng và chuyên hướng di chuyển theo chương trình điều khiển. Tuy nhiên, khi di chuyển ngang vẫn có sai lệch ít do đặc tính trượt của bánh xe. Định hướng nghiên cứu tiếp theo của nhóm tác giả là thử nghiệm chế tạo bánh xe mecanum với các vật liệu nhựa in 3D khác nhau để hạn chế ảnh hưởng của ma sát mặt đường lên khả năng truyền động của bánh xe, cũng như khảo sát ảnh hưởng của các thông số thiết kế đến hoạt động của bánh xe.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] T. H. Y. Zhang, "Research on a Tracked Omnidirectional and Cross-Country Vehicle," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 87, pp. 18-44, 2015.
- [2] I. D. F. Adascalitei, "Practical Applications for Mobile Robots based on Mecanum Wheels – a Systematic Survey," in International Conference On Innovations, Recent Trends And Challenges In Mechatronics, Mechanical Engineering And New High-Tech Products Development – MECAHITECH'11, 2011.
- [3] J. B. Song and K. S. Byun, "Design and Control of a Four-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot with Steerable Omnidirectional Wheels," *Journal of Robotic Systems*, vol. 21, no. 4, pp. 193-208, 2004.
- [4] I. Doroftei and S. Bogdan, "Design, modeling and control of an omni-directional mobile robot," *Solid State Phenomena*, vol. 166, pp. 173-178, 2010.
- [5] I. Doroftei, V. Grosu and V. Spinu, *Omnidirectional mobile robot-design and implementation*, INTECH Open Access Publisher, 2007.
- [6] S. L. Dickerson and B. D. Lapin, "Control of an omni-directional robotic vehicle with Mecanum wheels," *NTC '91 - National Telesystems Conference Proceedings*, 1991, pp. 323-328, doi: 10.1109/NTC.1991.148039.
- [7] S. D. Kamdar, "Design and manufacturing of a Mecanum wheel for the magnetic climbing robot," Embry-Riddle Aeronautical University, Daytona Beach, Florida, 2015.
- [8] A. E. Costa, A. F. da Silva, and O. S. Carneiro, "A study on extruded filament bonding in fused filament fabrication," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 25 no. 3, pp. 555-565, 2019, doi: [10.1108/RPJ-03-2018-0062](https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2018-0062)
- [9] A. Ramirez-Serrano, R. Kuzyk, and G. Solana, "Elliptical Double Mecanum Wheels for Autonomously Traversing Rough Terrains," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 43, no. 16, pp. 7-12, 2010.
- [10] A. Gferrer, "Geometry and kinematics of the Mecanum wheel," *Computer Aided Geometric Design*, vol. 25, no. 9, pp. 784-791, 2008.
- [11] J. C. Middleton and A. J. Tipton, "Synthetic biodegradable polymers as orthopedic devices," *Biomaterials*, vol. 21, no. 23, pp. 2335-2346, 2000.
- [12] G. L. Fiore, F. Jing, V. G. Young, C. J. Cramer, and M. A. Hillmyer, "High T g aliphatic polyesters by the polymerization of spirolactide derivatives," *Polymer Chemistry*, vol. 1, no. 6, pp. 870-877, 2010.
- [13] R. A. Giordano, B. M. Wu, S. W. Borland, L. G. Cima, E. M. Sachs, and M. J. Cima, "Mechanical properties of dense polylactic acid structures fabricated by three dimensional printing," *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, vol. 8, no. 1, pp. 63-75, 1997, doi: [10.1163/156856297X00588](https://doi.org/10.1163/156856297X00588).