

THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO ROBOT BẦY ĐÀN ỨNG DỤNG TRONG NGHIÊN CỨU

DESIGN AND FABRICATE SWARM ROBOT FOR RESEARCH APPLICATION

Đặng Trí Dũng, Nguyễn Minh Triều, Nguyễn Trường Thịnh*

Viện Công nghệ Thông minh và Tương tác, Trường Đại học Kinh tế Thành phố Hồ Chí Minh

TÓM TẮT

Swarm robotics là một lĩnh vực nghiên cứu đa ngành tập trung vào vấn đề xây dựng các bộ điều khiển phi tập trung được lấy cảm hứng từ các loài sinh vật sống thành bầy trong tự nhiên để điều khiển một số lượng lớn các robot cùng phối hợp thực hiện một nhiệm vụ chung. Phần lớn các đánh giá của những giải thuật này yêu cầu phải thực hiện trên bầy robot có số lượng cá thể lớn, dẫn đến việc các thực nghiệm robot bầy đàn trở nên khá tốn kém. Bài báo này trình bày về quá trình thiết kế và chế tạo một bầy đàn robot với mục đích ứng dụng trong nghiên cứu. Các robot trong bầy đàn này được phát triển để có khả năng tự tổ chức và làm việc cùng nhau để thực hiện các nhiệm vụ nghiên cứu phức tạp. Bài báo bao gồm thông tin về quá trình thiết kế, điều khiển và tích hợp các cảm biến, cũng như về việc áp dụng bầy đàn robot này trong các ứng dụng nghiên cứu cụ thể. Các kết quả và lợi ích của việc ứng dụng robot bầy đàn trong nghiên cứu cũng được thảo luận trong bài báo.

Từ khóa: Robot; Bầy đàn; Thiết kế; Chế tạo.

ABSTRACT

Swarm robotics is a multidisciplinary research field focused on the development of decentralized controllers inspired by natural organisms that live in swarms, aiming to control a large number of robots collaboratively in performing common tasks. Most evaluations of these algorithms require testing on large groups of robots, making swarm robotics experiments relatively costly. This paper presents the process of designing and manufacturing a swarm of robots for research purposes. These robots are developed to possess self-organization capabilities and work together to perform complex research tasks. The paper includes information about the design, control, sensor integration, as well as the application of this robot swarm in specific research scenarios. The results and benefits of applying swarm robotics in research are also discussed in the paper.

Keywords: Robot; Swarm; Design; Fabricate.

1. TỔNG QUAN

Trong lĩnh vực điều khiển hệ đa robot, việc điều phối một lượng lớn các robot, từ vài chục đến vài nghìn cá thể, thông qua các bộ điều khiển phi tập trung dựa trên khả năng giao tiếp cục bộ của chúng, đang được coi là một hướng tiếp cận mới với robot bầy đàn. Cách tiếp cận này thường lấy cảm hứng từ các hành vi tập thể của sinh vật tự nhiên, như các loài sống thành bầy, có khả năng tự tổ chức. Tính tự tổ chức này đang được nghiên cứu và ứng dụng trong hệ điều khiển đa robot, tuy vẫn còn khá mới và chưa phổ biến rộng rãi. Hệ điều khiển của robot bầy đàn không tập trung vào một hệ thống xử lý trung tâm. Thay vào đó, nó dựa vào khả năng giao tiếp giữa các robot để họ có thể trao đổi thông tin và hợp tác để hoàn thành nhiệm vụ chung. Loại hệ điều khiển này được gọi là hệ điều khiển phân tán. Nhờ vào tính tự tổ chức và hệ điều khiển phân tán, hệ robot bầy đàn có ba ưu điểm nổi trội so với các hệ đa robot khác: khả năng mở rộng, tính linh hoạt và tính ổn định [1]. Kilobot là một robot cực kì thích hợp trong việc phục vụ nghiên cứu bộ điều khiển phi tập trung cho robot bầy đàn vì sự nhỏ gọn, thiết kế đơn giản của nó. Được giới thiệu lần đầu tiên bởi Rubenstein và đồng sự [2], và các nghiên cứu xoay quanh xây dựng hành vi tập thể cho Kilobot cũng được phát triển. Khác với các robot di động thông thường có chuyển động dựa trên truyền động hai bánh vi sai, chuyển động của Kilobot dựa vào chân áp điện rung động (chuyển động thanh trượt). Điều này khiến robot di chuyển rất chậm và không có hệ thống hồi tiếp cho kiểu chuyển động này, dẫn đến là các thuật toán áp dụng trên robot này cũng khó áp dụng trên các hệ robot có sẵn khác. E-puck 2 [3] của Francesco Mondada và cộng sự từ Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Thụy Sĩ (EPFL) hay Cellulo [4] của Quỹ Khoa học Quốc gia Thụy

Sĩ, Ayberk Özgür là những ví dụ khác cho robot bầy đàn. E-puck 2 có kích thước nhỏ (Φ 70mm, cao 45 mm), sử dụng bộ vi sai hai bánh với một bộ cảm biến phong phú: 8 cảm biến tiệm cận hồng ngoại, camera màu CMOS, 3 x microphone, điều khiển từ xa IR, gia tốc kế 3D và tất nhiên có bộ xử lý mạnh mẽ được cung cấp bởi dsPIC 30F6014A. Tuy nhiên, thực tế cho thấy, các nghiên cứu này thường dựa trên mô phỏng hoặc sử dụng số lượng cá thể robot thấp, do giá thành của chúng khá đắt đỏ. Ví dụ, hệ robot bầy đàn Cellulo đi kèm với hệ thống định vị trung tâm, điều này giới hạn khả năng mở rộng của nó.

Ở Việt Nam, nghiên cứu về robot bầy đàn tại các trường đại học và viện nghiên cứu còn hạn chế. Các nghiên cứu về hệ nhiều robot thường tập trung vào việc phát triển bộ xử lý tập trung thay vì tập trung vào bộ xử lý phân tán. Mặc dù đã có một số ít bài báo công bố về nghiên cứu robot bầy đàn [5-7], nhưng chúng thường dừng lại ở mức mô phỏng. Nghiên cứu về robot bầy đàn không chỉ liên quan đến việc nghiên cứu hành vi của từng robot mà còn nghiên cứu về hành vi của toàn bộ bầy – hành vi tập thể, điều này rất quan trọng cho việc ứng dụng trong việc điều phối các hệ thống robot hoạt động hàng ngày, ví dụ như robot trong nhà máy, kho hàng, chuỗi cung ứng, và nhiều ứng dụng khác. Với sự tập trung vào số lượng lớn robot, chúng cần tự tổ chức, tự cấu hình và điều khiển phi tập trung. Mặc dù có tiềm năng và khả năng ứng dụng rộng rãi của nghiên cứu về robot bầy đàn, nhưng nó hiện đang đối diện với một số hạn chế, bao gồm vấn đề về giá cả và thiếu sự quan tâm trong nghiên cứu tại Việt Nam, cũng như sự hiếm hoi của các ứng dụng thực tế của robot bầy đàn trên toàn thế giới. Ngoài ra, tính phức tạp trong thiết kế và điều khiển của hệ thống cũng là một thách thức đáng kể. Vì vậy, nghiên cứu này đề xuất xây dựng

một nền tảng robot di động có kích thước nhỏ và chi phí hợp lý, nhằm hỗ trợ nghiên cứu trong lĩnh vực robot bầy đàn. Nền tảng này bao gồm thiết kế phần cứng và các tác vụ được thiết kế phù hợp với nó, cũng như đáp ứng nhu cầu của nhiều nghiên cứu trước đây.

2. YÊU CẦU THIẾT KẾ ROBOT BẦY ĐÀN

Khi các lợi ích của hệ thống robot bầy đàn được thảo luận, thường có ba lợi thế chính được đề cập [8], đó là: ổn định, linh hoạt và mở rộng. Điểm ổn định xuất phát từ tính dự phòng và sự thiếu vắng điểm lỗi đơn lẻ trong đàn robot đồng đều. Ngay cả khi có lỗi nhỏ, hiệu suất tổng thể vẫn giữ nguyên. Tính linh hoạt phát sinh từ việc các robot trong đàn gần như giống hệt nhau, cho phép mỗi con thực hiện nhiều vai trò và thích ứng với các nhiệm vụ mà không cần phải tùy chỉnh phần cứng. Khả năng mở rộng đến từ việc các phương pháp điều khiển của đàn robot linh hoạt với bất kỳ quy mô nào. Giao tiếp trong đàn có thể là rõ ràng hoặc ngầm, tùy thuộc vào việc thông điệp được gửi trực tiếp hay hành vi được điều chỉnh dựa trên các dấu hiệu cảm nhận được, tạo điều kiện cho sự hợp tác. Stigmergy, hoặc giao tiếp thông qua môi trường, cũng đóng vai trò trong sự phối hợp của đàn robot, chẳng hạn như dấu pheromone ở kiến hoặc tín hiệu trong vật liệu xây dựng [9].

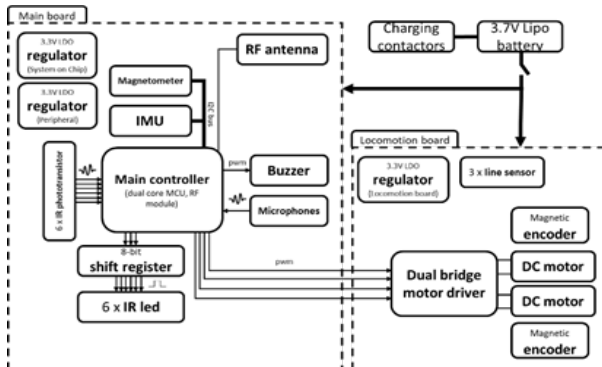
3. THIẾT KẾ PHẦN CỨNG

Về mặt tổng thể, thiết kế phần cứng cho robot bầy đàn có nhiều khác biệt so với robot đơn lẻ. Trong bầy robot, phần cứng có thể đa dạng về mặt đồng nhất hoặc không đồng nhất, nhưng nó phải đảm bảo sự đơn giản, nhỏ gọn và chi phí thấp. Nghiên cứu này tập trung vào thiết kế một nền tảng robot bầy đàn đồng nhất với mục tiêu sử dụng trong môi trường giáo dục và phòng thí nghiệm với chi phí thấp. Hơn nữa,

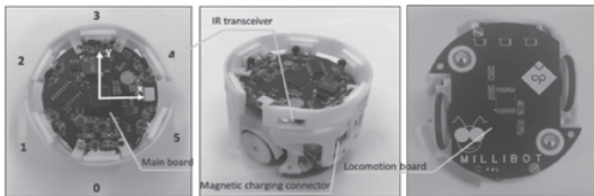
việc thiết kế phải hỗ trợ việc tháo rời và lắp ráp dễ dàng, vì sản xuất và lắp ráp một lượng lớn robot có thể tốn thời gian và chi phí. Mục tiêu của nghiên cứu là tạo ra một bo mạch hoàn chỉnh với đầy đủ các bộ phận cảm biến, vi điều khiển và module chức năng để các cá thể robot có kích thước nhỏ gọn. Ngoài ra, năng lượng và khả năng di chuyển cũng được xem xét để đảm bảo kích thước của robot. Thiết kế của Millibot tập trung vào ba mục tiêu chính: Hỗ trợ mở rộng các hoạt động của đàn robot, linh hoạt trong việc chọn lựa hệ thống truyền thông và khả năng thực hiện các tác vụ dài hạn.

3.1. Thiết kế hệ thống điện cho cá thể robot

Với các yêu cầu được nêu ở các phần trên thì hệ thống điện của robot có thể được đề xuất như hình 1. Để có thể tối ưu hóa kích thước của robot, tất cả các cảm biến, các module chức năng, cơ cấu chấp hành đều phải được tích hợp lên trên các bo mạch. Dựa trên hệ thống đề xuất ở hình 1, các thành phần có thể onboard bao gồm: Bộ xử lý trung tâm, bộ phận truyền nhận dữ liệu bằng ánh sáng hồng ngoại, bộ phận truyền nhận dữ liệu bằng âm thanh, bộ thu/phát WiFi, IMU, driver và bộ nguồn. Việc chọn lựa các thành phần cho hệ thống điện nêu trên phải đáp các tiêu chí để xây dựng một hệ thống robot bầy đàn được nêu ở phần tổng quan. Hệ thống điện của cá thể robot được chia làm hai phần chính phân bố trên hai bo mạch phân biệt có chức năng cụ thể và không thể tách rời: Locomotion board và main board. Bo mạch chính chứa các bộ phận chức năng bao gồm bộ điều khiển chính tích hợp các chuẩn truyền thông WiFi và Bluetooth, cảm biến và hệ thống giao tiếp cục bộ giữa các robot dựa trên ánh sáng hồng ngoại và âm thanh. Trong khi đó, locomotion board có đầy đủ chức năng chịu trách nhiệm cho việc di chuyển của robot. Thiết kế của các cá thể robot được biểu diễn trên hình 2.



Hình 1. Hệ thống điện của Millibot gồm hai phần chính: Main board và locomotion board.



Hình 2. Millibot với main board (trái) được đặt phía trên và locomotion board (phải) được đặt phía dưới của robot.

3.2. Bộ điều khiển trung tâm

Việc chọn lựa bộ điều khiển trung tâm cho cá thể robot phụ thuộc vào các tác vụ mà nó đảm nhận và khả năng xử lý của nó. Theo các chỉ tiêu về chi phí, tốc độ xử lý và các chức năng có sẵn của nó, bộ điều khiển trung tâm của Millibot được cung cấp bởi dòng Espressif's System on Chip (SoC) ESP32 có bộ vi xử lý Xtensa 32-bit lõi kép với tốc độ có thể thiết lập lên tới 240 MHz. Để giảm kích thước của mainboard, ESP32-PICO-D4 được lựa chọn vì nó được tích hợp tất cả các thành phần ngoại vi tối thiểu để bộ điều khiển có thể hoạt động trong 01 package duy nhất bao gồm oscillator, bộ nhớ flash 4MB, các tụ lọc và mạch matching tần số RF. ESP32 hỗ trợ giao tiếp WiFi 2.4 GHz và Bluetooth low energy trong cùng 01 package. Module ESP32-PICO-D4 được đóng gói dưới dạng 01 chip PLA 48-pins nhỏ gọn với kích thước 7mm x 7mm.

3.3. Hệ thống di chuyển

Millibot sử dụng hai động cơ DC có hộp giảm tốc (9161C), được đặt song song và không đồng trục nhằm giảm tổng kích thước của robot. Hai bánh lăn bằng bi inox được đặt đối xứng để giúp robot duy trì cân bằng và tạo mô hình skid-steered. Với tính ổn định cơ học và khả năng tiếp cận, mô hình skid-steered là một trong những mô hình phổ biến nhất được sử dụng trong robot di động. Sự phức tạp của mô hình tương tác giữa bánh xe và địa hình được biểu diễn thông qua tham số độ ma sát bề mặt khi robot di chuyển trên đường cong, là một vấn đề khó giải quyết trong mô hình này. Mô hình này trở nên phức tạp do bánh xe của nền tảng skid-steered phải trượt ngang và/hoặc dọc khi thực hiện chuyển động theo đường cong. Tuy nhiên, do giới hạn tính toán của từng robot trong bầy đàn, chuyển động theo đường cong hiếm khi được sử dụng trong các ứng dụng. Về chuyển động tịnh tiến và quay tại chỗ, ngay cả khi các động cơ không quay quanh cùng một trục, robot vẫn có lực và mô-men tương tự như robot có bánh di chuyển kiểu vi sai. Do đó, mô hình dẫn động vi sai của hai bánh vẫn có thể áp dụng trong trường hợp này. Gọi V và ω biểu diễn vận tốc góc và vận tốc tuyến tính của một cá thể robot bất kỳ, vận tốc bánh xe bên phải và bên trái, $\dot{\theta}_r$ và $\dot{\theta}_l$, có thể được xác định thông qua phương trình 1.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r_w} & -\frac{r_r}{r_w} \\ \frac{1}{r_w} & \frac{r_r}{2r_w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

Trong đó, r_r và r_w lần lượt là khoảng cách giữa hai bánh xe và bán kính của mỗi bánh xe.



Để điều khiển sự di chuyển của robot, chúng ta tích hợp một chip điều khiển dạng cầu H kép (DRV8833) vào mạch. Chip này được sử dụng để giới hạn dòng điện cảm ứng cho mỗi cầu H. Điện áp cung cấp cho mạch điều khiển được quy định ở mức 3,3V và dòng điện tối đa cung cấp cho mỗi động cơ được giới hạn trong khoảng 133 mA. Với bánh xe có đường kính 18mm, tốc độ trung bình của bầy đàn là khoảng 25 cm/s. Ngoài ra, có thể sử dụng đầu vào của bộ điều khiển để điều khiển tốc độ động cơ thông qua PWM 8-bit tích hợp trong bộ điều khiển trung tâm. Phản hồi về tốc độ được cung cấp bởi bộ encoder từ một kênh trên mỗi động cơ. Để giúp robot di chuyển theo quỹ đạo mong muốn, chúng ta áp dụng hai bộ điều khiển vòng kín vận tốc độc lập (bộ điều khiển PID) cho mỗi bánh xe. Tuy nhiên, vấn đề chính trong thiết kế của Millibot là tín hiệu phản hồi chỉ được cung cấp từ bộ mã hóa một kênh, trong khi hầu hết các platform mobile robot trước đây sử dụng ít nhất hai kênh cho bộ encoder. Do đó, bộ điều khiển thông thường chỉ có khả năng xác định tốc độ chứ không thể xác định vận tốc. Điều này dẫn đến việc robot không thể đảo hướng bánh xe trong lúc di chuyển nếu sử dụng bộ PID thông thường.

Để có thể điều khiển động cơ quay theo hướng mong muốn, tham số virtual direction sign được đưa vào. Ý tưởng chính của phương pháp này là tạo điểm đặt tạm thời ở tốc độ bằng 0 cho bộ điều khiển PID khi động cơ đảo chiều quay của nó. Gọi $S_L, S_R \in \{1, -1\}$ lần lượt là virtual direction sign của bánh xe trái và phải, vận tốc bánh xe trái và phải có thể được xác định bằng phương trình 2.

$$\dot{\theta}_L = S_L \frac{2\pi r_w}{T} m_g \quad (2)$$

Với T là thời gian cho một vòng quay của trục động cơ và m_g là tỷ số truyền của động cơ. Virtual direction sign sẽ không đổi cho đến

khi động cơ dừng. Tại thời điểm ngay khi động cơ dừng, điểm đặt mong muốn sẽ được thiết lập và virtual direction sign sẽ thay đổi. Bằng phương pháp này, tốc độ phản hồi của bộ điều khiển PID sẽ bị giảm đi và phụ thuộc vào tốc độ phản hồi của phương pháp zero speed detection được sử dụng trong bộ điều khiển. Trong thực tế, do giới hạn phần cứng đơn giản, zero speed không thực sự được phát hiện, chỉ có thể phát hiện T vượt quá một ngưỡng cho trước T_0 và ngưỡng này phụ thuộc vào tốc độ điều khiển tối thiểu của động cơ. Trong trường hợp của Millibot, với $m_g = 1:171$ và tốc độ tuyến tính tối thiểu trung bình của Millibot là 10 cm/s, nên T_0 được đặt 40ms.

3.4. Hệ thống năng lượng

Nghiên cứu này sử dụng pin Lipo làm nguồn năng lượng cho robot vì nó có khả năng chịu tải tốt và hoạt động ở mức điện áp từ 4.2V đến 3.3V, phù hợp với tất cả các linh kiện trong Millibot. Một bộ pin Li-Po 3.7V 2 cell nối tiếp có kích thước 38 x 25 x 12 mm và dung lượng 1000mAh được dùng để cấp nguồn cho Millibot. Mặc dù các thành phần điện tử trong robot có dải điện áp hoạt động khác nhau, nhưng chúng đều có thể hoạt động bình thường ở 3.3V, vì vậy nghiên cứu sử dụng các bộ điều chỉnh áp với áp rơi thấp giá rẻ. Các bộ điều chỉnh áp thông thường như AMS1117 hoặc LV317 không thích hợp trong trường hợp này do độ rơi áp cao. Thay vào đó, nghiên cứu sử dụng RT9013-33G, một bộ điều chỉnh áp phù hợp nhất với dải điện áp hoạt động rộng từ 2.2V đến 5.0V và đầu ra cố định ở 3.3V. Cụ thể, điện áp rơi tối đa trên đầu ra là 250mV khi dòng cực đại lên tới 500mA.

3.5. Phương thức truyền thông giữa các cá thể

Trong robot bầy đàn, nhiệm vụ chủ yếu được thực hiện thông qua sự cộng tác giữa các

robot. Với sự thiếu hụt của bộ điều khiển trung tâm, giao tiếp giữa các robot trở thành một yếu tố quan trọng cho sự hoạt động của từng cá thể trong bầy. Giao tiếp này có thể được chia thành hai loại chính: trực tiếp (explicit) và gián tiếp (implicit). Trong nhiều nghiên cứu, giao tiếp dựa trên phương pháp sử dụng pheromone, như kiến, đã được áp dụng cho robot. Tuy nhiên, phương pháp này cũng mang theo nhiều hạn chế, bao gồm khả năng truyền tải thông tin hạn chế (sensor chỉ có thể phát hiện sự có hoặc không có của chất giả pheromone), cũng như khả năng chỉ thị đích xác cá thể cần tiếp nhận thông tin. Phương pháp truyền thông qua sóng radio, như wifi, Bluetooth, RF, NFC cũng được sử dụng rộng rãi trong robot. Tuy nhiên, những phương pháp này đòi hỏi năng lượng tiêu thụ cao và có thể trở nên quá tải khi số lượng robot trong bầy tăng lên. So với những phương pháp giao tiếp giữa các robot đã được đề cập, sử dụng hồng ngoại trở thành một lựa chọn hợp lý cho việc trao đổi thông tin giữa các robot trong các ứng dụng bầy đàn. Điều này đặc biệt thích hợp với các robot có kích thước nhỏ sử dụng trong môi trường phòng thí nghiệm do tính linh hoạt và khả năng mở rộng của nó.

Cảm biến hồng ngoại đã được lựa chọn vì chúng có chi phí thấp, đáng tin cậy trong phạm vi cho phép, và dễ dàng trong việc thiết kế và cài đặt. Môi trường hoạt động của các cá thể trong bầy được giả định và đã được xác định trước, bao gồm thông tin về không gian hoạt động với sự giới hạn. Do đó, thông tin về môi trường xung quanh robot là ổn định và không thay đổi. Ngoài ra, do mỗi cá thể robot được giả định có cấu trúc đơn giản và xử lý các nhiệm vụ với tài nguyên tối ưu, sai số trong việc đo khoảng cách chỉ cho phép một mức độ nhất định (lên đến 1cm). Millibot được trang bị 6 bộ thu phát hồng ngoại được phân bố đều quanh bo mạch chính của robot. Mỗi bộ thu phát bao gồm một đèn LED phát hồng ngoại và một transistor hồng ngoại được sử dụng để thu sóng

ánh sáng hồng ngoại, với góc mở khoảng 60 độ. Tất cả các đèn LED phát hồng ngoại được điều khiển thông qua các bộ chuyển tiếp bit 8-bit serial-in, parallel-out, có khả năng cung cấp tần số chuyển đổi đầu ra lên đến 1kHz. Sáu transistor hồng ngoại này kết nối trực tiếp với 6 kênh ADC riêng biệt 12 bit trên bo mạch chính. Nhờ vào chức năng direct memory access, dữ liệu từ các kênh ADC này có thể được lưu trữ trực tiếp vào bộ nhớ mà không cần sự can thiệp của CPU, dẫn đến tốc độ lấy mẫu tối đa ở tất cả các kênh lên đến 20kHz. Ở tốc độ truyền 1kHz, trong không gian hoạt động của Millibot, với khoảng cách tối đa lên đến 45 cm, có thể truyền dữ liệu từ tất cả các bộ thu phát hồng ngoại. Tín hiệu phản xạ có thể được nhận biết từ khoảng cách 15 cm. Đo khoảng cách ước tính dựa trên các giá trị mẫu analog được đo từ cường độ ánh sáng phản xạ từ các vật thể trước mắt.

4. CÁC TÁC VỤ CÓ KHẢ NĂNG MỞ RỘNG CƠ BẢN

Như đã đề cập trước đó, quá trình vận hành một lượng lớn robot bầy đàn có thể mất nhiều thời gian khi sử dụng công tắc bật/tắt nguồn truyền thống với công tắc vật lý. Bên cạnh đó, robot có thể được cấu hình trong một khu vực đóng cửa đủ lớn để hoạt động, giới hạn sự tương tác giữa con người và toàn bộ bầy robot. Điều này chỉ cho phép người dùng can thiệp vào bầy robot sau khi đã bắt đầu quá trình sử dụng. Một hạn chế khác của công tắc bật/tắt thông thường là robot tiêu thụ năng lượng nhanh chóng trong quá trình chờ khởi động toàn bộ bầy robot. Hơn nữa, trong quá trình thử nghiệm thuật toán, người dùng thường mất thời gian để phát triển phần mềm, và trong thời gian này, robot nếu không được tắt hoặc không có chế độ chờ sẽ nhanh chóng tiêu hao năng lượng và cạn pin trước khi dùng lần tiếp theo có thể diễn ra hoàn toàn. Do đó, việc có một cơ chế chuyển đổi chế độ hoạt động cho bầy robot là điều cần thiết cho việc vận hành chúng. 

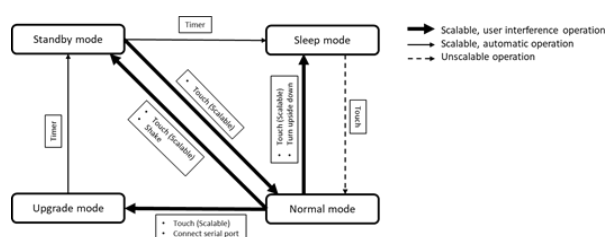
Nghiên cứu này giới thiệu 04 chế độ hoạt động của bầy robot có thể được chỉ định bởi người dùng trong quá trình hoạt động được minh họa rõ ràng trong Hình 3:

- Chế độ hoạt động bình thường (normal mode): Tất cả các thiết bị ngoại vi ở chế độ mở và hoạt động theo chương trình chính. Ở chế độ này, bộ điều khiển trung tâm, Esp32, ở chế độ hoạt động bình thường (tất cả các chức năng hoạt động bình thường theo chương trình chính).

- Chế độ nâng cấp firmware (upgrade mode): Tất cả các thiết bị ngoại vi và locomotion board của robot ngừng hoạt động. Trong khi đó, Esp32 vẫn ở chế độ hoạt động bình thường để thiết lập mesh network dựa trên WiFi được sử dụng để phục vụ quá trình nâng cấp firmware.

- Chế độ chờ (idle mode): Thay vì tắt robot bằng công tắc vật lý, chế độ này được sử dụng khi người dùng muốn bầy đàn nghỉ ngơi trong khi người dùng thực hiện các nhiệm vụ khác như phát triển phần mềm hoặc sửa lỗi robot. Nguồn đánh thức (wake-up source) được đặt trước khi bộ điều khiển trung tâm Esp32 chuyển sang chế độ ngủ sâu (deep sleep mode). Khi Esp32 ở chế độ này, chỉ có bộ xử lý ultra low power (ULP) coprocessor và mô-đun RTC được phép hoạt động.

- Chế độ ngủ (sleep mode): Chỉ một số thành phần thiết yếu của robot được duy trì hoạt động khi robot ở chế độ này để tiết kiệm năng lượng trong khi duy trì khả năng đánh thức của hệ thống bởi các kích thích bên ngoài. Bộ điều khiển trung tâm ESP32 ở chế độ ngủ sâu. Ở chế độ này, robot chỉ tiêu thụ 0,5mAh, do đó robot có thể ngủ và không cần sạc lại trong hơn 02 tháng. Nguồn đánh thức giữa idle mode và sleep mode của Millibot là khác nhau.



Hình 3. Các chế độ hoạt động khác nhau của Millibot và phương thức chuyển đổi giữa chúng.



Hình 4. Ảnh chụp thử nghiệm chuyển từ normal mode sang idle mode. Đèn led màu xanh cho biết robot đang ở normal mode trong khi đèn led màu cam cho biết robot đang ở idle mode. Trái: người dùng chạm vào một robot bất kỳ trong bầy để khởi động idle mode. Giữa: Thông báo "chờ" được lan truyền khắp nơi trong bầy. Phải: Toàn bộ bầy đàn chuyển sang idle mode.

Trong chế độ thông thường, robot có khả năng chuyển đổi sang các chế độ khác dựa trên tương tác của người dùng. Một cá thể robot hoặc cả bầy có thể bị ảnh hưởng bởi tương tác này. Cụ thể, người dùng có thể sử dụng cảm biến chạm để tương tác với robot. Robot có khả năng xác định chế độ mà người dùng mong muốn dựa trên cách họ tương tác với cảm biến chạm tích hợp trên robot. Khi người dùng hoàn thành tương tác, robot sẽ tiến hành xoay tại chỗ trong một khoảng thời gian xác định và phát đi một thông điệp đã mã hóa qua hệ thống giao tiếp hồng ngoại đến tất cả robot lân cận. Các robot nhận được thông điệp này sẽ tiếp tục thực hiện quá trình tương tự, và thông điệp cuối cùng sẽ được truyền tới toàn bộ bầy robot. Cách tiếp cận này giúp tương tác với toàn bộ bầy robot trở nên nhanh chóng và giảm thiểu sự tương tác vật lý giữa người dùng và robot. Robot có thể chuyển sang chế độ chờ bằng một lần chạm nhanh, chế độ nâng cấp bằng hai lần chạm nhanh liên tiếp và chế độ ngủ bằng một

lần chạm và giữ ít nhất ba giây. Một ví dụ cụ thể cho cách hoạt động này được minh họa trong Hình 4, trong đó người dùng chỉ cần tương tác với một robot, nhưng tác động này sẽ lan rộng đến toàn bộ bầy robot.

Ngoài ra, người dùng có thể chuyển từ chế độ chờ hoặc chế độ ngủ riêng cho từng robot bằng cách lắc hoặc lật ngược robot tương ứng. Serial port trên main board có thể được sử dụng để nâng cấp firmware cho từng robot riêng lẻ khi cần. Trước khi robot chuyển sang chế độ chờ, cảm biến chạm và các kênh analog được gắn với bộ thu hồng ngoại được đăng ký như nguồn kích thích đánh thức. Nếu người dùng chạm vào robot hoặc cảm biến hồng ngoại nhận tín hiệu nào đó, robot sẽ bị đánh thức. Người dùng chỉ cần chạm vào một robot bất kỳ để đánh thức cả bầy. Ngay sau khi bị đánh thức, robot sẽ bật tất cả các đèn hồng ngoại trong một khoảng thời gian xác định, xoay tại chỗ và kích hoạt toàn bộ robot lân cận thông qua nguồn kích thích thứ hai đã được nêu. Ngoài ra, robot sẽ chuyển sang chế độ ngủ nếu không được đánh thức sau ba giờ ở chế độ chờ để tiết kiệm năng lượng pin.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã phát triển một nền tảng robot di động (gọi là Millibot) để sử dụng trong các hoạt động nghiên cứu và học tập. Millibot đã được thiết kế, xây dựng và kiểm tra trên một loạt tác vụ liên quan đến hệ thống robot bầy đàn. Nền tảng robot đề xuất này cung cấp một loạt tính năng có thể tùy chỉnh, cho phép người dùng tiến hành nhiều thử nghiệm nghiên cứu với một chi phí thấp, chỉ khoảng 23 đô la cho mỗi cá thể prototype. Millibot chia sẻ nhiều đặc điểm tương tự với các nền tảng robot di động hiện có đã được mô tả trong các nghiên cứu trước đây, như đã được trình bày ở các phần trước. Nghiên cứu này cũng giới thiệu một số thao tác cơ bản trên bầy robot, và có khả năng mở rộng để người dùng có thể thực hiện

trên một bầy Millibot quy mô lớn mà không cần can thiệp vật lý hoặc ít can thiệp nhất.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này là sản phẩm của đề tài Khoa học và Công nghệ cấp Bộ mã số: B2022-SPK-02 tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo, và chủ trì bởi Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam. Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Bộ Giáo dục và Đào tạo và Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ thực hiện đề tài này. ❖

Ngày nhận bài: **01/11/2023**

Ngày phản biện: **18/11/2023**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Hamann, Heiko. *Swarm robotics: A formal approach*. Berlin: Springer, 2018.
- [2]. Rubenstein, M., Ahler, C., Hoff, N., Cabrera, A. and Nagpal, R., 2014. *Kilobot: A low-cost robot with scalable operations designed for collective behaviors*. Robotics and Autonomous Systems, 62(7), pp.966-975.
- [3]. Rubenstein, M., Ahler, C., Hoff, N., Cabrera, A. and Nagpal, R., 2014. *Kilobot: A low-cost robot with scalable operations designed for collective behaviors*. Robotics and Autonomous Systems, 62(7), pp.966-975.
- [4]. Özgür, A., Lemaignan, S., Johal, W., Beltran, M., Briod, M., Pereyre, L., Mondada, F. and Dillenbourg, P., 2017, March. *Cellulo: Versatile handheld robots for education*. In 2017 12th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI) (pp. 119-127). IEEE.
- [5]. Le Hung Lan, Le Thị Thủy Nga, Le Hong Lan, *Aggregation Stability of Multiple Agents with Fuzzy Attraction and Repulsion Forces*, pp. 81-85, MMAR 2013.
- [6]. Lê Hùng Lân, Lê Thị Thủy Nga; *Phân tích sự ổn định tụ bầy của robot bầy đàn sử dụng hàm hút/đẩy mờ*, Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải, pp. 88-93, 10/ 2013.
- [7]. Lê Thị Thủy Nga, Lê Hùng Lân; *Điều khiển robot bầy đàn tìm kiếm môi và tránh vật cản sử dụng logic mờ*, Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải, pp. 15-20, 3/ 2014.
- [8]. Wilson, Sean, et al. "Design of ant-inspired stochastic control policies for collective transport by robotic swarms". *Swarm Intelligence* 8.4 (2014): 303-327.
- [9]. Sugawara, Ken, Nikolaus Correll, and Dustin Reishus. "Object transportation by granular convection using swarm robots." *Distributed autonomous robotic systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. 135-147.