

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ**

Phạm Duy Hưng

**PHÁT TRIỂN THUẬT TOÁN TỰ NỞ CHO HỆ THỐNG ĐA ROBOT
DÙNG TRONG KHẢO SÁT THÔNG SỐ MÔI TRƯỜNG**

Chuyên ngành: Kỹ thuật Điện tử

Mã số: 62 52 02 03

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ
NGÀNH CÔNG NGHỆ KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ, TRUYỀN THÔNG**

Hà Nội – 2018

Công trình được hoàn thành tại: Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS.TS Trần Quang Vinh, Trường Đại học Công nghệ
2. PGS.TS Ngô Trung Dũng, Đại học Prince Edward Island, Canada

Phản biện:

.....

Phản biện:

.....

Phản biện:

.....

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng cấp Đại học Quốc gia chấm luận án tiến sĩ họp tại

vào hồi giờ ngày tháng năm

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Trung tâm Thông tin - Thư viện, Đại học Quốc gia Hà Nội

MỞ ĐẦU

Lý do chọn đề tài: trong xu thế phát triển của cách mạng công nghiệp 4.0, robot ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong đời sống xã hội từ các robot công nghiệp trong các nhà máy đến robot phục vụ tại các nhà hàng, bệnh viện và hộ gia đình. Cùng với việc nghiên cứu, cải tiến năng lực làm việc, trí thông minh nhân tạo của các robot riêng lẻ, nghiên cứu về hoạt động của hệ thống đa robot, gọi tắt là MRS (Multi-Robot System), là chủ đề mới, có tính cấp thiết bởi tiềm năng ứng dụng của nó trong giám sát môi trường, theo dõi đa mục tiêu, phối hợp vận chuyển, tìm kiếm, cứu hộ,...

Nghiên cứu về điều khiển đồng thời số lượng lớn các robot di động tự triển khai vào môi trường trong khi luôn duy trì sự toàn vẹn của mạng để trao đổi thông tin phối hợp giữa các robot là chủ đề mang tính thời sự, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn cao, có tiềm năng ứng dụng cho theo dõi đa mục tiêu, bao phủ giám sát môi trường,... phục vụ an ninh, quốc phòng và tìm kiếm, cứu hộ, cứu nạn,... *Tự triển khai* hay *tự nổ* được hiểu là việc điều khiển phân tán bầy robot nhằm trải rộng chúng ra hay "nở" rộng chúng ra môi trường theo một yêu cầu cụ thể.

Mục đích nghiên cứu: luận án này nghiên cứu phát triển thuật toán tự triển khai MRS để khám phá môi trường không biết trước, gồm các mục tiêu cụ thể như sau:

- Nghiên cứu điều khiển duy trì sự toàn vẹn của mạng đa robot trong khi các robot thực hiện nhiệm vụ. Mạng có khả năng mở rộng vùng bao phủ, thích nghi với môi trường không biết trước.
- Ứng dụng điều khiển duy trì sự toàn vẹn của mạng đa robot để xây dựng chiến lược tự triển khai MRS theo dõi đa mục tiêu và bao phủ. Chiến lược triển khai kết hợp thủ tục phân nhiệm dựa trên trao đổi thông tin giữa các robot và điều khiển chuyển động của robot để thực thi nhiệm vụ.

Đối tượng nghiên cứu: là điều khiển duy trì sự toàn vẹn của mạng đa robot và chiến lược theo dõi đa mục tiêu và bao phủ. MRS gồm nhiều robot di động hoạt động tự trị trong không gian hai chiều.

Phạm vi nghiên cứu: được giới hạn trong điều khiển phân tán, ở đó các robot ra quyết định điều khiển dựa trên thông tin cục bộ từ các hàng xóm trong vùng cảm nhận của chúng. Luận án tập trung xem xét vấn đề điều khiển duy trì sự toàn vẹn của mạng đa robot và ứng dụng cho bài toán theo dõi đa mục tiêu và bao phủ. Luận án không nghiên cứu về hệ thống cảm biến và tổng hợp dữ liệu cảm biến để nhận biết và hiểu về môi trường; định vị và dẫn đường cho các robot; đảm bảo độ tin cậy truyền thông trong mạng đa robot,... Thay vào đó, luận án sử dụng các giả thiết hiện đang dùng phổ biến trong nghiên cứu về MRS và coi đó là các giả thiết được thỏa mãn.

Phương pháp nghiên cứu: kết hợp giữa nghiên cứu lý thuyết, mô phỏng và thực nghiệm. Nghiên cứu lý thuyết đề xuất mô hình, kỹ thuật điều khiển duy trì, mở rộng mạng đa robot dựa trên cấu trúc kết nối cục bộ giữa các robot; chiến lược triển khai MRS để theo dõi đa mục tiêu và bao phủ. Mô phỏng dùng để kiểm chứng mô hình, các kỹ thuật điều khiển trên quy mô lớn (về số lượng robot, kích bản làm việc). Thực nghiệm để đánh giá khả năng hoạt động của các đề xuất trên robot thật.

Những đóng góp của luận án: luận án trình bày một phương pháp mới có tên là điều khiển phân tán đa tầng, viết tắt là HDC (Hierarchical Distributed Control), cho duy trì sự toàn vẹn mạng toàn cục của hệ thống đa robot. HDC được ứng dụng để xây dựng chiến lược tự triển khai hệ thống đa robot cho khám phá, theo dõi đa mục tiêu và bao phủ. Luận án hoàn thành các mục tiêu nghiên cứu và có 3 đóng góp mới như sau:

- Đề xuất một điều khiển phân tán đa tầng (HDC) cho duy trì sự toàn vẹn của mạng đa robot. HDC gồm điều khiển nút để điều khiển chuyển động của robot và duy trì mạng toàn cục, và điều khiển kết nối để mở rộng vùng bao phủ mạng. HDC dựa trên tiếp cận hình học xem xét cấu trúc kết nối cục bộ giữa các robot vì thế nó không yêu cầu ước lượng kết nối đại số của đồ thị mạng – phương pháp cổ điển. Bên cạnh đó, nhờ vào việc tinh giản các cấu trúc kết nối cục bộ, HDC có khả năng giải phóng các ràng buộc của kết nối cục bộ giống như cực tiểu cục bộ, cho phép hệ thống đa robot thu được hiệu suất cao trong chuyển động theo bầy, theo dõi đa mục tiêu và bao phủ. Đóng góp này được công bố trong công trình [CT1-CT4][CT8].

- HDC được ứng dụng cho chiến lược tự triển khai cho theo dõi đa mục tiêu, viết tắt là MTT (Multi-Target Tracking), và bao phủ của hệ thống đa robot kết nối mạng trong môi trường không biết trước. MTT kết hợp thủ tục phân nhiệm dựa trên trao đổi thông tin giữa các robot và điều khiển HDC để thực thi nhiệm vụ. Vượt qua các nghiên cứu đã tồn tại, luận án tìm ra rằng bài toán theo dõi đa mục tiêu và bao phủ có đặc điểm chung: các đích cho bài toán theo dõi đa mục tiêu giống với các đích ảo của bài toán bao phủ, vì thế MTT được áp dụng để giải quyết cả hai bài toán. Trong bài toán bao phủ, luận án đề xuất bộ tạo đích ảo VTG (Virtual Target Generation) dựa trên cấu trúc lưới lục giác cho phép hệ thống đa robot bao phủ được môi trường có cấu trúc. Luận án khảo sát, đánh giá MTT trong cả mô phỏng và thí nghiệm thật. Đóng góp này công bố trong công trình [CT2-CT5].

- Đề xuất thuật toán phát hiện và phân loại biên trong đó sửa lỗi biên được thực hiện bằng thuật toán mới dựa trên tiếp cận hình học. Thuật toán này loại bỏ các lỗi biên thông qua xem xét cấu trúc kết nối cục bộ thay cho quá trình đệ quy và động bộ toàn cục. Luận án tích hợp thuật toán phát hiện biên vào MTT để giải quyết bài toán theo dõi đa mục tiêu với các kịch bản đích phân bố không liên thông. Đóng góp này công bố trong công trình [CT6][CT7].

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án: Kết quả của luận án có ý nghĩa khoa học trong lĩnh vực nghiên cứu về hệ thống đa robot, có giá trị và độ tin cậy, có tiềm năng ứng dụng trong tuần tra và giám sát, tìm kiếm và cứu hộ phục vụ an ninh, quốc phòng; vận chuyển trong nhà kho, sân bay, sản xuất quy mô lớn cho đời sống xã hội.

Bố cục luận án: gồm phần mở đầu và 4 chương nội dung, phần kết luận và danh mục các tài liệu tham khảo. Chương 1 trình bày tổng quan tài liệu về điều khiển MRS và chiến lược tự triển khai MRS cho theo dõi đa mục tiêu và bao phủ. Chương 2: trình bày lý thuyết đảm bảo duy trì và mở rộng mạng đa robot và áp dụng để thiết kế HDC. Chương 3 trình bày ứng dụng HDC để xây dựng chiến lược tự triển khai cho hai bài toán điển hình là theo dõi đa mục tiêu và bao phủ lưới lục giác. Hiệu quả của HDC và các chiến lược tự triển khai MRS được đánh giá thông qua mô phỏng và thực nghiệm. Chương 4 trình bày mở rộng ứng dụng HDC cho triển khai MRS trong môi trường có cấu trúc giống tòa nhà với các robot đồng nhất DSHR và với robot mẹ, con. Cuối cùng là một số kết luận và các hướng nghiên cứu tiếp theo của luận án.

Chương 1

TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG ĐA ROBOT

1.1. Giới thiệu

Hệ thống đa robot, viết tắt là MRS (Multi-Robot System), được nhắc đến như một tập hợp số lượng lớn các robot tự trị có khả năng cảm nhận được môi trường, tính toán điều khiển và trao đổi thông tin qua mạng truyền thông. Các robot có tính năng hạn chế, thường không hiệu quả nếu hoạt động một mình nhưng đạt hiệu quả cao khi phối hợp thực hiện nhiệm vụ. Hoạt động tương tác, hợp tác giúp MRS thu được kết quả nhanh hơn và đáng tin cậy hơn một robot riêng lẻ.

MRS có các đặc tính: (1) Tính bền vững (Robustness): khả năng liên kết, hoạt động ổn định ngay cả khi mất một vài robot; (2) Tính linh hoạt (Flexibility): khả năng thích nghi với nhiều môi trường, nhiệm vụ khác nhau; (3) Khả năng mở rộng (Scalability): các thuật toán điều khiển có thể hoạt động với quy mô bầy robot khác nhau mà không yêu cầu cấu hình lại. Các tính năng này cho phép MRS đạt hiệu suất và độ tin cậy cao trong các nhiệm vụ.

Nghiên cứu về MRS hiện được chia thành 3 nhóm chính (<http://www.multirobotsystems.org>):

- *Mô hình hóa và điều khiển*: nghiên cứu mô hình động học, động lực học, cấu trúc cảm biến và tương tác với môi trường; Điều khiển tối ưu; Kiến trúc điều khiển tập trung/phân tán, khả năng mở rộng MRS; bài toán di chuyển theo bầy, bao phủ, đội hình,...MRS phỏng sinh học và trí tuệ bầy đàn.

- *Lập kế hoạch và cơ chế ra quyết định*: nghiên cứu kế hoạch chuyển động và phối hợp; Phân nhiệm và hợp tác thực hiện nhiệm vụ; Cơ chế ra quyết định; Tương tác giữ các robot, giữa robot với môi trường và với con người; Phối hợp học tập trong bầy robot; Trí tuệ nhân tạo cho các hệ thống lớn.

- *Ứng dụng MRS và các vấn đề công nghệ*: nghiên cứu ứng dụng MRS trong xã hội/công nghiệp; Thiết kế cơ, điện tử cho MRS; Hệ điều hành và công nghệ đám mây cho MRS; Nền tảng phần mềm và công cụ mô phỏng MRS; Truyền thông trong MRS; phương pháp thí nghiệm MRS; MRS trong môi trường có cấu trúc; MRS cấu trúc micro/nano; Đánh giá hiệu suất và đối sánh trong MRS.

Luận án này nghiên cứu vấn đề điều khiển phân tán MRS và cơ chế phối hợp giữa các robot cho hoạt động tự triển khai để giám sát môi trường không biết trước. Hoạt động phối hợp giữa các robot được thực hiện thông qua trao đổi thông tin do vậy việc duy trì sự toàn vẹn của mạng cho tất cả các robot theo thời gian là nội dung quan trọng trong nghiên cứu này.

Tự triển khai (Self-Deployment): các robot tự điều khiển, phân tán ra hay trải ra/nở ra môi trường nhằm thực hiện nhiệm vụ cụ thể như theo dõi mục tiêu, giám sát bao phủ,...

Giám sát môi trường (Environmental Surveillance): được hiểu và giới hạn trong phạm vi (1) MRS tìm kiếm và theo dõi các mục tiêu phân bố ngẫu nhiên, không biết trước trong môi trường; (2) MRS giám sát môi trường không biết trước thông qua bao phủ vùng cảm nhận của MRS lên nó. Luận án tập trung nghiên cứu về điều khiển MRS và áp dụng để xây dựng chiến lược triển khai MRS cho nhiệm vụ theo dõi đa mục tiêu và bao phủ, không nghiên cứu về thu thập, phân tích thông số môi trường.

Theo dõi đa mục tiêu (Multi-Target Tracking): các robot phối hợp với nhau lần lượt tìm kiếm và chiếm đóng các đích phân bố ngẫu nhiên, không biết trước trong môi trường.

Bao phủ (Coverage): các robot phối hợp với nhau để bao phủ vùng cảm nhận lên môi trường.

Điều khiển phân tán (Distributed control): phương thức điều khiển trong đó mỗi robot tính toán và quyết định chỉ dựa trên thông tin thu thập được từ các robot nằm trong vùng nhìn thấy của nó.

1.2. Điều khiển phân tán hệ thống đa robot

Các nghiên cứu hiện nay có thể chia thành ba phương pháp chính:

- Điều khiển hành vi (BC): các nghiên cứu hiện nay quan tâm đến thiết kế và tổng hợp hành vi cho MRS. Hành vi của robot chủ yếu được hình thành từ sự tương tác cục bộ với các robot hàng xóm, chưa quan tâm đến vấn đề duy trì sự toàn vẹn của mạng truyền thông và khai thác nền tảng của mạng cho các hành vi hợp tác như phân nhiệm, do đó nó chỉ được ứng dụng trong các bài toán điều khiển MRS di chuyển theo bầy hoặc tụ bầy, không có các ứng dụng yêu cầu sự phối hợp các robot dựa trên trong đổi thông tin trong mạng đa robot như theo dõi đa mục tiêu, bao phủ.

- Trường thế nhân tạo (APF) sử dụng các loại hàm thế và phương pháp tổng hợp khác nhau để tạo ra lực tổng hợp điều khiển robot, có nhược điểm là dễ sinh ra các điểm cực tiểu cục bộ làm cho robot không thể di chuyển đến mục tiêu. Thêm vào đó, APF cũng chỉ hoạt động dựa trên tương tác cục bộ nên các vấn đề hợp tác, phân nhiệm không thể thực hiện. Hạn chế này làm cho APF trở lên thiếu linh hoạt và giảm hiệu quả của MRS. Ngoài ra, APF chỉ đảm bảo duy trì kết nối cục bộ, không đảm bảo duy trì mạng toàn cục.

- Điều khiển dựa trên kết nối đại số (ACC) sử dụng ước lượng kết nối đại số λ_2 là giá trị riêng nhỏ nhất thứ hai của ma trận Laplace - ma trận đặc trưng của đồ thị kết nối mạng đa robot - để xây dựng bộ điều khiển phân tán duy trì sự toàn vẹn của mạng đa robot. Ước lượng λ_2 thực hiện theo kiểu phân tán, mỗi robot ước lượng giá trị kết nối dựa trên giá trị nhận được từ các robot hàng xóm, tuy nhiên nó cần thời gian tính toán lớn (khoảng vài giây) để bộ ước lượng hội tụ, bản chất là để robot cập nhật trạng thái ước lượng của toàn mạng. Điều này không khả thi khi trên các hệ thống thật.

1.3. Tự triển khai hệ thống đa robot

Phân tích các nghiên cứu hiện nay về theo dõi đa mục tiêu và bao phủ chỉ ra rằng mỗi bộ điều khiển cùng chiến lược triển khai MRS được thiết kế cho một bài toán ứng dụng cụ thể hoặc theo dõi đa mục tiêu hoặc bao phủ, không có phương pháp nào giải quyết cả hai bài toán. Điều này làm giảm tính linh hoạt của MRS và là động lực để luận án xây dựng một chiến lược triển khai áp dụng cho cả bài toán theo dõi đa mục tiêu và bao phủ.

1.4. Kết luận chương

Căn cứ mục tiêu tổng quát của luận án và kết quả khảo sát các nghiên cứu hiện nay, luận án đề ra nhiệm vụ cụ thể như sau:

- Nghiên cứu, thiết kế điều khiển phân tán cho MRS đảm bảo sự toàn vẹn của mạng trong khi thực hiện nhiệm vụ. Nó được phát triển trên nền tảng điều khiển hành vi và khai thác cấu trúc hình học các kết nối cục bộ giữa các robot để xây dựng điều kiện đảm bảo duy trì và mở rộng mạng đa robot. Đây là tiếp cận mới so với phương pháp cổ điển sử dụng λ_2 .

- Nghiên cứu, xây dựng chiến lược triển khai MRS cho cả bài toán theo dõi đa mục tiêu và bao phủ. Nó kết hợp hoạt động phân nhiệm giữa các robot và điều khiển thực hiện nhiệm vụ được giao.

Chương 2

ĐIỀU KHIỂN PHÂN TÁN ĐA TẦNG HDC CHO DUY TRÌ VÀ MỞ RỘNG MẠNG ĐA ROBOT

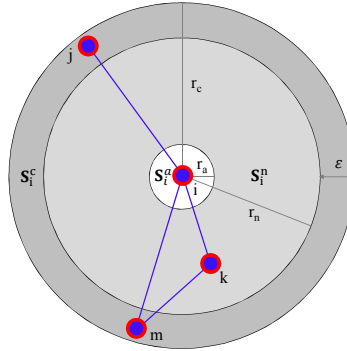
2.1. Mô hình hệ thống

MRS gồm n robot di động có tập chỉ số định danh $N = \{1, \dots, n\}$. Các robot có khả năng di chuyển trên nền phẳng trong không gian 2 chiều, có phương trình động học được mô tả như sau:

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t), i \in N \quad (2.1)$$

với $x_i(t) = x_i$ và $u_i(t) = u_i$ là vị trí và lối vào điều khiển của robot i tại thời điểm t .

Robot $i \in N$ có khả năng định vị và truyền thông với các robot hàng xóm N_i trong vùng cảm nhận \mathbf{S}_i . \mathbf{S}_i được phân chia thành: *Vùng tới hạn* \mathbf{S}_i^c (*critical area*) là hình vành khăn giới hạn bởi bán kính r_c và $r_n < r_c$ có độ rộng $\varepsilon \triangleq r_c - r_n$ và *Vùng không tới hạn* \mathbf{S}_i^n (*non-critical area*) là vùng đĩa tròn giới hạn bởi bán kính $r_n < r_c$. Trong vùng không tới hạn có vùng tránh vật cản \mathbf{S}_i^a (*obstacle avoidance area*) hình đĩa tròn bán kính $r_a < r_n$.



Hình 2.1: Vùng cảm nhận \mathbf{S}_i gồm vùng tới hạn \mathbf{S}_i^c và vùng không tới hạn \mathbf{S}_i^n chứa vùng tránh vật cản \mathbf{S}_i^a . Robot i có tập $N_i^c = \{j\}$, $N_i^n = \{k, m\}$ với $N_i^{n1} = \{k\}$ và $N_i^{n2} = \{m\}$.

Mạng đa robot được mô hình hóa bởi đồ thị vô hướng $G(V, E)$ trong đó tập đỉnh $V = N$, tập cạnh $E = \{e_{ij} \mid i, j \in V, i \neq j\}$. Cạnh e_{ij} được coi là kết nối nếu $r_{ij} \leq r_c$, tức là $j \in N_i$. G được mô tả bởi ma trận liên kề \mathbf{A} , đối xứng trong đó mỗi phần tử e_{ij} biểu diễn trọng số cạnh kết nối giữa robot i và j như sau:

$$e_{ij} = e_{ji} \triangleq \begin{cases} 1 & r_{ij} \leq r_c \leftrightarrow j \in N_i (\text{Kết nối}) \\ 0 & r_{ij} > r_c \leftrightarrow j \notin N_i (\text{Không kết nối}) \end{cases} \quad (2.2)$$

Theo lý thuyết đồ thị, thuộc tính kết nối của mạng đa robot được xác định bởi giá trị riêng nhỏ nhất thứ 2, ký hiệu là λ_2 , của ma trận Laplace $\mathbf{L} = \mathbf{D} - \mathbf{A}$ của đồ thị G trong đó \mathbf{D} là ma trận đường chéo có $d_i = \sum_{j=1}^n e_{ij}$. Mạng được xem là kết nối nếu $\lambda_2 > 0$, độ mạnh của kết nối tỷ lệ thuận với λ_2 – giá trị càng lớn thì đồ thị kết nối càng mạnh. Luận án này không sử dụng λ_2 cho điều khiển, nó chỉ được sử dụng kiểm chứng tình trạng kết nối mạng của phương pháp được đề xuất.

Liên kết nối giữa hai robot bất kỳ $i, j \in N$ trong mạng đa robot được định nghĩa như sau:

Định nghĩa 2.1 (Liên kết nối). Robot i và j được kết nối với nhau bởi một chuỗi I_{ij} gồm p robot từ robot R_1 đến R_p với $i = R_1$ và $j = R_p$ trong đó $e_{R_m R_{m+1}} = 1, \forall m \in [1, p), p > 2$. Chuỗi I_{ij} được gọi là

liên kết nối giữa robot i và j và được biểu diễn như sau:

$$I_{ij} = \{R_1, \dots, R_p \mid e_{R_m R_{m+1}} = 1, \forall m \in [1, p)\}. \quad (2.3)$$

Gọi L_c là bậc truyền thông - số nút mạng bản tin được phép truyền qua; ℓ_c là độ dài liên kết nối. Điều kiện để bản tin được truyền từ nút nguồn i đến nút đích j là tồn tại I_{ij} và $L_c \geq \ell_c$. Luận án này sử dụng thuật toán định tuyến dựa trên nhận thức khoảng cách DAR (Distance-Aware Routing) được Lee đề xuất năm 2011.

Bài toán 2.1 (Điều khiển duy trì và mở rộng mạng đa robot). *Tìm ràng buộc D_i cho lối vào điều khiển u_i của robot bất kỳ $i \in N$ sao cho $\forall t > t_0$ robot i và $\forall j \in N, j \neq i$, có $e_{ij} = 1$ (kết nối trực tiếp) hoặc $\exists I_{ij} \neq \emptyset$ (kết nối gián tiếp). Gọi d_i và \mathbf{B}_i tương ứng là mục tiêu và vùng giới hạn chuyển động của robot i tạo bởi ràng buộc D_i . Tối ưu hóa D_i để mở rộng \mathbf{B}_i về phía mục tiêu d_i .*

2.2. Duy trì mạng đa robot

Định nghĩa 2.2 (Robot tới hạn và cạnh tới hạn). *Robot $j \in N_i$ được gọi là robot tới hạn của robot i nếu $x_j \in \mathbf{S}_i^c$ và $\nexists k : x_k \in \mathbf{S}_i^n \cap \mathbf{S}_j^n$. N_i^c là tập các robot tới hạn của robot i được biểu diễn như sau:*

$$N_i^c \triangleq \{j \mid x_j \in \mathbf{S}_i^c, \nexists k : x_k \in \mathbf{S}_i^n \cap \mathbf{S}_j^n\} \quad (2.4)$$

$e_{ij}, j \in N_i^c$ được gọi là cạnh tới hạn.

Định nghĩa 2.3 (Robot không tới hạn và cạnh không tới hạn). *Robot $j \in N_i$ được coi là robot không tới hạn của robot i nếu $j \notin N_i^c$. N_i^n là tập các robot không tới hạn của robot i được biểu diễn như sau:*

$$N_i^n \triangleq \{j \in N_i \setminus N_i^c\} = N_i^{n_1} \cup N_i^{n_2} \quad (2.5)$$

với $N_i^{n_1} = \{j \mid x_j \in \mathbf{S}_i^n\}$ và $N_i^{n_2} = \{j \mid x_j \in \mathbf{S}_i^c, \exists k : x_k \in \mathbf{S}_i^n \cap \mathbf{S}_j^n\}$

$e_{ij}, j \in N_i^n$ được gọi là cạnh không tới hạn.

Định lý 2.1 (Duy trì cạnh kết nối). *Kết nối e_{ij} giữa robot i và j được duy trì nếu bước chạy của robot i và j ứng với chu kỳ lệnh Δt thỏa mãn điều kiện sau:*

$$\Delta x_i \leq \frac{r_c - r_{ij}}{2} \text{ và } \Delta x_j \leq \frac{r_c - r_{ij}}{2} \quad (2.6)$$

Định lý 2.2 (Duy trì mạng). *Mạng toàn cục của hệ thống đa robot được duy trì nếu mọi robot i có bước chạy Δx_i trong mạng thỏa mãn điều kiện biên sau đây.*

$$\Delta x_i \leq \begin{cases} \frac{\varepsilon}{2} & N_i^c = \emptyset \\ \frac{\varepsilon_i}{2} & N_i^c \neq \emptyset \end{cases} \text{ với } \varepsilon_i = \min_{j \in N_i^c} (r_c - r_{ij}) \leq \varepsilon \quad (2.7)$$

Như vậy, $\Delta x_i \leq \frac{\varepsilon}{2}$ là ràng buộc mặc định cho mọi robot i duy trì mạng toàn cục trong khi $\Delta x_i \leq \frac{\varepsilon_i}{2}$ là ràng buộc khi xuất hiện các kết nối tới hạn. Tức là, u_i bị giới hạn bởi D_i như sau:

$$v_{i_{max}} = \begin{cases} \frac{\varepsilon}{2\Delta t} & N_i^c = \emptyset \\ \frac{\varepsilon_i}{2\Delta t} & N_i^c \neq \emptyset \end{cases} \text{ với } \varepsilon_i = \min_{j \in N_i^c} (r_c - r_{ij}) \leq \varepsilon \quad (2.8)$$

2.3. Tối ưu kết nối, mở rộng mạng

Khi D_i được thỏa mãn, robot i bị giới hạn trong vùng \mathbf{B}_i xác định bởi tập robot tới hạn X_i :

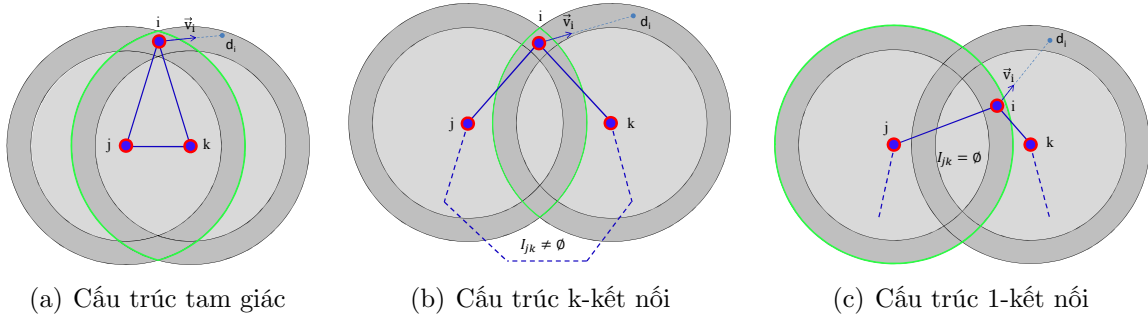
$$\mathbf{B}_i = \bigcap_{j \in X_i} \mathbf{S}_j^c \quad (2.9)$$

Có ba loại cấu trúc kết nối cục bộ LCT (*local connectivity topology*) chứa các kết nối dư thừa, nếu được loại bỏ thì \mathbf{B}_i có thể mở rộng như sau:

Định nghĩa 2.4 (Cấu trúc tam giác). Robot i và cặp robot hàng xóm j, k hình thành cấu trúc tam giác (triangle topology) nếu $j, k \in N_i^c$ và $e_{jk} = 1$.

Định nghĩa 2.5 (Cấu trúc k-kết nối). Robot i và cặp robot hàng xóm j, k hình thành cấu trúc k-kết nối (k-connected topology) nếu $j \in N_i^c$ và/hoặc $k \in N_i^c$ và $(e_{jk} = 0) \wedge (\exists I_{jk} \setminus \{j, i, k\} \neq \emptyset)$.

Định nghĩa 2.6 (Cấu trúc 1-kết nối). Robot i và robot hàng xóm j hình thành cấu trúc 1-kết nối (one-connected topology) nếu $\nexists I_{ij} \setminus \{i, j\} \neq \emptyset$. Cấu trúc 1-kết nối chứa kết nối duy nhất e_{ij} giữa robot i và j do vậy kết nối này phải được duy trì để đảm bảo sự toàn vẹn của mạng.



Hình 2.2: Cấu trúc kết nối cục bộ

Tập hợp các LCT kề nhau liên tiếp được phân loại thành hai nhóm T_i và K_i , mỗi nhóm có q robot tới hạn, biểu diễn bởi tập thứ tự $N_i^g = \{g_1, \dots, g_q\}$.

- Nhóm T_i gồm các cấu trúc tam giác kề nhau liên tiếp thỏa mãn:

$$e_{g_m g_{m+1}} = 1, \forall m \in [1, q] \quad (2.10)$$

$$\nexists j \in N_i \setminus N_i^g : e_{jk} = 1, k = \{g_1, g_q\} \quad (2.11)$$

- Nhóm K_i gồm các cấu trúc k-kết nối kề nhau liên tiếp thỏa mãn:

$$e_{g_m g_{m+1}} = 0 \wedge I_{g_m g_{m+1}} \setminus \{g_m, i, g_{m+1}\} \neq \emptyset, \forall m \in [1, q] \quad (2.12)$$

$$\nexists j \in N_i \setminus N_i^g : (e_{jk} = 1) \wedge (I_{jk} \setminus \{j, i, k\} \neq \emptyset), k = \{g_1, g_q\} \quad (2.13)$$

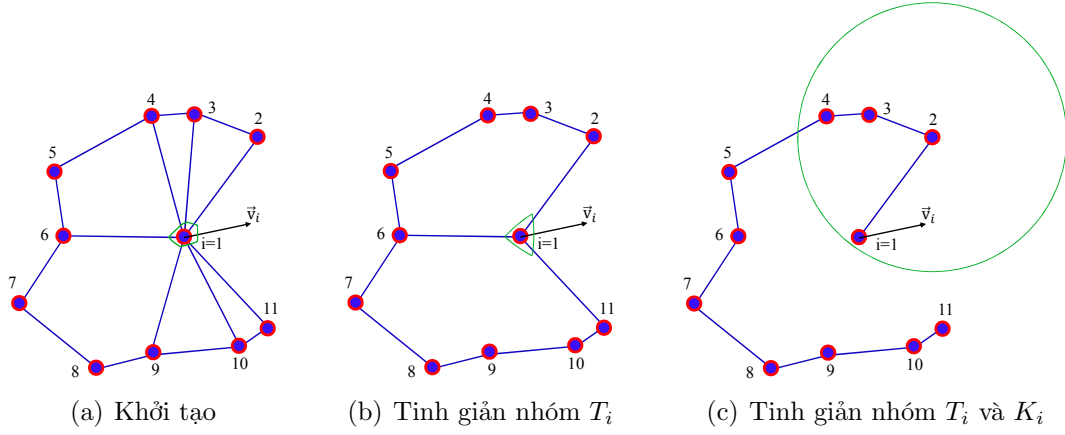
Định lý 2.3 (Kết nối trong N_i^g). Trong mỗi nhóm LCT của robot i , hai robot bất kỳ $j, k \in N_i^g$ được nối với nhau trực tiếp hoặc gián tiếp.

Định lý 2.4 (Kết nối dư thừa). Trong mỗi nhóm LCT của robot i , nếu robot i chỉ duy trì một kết nối e_{ig_ℓ} , $g_\ell \in N_i^g$ và loại bỏ các kết nối khác, gọi là kết nối dư thừa, thì robot i vẫn duy trì kết nối với mọi robot $g_m \in N_i^g$, $g_m \neq g_\ell$ thông qua liên kết nối I_{ig_m} .

Định lý 2.5 (Quy tắc xác định kết nối dư thừa). Trong mỗi nhóm LCT của robot i , nếu loại bỏ các cạnh dư thừa e_{ij} thỏa mãn phương điều kiện sau thì vùng \mathbf{B}_i được mở rộng về phía gần đích nhất.

$$\theta_i^j > \min_{k \in N_i^g} (\theta_i^k) \quad (2.14)$$

với $\theta_i^k = (\vec{\mathbf{v}}_i^a, \vec{\mathbf{r}}_{ik})$ và $\vec{\mathbf{v}}_i^a$ là vận tốc hướng đích d_i của robot i .



Hình 2.3: Chiến lược tinh giản LCT

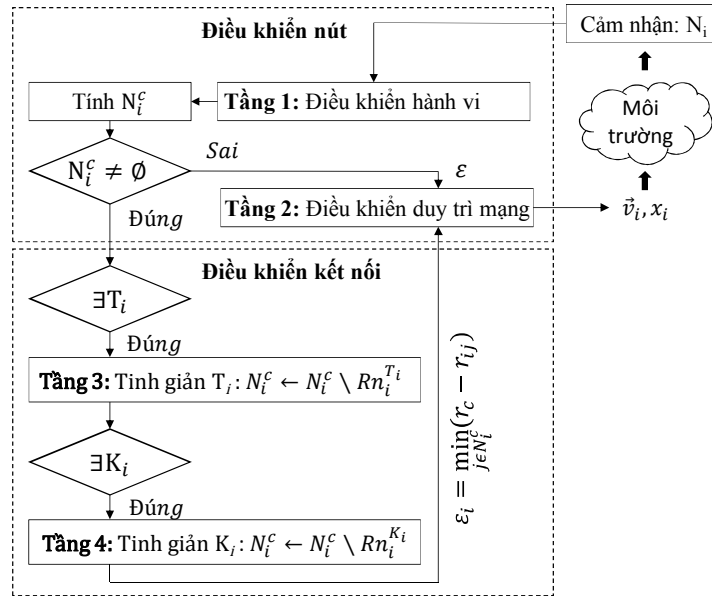
Các kết nối dư thừa lần lượt được tinh giản qua hai bước tương ứng với hai định lý sau:

Định lý 2.6 (Tinh giản nhóm T_i). Trong nhóm T_i , nếu tất cả các kết nối dư thừa được loại bỏ thì kết nối duy trì duy nhất $e_{ig\ell}, g\ell \in N_i^g$ thuộc về cấu trúc 1-kết nối hoặc cấu trúc k-kết nối.

Định lý 2.7 (Tinh giản nhóm K_i). Trong nhóm K_i , nếu tất cả các kết nối dư thừa được loại bỏ thì kết nối duy trì duy nhất $e_{ig\ell}, g\ell \in N_i^g$ thuộc về cấu trúc 1-kết nối.

2.4. Điều khiển phân tán đa tầng

Phần sau đây trình bày việc áp dụng lý thuyết được đề xuất để thiết kế bộ điều khiển phân tán đa tầng cho MRS, gọi tắt là HDC (*Hierarchical Distributed Control*) có sơ đồ khối như hình 2.4.



Hình 2.4: Sơ đồ khối HDC

2.4.1. Điều khiển nút

Tầng 1 - Điều khiển hành vi: lệnh vận tốc của robot i được tổng hợp như sau:

$$\vec{v}_i = \alpha \vec{v}_i^c + \beta \vec{v}_i^s + \gamma \vec{v}_i^a \quad (2.15)$$

với α, β, γ là các hệ số hiệu chỉnh tương ứng các thành phần \vec{v}_i^c , \vec{v}_i^s và \vec{v}_i^a được biểu diễn sau đây:

- *Vận tốc liên kết* \vec{v}_i^c (cohesion velocity): điều khiển robot i và các hàng xóm tiến lại gần nhau

$$\vec{v}_i^c = \sum_{j \in N_i^a} \vec{r}_{ij}, \text{ với } N_i^a = \{j \mid x_j \in \mathbf{S}_i \setminus \mathbf{S}_i^a\} \quad (2.16)$$

- *Vận tốc phân chia* \vec{v}_i^s (separation velocity): điều khiển robot i tránh va chạm với các hàng xóm

$$\vec{v}_i^s = - \sum_{j \in N_i^a} w_{ij} e^{-\zeta(r_{ij}-r_a)} \hat{\mathbf{r}}_{ij}, \text{ với } N_i^a = \{j \mid x_j \in \mathbf{S}_i^a\} \quad (2.17)$$

với ζ là một hằng số cho trước và w_{ij} là trường tránh va chạm biểu diễn bởi phương trình sau:

$$w_{ij} = \sigma + (1 - \sigma) \frac{(1 + \cos(\varphi_i^j))}{2} \quad (2.18)$$

trong đó $\cos(\cdot)$ là toán tử cosin, φ_i^j là góc giữa hướng robot i và \vec{r}_{ij} , $\sigma \in [0, 1]$.

- *Vận tốc hướng đích* \vec{v}_i^a (alignment velocity): lái robot i hướng tới đích d_i mong muốn

$$\vec{v}_i^a = \hat{\mathbf{r}}_{id_i} = \frac{\vec{r}_{id_i}}{r_{id_i}} \quad (2.19)$$

Phương trình 2.15 có thể biểu diễn qua hệ số liên kết bày Υ trong cặp phương trình sau:

$$\vec{v}_i = \gamma \vec{v}_i^g + \beta \vec{v}_i^s \quad (2.20)$$

$$\vec{v}_i^g = \Upsilon \vec{v}_i^c + \vec{v}_i^a, \text{ với } \Upsilon = \frac{\alpha}{\gamma} \quad (2.21)$$

Υ quyết định tốc độ tụ bầy, giá trị càng lớn thì tụ bầy càng nhanh và ngược lại. Υ được thiết lập như phương trình sau để tránh hiện tượng kéo/đẩy liên tục khi khoảng cách giữa các robot xấp xỉ r_a .

$$\Upsilon = \begin{cases} \Upsilon_0 & r_{th} \leq r_i \leq r_c \\ 0 & r_a < r_i < r_{th} \end{cases} \quad (2.22)$$

Tầng 2 - Điều khiển duy trì sự toàn vẹn mạng: Tầng 2 được thêm vào trên nền của Tầng 1 nhằm giữ cho các robot kết nối bền vững với mạng. Tầng 2 thiết lập ràng buộc D_i đối với lối vào u_i đảm bảo duy trì sự toàn vẹn của mạng, cụ thể lối vào u_i bị giới hạn bởi vận tốc $v_{i_{max}}$. Mặc định $v_{i_{max}} = \frac{\varepsilon}{2\Delta t}$. Robot i xác định tập robot tới hạn N_i^c bởi phương trình 2.4, nếu $N_i^c \neq \emptyset$ thì $v_{i_{max}} = \frac{\varepsilon_i}{2\Delta t}$, với $\varepsilon_i = \min_{j \in N_i^c} (r_c - r_{ij})$.

2.4.2. Điều khiển kết nối

Tầng 3 - Tinh giản cấu trúc tam giác: Tầng 3 hoạt động trên tầng 2, được kích hoạt khi robot i có ít nhất một cấu trúc tam giác. Nó sử dụng truyền thông trực tiếp với các robot hàng xóm để tạo quyết định đồng thuận loại bỏ các kết nối tới hạn dư thừa thuộc T_i . Áp dụng định lý 2.5, tập các robot tới hạn của robot i nằm trên các cạnh dư thừa trong nhóm T_i được biểu diễn như sau:

$$Rn_i^T = \{j \in N_i^g \mid (\theta_i^j > \min_{k \in N_i^g} (\theta_i^k)) \wedge (\rho_{ij} = 1)\} \quad (2.23)$$

với $\rho_{ij} = \rho_{ji}$ là tín hiệu đồng thuận giữa i và j . $\rho_{ij} = 1$ nếu i đồng ý với j , ngược lại $\rho_{ij} = 0$.

Sau khi tinh giản, nếu robot i chỉ còn cấu trúc 1-kết nối thì robot i có thể di chuyển gần nhất tới đích yêu cầu. Ngược lại, tầng 4 được kích hoạt để tiếp tục tinh giản cấu trúc k-kết nối.

Tần 4 - Tinh giản cấu trúc k-kết nối: Tầng 4 hoạt động trên tầng 3 cho phép robot i tinh giản nhóm K_i , được kích hoạt khi có thể tồn tại cấu trúc k-kết nối. DAR được sử dụng để xác định có tồn tại liên kết nối giữa các robot tới hạn, từ đó xác định chúng thuộc về cấu trúc k-kết nối hay 1-kết nối và đưa ra quyết định đồng thuận loại bỏ cạnh dư thừa. Theo định lý 2.5, tập các robot nằm trên các cạnh dư thừa nhóm K_i biểu diễn như sau:

$$Rn_i^K = \{j \in N_i^g \mid (\theta_i^j > \min_{k \in N_i^g}(\theta_i^k)) \wedge (\rho_{ij} = 1)\} \quad (2.24)$$

Sau khi tinh giản, robot i chỉ có cấu trúc 1-kết nối với robot $j \in X$, với $X = N_i^c \setminus (Rn_i^T \cup Rn_i^K)$.

2.5. Độ phức tạp và tính ổn định của bộ điều khiển

2.5.1. Độ phức tạp

HDC có độ phức tạp điều khiển $O(\|N_i\|)$ và độ phức tạp truyền thông $O(L_c)$.

2.5.2. Tính ổn định

HDC có hàm Lyapunov mô tả bởi phương trình sau:

$$V = \sum_{i \in N} \left(\sum_{j \in N \setminus \{i\}} (\alpha \psi_{ij}^c + \beta \psi_{ij}^s) + \gamma \right) \quad (2.25)$$

Các hàm thế ψ_{ij}^s và ψ_{ij}^c có các thuộc tính như sau:

- Hàm thế đẩy ψ_{ij}^s :
 - ▷ ψ_{ij}^s là hàm của khoảng cách tương đối giữa robot i và j , tức là $\psi_{ij}^s = \psi_{ij}^s(r_{ij})$.
 - ▷ $\psi_{ij}^s \rightarrow +\infty$ khi $r_{ij} \rightarrow 0$.
 - ▷ ψ_{ij}^s có tính khả vi liên tục.
 - ▷ $\psi_{ij}^s = 0$ và $\frac{\partial \psi_{ij}^s}{\partial x_i} = 0$ nếu $r_{ij} > r_a$ ▷ $\frac{\partial \psi_{ij}^s}{\partial r_{ij}^2} < 0$ nếu $r_{ij} \leq r_a$ và $\frac{\partial \psi_{ij}^s}{\partial r_{ij}^2} = 0$ nếu $r_{ij} > r_a$.
- Hàm thế hút ψ_{ij}^c :
 - ▷ ψ_{ij}^c là hàm của khoảng cách tương đối giữa robot i và j , tức là $\psi_{ij}^c = \psi_{ij}^c(r_{ij})$.
 - ▷ $\psi_{ij}^c \rightarrow +\infty$ khi $r_{ij} \rightarrow r_c$.
 - ▷ ψ_{ij}^c là hàm khả vi liên tục.
 - ▷ $\frac{\partial \psi_{ij}^c}{\partial r_{ij}^2} > 0$ nếu $r_a < r_{ij} \leq r_c$.

Luận án đã chứng minh $\dot{V} \leq 0$. Do vậy, theo nguyên lý bất biến LaSalle, HDC ổn định.

2.6. Kết luận chương

Chương này đã đề xuất lý thuyết về duy trì và mở rộng mạng đa robot sử dụng tiếp cận hình học, xem xét cấu trúc kết nối cục bộ trên mỗi robot. Đây là phương pháp mới so với phương pháp sử dụng ước lượng thuộc tính kết nối λ_2 của đồ thị mạng đa robot. Trên cơ sở lý thuyết này, luận án đã thiết kế điều khiển phân tán đa tầng HDC gồm điều khiển nút cho phép thiết lập lệnh vận tốc dựa trên điều khiển hành vi và ràng buộc đảm bảo duy trì sự toàn vẹn của mạng, và điều khiển kết nối cho phép tinh giản các cấu trúc LCT để mở rộng mạng. Nội dung được trình bày công bố trong các bài báo [CT1][CT2][CT8].

Chương 3 tiếp theo sẽ báo cáo về những ứng dụng điển hình của HDC và các mô phỏng, thực nghiệm chứng minh hiệu quả và độ tin cậy của đề xuất.

Chương 3

ỨNG DỤNG HDC CHO TRIỂN KHAI HỆ THỐNG ĐA ROBOT THEO DÕI ĐA MỤC TIÊU VÀ BAO PHỦ

HDC được sử dụng cho chiến lược triển khai MRS cho theo dõi đa mục tiêu và bao phủ, có vai trò duy trì mạng toàn cục để phối hợp phân nhiệm các robot và điều khiển robot thực hiện nhiệm vụ.

Bài toán 3.1 (Theo dõi đa mục tiêu). *MRS được triển khai để tìm kiếm và chiếm đóng các đích phân bố ngẫu nhiên trong môi trường, mỗi đích được chiếm đóng bởi 1 robot. Ban đầu, các robot kết nối với nhau trong cùng một mạng và MRS quan sát được ít nhất một đích. Có 2 trường hợp như sau:*

- *Đích liên thông: 2 đích bất kỳ d_i, d_j kết nối trực tiếp ($r_{d_i, d_j} \leq r_c$) hoặc gián tiếp ($\exists I_{d_i, d_j} \neq \emptyset$). Tức là, nếu robot i chiếm đóng được một đích thì nó luôn quan sát được ít nhất một đích khác.*

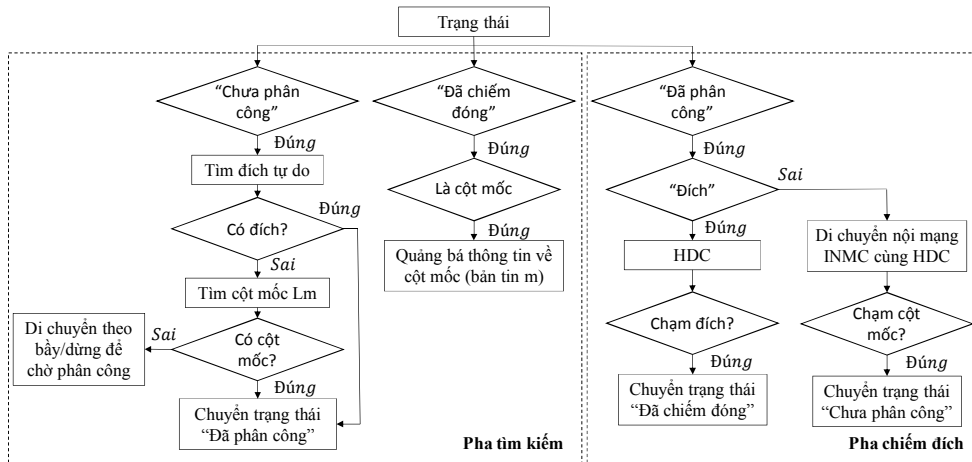
- *Đích không liên thông: Tồn tại cặp đích d_i, d_j không kết nối trực tiếp ($r_{d_i, d_j} > r_c$) và gián tiếp ($\nexists I_{d_i, d_j} \neq \emptyset$). Tức là, các đích được phân bố thành các nhóm không liên thông gọi là các đám mây đích.*

Bài toán 3.2 (Bao phủ). *MRS được triển khai để tạo lưới lục giác bao phủ vùng cảm nhận $C = \bigcup_{i \in N} S_i$ lên môi trường E không biết trước, có cấu trúc bất kỳ.*

3.1. Bài toán theo dõi đa mục tiêu

3.1.1. Đám mây đích liên thông

Chiến lược theo dõi đa mục tiêu (MTT) kết hợp phân nhiệm dựa trên trao đổi thông tin trong mạng và điều khiển thực thi nhiệm vụ bởi HDC, có sơ đồ khối như hình 3.1 gồm 2 pha và 3 trạng thái như sau:



Hình 3.1: Sơ đồ khối chiến lược theo dõi đa mục tiêu

3.1.1.1. Ba trạng thái hoạt động

- *"Đã chiếm đóng"*: là trạng thái robot đã chiếm được đích. Nó trở thành "Cột mốc" nếu quan sát được đích chưa được chiếm đóng khác và có nhiệm vụ thu hút các robot đến chiếm đóng chúng.
- *"Đã phân công"*: là trạng thái robot đã được phân công đích hoặc cột mốc.
- *"Chưa phân công"*: là trạng thái robot chưa được phân công bất kỳ đích nào, còn gọi là tự do.

3.1.1.2. Hai pha làm việc

- *Pha tìm kiếm đích*: robot i "Chưa phân công" thực hiện các nhiệm vụ lần lượt như sau:

▷ *Tìm kiếm đích tự do*: robot i khởi phát thủ tục *Tìm kiếm tự do* để tìm đích trong S_i . Nếu ít nhất một đích được tìm thấy, thì robot i sẽ chọn *đích gần nhất* làm mục tiêu và cập nhật trạng thái đã phân công đích. Khi robot không tìm thấy đích tự do nào, thủ tục *tìm kiếm cột mốc* được khởi phát.

▷ *Tìm kiếm cột mốc*: robot i sử dụng DAR để tìm đường ngắn nhất tới các cột mốc trong tập L_m (L_m được cập nhật thường xuyên khi nhận được bản tin m từ cột mốc) và chọn cột mốc có tuyến đường ngắn nhất lưu trong mảng *Route*, chuyển sang trạng thái đã phân công. Ngược lại ($L_m = \emptyset$), robot tự do có thể chuyển động theo bầy bám các robot được phân công hoặc dừng lại đợi phân công.

- *Pha chiếm đóng đích*: robot i đã được phân công thực hiện một trong 2 nhiệm vụ sau:

▷ *Robot i được phân công đích*: Robot i gọi HDC để di chuyển tới đích được phân công. Khi robot i chạm đích, nó chuyển sang trạng thái "Đã chiếm đóng" và kiểm tra có là cột mốc hay không. Nếu robot i thấy đích tự do khác thì nó được coi là một cột mốc và phát quảng bá bản tin m báo cho các robot tự do cập nhật tập cột mốc L_m .

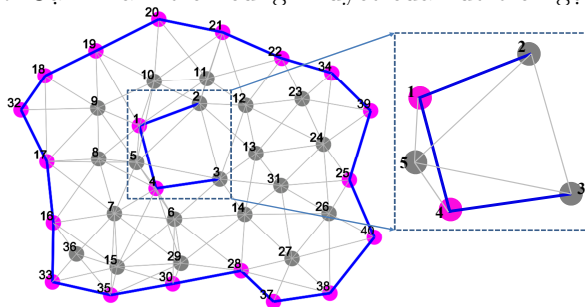
▷ *Robot i được phân công cột mốc*: Robot i sử dụng HDC để di chuyển đến cột mốc thông qua các đích tạm thời là các nút nằm trên tuyến đường xác định bởi *Route* (gọi là di chuyển nội mạng INMC). Khi chạm cột mốc, robot i chuyển về trạng thái "Chưa phân công" để thực hiện pha tìm kiếm đích tự do. Do xung quanh cột mốc có các đích tự do nên việc tìm kiếm có thể nhanh chóng hoàn thành.

Để giải quyết các kịch bản đích không liên thông, MTT được bổ sung thêm nhiệm vụ tìm kiếm và liên thông các đám mây đích bằng cách tạo bầy robot tự do di chuyển quanh biên của đám mây đích chính để quét tìm và tạo liên kết với đám mây đích khác.

3.1.2. Phát hiện và phân loại biên của mạng đa robot

3.1.2.1. Phát hiện biên

Thuật toán phát hiện biên (DBD) được phát triển từ đề xuất của McLurkin năm 2009. Đường biên là đường bao quanh cấu trúc hình học của mạng. Nút trên đường biên gọi là *nút biên*, ngược lại là *nút trong*, phân biệt bởi các cung tạo bởi nút đó và các cặp nút hàng xóm kề nhau liên tiếp. Cụ thể, nút i và cặp hàng xóm $(j, k) \in N_i$ tạo thành một cung, gọi là *cung khuyết* nếu nút j và k không kết nối với nhau ($e_{jk} = 0$) hoặc có góc lớn hơn hoặc bằng π ($\theta_i^{jk} \geq \pi$), ngược lại nó gọi là *cung tam giác*. Gọi P_i là tập các cung bao quanh nút i . Nếu tất cả các cung thuộc P_i là cung tam giác thì nút i là *nút trong*. Ngược lại, là *nút biên*. Cạnh nằm trên cung khuyết của nút biên gọi là *cạnh biên*.



Hình 3.2: Hai nút biên lỗi (đỏ) có cạnh biên (xanh) kết nối với nút trong (xám).

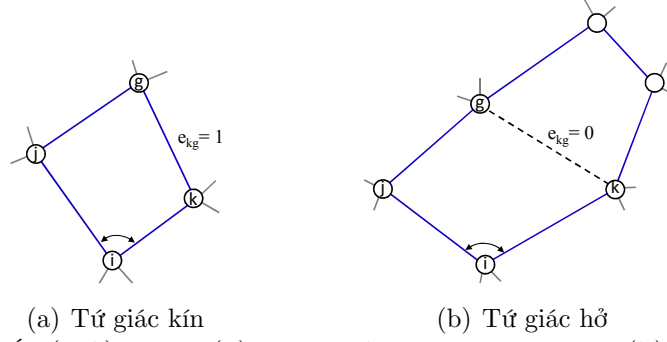
Vì đường biên là một vòng kín, hình thành bởi các cạnh biên trong đó mỗi nút biên được nối với hai nút biên hàng xóm, nên định nghĩa trên có thể sinh ra các *nút biên lỗi*.

Định nghĩa 3.1 (Nút biên lỗi). *Nút biên lỗi là nút biên kết nối trực tiếp hoặc gián tiếp với một nút trong thông qua cạnh biên như miêu tả trong hình 3.2.*

Luận án đề xuất phương pháp sửa lỗi biên, gọi tắt là BEC (Boundary Error Correction), dựa trên cấu trúc hình học các kết nối cục bộ thay cho quá trình sửa lỗi đệ quy trong thuật toán gốc.

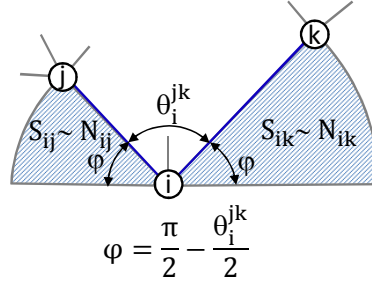
3.1.2.2. Sửa lỗi biên

Để dàng nhận ra rằng cung khuyết (j, k) của nút i nằm trong tứ giác tạo bởi các nút i, j, k, g với $g \in N_{j \setminus i} = N_j \setminus \{N_i \cup i\}$ hoặc/và $g \in N_{k \setminus i} = N_k \setminus \{N_i \cup i\}$. Nó gọi là kín nếu $e_{kg} = 1$, hở nếu $e_{kg} = 0$ như hình 3.3.



Hình 3.3: Cung khuyết (j, k) trong (a) tứ giác kín với $e_{kg} = 1$, và (b) tứ giác hở với $e_{kg} = 0$

Định nghĩa 3.2 (Cung tam giác mở rộng). *Cung khuyết (j, k) của nút i được gọi là cung tam giác mở rộng nếu tứ giác tạo bởi các nút i, j, k, g với $g \in N_{j \setminus i}$ hoặc/và $g \in N_{k \setminus i}$ bị chia thành nhiều tam giác.*



Hình 3.4: Tập N_{ij} và N_{ik}

Gọi N_{ij} và N_{ik} tương ứng là tập các nút hàng xóm của i thuộc vùng S_{ij} , S_{ik} như mô tả trong hình 3.4. Về trực quan, tứ giác i, j, k, g có thể bị chia thành các tam giác trong ba trường hợp như sau:

- Tồn tại nút $m \in N_{ik}$ kết nối với nút j , $e_{jm} = 1$, sao cho nút j, m có ít nhất một hàng xóm chung g không thuộc N_i , $N_{j \setminus i} \cap N_{m \setminus i} \neq \emptyset$, tạo thành cung tam giác $(g, m) \in P_j$ (hình 3.5.a).

$$\text{Cond}_1 = \begin{cases} 1 & \exists m \in N_{ik} : (e_{jm} = 1) \wedge (N_{j \setminus i} \cap N_{m \setminus i} \neq \emptyset) \\ 0 & \text{khác} \end{cases} \quad (3.1)$$

Cặp (i, g) của nút j chứa 2 cung tam giác $(i, m) \in P_j$ và $(g, m) \in P_j$. Do vậy, nút j là nút trong.

- Tồn tại nút $\ell \in N_{ij}$ kết nối với nút k , $e_{k\ell} = 1$, sao cho nút k, ℓ có ít nhất một hàng xóm chung g không thuộc N_i , $N_{k \setminus i} \cap N_{\ell \setminus i} \neq \emptyset$, tạo thành cung tam giác $(g, \ell) \in P_k$ (hình 3.5.b).

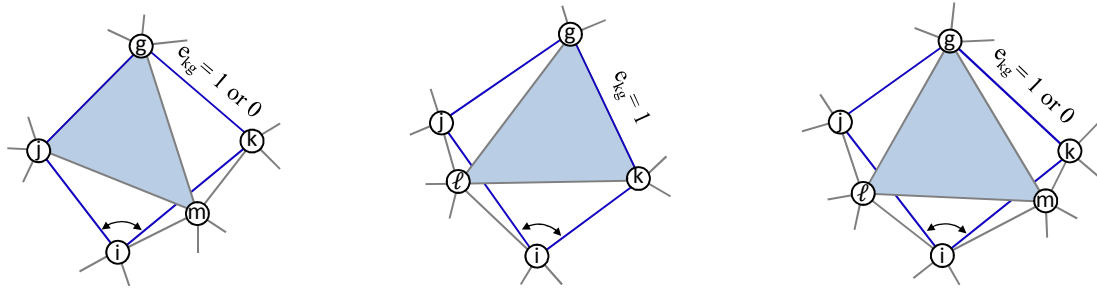
$$\text{Cond}_2 = \begin{cases} 1 & \exists \ell \in N_{ij} : (e_{k\ell} = 1) \wedge (N_{k \setminus i} \cap N_{\ell \setminus i} \neq \emptyset) \\ 0 & \text{khác} \end{cases} \quad (3.2)$$

Cặp (i, g) của nút k chứa 2 cung tam giác $(i, \ell) \in P_k$ và $(g, \ell) \in P_k$. Do vậy, nút k là nút trong.

- Tồn tại các nút $\ell \in N_{ij}$ và $m \in N_{ik}$ kết nối với nhau, $e_{\ell m} = 1$, sao cho nút ℓ, m có ít nhất một hàng xóm chung g không thuộc N_i , $N_{\ell \setminus i} \cap N_{m \setminus i} \neq \emptyset$ tạo thành cung tam giác $(\ell, m) \in P_g$ (hình 3.5.c).

$$\text{Cond}_3 = \begin{cases} 1 & \exists \ell \in N_{ij}, m \in N_{ik} : (e_{\ell m} = 1) \wedge (N_{\ell \setminus i} \cap N_{m \setminus i} \neq \emptyset) \\ 0 & \text{khác} \end{cases} \quad (3.3)$$

Cặp (j, k) của nút g chứa ít nhất hai cung tam giác $(j, \ell) \in P_g$ và $(m, \ell) \in P_g$. Do đó nút g là nút trong.



(a) j là nút trong

(b) k là nút trong

(c) g là nút trong

Hình 3.5: Cung tam giác mở rộng $(j, k) \in P_i$: (a) $(m, g) \in P_j$; (b) $(l, g) \in P_k$; (c) $(l, g) \in P_g$.

Định lý 3.1 (Lỗi biên). Một lỗi biên xuất hiện trên một nút biên nếu và chỉ nếu nút biên đó có chứa cung tam giác mở rộng.

Định lý 3.2 (Sửa biên lỗi). Nếu tất cả các nút có cung tam giác mở rộng được gán nhãn nút trong, thì không tồn tại bất kỳ điểm biên lỗi nào trong mạng.

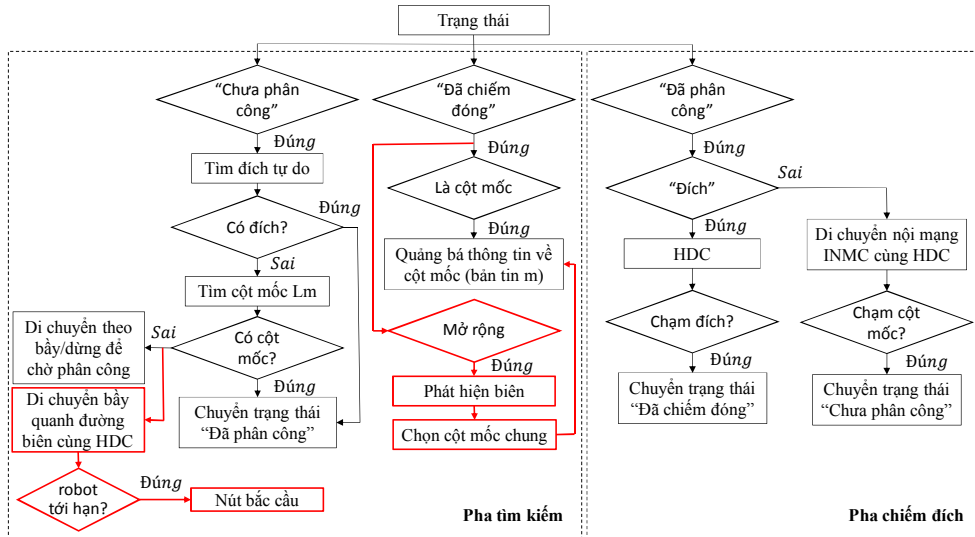
Tóm lại, DBD được phát triển trong luận án này sử dụng BEC để sửa lỗi biên thông qua xem xét cấu trúc hình học các kết nối cục bộ thay cho phương pháp đệ quy trong thuật toán gốc. BEC có độ phức tạp tính toán là $O(N_i^2)$ và độ phức tạp của truyền thông là $O(1)$.

3.1.2.3. Phân loại đường biên

Luận án đề xuất thuật toán phân loại đường biên trong và đường biên ngoài dựa trên mạng truyền thông để kiểm tra số nút trên biên n_b và tổng góc trong của đa giác biên Θ . Nó là đường biên trong nếu $\Theta = (n_b - 2) * \pi$, là đường biên ngoài nếu $\Theta = n_b * 2\pi - (n_b - 2) * \pi = (n_b + 2) * \pi$.

3.1.3. Đám mây đích không liên thông

DBD được tích hợp vào MTT để giải quyết các kịch bản đích không liên thông. Các nhiệm vụ bổ sung biểu diễn như trong hình 3.6.



Hình 3.6: Chiến lược MTT mở rộng.

- *Phát hiện biên và chọn cột mốc chung*: Khi MRS chiếm xong một đám mây đích và còn robot tự do, nó tìm đường biên của đám mây vừa chiếm đóng và chọn một nút biên làm cột mốc chung thu hút các đích tự do thông qua quảng bá bản tin m .

- *Tập trung ở cột mốc chung*: Robot tự do sử dụng DAR để tìm đường ngắn nhất tới cột mốc chung và chuyển sang "Đã phân công". Ở trạng thái này, robot dùng HDC di chuyển nội mạng đến cột mốc chung và chuyển trạng thái "Chưa phân công".

- *Di chuyển quanh biên*: Khi đã tập trung ở cột mốc chung, các robot sử dụng HDC di chuyển theo bầy xung quanh đường biên. Nếu phát hiện một đám mây đích mới thì MTT hoạt động để tìm và chiếm đóng các đích mới. Các robot tới hạn sẽ đóng vai trò *robot bắc cầu* liên kết các đám mây đích. Quá trình lặp cho đến khi không còn robot tự do nào hoặc bầy robot đi hết một vòng đường biên.

3.1.4. Kết quả thí nghiệm và thảo luận

Phần sau trình bày kết quả mô phỏng và thực nghiệm đánh giá hoạt động của HDC qua MTT.

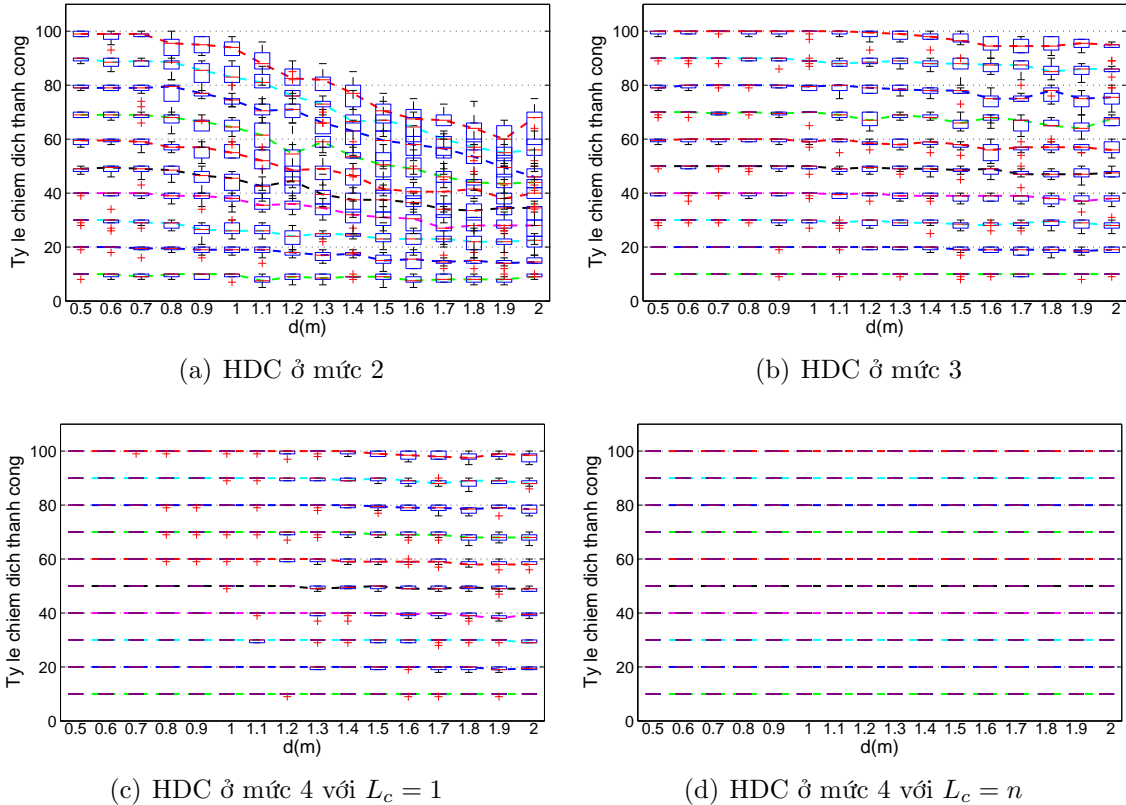
3.1.4.1. Mô phỏng

6400 thí nghiệm mô phỏng đã được thực hiện trên 1600 kịch bản đích liên thông được tạo ngẫu nhiên có số lượng từ 10 đến 100 đích và độ khó thay đổi theo $d = 0.5r_c - 2.0r_c$ (d càng lớn thì độ khó càng cao) trong các trường hợp HDC ở mức 2, mức 3, mức 4 với $L_c = 1$ và mức 4 với $L_c = n$. Số lượng robot được triển khai bằng số lượng đích với các tham số như bảng 3.1. Kết quả mô phỏng minh họa trong hình 3.7 và video mô phỏng 100 robot có tại địa chỉ <https://youtu.be/1nas4pGv2i8>.

Bảng 3.1: Tham số hệ thống cho mô phỏng

Tham số	r_c	r_a	r_{th}	ε	Δt	ζ	σ	β	Υ
Giá trị	1m	0.2m	0.4m	0.2m	10ms	30	0.75	1	0.75

Tỷ lệ trung bình chiếm đích thành công đạt 83,06% khi HDC ở mức 2 (hình 3.7.a), cao nhất là 98,82% (kịch bản dễ nhất với $d = 0,5r_c$) và giảm tới 69,06% (kịch bản khó nhất với $d = 2,0r_c$), trường hợp xấu nhất đạt 47,50%.



Hình 3.7: Tỷ lệ chiếm đích thành công

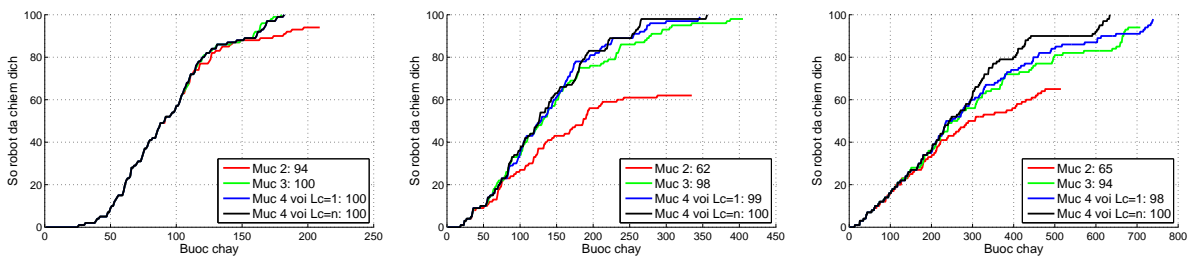
Khi HDC ở mức 3 đạt 97,41% cao hơn mức 2 (hình 3.7.b) vì các kết nối tới hạn dư thừa nằm trong các cấu trúc tam giác đã được loại bỏ. Tỷ lệ cao nhất đạt 99,47% (kịch bản dễ nhất với $d = 0,5r_c$) và giảm tới 94,73% (kịch bản khó nhất với $d = 2,0r_c$), đạt 72,50% trong trường hợp xấu nhất.

Khi HDC hoạt động tới mức 4 với $L_c = 1$, tức là các robot chỉ có thể phát hiện và xử lý các k-kết nối dạng tứ giác, tỷ lệ trung bình chiếm đích thành công đạt rất cao, 99,24%. Tỷ lệ này đạt 100% cho

các thí nghiệm phân bố dày (hình 3.7.c) trong khi nó đạt 97,97% trong các kịch bản phân bố thưa, trường hợp xấu nhất tỷ lệ này cũng đạt 90%.

Khi HDC hoạt động tới mức 4 với $L_c = n$, như dự báo, khi $L_c = n$, các robot luôn chiếm đóng 100% số đích trong mọi kịch bản từ đơn giản (phân bố dày) đến phức tạp (phân bố thưa) (hình 3.7.d). Có thể giải thích rằng khi $L_c = n$ thì các robot có thể phát hiện và xử lý tất cả các LCT để tiếp cận mục tiêu trong khi vẫn đảm bảo duy trì sự toàn vẹn của mạng đa robot.

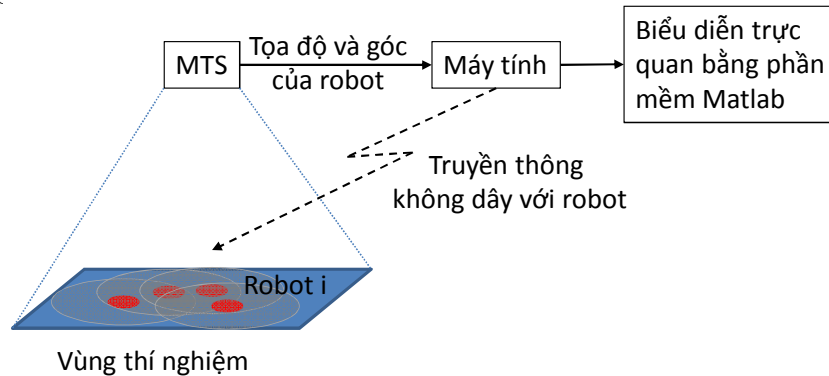
Độ phức tạp tính toán phụ thuộc nhiều vào kịch bản thí nghiệm. Tuy nhiên, nó không tăng đột biến từ kịch bản đơn giản đến kịch bản phức tạp như minh họa trong hình 3.8 cùng 100 robot. Trong cùng một kịch bản, việc tối ưu các ràng buộc chuyển động thông qua tinh giản các LCT là cần thiết để tăng tốc độ và tỷ lệ chiếm đích thành công. Về lý thuyết, HDC hoạt động tốt nhất khi ở mức 4 với bậc truyền thông $L_c = n$ tuy nhiên trong thực tế (với thí nghiệm 100 robot), L_c trung bình chỉ là $L_c = 3; 3,057; 3,657$ tương ứng với kịch bản phân bố dày, trung bình và thưa, tối đa $L_c = 10$.



(a) $d = 1.0$ (mật độ dày) (b) $d = 1.5$ (mật độ trung bình) (c) $d = 2.0$ (mật độ thưa)
 Hình 3.8: Tốc độ chiếm đích thành công theo thời gian trong trường hợp 100 đích

3.1.4.2. Thực nghiệm

Thực nghiệm sử dụng các robot di động hai bánh vi sai có đế hình đĩa tròn đường kính 14cm, khoảng cách hai bánh xe 13,5cm, bán kính bánh xe 1,4cm, $v_{max} = 0.8m/s$, được trang bị vi điều khiển 8 bit AVR ATmega128 làm bộ điều khiển, mô đun truyền thông nối tiếp Wixel.



Hình 3.9: Hệ thí nghiệm cùng các robot thật.

Do bài toán định vị, tổng hợp cảm biến của robot không phải đối tượng nghiên cứu của luận án nên trong các thí nghiệm, dữ liệu về vị trí, khoảng cách tương đối, chỉ số định danh của robot được thu thập và cung cấp cho robot qua hệ thống theo dõi chuyển động MTS (Motion tracking system) như hình 3.9. Mỗi robot chỉ nhận biết được thông tin về đối tượng (robot, vật cản, mục tiêu) trong S_i .

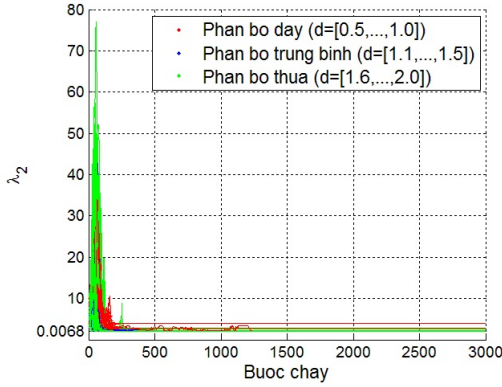
HDC và MTT được thử nghiệm thành công cùng 6 thí nghiệm: thí nghiệm 1-3 có đích liên thông, chứa các *bẫy* LCT; thí nghiệm 4 dùng ít robot chiếm nhiều đích (các robot chiếm đích trong một khoảng thời gian sau đó dời đi tìm và chiếm đích mới); thí nghiệm 5 và 6 có đích không liên thông. MRS đều chiếm đóng 100% đích khi HDC ở mức 4. Video thí nghiệm có thể xem trong các liên kết sau:

- ▷ Thí nghiệm 1: <https://youtu.be/gDEfK1HD7vM>
- ▷ Thí nghiệm 2: <https://youtu.be/6aEeFRky10g>
- ▷ Thí nghiệm 3: <https://youtu.be/Db0Fo0dYye0>
- ▷ Thí nghiệm 4: <https://youtu.be/uWuljXp1A5s>
- ▷ Thí nghiệm 5: <https://youtu.be/fnRhxdanKQY>
- ▷ Thí nghiệm 6: <https://youtu.be/CLQQJ0p-Puk>

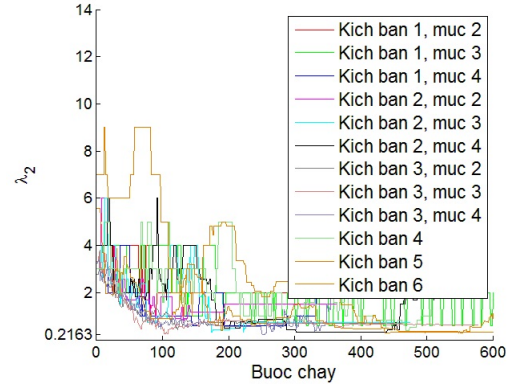
3.1.4.3. Thảo luận

Kết quả mô phỏng và thực nghiệm chỉ ra các thuộc tính của HDC như sau:

- HDC đảm bảo duy trì sự toàn vẹn của mạng đa robot như minh họa trong hình 3.10 ($\lambda_2 > 0$). HDC không yêu cầu ước lượng $\lambda_2 > 0$ như ACC và chỉ cần 0.01s cho tính toán, điều khiển thay vì vài giây chỉ để có được giá trị ước lượng $\lambda_2 > 0$ của ACC.



(a) λ_2 của 6400 thí nghiệm mô phỏng



(b) λ_2 của 12 thí nghiệm thực nghiệm

Hình 3.10: Thuộc tính kết nối của đồ thị $G(V, E)$ theo thời gian

- HDC có thể mở rộng vùng bao phủ mạng nhờ chiến lược tinh giản các cấu trúc LCT. Nhờ vậy thu được hiệu suất cao.
- HDC có tính linh hoạt, thích nghi với nhiều nhiệm vụ (chiếm đóng đích lâu dài hoặc tạm thời) và kịch bản ứng dụng (phân bố dày đến thưa, phân bố liên thông và không liên thông).

3.2. Bài toán bao phủ

MTT được sử dụng để triển khai MRS chiếm đóng các đích ảo để tạo lưới bao phủ lục giác.

3.2.1. Quy tắc tạo đỉnh ảo

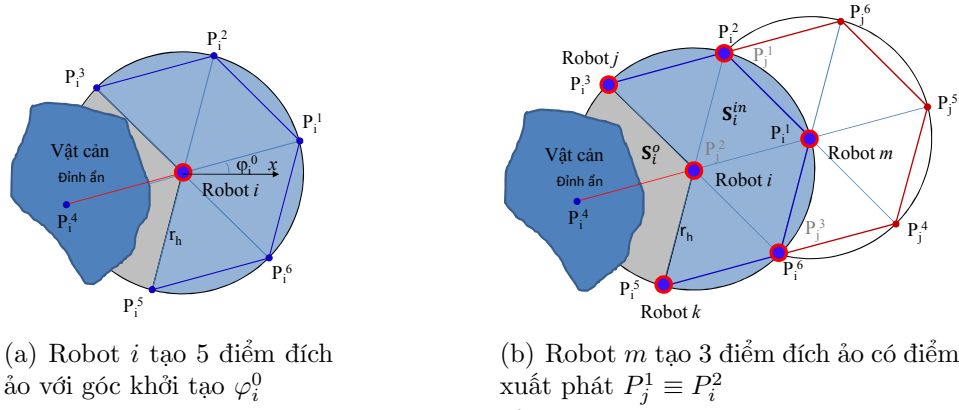
Quy tắc tạo đích ảo VTG (Virtual Target Generation) được minh họa trong hình 3.11. Khi robot i chiếm đóng một đỉnh lục giác, nó tạo ra $N_v = 6$ đỉnh cách đều trên đường tròn bán kính r_h như sau:

$$P_i^j = x_i + (r_h \cos \varphi_i^j, r_h \sin \varphi_i^j) \quad (3.4)$$

với $j \in I = [1, \dots, N_v]$ và φ_i^j được biểu diễn như sau:

$$\varphi_i^j = \varphi_i^0 + (j - 1)\varphi_h \quad (3.5)$$

với $\varphi_h = \frac{2\pi}{N_v}$ và φ_i^0 là góc khởi tạo, nhận giá trị bất kỳ nếu robot i là đỉnh đầu tiên của lưới lục giác, ngược lại φ_i^0 được gán giá trị góc giữ trục tọa độ cục bộ của robot i và cạnh e_{ij} , $j \in N_i^o$ với N_i^o là tập các hàng xóm của i đã chiếm đích ảo của robot i .



Hình 3.11: Quy tắc tạo đích ảo

Giả sử robot $k \in N_i^o$ được đặt ở đỉnh $P_i^j, j \in I$ của robot i được xác định bởi góc φ_i^j . Dễ dàng nhận ra rằng robot i và k có hai đỉnh chung là P_i^{j-1} và P_i^{j+1} tương ứng với hai góc φ_i^{j-1} và φ_i^{j+1} . Gọi P_i^o là tập chứa ba đỉnh $P_i^{j-1}, P_i^j, P_i^{j+1}$ tương ứng với robot k và P_i^{ob} là các đỉnh ấn của robot i . Đỉnh $P_i^j, j \in I$, được xem là đích ảo của robot i nếu P_i^j không thuộc P_i^o và P_i^{ob} . Tập đích ảo P_i của robot i được biểu diễn như sau:

$$P_i = \{P_i^j, j \in I \mid P_i^j \notin (P_i^o \cup P_i^{ob})\} \quad (3.6)$$

Một nút phạt có thể được tạo ra theo định nghĩa ?? khi tồn tại một vùng góc trong hoặc một vùng tiếp giáp giữa hai vùng con nằm giữa hai đỉnh ấn kề nhau $P_i^j, P_i^k \in P_i^{ob}$, tức là đoạn $L_{P_i^j P_i^k}$ giữa P_i^j và P_i^k giao với \mathbf{A}_I . Vị trí đỉnh phạt được xác định bởi góc sau:

$$\varphi_i^{pjk} = \varphi_i^j + \rho_p \frac{(\varphi_i^j + \varphi_i^k)}{2} \quad (3.7)$$

với $j \in I, k \in I^+$ thỏa mãn $k = j + 1$ nếu $j < N_v$ và $k = 1$ nếu $j = N_v$. ρ_p là hệ số phạt đảm bảo rằng đỉnh phạt P_i^{pjk} không trở thành một đỉnh ấn.

Tập các đỉnh phạt của robot i , ký hiệu là P_i^p , được biểu diễn như sau:

$$P_i^p = \{P_i^{pjk}, j \in I, k \in I^+ \mid P_i^j, P_i^k \in P_i^{ob}\} \quad (3.8)$$

Tổng hợp P_i và P_i^p , ta có tập các đích ảo của i như sau:

$$P_i^+ = P_i \cup P_i^p \quad (3.9)$$

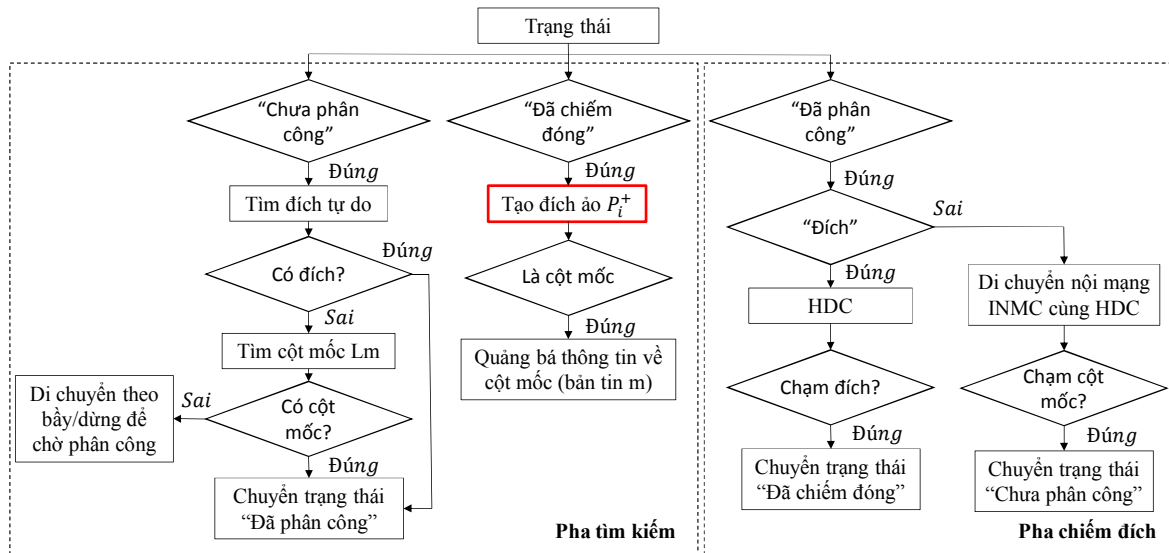
3.2.2. Điều khiển bao phủ

Điều khiển bao phủ, viết tắt DCC (Distributed Coverage Control), là sự kết hợp của MTT và VTG như hình 3.12. Bởi vậy DCC cũng có ba trạng thái hoạt động và hai pha làm việc như MTT. Hoạt động của DCC có hai điều cần lưu ý so với MTT như sau: (1) Ở trạng thái đã chiếm đích, robot gọi thuật toán VTG để tạo đích ảo. Nó trở thành cột mốc nếu tạo ra tập đích ảo khác rỗng; (2) Tại mỗi thời điểm chỉ cột mốc có chỉ số thấp nhất ở trạng thái *hoạt động (active)*, các cột mốc khác ở trạng thái *không hoạt động (inactive)*. Cột mốc *hoạt động* có nhiệm vụ thu hút các robot tự do đến chiếm các đích ảo của nó. Khi tất cả các đích ảo của robot được chiếm đóng thì cột mốc tiếp chuyển sang trạng thái *hoạt động*.

3.2.3. Kết quả thí nghiệm và thảo luận

3.2.3.1. Thử nghiệm

DCC được thử nghiệm thành công trên MRS thật cùng 6 thí nghiệm trong môi trường không vật cản (thí nghiệm 1-4) và môi trường có cấu trúc giới hạn bởi các cạnh đa giác lõm (Concave



Hình 3.12: Điều khiển bao phủ DCC kết hợp giữa MTT và VTG (khối đỏ).

Polygon)(thí nghiệm 5-6). Bán kính lục giác r_h lần lượt được thiết lập là $r_h = 1m$ và $r_h = 0.65m$. Video thí nghiệm có thể xem trong các liên kết sau:

- ▷ Thí nghiệm 1 (7 robot - 1 ô lục giác): <https://youtu.be/aq4eHcdB1WM>
- ▷ Thí nghiệm 2 (10 robot - 2 ô lục giác): <https://youtu.be/Eb6UjEZISnc>
- ▷ Thí nghiệm 3 (12 robot - 3 ô lục giác): <https://youtu.be/3NSJR7zxfEo>
- ▷ Thí nghiệm 4 (14 robot - 4 ô lục giác): <https://youtu.be/jUT0Mu0-djA>
- ▷ Thí nghiệm 5 (7 robot - phòng 1): <https://youtu.be/zYcsyFGsSoU>
- ▷ Thí nghiệm 6 (10 robot - phòng 2): <https://youtu.be/N9oeyyR-d3E>

Tỷ lệ bao phủ các phòng đạt 100% và mạng luôn kết nối ($\lambda_2 > 0$).

3.2.3.2. Thảo luận

Kết quả thí nghiệm cho thấy, điều khiển bao phủ có thể được thực hiện bằng chiến lược MTT trong đó mục tiêu chiếm đóng là các đích ảo được tạo theo cấu trúc lục giác. Nhờ quy tắc tạo đích ảo VTG có thể tạo các đỉnh ảo có quy tắc và bất quy tắc (nút phạt) nên lưới lục giác có thể bao phủ toàn bộ môi trường có cấu trúc bất kỳ.

3.3. Kết luận chương

Chương này ứng dụng HDC để xây dựng chiến lược MTT cho bài toán theo dõi đa mục tiêu và bao phủ. Trong theo dõi đa mục tiêu, MTT được thiết kế để tìm kiếm và chiếm đóng các đích thật, liên thông. Nó được bổ sung thuật toán phát hiện biên để giải quyết kịch bản đích không liên thông. Trong điều khiển bao phủ DCC, MTT kết hợp với VTG tạo lưới lục giác bao phủ môi trường có cấu trúc bất kỳ. Các thí nghiệm cho thấy, chiến lược MTT với nền tảng là HDC thu được hiệu suất cao. HDC đảm bảo duy trì toàn vẹn mạng đa robot và thích nghi với nhiều ứng dụng khác nhau. Chương này cũng đề xuất một phương pháp mới sửa lỗi biên BEC sử dụng cấu trúc kết nối cục bộ thay cho phương pháp đệ quy. Nội dung trình bày trong chương này đã được công bố trong các bài báo [CT2-CT7].

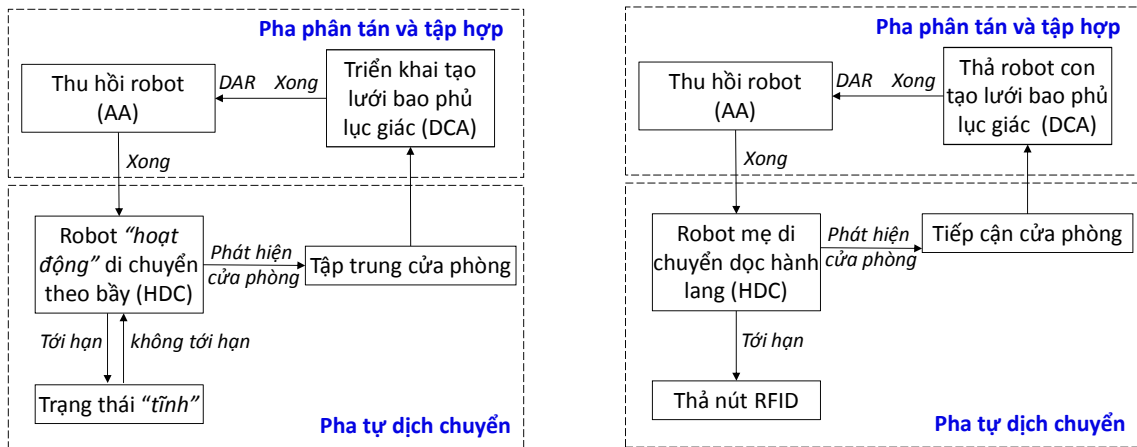
Chương 4 tiếp theo sẽ báo cáo về việc áp dụng HDC để xây dựng chiến lược triển khai MRS trong môi trường có cấu trúc giống tòa nhà nhằm minh họa thêm tính linh hoạt, thích nghi của HDC.

Chương 4

ỨNG DỤNG HDC CHO TRIỂN KHAI HỆ THỐNG ĐA ROBOT KHÁM PHÁ MÔI TRƯỜNG CÓ CẤU TRÚC

4.1. Chiến lược triển khai các robot đồng nhất

Chiến lược triển khai các robot đồng nhất DSHR (Deployment Strategy for Homogeneous Robots) sử dụng các robot giống nhau cả về thiết kế và tính năng, có 2 pha hoạt động như hình 4.1.a gồm:



(a) DSHR (b) DSNR
Hình 4.1: Chiến lược triển khai MRS trong môi trường có cấu trúc.

Pha tự dịch chuyển (self-displacement): thực hiện ba nhiệm vụ như sau:

- *Di chuyển theo bầy:* MRS sử dụng HDC để thực hiện hành vi di chuyển theo bầy dọc hành lang.
- *Tạo mạng xương sống:* MRS thiết lập mạng xương sống kết nối bầy robot với trạm cơ sở đặt ở lối vào tòa nhà giúp chuyển tải thông tin thu nhận được từ bầy robot tới trạm cơ sở. Nó được hình thành bằng cách gán cho các robot tới hạn trạng thái "tĩnh" (không chuyển động).

- *Tập trung ở cửa phòng:* Khi cửa phòng được phát hiện, bầy robot tập trung trước cửa để triển khai bao phủ. Một robot chính giữa cửa phòng nhất được phân công làm nút "tĩnh" đóng vai trò cột mốc dẫn đường cho các robot vào/ra phòng, nó có thể luân phiên hoặc chỉ phân công cho một robot.

Pha tự phân tán và tập hợp: thực hiện hai nhiệm vụ như sau:

- *Triển khai tạo lưới bao phủ lục giác:* Robot gần cột mốc nhất được triển khai vào trong phòng và trở thành nút lục giác đầu tiên. DCC được sử dụng để tạo lưới lục giác bao phủ toàn bộ phòng.

- *Thu hồi bầy robot:* Sau khi phòng được khám phá, các robot sử dụng thuật toán tập hợp AA (Aggregation Algorithm), để thu hồi và tập hợp các robot trước cửa phòng để tiếp tục di chuyển tới các phòng khác. AA theo nguyên tắc vào trước, ra sau FILO (First In - Last Out). Cụ thể, robot được triển khai sau cùng sẽ sử dụng DAR tìm tuyến đường ngắn nhất tới nút cột mốc ở cửa phòng và di chuyển nội mạng (INMC) về cột mốc ở cửa phòng. Khi chạm cột mốc, robot di chuyển đến điểm đích ảo chính là điểm dừng ban đầu trước khi triển khai vào trong phòng. Để tăng tốc độ thu hồi, một số robot có thể cùng được kích hoạt hành vi thu hồi nêu trên.

Sau khi tập hợp bầy, pha tự dịch chuyển được kích hoạt trở lại hướng về phía các vùng chưa được

khám phá. Nếu bầy chạm đến cuối hành lang, bầy sẽ bám theo mạng xương sống để tìm kiếm các vùng chưa được khám phá thuộc nhánh hành lang khác. Khi tất cả các nhánh đã được khám phá, bầy robot bám theo mạng xương sống để di chuyển trở về vị trí khởi tạo ban đầu.

4.2. Chiến lược triển khai robot mẹ, con

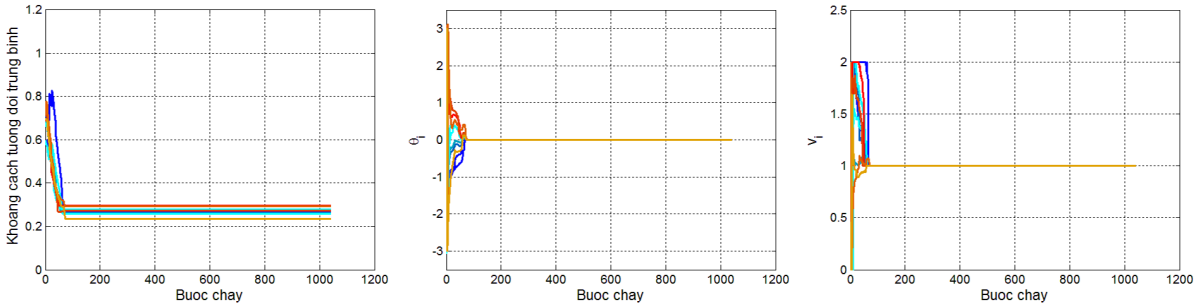
Chiến lược triển khai robot mẹ, con DSNR (Deployment Strategy for Non-homogeneous Robots) sử dụng robot mẹ có tính năng vượt trội bởi khả năng di chuyển, hệ thống cảm biến và có thể mang các robot con để thả/thu hồi vào/từ môi trường. DSNR được biểu diễn như hình 4.1.b, hoạt động như DSHR gồm pha tự dịch chuyển và pha tự phân tán và tập hợp. Điểm khác biệt là: (1) trong pha tự dịch chuyển, robot mẹ thả các nút mạng không dây (chẳng hạn nút RFID) trên hành lang để thiết lập mạng xương sống, (2) trong pha tự phân tán và tập hợp, robot mẹ đứng ở cửa phòng, thả các robot con để tạo lưới lục giác bao phủ phòng và đóng vai trò là cột mốc cho thuật toán AA thu hồi robot con.

4.3. Kết quả thí nghiệm và thảo luận

4.3.1. Mô phỏng

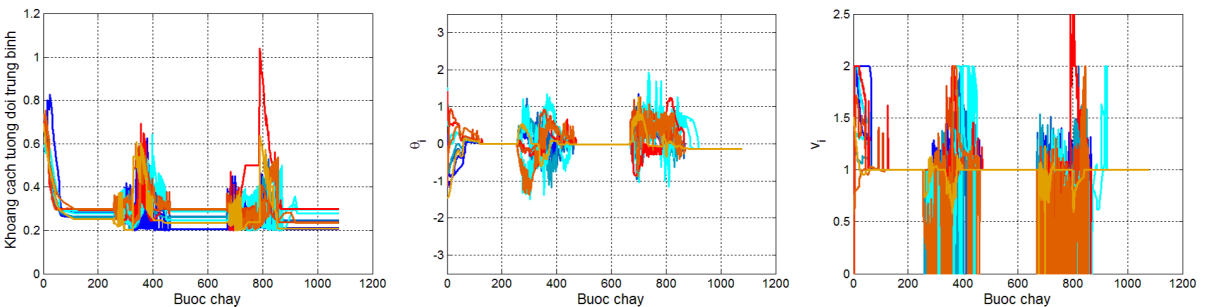
4.3.1.1. Di chuyển theo bầy

Trước tiên, luận án mô phỏng di chuyển theo bầy với 10 robot có thông số như bảng 3.1 trong vùng thí nghiệm $3m \times 12m$. Ban đầu, các robot kết nối trong cùng một mạng.



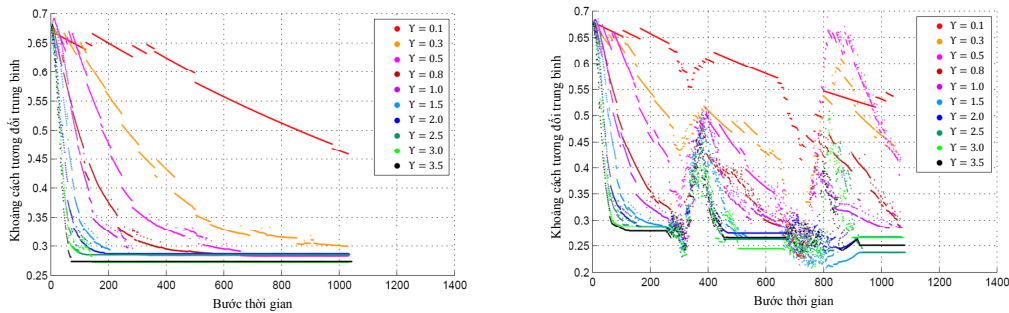
(a) Khoảng cách trung bình (b) Đồng thuận hướng (c) Đồng thuận vận tốc
Hình 4.2: 10 robot chuyển động theo bầy trong trường hợp không vật cản với $\Upsilon = 3.5$

Hình 4.2 biểu diễn kết quả trong trường hợp không có vật cản với hệ số liên kết $\Upsilon = 3.5$. Kết quả cho thấy, sau khoảng 70 bước (khoảng $1m$), các robot hội tụ tới cấu trúc cân bằng và di chuyển với quỹ đạo, hướng và vận tốc ổn định cho tới khi chạm đích. Ở cấu trúc cân bằng, robot chỉ chuyển động với thành phần vận tốc hướng đích và giữ khoảng cách trung bình với các hàng xóm trong khoảng $r_a = 0.2m$ đến $r_{th} = 0.4m$ (vùng tự do), chạm đích sau khoảng 1000 bước. Video thí nghiệm xem tại <https://youtu.be/G4fTqia0wI8>.



(a) Khoảng cách trung bình (b) Đồng thuận hướng (c) Đồng thuận vận tốc
Hình 4.3: 10 robot chuyển động theo bầy trong trường hợp có vật cản với $\Upsilon = 3.5$

Hình 4.3 biểu diễn kết quả trong trường hợp có 2 vật cản (hình tròn và tam giác) với hệ số liên kết $\Upsilon = 3.5$. Giống như thí nghiệm trước, sau thời gian khoảng 70 bước, các robot hội tụ đến trạng thái cân bằng và duy trì trạng thái này cho đến khi gặp vật cản thứ nhất. Khi gặp vật cản thứ nhất, các robot tránh vật bằng cách đi vòng qua nó trong khi vẫn đảm bảo duy trì liên kết bầy. Sau khi vượt qua vật cản, bầy robot một lần nữa hội tụ tới trạng thái cân bằng trong khi tiếp tục di chuyển tới đích. Khi gặp vật cản thứ hai, quá trình tránh vật và hội tụ đàn tương tự như đối với vật cản thứ nhất. Hình 4.3.a cho thấy MRS có ba khoảng thời gian hoạt động ở trạng thái cân bằng là khoảng trước khi gặp vật cản thứ nhất, giữa vật cản thứ nhất và thứ hai, và sau khi gặp vật cản thứ hai. Khoảng cách trung bình, hướng và vận tốc của robot có biến động lớn khi tương tác với vật cản. Thời gian di chuyển bầy trong kịch bản này không thay đổi nhiều so với thí nghiệm không vật cản. Video thí nghiệm xem tại <https://youtu.be/M06B0YnnZJQ>.

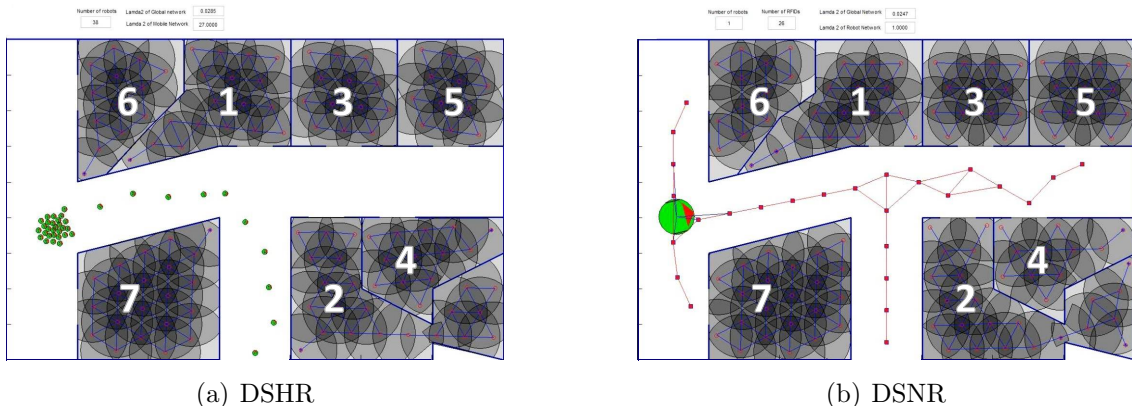


(a) Không vật cản (b) Có vật cản
Hình 4.4: Tốc độ hội tụ của bầy gồm 10 robot

Hình 4.4 biểu diễn tốc độ hội tụ của bầy robot trong quá trình di chuyển đến mục tiêu với hệ số $\Upsilon = [0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5]$. Nó cho thấy Υ càng lớn thì tốc độ hội tụ càng nhanh.

4.3.1.2. Triển khai MRS trong môi trường có cấu trúc

Tiếp theo, luận án đánh giá việc kết hợp di chuyển theo bầy và điều khiển bao phủ DCC trong DSHR và DSNR cùng môi trường có cấu trúc gồm 7 phòng hình dạng bất kỳ nối với nhau bởi 3 hành lang. Các tham số hệ thống được mô tả trong bảng 3.1. Hệ số liên kết $\Upsilon = 3.5$ cho pha dịch chuyển, $\Upsilon = 0.75$ cho pha phân tán và tập hợp.



(a) DSHR (b) DSNR
Hình 4.5: MRS triển khai khám phá, bao phủ môi trường có cấu trúc tòa nhà.

DSHR: MRS gồm 38 robot di động giống nhau, được khởi tạo ở vị trí lối vào của tòa nhà. MRS di chuyển dọc theo hành lang và neo lại các robot tối hạn tạo thành mạng xương sống nơi bầy đi qua. Khi phát hiện phòng chưa triển khai, các robot tập trung bầy trước cửa phòng, chọn một nút làm cột mốc để dẫn đường các robot vào/ra phòng và bắt đầu triển khai robot vào bên trong phòng tạo lưới bao phủ lục giác. Lần lượt 7 phòng đánh số từ 1 đến 7 được triển khai, khám phá như minh họa trong

hình 4.5.a, sử dụng số robot tương ứng là 18, 22, 13, 13, 12, 13, và 21. Mạng xương sống trên hành lang sử dụng tối đa 14 robot. Video thí nghiệm có thể xem tại địa chỉ <https://youtu.be/Cwv3hviRy1Q>.

DSNR: Robot mẹ mang theo 24 robot con và 26 nút mạng không dây, có tốc độ gấp 5 lần robot con, được khởi tạo ở lối vào tòa nhà. Các robot con có thông số giống như thí nghiệm với DSHR. Trong pha tự dịch chuyển, robot mẹ di chuyển dọc hành lang và thả nút mạng không dây cố định (chẳng hạn các nút RFID) hình thành mạng xương sống. Lần lượt 7 phòng được đánh số từ 1 đến 7 được khám phá và bao phủ như minh họa trong hình 4.5.b sử dụng số robot con tương ứng là 18, 24, 14, 12, 14, 13, và 23. Mạng xương sống trên hành lang sử dụng 26 nút mạng không dây cố định. Video thí nghiệm có thể xem tại địa chỉ <https://youtu.be/AMWxB2RElis>.

Về thời gian triển khai, DSNR nhanh hơn đáng kể so với DSHR (gấp 2.3 lần). Cụ thể thời gian pha phân tán và tập hợp giữa DSNR và DSHR gần như bằng nhau trong khi pha dịch chuyển của DSNR ít hơn nhiều so với DSHR (trung bình ít hơn 3,36 lần). Điều này có thể dễ dàng lý giải DSNR sử dụng robot mẹ có năng lực vượt trội so với robot con về khả năng di chuyển. Trong cả hai thí nghiệm, MRS có $\lambda_2 > 0$ chứng tỏ mạng đa robot luôn duy trì kết nối trong suốt quá trình triển khai.

4.3.2. Thực nghiệm

DSHR được kiểm chứng trên hệ thống thật gồm 13 robot triển khai vào môi trường có gồm 2 phòng nối với nhau bởi 1 hành lang. Đầu tiên 7 robot được triển khai bao phủ phòng số 1, sau đó thu hồi và di chuyển theo bầy đến phòng số 2. Hai robot được neo lại trên hành lang tạo mạng xương sống, 1 robot được neo tại cửa phòng số 2 để dẫn đường các robot vào/ra và 10 robot được triển khai bao phủ phòng số 2. Khi hoàn nhiệm vụ hoàn thành, các robot được thu hồi, bám theo mạng xương sống trở về vị trí ban đầu. Mạng đa robot được duy trì trong toàn bộ quá trình triển khai ($\lambda_2 > 0$). Video thí nghiệm có thể xem trong liên kết <https://youtu.be/I7sP3pm8zEE>

4.3.3. Thảo luận

DSHR và DSNR kết hợp dịch chuyển theo bầy và điều khiển bao phủ DCC với lõi là HDC. Cả hai mô hình đều sử dụng tối thiểu số lượng robot do tối ưu được số robot trong mạng xương sống và trong lưới lục giác, đảm bảo bao phủ toàn bộ môi trường. DSNR dịch chuyển nhanh hơn DSHR do sử dụng những ưu điểm vượt trội của robot mẹ. DSHR và DSNR có ưu điểm hơn chiến lược triển khai sử dụng APF nhờ sự phối hợp, phân nhiệm trên nền tảng mạng truyền thông.

4.4. Kết luận chương

Chương này trình bày chiến lược triển khai bầy robot đồng nhất (DSHR) và bầy robot mẹ, con (DSNR) khám phá môi trường cấu trúc tòa nhà. Chiến lược triển khai kết hợp di chuyển theo bầy và điều khiển bao phủ. HDC đảm bảo các robot thực hiện mục tiêu trong khi luôn duy trì sự toàn vẹn của mạng cho hoạt động trao đổi thông tin, dẫn đường. Điều này một lần nữa minh chứng khả năng linh hoạt của điều khiển HDC trong thiết kế các ứng dụng phức tạp có nhiều quá trình điều khiển khác nhau. Nội dung trình bày trong chương này đã được công bố trong các bài báo [CT2,CT3].

KẾT LUẬN

Luận án đã hoàn thành các mục tiêu nghiên cứu đề ra, đạt được các kết quả cụ thể sau:

- Đề xuất điều khiển phân tán đa tầng (HDC) đảm bảo duy trì và mở rộng mạng đa robot theo phương pháp mới, xem xét cấu trúc kết nối cục bộ giữa các robot. HDC có thể điều khiển với chu kỳ 0.01s trong khi phương pháp ACC cần vài giây để có giá trị ước lượng λ_2 cho bộ điều khiển. HDC cũng có ưu điểm hơn APF vì loại bỏ được các cực tiểu cục bộ nhờ chiến lược tinh giản các kết nối cục bộ.

- Ứng dụng HDC xây dựng chiến lược tự triển khai MTT cho hai bài toán điển hình về phối hợp đa robot là theo dõi đa mục tiêu và bao phủ. MTT kết hợp thủ tục phân nhiệm dựa trên trao đổi thông tin giữa các robot và HDC để thực thi nhiệm vụ. Vượt qua các nghiên cứu đã tồn tại, luận án tìm ra rằng bài toán theo dõi đa mục tiêu và bao phủ có đặc điểm chung: các đích cho bài toán theo dõi đa mục tiêu giống với các đích ảo của bài toán bao phủ, vì thế MTT được áp dụng để giải quyết cả hai bài toán. Trong bài toán bao phủ, luận án đề xuất bộ tạo đích ảo VTG (Virtual Target Generation) dựa trên cấu trúc lưới lục giác cho phép hệ thống đa robot bao phủ được môi trường có cấu trúc. Thêm vào đó, HDC được ứng dụng cho chiến lược DSHR và DSNR kết hợp chuyển động theo bầy và điều khiển bao phủ để khám phá môi trường có cấu trúc giống tòa nhà gồm nhiều phòng.

- Đề xuất thuật toán phát hiện và phân loại biên trong đó sửa lỗi biên được thực hiện bằng thuật toán mới BEC dựa trên tiếp cận hình học. BEC loại bỏ các lỗi biên thông qua xem xét cấu trúc kết nối cục bộ thay cho quá trình đệ quy và động bộ toàn cục. Luận án tích hợp thuật toán phát hiện biên vào MTT để giải quyết bài toán theo dõi đa mục tiêu với các kịch bản đích phân bố không liên thông.

HDC và các chiến lược triển khai được kiểm chứng và đánh giá hiệu quả thông qua mô phỏng và thực nghiệm cùng tối đa 14 robot di động. Kết quả cho thấy HDC và các chiến lược triển khai hoạt động ổn định, cho hiệu suất cao, đặc biệt khi được kích hoạt ở mức 4 với $L_c = n$, linh hoạt và thích nghi với nhiều loại kịch bản thí nghiệm khác nhau, có tiềm năng ứng dụng trong hoạt động an ninh, quốc phòng như tuần tra và giám sát, tìm kiếm và cứu hộ; hoạt động vận chuyển trong đời sống xã hội như kho hàng, sân bay, sản xuất quy mô lớn,...

Luận án sử dụng hai giả thiết về khả năng cảm nhận và truyền thông cho các robot di động. Mô hình cảm biến dải có dạng đĩa tròn được áp dụng cho tất cả các robot vì thế chúng có thể phát hiện, định vị và định danh các robot hàng xóm trong dải cảm nhận. Mặc dù giả thiết này được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu về MRS và mạng cảm nhận không dây di động, nó không thực sự thực tế đối với công nghệ cảm biến hiện nay và khi MRS được áp dụng trong môi trường thực. Mô hình xác suất và bổ sung nhiễu trắng cho các cảm biến đo dải có thể thực tế hơn của mô hình cảm biến. Bên cạnh đó, mô hình truyền thông nhị phân được áp dụng để biểu diễn truyền thông của robot với sự tồn tại của giao thức truyền thông P2P có tỷ lệ truyền/nhận thành công được đảm bảo trong vùng cảm nhận của robot. Mặc dù giả thiết này là hợp lý đối với các công nghệ truyền thông không dây hiện nay, nhưng việc truyền thông giữa các robot trong khoảng cách hẹp có thể bị cản trở bởi các chướng ngại vật và độ trễ trong truyền thông P2P gây ra bởi việc chuyển động của các robot vẫn là bài toán nghiên cứu mở trong mạng không dây. Trong tương lai, các nghiên cứu tiếp theo có thể được thực hiện như nghiên cứu mô hình xác suất cho cảm nhận và khả năng truyền thông cho HDC; mô hình học sâu cho bài toán lập kế hoạch và dẫn đường sử dụng HDC; điều khiển thích nghi HDC cùng biến dung sai tối hạn ε .

DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

[CT1] Pham Duy Hung, Pham Minh Trien, Tran Quang Vinh, and Trung Dung Ngo, "Accelerating multi-target tracking by a swarm of mobile robots with network preservation", *IEEE International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition (SoCPaR)*, Hanoi, Vietnam, 2013, pp.327-332.

[CT2] Pham Duy Hung, Pham Minh Trien, Tran Quang Vinh, and Ngo Trung Dung, "Self-deployment strategy for a swarm of robots with global network preservation to assist rescuers in hazardous environments", *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Bali, Indonesia, Dec 2014, pp.2655-2660.

[CT3] Ngo Trung Dung, Pham Duy Hung, and Pham Minh Trien, "A kangaroo inspired heterogeneous swarm of mobile robots with global network integrity for fast deployment and exploration in large scale structured environments", *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Bali, Indonesia, Dec 2014, pp. 1205-1212.

[CT4] Pham Duy Hung, Tran Quang Vinh, and Ngo Trung Dung, "A scalable, decentralised large-scale network of mobile robots for multi-target tracking", In: *Intelligent Autonomous Systems 13*, 2194-5357, vol. 302, Springer International Publishing, pp. 621-637, ISBN 978-3-319-08338-4.

[CT5] Pham Duy Hung, Tran Quang Vinh, and Ngo Trung Dung, "Distributed coverage control for networked multi-robot systems in any environments", *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Banff, Canada, 2016, pp. 1067-1072.

[CT6] Pham Duy Hung, Tran Quang Vinh, and Ngo Trung Dung, "An online local boundary detection and classification algorithm for networked multi-robot systems", *IEEE International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, Hanoi, Vietnam, 2016, pp. 253-258.

[CT7] Pham Duy Hung, Tran Quang Vinh, and Ngo Trung Dung, "An online distributed boundary detection and classification algorithm for mobile sensor networks", *Journal on Electronics and Communications (JEC)*, Vol. 7, No.1-2 (2017), pp. 29-36.

[CT8] Pham Duy Hung, Tran Quang Vinh, and Ngo Trung Dung, "Hierarchical distributed control for global network integrity preservation in multi-robot systems," *Dã nộp tạp chí IEEE Transactions on Cybernetics. Kết quả phản biện: 2 accepted, 3 major revisions..*