

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ

TRƯỜNG XUÂN HÙNG

**NGHIÊN CỨU THUẬT TOÁN TỐI ƯU
BẦY ONG TRONG HOẠCH ĐỊNH ĐƯỜNG ĐI
VÀ PHÂN CỤM ĐỘNG CHO HỆ ROBOT**

Ngành đào tạo: Cơ kỹ thuật

Mã số: 9520101

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ CƠ KỸ THUẬT

Hà Nội – 2026

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

Người hướng dẫn khoa học: PGS. TS. Phạm Mạnh Thắng

Phản biện: PGS. TS. Nguyễn Hoài Nam, Trường Điện

Điện tử, ĐH Bách Khoa Hà Nội

Phản biện: PGS. TS. Trần Ngọc Đoàn, Khoa Hàng không

Vũ trụ, Học viện Kỹ thuật Quân sự

Phản biện: TS. Nguyễn Thị Thanh Tân, Khoa Công nghệ

Thông tin, Trường Đại học Điện lực

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

Trước khi hệ robot ra đời, bài toán hoạch định đường đi chủ yếu dựa vào các thuật toán tìm kiếm (như Dijkstra, A*, RRT) trong môi trường có tính xác định cao, hoặc phương pháp trường thế năng nhân tạo (APF) do Khatib giới thiệu năm 1985 để dẫn hướng thông qua lực hút/đẩy ảo. Tuy nhiên, sự xuất hiện của hệ thống đa robot hoạt động cùng không gian đã làm thay đổi hoàn toàn bản chất vấn đề. Việc tìm kiếm đường đi lúc này không chỉ dành cho một cá thể đơn lẻ mà đòi hỏi những định hướng mới phức tạp hơn, nhằm đáp ứng sự tương tác và khác biệt về nhiệm vụ, điểm xuất phát cũng như đích đến của hàng loạt phần tử trong cùng một quy mô hệ thống lớn.

Một trong những định hướng nghiên cứu mới cho hoạch định đường đi hệ robot là nhóm các phương pháp dựa trên trí tuệ tập thể. Trong đó, Bonabeau định nghĩa "trí tuệ tập thể" là bất kỳ nỗ lực nào nhằm thiết kế thuật toán hoặc giải pháp giải quyết vấn đề theo cách phân tán lấy cảm hứng từ hành vi tập thể của bầy côn trùng có tập tính xã hội hoặc các xã hội động vật khác. Một vài phương pháp trí tuệ tập thể đã được đề xuất như: tối ưu bầy đàn phân tử (PSO), tối ưu đàn kiến (ACO), tối ưu bầy ong (ABC), tối ưu cỏ dại (IWO).

Trong bối cảnh đó, nghiên cứu sinh đã thực hiện luận án với đề tài "*Nghiên cứu thuật toán tối ưu bầy ong trong hoạch định đường đi và phân cụm động cho hệ robot*" với phạm vi nghiên cứu tập trung vào hệ thống đa robot với kiến trúc điều khiển tập trung, hoạch định đường đi và phân cụm các phần tử robot. Hệ thống đa robot được xem xét bao gồm tập hợp nhiều phần tử có cấu tạo tương tự nhau, hoạt động của chúng được quản lý, giám sát từ trạm điều khiển trung tâm. Cụ thể:

- Mỗi phần tử robot được phân công tác một tác vụ, tương ứng với vị trí bắt đầu và vị trí đích đến cụ thể. Các tác vụ độc lập với nhau và có vị trí bắt đầu và vị trí đích đến khác nhau.

- Hoạch định đường đi được thực thi ở trạm điều khiển trung tâm để xác định được hành trình di chuyển cho từng phần tử và truyền dữ liệu hành trình xuống từng phần tử robot.

- Phần tử robot thực thi các chức năng điều khiển cục bộ như: ổn định tốc độ, bám theo quỹ đạo, tự động phát hiện và tránh vật cản...

- Trong quá trình hoạt động, các robot chia sẻ thông tin về trạng thái hoạt động, dữ liệu vận hành (vị trí, hướng di chuyển, tốc độ...) với trạm điều khiển trung tâm. Ngược lại, dữ liệu vận hành của hệ thống được trạm điều khiển trung tâm gửi xuống các robot để cung cấp thông tin hỗ trợ cho điều khiển cục bộ tại từng phần tử.

Nghiên cứu sinh đã tập trung vào hai mục đích nghiên cứu: (1) hoạch định đường đi hoạch định đường đi dựa trên thuật toán ABC, đảm bảo được tối ưu toàn cục trong hoạch định đường đi đồng thời duy trì năng lực tìm kiếm để ứng phó với những biến đổi cục bộ; (2) Giải pháp phân vùng để hỗ trợ cho việc quản lý hệ thống đa robot; phân chia robot thành những nhóm nhỏ, chia sẻ dữ liệu độc lập theo từng nhóm để giảm khối lượng dữ liệu vận hành của hệ thống cần trao đổi. Trong đó, mục tiêu cụ thể đồng thời cũng là đóng góp chính của luận án là:

i. Cải tiến thuật toán ABC truyền thống với cốt lõi là tối ưu cấu trúc thông qua cơ chế co dãn sử dụng cặp toán tử đối ngẫu Co và Dẫn, đề xuất được thuật toán ElasticABC trong hoạch định đường đi cho hệ thống đa robot;

ii. Tích hợp chiến lược khởi tạo phỏng đoán dựa trên toán tử Dẫn vào trong thuật toán ElasticABC, thay thế cho hình thức khởi tạo ngẫu nhiên trong thuật toán ABC truyền thống.

iii. Tích hợp được kỹ thuật xử lý chuyên dụng (DeZigzagPath) vào trong thuật toán ElasticABC, để xử lý hiện tượng gấp khúc cục bộ thường gặp trong hành trình được tìm kiếm, hoàn thiện chất lượng đường đi thực tế.

iv. Dựa theo cách tiếp cận phân cụm mềm, sử dụng phân phối hỗn hợp Gauss để mô hình hoá sự phân bố phân tử robot theo xác suất căn cứ theo dữ liệu đầu vào là tập hợp các điểm giao cắt hành trình, đề xuất được phương pháp phân cụm động (DCM) chấp nhận sự chồng lấn linh hoạt về không gian giữa các cụm cho hệ thống đa robot,

v. Đề xuất tham số chi phí δ_k làm chỉ số đánh giá đại diện cho độ phức tạp quản lý và mức độ tiêu thụ tài nguyên của từng cụm, kết hợp với hàm mục tiêu bình phương tối thiểu f_{obj} , hoạt động như một "bộ lọc" để lựa chọn được cấu hình phân cụm có số lượng phân tử robot từng cụm cân bằng trong DCM.

vi. Đề xuất được hai giải pháp kỹ thuật xác định trạng thái chuyển động cùng với điều chỉnh hướng phát hiện vật cản cho các phân tử trong hệ thống đa robot; giải pháp đã lần lượt được cấp bằng độc quyền giải pháp hữu ích số 3615 và bằng độc quyền sáng chế số 48666.

Không kể phần mở đầu và kết luận, nội dung của luận án được tổ chức gồm 04 chương:

- Chương 1 trình bày tổng quan về các chủ đề nghiên cứu có liên quan từ giới thiệu về robot di động như là đối tượng cơ điện tử đến hệ thống đa robot và hoạch định đường đi cùng với phân vùng. Dựa trên khảo sát và đánh giá hạn chế hiện hữu, nghiên cứu sinh đề xuất định

hướng nghiên cứu, là cơ sở căn bản để triển khai các nội dung tiếp theo được trình bày trong Chương 2 và Chương 3.

- Chương 2 tập trung phát triển giải pháp hoạch định đường đi cho hệ thống đa robot bằng cách đề xuất biến thể ElasticABC với cơ chế tối ưu cấu trúc kết hợp khởi tạo phỏng đoán, tìm kiếm đường đi thích nghi với điều kiện môi trường. ElasticABC được sử dụng nhằm khắc phục hạn chế của thuật toán tối ưu bầy ong truyền thống. Kỹ thuật xử lý hậu kỳ DeZigzagPath cũng được đề xuất tích hợp để loại bỏ hiện tượng gấp khúc cục bộ. Các khung thuật toán cơ bản của ElasticABC được xây dựng để làm cơ sở cho giai đoạn thử nghiệm tiếp theo.

- Chương 3 tập trung vào nghiên cứu giải pháp phân cụm dựa trên mô hình hỗn hợp Gauss và thuật toán EM; đề xuất phương pháp phân cụm động (DCM) với cơ chế cân bằng tải thông qua tham số chi phí và sử dụng hàm mục tiêu toàn phương. DCM được sử dụng nhằm tìm kiếm cấu hình phân cụm cân bằng. Các khung thuật toán cơ bản của DCM đã được xây dựng để làm cơ sở cho giai đoạn thử nghiệm tiếp theo.

- Chương 4 trình bày chi tiết về kiểm chứng thuật toán ElasticABC và phương pháp DCM thông qua xây dựng chương trình mô phỏng trên máy tính và thực thi trên nhiều kịch bản đa dạng. ElasticABC thử nghiệm cho hệ robot có 10 phần tử, được so sánh với thuật toán ABC truyền thống cũng như đánh giá hoạt động trong những cấu hình vật cản khác nhau. Tiếp theo, thử nghiệm DCM tiến hành với hệ robot có tối đa 50 phần tử, được so sánh với phương pháp phân cụm cứng dựa trên k-means và đánh giá hoạt động cũng như đặc điểm phân tán không gian thông qua những cấu hình điểm giao cắt hành trình khác nhau.

Chương 1. Tổng quan về hoạch định đường đi

Trong những thập kỷ gần đây, sự phát triển của robot di động đã thúc đẩy sự dịch chuyển từ ứng dụng đơn lẻ sang hệ thống đa robot phức tạp (MRS - multi-robot systems, multi-robots). Chúng đã và đang trở thành xu hướng chủ đạo trong nhiều lĩnh vực như hậu cần, nông nghiệp công nghệ cao và tìm kiếm cứu nạn. Việc điều phối số lượng lớn phần tử robot di chuyển an toàn và hiệu quả trong cùng một không gian làm việc đã đặt ra thách thức to lớn về mặt thuật toán và kỹ thuật; cần có giải pháp hoạch định đường đi hiệu quả với hệ thống đa robot cùng với giải pháp phân vùng hoặc phân cụm khi quy mô về số lượng tăng lên để hỗ trợ cho hoạt động quản lý hệ thống. Chương này giới thiệu những tìm hiểu tổng quan về chủ đề liên quan đến đối tượng nghiên cứu: hệ thống đa robot, hoạch định đường đi, phân cụm. Nội dung của chương được cấu trúc để cung cấp cái nhìn toàn diện từ khái niệm cơ bản đến phương pháp giải quyết vấn đề cụ thể, trong đó bao gồm hai phần trọng tâm. Thứ nhất là khảo sát, phân tích và so sánh các nhóm phương pháp hoạch định đường đi, từ thuật toán cổ điển cho đến phương pháp trí tuệ nhân tạo hoặc phương pháp trí tuệ tập thể/mô phỏng sinh học, đặc biệt tập trung vào phương pháp tối ưu bầy ong. Thứ hai là khảo sát, phân tích và phân tích các phương pháp phân cụm "cứng" hiện có, từ các kỹ thuật phân vùng không gian kinh điển đến các thuật toán dựa trên dữ liệu. Cuối cùng, thông qua việc đánh giá thách thức và khoảng trống trong các nghiên cứu hiện có, phần cuối chương đề xuất định hướng nghiên cứu cụ thể nhằm giải quyết bài toán di chuyển cho hệ thống đa robot trong môi trường phức tạp.

Một trong những thách thức cơ bản nhất nằm ở sự cân bằng giữa chất lượng tối ưu và khả năng mở rộng. Phương pháp cổ điển như A*

tuy đảm bảo tính tối ưu về đường đi nhưng lại trở nên kém hiệu quả khi số chiều không gian tăng lên, cần chi phí tính toán rất lớn với không gian cấu hình nhiều chiều. Phương pháp phỏng đoán đem lại sự linh hoạt nhưng thường xuyên đối mặt với nguy cơ mắc kẹt tại các điểm tối ưu cục bộ; phương pháp APF cũng gặp phải vấn đề cổ hủ này. Thách thức càng trở nên nghiêm trọng khi quy mô hệ thống tăng, bởi độ phức tạp của bài toán MRPP gia tăng đáng kể theo số lượng phần tử robot trong hệ thống.

Thách thức lớn thứ hai là việc xử lý môi trường động và tính không chắc chắn. Hầu hết các phương pháp hoạch định toàn cục đều giả định môi trường đã biết trước và không đổi, khiến chúng không thể đối phó với những tình huống không dự đoán trước. Mặc dù các kỹ thuật tránh va chạm cục bộ được đề xuất để giải quyết vấn đề này, nhưng bản thân chúng lại có những hạn chế riêng, ví dụ như APF bị dao động.

Về các hướng nghiên cứu, thứ nhất là nghiên cứu giải pháp hoạch định đường đi cho hệ thống đa robot dựa trên nền tảng trí tuệ tập thể, trọng tâm là thuật toán Tối ưu bầy ong. Giải quyết bài toán giới hạn của không gian tìm kiếm cố định trong thuật toán ABC truyền thống. Nghiên cứu sinh tập trung nghiên cứu theo định hướng phát triển cơ chế biểu diễn giải pháp linh hoạt, cho phép thuật toán tự động điều chỉnh cấu trúc và độ phức tạp của đường đi tương thích với môi trường. Mục tiêu là xây dựng một mô hình kết hợp hiệu quả: vừa tận dụng khả năng tìm kiếm toàn cục của bầy đàn để tối ưu hóa chi phí di chuyển, vừa tích hợp khả năng biến đổi cấu trúc cục bộ để thích ứng nhanh với các vật cản hoặc thay đổi bất ngờ trong quá trình vận hành. Định hướng này góp phần đáp ứng mục tiêu nghiên cứu thứ nhất của Luận án.

Thứ hai là giải quyết vấn đề áp lực tính toán và khả năng phối hợp khi quy mô hệ thống đa robot tăng cao, nghiên cứu đề xuất giải pháp phân chia không gian làm việc thông qua ứng dụng năng lực "phân cụm mềm" của GMM để phân chia các phần tử robot vào các cụm hoạt động và chia sẻ dữ liệu vận hành hệ thống một cách độc lập, giải quyết bài toán tổ chức và phối hợp cho hệ thống đa robot. Thiết lập cơ chế cân bằng về số lượng phần tử robot trong từng cụm thông qua hàm tiêu toàn phương. Định hướng này góp phần đáp ứng mục tiêu nghiên cứu thứ hai của Luận án.

Kết luận

Chương này đã tổng kết đầy đủ về sự phát triển cùng thực trạng nghiên cứu của MRS. Sự chuyển dịch từ một phần tử robot đơn lẻ sang các hệ thống phức tạp đã giúp MRS trở thành giải pháp then chốt trong các lĩnh vực hậu cần, nông nghiệp và cứu nạn, cho phép các phần tử robot phối hợp chia sẻ nhiệm vụ mà một cá thể đơn lẻ không thể hoàn thành. Với bối cảnh như vậy, MRPP cũng có xu hướng dịch chuyển rõ rệt từ thuật toán cổ điển sang phương pháp trí tuệ tập thể và mô phỏng sinh học. Trong đó, thuật toán ABC được đánh giá cao nhờ tính đơn giản và khả năng tìm kiếm toàn cục mạnh mẽ, tuy nhiên vẫn tồn tại hạn chế về tốc độ hội tụ và khả năng khai thác cục bộ ở giai đoạn sau của quá trình tìm kiếm. Đồng thời, để quản lý hiệu quả hệ thống khi quy mô số lượng tăng lên, các kỹ thuật phân cụm đã được khảo sát, đặc biệt nhấn mạnh sự cần thiết của các phương pháp phân cụm "mềm" như mô hình hỗn hợp Gauss (GMM) để thay thế tính cứng nhắc của các ranh giới phân chia truyền thống và xử lý tốt hơn tính không chắc chắn trong môi trường biến động. Mặc dù các công trình hiện có đã đạt được nhiều thành tựu, nhưng thách thức về sự cân bằng giữa chất lượng tối ưu và khả năng mở rộng vẫn là một khoảng trống

nguyên cứu lớn cần giải quyết. Từ đó, luận án xác định hướng nghiên cứu tập trung vào nghiên cứu thuật toán ABC với cải tiến về cấu trúc và cơ chế biểu diễn linh hoạt và ứng dụng năng lực phân cụm của GMM để thiết lập cơ chế điều phối hiệu quả cho hệ thống đa robot quy mô lớn, góp phần đáp ứng trực tiếp hai mục tiêu nghiên cứu trọng tâm của đề tài.

Chương 2. Tối ưu bầy ong trong hoạch định đường đi

Luận án đề xuất một giải pháp cải tiến mới cho thuật toán ABC, biến thể ElasticABC, tập trung giải quyết vấn đề khả năng khai thác cục bộ hạn chế và không gian tìm kiếm cố định. Khi đó, hành trình tìm kiếm có số lượng điểm trung gian thích nghi được điều kiện của môi trường cho từng phần tử robot. Nội dung của chương này trình bày chi tiết về quá trình xây dựng thuật toán với cặp toán tử đối ngẫu Co và Dẫn, khởi tạo phỏng đoán, kỹ thuật xử lý chuyên dụng DeZigzagPath, các phương trình cho ba giai đoạn thực thi của thuật toán. Bên cạnh đó, một số khung thuật toán cơ bản của ElasticABC cũng được giới thiệu trong chương này. Nội dung trình bày của Chương 2 góp phần đáp ứng mục đích nghiên cứu thứ nhất của Luận án.

Xét một không gian làm việc cho N robot, nơi được bố trí các vật cản tĩnh. Định nghĩa không gian vật cản $\mathcal{O}$ là vùng thuộc $\mathcal{W}$ có chứa các vật cản tĩnh. Không gian tự do $\mathcal{F}$ là một phần cụ thể của không gian làm việc $\mathcal{W}$ nơi các robot có thể di chuyển tự do. Chúng ta có mối quan hệ giữa $\mathcal{F}$ và $\mathcal{W}$ như sau:

$$\mathcal{F} \subset \mathcal{W}$$

và

$$(\mathcal{F} \cup \mathcal{O}) \subset \mathcal{W}$$

Khi N phần tử robot, được gọi là $A_1, A_2, \dots, A_N$, di chuyển theo các quỹ đạo độc lập từ điểm xuất phát riêng đến các đích trong không gian làm việc $\mathcal{W}$. Giả thiết tập hợp điểm xuất phát và tập hợp điểm đích đến của N robot lần lượt là

$$(q_{10}, q_{20}, \dots, q_{N0})$$

và

$$(q_{1G}, q_{2G}, \dots, q_{NG})$$

Các điểm đều trong không gian tự do $\mathcal{F}$, khi đó quỹ đạo của phần tử A_r bất kỳ được định nghĩa như sau:

$$Path_r(t) = f_{pp}(q_{r0} \quad q_{rG})$$

Toán tử Dẫn được dùng khi một đoạn hành trình của phần tử robot cắt qua vật cản, biên dạng lỗi. Điểm trung gian được thêm mới được xác định theo thành phần pháp tuyến và thành phần tiếp tuyến của bề mặt tại điểm va chạm; tọa độ của nó được xác định theo biểu thức như sau

$$wp_{new} = C + (d_{safe} + \epsilon) \cdot \mathbf{n}_C + \lambda \cdot \mathbf{t}_C$$

trong đó C là tọa độ của điểm va chạm; d_{safe} là khoảng an toàn tối thiểu để robot không va chạm với vật cản khi di chuyển; $\epsilon \geq 0$ là hệ số ngẫu nhiên để duy trì đặc điểm khám phá toàn cục trong giai đoạn khởi tạo, $\mathbf{n}_C$ là vec-tơ pháp tuyến đơn vị; λ là hệ số trượt theo phương tiếp tuyến, nhận giá trị ngẫu nhiên, $\mathbf{t}_C$ là vec-tơ tiếp tuyến đơn vị.

Toán tử Co được sử dụng để loại bỏ bớt điểm trung gian trong bộ ba điểm liên tiếp gần thẳng hàng với nhau, thông qua kiểm tra góc mở θ tại điểm trung gian nằm giữa, biểu thức xác định là

$$\cos\theta = \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}}{\|\mathbf{a}\| \|\mathbf{b}\|}$$

với $\mathbf{a}$ là vector đoạn nối từ $wp_{r,i-1}$ đến $wp_{r,i}$; $\mathbf{b}$ là vector đoạn nối từ $wp_{r,i}$ đến $wp_{r,i+1}$. Góc mở θ này phải vượt quá ngưỡng cho phép để làm điều kiện xoá điểm $wp_{r,i}$; đồng thời việc xoá không tạo ra đường giao cắt vật cản mới.

Biểu thức mô tả quỹ đạo của phần tử A_r được viết lại như sau

$$Path_r(t) = f_{pp}(q_{r0}, wp_{r,1} \dots wp_{r,i} \dots wp_{r,k}, q_{rG})$$

trong đó $wp_{r,i}$ là tọa độ điểm trung gian thứ i , k là số lượng điểm trung gian.

Hàm mục tiêu được thiết lập bao gồm tổng độ dài Euclid và thành phần phạt va chạm. Xét cho phần tử robot A_r , hàm mục tiêu được mô tả như sau

$$f_{obj,r} = L_r + \omega_1 \sum_{j=1}^m S(r, j)$$

trong đó L_r là khoảng cách Euclid giữa hai điểm trung gian thứ $i+1$ và i , $wp_{r,i+1}$ và $wp_{r,i}$

$$L_r = \sum_{i=0}^k \|wp_{r,i+1} - wp_{r,i}\|_2$$

ω_1 là hệ số phạt, có giá trị đủ lớn để ngăn không cho phần tử va chạm với vật cản; và $S(r, j)$ là hàm kiểm tra va chạm được xác định theo biểu thức sau

$$S(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{if } wp_{r,j} \in \mathcal{O} \\ 0, & \text{if } wp_{r,j} \notin \mathcal{O} \end{cases}$$

(Error!
No text of
specified
style in
document..1)

trong đó $wp_{r,j}$ là điểm trung gian thứ j của phần tử A_r .

Thuật toán ABC được thực thi theo vòng lặp với ba giai đoạn căn cứ theo công trình của Karaboga và các cộng sự: (1) giai đoạn ong thợ, mỗi cá thể sẽ tìm kiếm giải pháp mới, ở đây chính là vị trí mới cho điểm trung gian trong vùng lân cận của vị trí hiện tại; (2) giai đoạn ong quan sát, xác suất chọn giải pháp được xác định theo biểu thức hàm thích nghi của hàm mục tiêu; (3) giai đoạn ong trình sát, nếu một giải pháp không được cải thiện sau một số chu kỳ được xác định trước, nó sẽ bị loại bỏ. Con ong thợ liên quan trở thành ong trình sát và khám phá một giải pháp mới bằng cách sử dụng khởi tạo phỏng đoán.

Kỹ thuật khử đoạn gấp khúc, DeZigzagPath, được thiết kế như một công cụ duỗi thẳng đoạn gấp khúc cục bộ trong đường đi của robot

trong khi vẫn phải bảo toàn được đặc trưng hình học chính đã tạo ra bởi thuật toán ElasticABC. DeZigzagPath sử dụng tham số biên độ "dao động" cho phép làm tiêu chuẩn phân loại đoạn gấp khúc. Cụ thể hơn, một thuật toán lặp cho bộ ba điểm trung gian liên tiếp, tính toán khoảng cách từ điểm hiện tại đến đoạn thẳng nối tắt giữa hai điểm trước và sau h.

Kết luận

Chương này đã trình bày chi tiết về quá trình xây dựng biến thể ElasticABC, cải tiến từ thuật toán ABC truyền thống, để hoạch định đường đi cho hệ thống đa robot với hai đặc điểm quan trọng như sau. (1) Về mặt phương pháp luận, ElasticABC cải tiến nhược điểm của cấu trúc vector cố định trong phương pháp ABC truyền thống. Thông qua việc áp dụng cơ chế co giãn cùng cặp toán tử đối ngẫu kết hợp với khởi tạo phỏng đoán, thuật toán không những giảm thiểu không gian tìm kiếm không cần thiết ban đầu mà còn cho phép đường đi tự thích nghi với độ phức tạp của môi trường. Đồng thời, hoạt động song song của cặp toán tử Co và Dẫn đã tạo ra sự cân bằng động giữa khả năng khám phá, tránh vật cản hoặc thoát khỏi bẫy cục bộ, với khả năng khai thác, tối ưu hóa độ dài, loại bỏ điểm dư thừa. (2) Đề xuất kỹ thuật xử lý hậu kỳ DeZigzagPath giữ vai trò quan trọng trong việc hoàn thiện chất lượng đường đi; loại bỏ triệt để hiện tượng gấp khúc cục bộ trong khi vẫn giữ nguyên cấu trúc tổng thể của đường đi.

Những công bố liên quan đến Chương 2 có: Công trình 2 trong Danh mục các công trình khoa học. Ngoài ra, nghiên cứu sinh đã nộp bản thảo Công trình 7 cho tạp chí Array thuộc nhà xuất bản Elsevier.

Chương 3. Phương pháp phân cụm động

Khi quy mô hệ thống đa robot ngày càng gia tăng về số lượng phần tử, nhu cầu vận hành phức tạp kèm theo khả năng đáp ứng nhanh chóng. Bên cạnh vấn đề điều khiển cục bộ của từng cá thể, việc quản lý vận hành của hệ thống cần duy trì tốc độ xử lý và chia sẻ thông tin vận hành từ trạm điều khiển trung tâm xuống các robot, với hệ thống có kiến trúc điều khiển tập trung. Do đó, việc tìm kiếm một cơ chế phân cụm trở thành một yêu cầu cần thiết để hỗ trợ cho hoạt động quản lý vận hành. Luận án đề xuất một phương pháp phân cụm mới dựa theo cách tiếp cận phân chia mềm của GMM, lựa chọn được cấu hình phân cụm có số lượng phần tử của từng cụm là cân bằng: khả năng cân bằng tải. Hệ thống có thể chia sẻ dữ liệu độc lập theo từng cụm, qua đó giảm khối lượng dữ liệu vận hành của hệ thống cần trao đổi. Nội dung của chương này trình bày chi tiết về quá trình xây dựng phương pháp phân cụm động (DCM) với sự kết hợp giữa mô hình GMM và thuật toán EM, đề xuất tham số chi phí δ_k và hàm mục tiêu bình phương tối thiểu f_{obj} . Bên cạnh đó, một số khung thuật toán cơ bản của DCM cũng được giới thiệu trong chương này. Nội dung trình bày của Chương 3 góp phần đáp ứng mục đích nghiên cứu thứ hai của Luận án.

Hai giải pháp kỹ thuật được đề xuất tích hợp trong phần tử robot, hỗ trợ nhận thức môi trường xung quanh. (1) Giải pháp thứ nhất là phương pháp ước lượng trạng thái động học của robot thông qua thiết bị đo lường quán tính và thuật toán xử lý dữ liệu thời gian thực. Dữ liệu đầu vào được tính toán để xác định các tham số trạng thái bao gồm: hướng định vị, vận tốc góc, gia tốc (tăng/giảm tốc), cũng như các biến động động lực học như sóc, rung và độ nghiêng. Các thông

số ước lượng này đóng vai trò là đầu vào cho hệ thống điều khiển và giám sát, phát hiện các trạng thái bất thường nhằm đảm bảo tính an toàn và ổn định. (2) Giải pháp thứ hai là một cơ cấu hiệu chỉnh hướng chuyên dụng cho hệ cảm biến phát hiện vật cản, cho phép điều chỉnh được FOV tổng thể như: mở rộng hoặc thu hẹp hoặc chệch về một phía (trái hoặc phải). Ưu điểm nổi bật của cơ cấu này là khả năng cấu hình một lần duy nhất, cho phép robot thích nghi với các hành lang có biên độ hẹp và cấu trúc chân giá hàng đa dạng mà không yêu cầu thiết kế lại hệ thống cơ khí.

Trên cơ sở đánh giá nghiên cứu hiện có, phương pháp phân cụm động với hai giai đoạn sử dụng mô hình GMM được đề xuất cho hệ thống đa robot có kiến trúc điều khiển tập trung. Phương pháp này phân chia toàn bộ robot thành nhiều nhóm nhỏ hơn, dễ quản lý hơn, nhằm mục đích cách giảm khối lượng dữ liệu vận hành gửi từ trạm điều khiển trung tâm xuống bằng cách cân bằng tải cho từng cụm và dữ liệu chia sẻ cho từng cụm độc lập với nhau, qua đó giảm tải công việc tổng thể của hệ thống. Khi đó, mỗi robot chỉ cần duy trì liên lạc và phối hợp hoạt động (nếu cần) với các robot khác trong nhóm được chỉ định.

Xét một hệ thống đa robot với N phần tử, nếu tồn tại điểm giao cắt giữa quỹ đạo của A_r với quỹ đạo của A_i , chúng ta định nghĩa các điểm giao cắt như sau:

$$(Co_{r,i}) = Path_r(t) \cap Path_i(t) \neq \emptyset$$

Vì vậy, tập dữ liệu các điểm giao cắt giữa các quỹ đạo của N robot là:

$$C = \bigcup_{r,i=0}^N (Co_{r,i})$$

và mối quan hệ giữa mỗi phần tử robot với tập dữ liệu là

$$A_i \Leftrightarrow Path_r(t) \Leftrightarrow Co_{r,i}$$

Biểu thức toán học mô tả GMM và thuật toán EM được mô tả dựa theo công bố của McLachlan và Rathnayake cùng với sách "Mathematics for Machine Learning".

Xét trường hợp tổng quát về một tổ hợp tuyến tính của K hàm mật độ xác suất tuân theo phân bố chuẩn, nó được biểu diễn thông qua công thức sau

$$p(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^K w_i \mathcal{N}(\mathbf{x}|\mu_i, \Sigma_i)$$

trong đó $\mathcal{N}(\mathbf{x}|\mu_i, \Sigma_i)$ được gọi là thành phần thứ i của mô hình hỗn hợp, với giá trị trung bình là μ_i và ma trận hiệp phương sai Σ_i ; phương trình mô tả cụ thể đối với thành phần $\mathcal{N}(\mathbf{x}|\mu_i, \Sigma_i)$ là như sau

$$\mathcal{N}(\mathbf{x}|\mu_i, \Sigma_i) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} (|\Sigma_i|)^{\frac{1}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mu_i)^T \Sigma_i^{-1}(\mathbf{x} - \mu_i)\right)$$

Với giả định hai phía của công thức đều là phân bố chuẩn, giá trị w_i được gọi là trọng số trộn của thành phần thứ i ; các giá trị w_i phải thoả mãn điều kiện sau

$$\begin{cases} w_i > 0 \\ \sum_{i=1}^K w_i = 1 \end{cases}$$

Thuật toán EM cung cấp một cách tiếp cận lặp đi lặp lại để tìm các tham số của mô hình GMM thông qua việc tính toán giá trị "trách nhiệm" của mỗi thành phần đối với từng điểm dữ liệu theo các bước sau:

Bước khởi tạo: chọn giá trị ban đầu ngẫu nhiên cho các tham số giá trị trung bình μ_i , ma trận hiệp phương sai Σ_i , và trọng số trộn w_i ; từ đó tính được giá trị khởi tạo cho hàm logarit khả năng.

Bước E, kỳ vọng: dựa trên tham số hiện tại, đánh giá các giá trị "trách nhiệm", được viết lại như sau

$$\gamma(z_i) = f_E(C_i|x_j) = \frac{w_i \mathcal{N}(x_j|\mu_i, \Sigma_i)}{\sum_{k=1}^K w_i \mathcal{N}(x_j|\mu_k, \Sigma_k)}$$

Bước M, tối đa: cập nhật lại các tham số dựa vào giá trị "trách nhiệm" $\gamma(z_i)$

$$\begin{aligned}\mu_i &= \frac{\sum_{j=1}^N f_E(C_i|x_j) x_j}{N w_i} \\ \Sigma_i &= \frac{\sum_{j=1}^N f_E(C_i|x_j) (x_j - \mu_i)(x_j - \mu_i)^T}{N w_i} \\ w_i &= \frac{\sum_{j=1}^N f_E(C_i|x_j)}{N}\end{aligned}$$

Để đánh giá về yếu tố cân bằng tải giữa các cụm, biểu thị qua sự phối hợp giữa các phần tử trong hệ thống đa robot, tham số "chi phí" hoàn toàn mới được đề xuất. Chi phí này được xác định bởi số lượng robot tham gia chia sẻ thông tin với nhau trong một khoảng thời gian xác định

$$\delta_k = \frac{1}{N_k}$$

trong đó $k = 1..K$ với K là số lượng cụm và N_k là số lượng robot được phân bổ trong cụm thứ k .

Tham số δ_k đóng vai trò như là chỉ số đánh giá độ phức tạp quản lý của hệ thống, đại diện cho mức độ trung bình về tài nguyên truyền thông và xử lý phối hợp mà từng phần tử robot được nhận. Hơn nữa, trong hoạt động của thuật toán EM để xác định tập tham số cho các thành phần của mô hình GMM, bản chất lặp của thuật toán EM tạo ra

nhiều kết quả tiềm năng khác nhau. Hàm mục tiêu được đề xuất để đạt được kết quả phân cụm gần tối ưu, cụ thể là

$$f_{obj} = \sqrt{\sum_{k=1}^K (\delta_k)^2} \rightarrow \min$$

Đây là hàm mục tiêu bình phương tối thiểu, xác định dựa theo tham số chi phí cho từng thành phần của mô hình GMM; vai trò như một cơ chế lọc để buộc hệ thống hướng đến sự cân bằng tải thông qua lựa chọn được cấu hình phân cụm phù hợp nhất.

Kết luận

Nội dung của chương này đã trình bày chi tiết về quá trình xây dựng phương pháp phân cụm động, được sử dụng để chia các phần tử trong hệ thống đa robot vào những cụm nhỏ hơn; có hai đặc điểm quan trọng. (1) Lựa chọn cách tiếp cận phân cụm mềm, DCM tích hợp GMM cùng với thuật toán EM, cho phép mô hình hóa sự phân bố robot theo xác suất. (2) Đề xuất tham số chi phí δ_k đóng vai trò như là chỉ số đánh giá độ phức tạp quản lý của hệ thống và hàm mục tiêu toàn phương f_{obj} có vai trò là bộ lọc để lựa chọn được cấu hình phân cụm cân bằng tải: các cụm có số lượng phần tử cân bằng với nhau.

Những công bố liên quan đến Chương 3 có: Công trình 1, 3, 5, và 6 trong Danh mục các công trình khoa học.

Chương 4. Thử nghiệm và đánh giá hoạt động

Nghiên cứu sinh đã phát triển các chương trình mô phỏng trên máy tính sử dụng phần mềm MATLAB, để thử nghiệm và đánh giá hoạt động của ElasticABC và DCM. Nội dung chương này trình bày chi tiết về quá trình thử nghiệm và đánh giá hoạt động thông qua thực thi các chương trình mô phỏng trong nhiều kịch bản thử nghiệm khác nhau. Đối tượng thử nghiệm là hệ thống đa robot có kiến trúc điều khiển tập trung, các phần tử robot có cấu tạo tương tự nhau, hoạt động theo sự quản lý, giám sát từ một trạm điều khiển trung tâm. Khi mỗi phần tử được phân công một tác vụ, tương ứng với vị trí bắt đầu và vị trí đích đến cụ thể, thuật toán ElasticABC sẽ thực thi để tìm kiếm đường đi gần tối ưu cho từng robot. Khi mở rộng bài toán, bên cạnh ElasticABC, những thuật toán khác cũng có thể được dùng để hoạch định đường đi, ví dụ như A* hoặc ABC truyền thống. Trong quá trình robot di chuyển theo hành trình, thực thi tác vụ, dữ liệu hoạt động và vận hành được từng phần tử chia sẻ về trạm điều khiển trung tâm; ngược lại trạm điều khiển trung tâm cung cấp dữ liệu vận hành của hệ thống đến các phần tử robot. Thuật toán DCM được dùng để phân chia các phần tử thành cụm nhỏ hơn, khi đó dữ liệu vận hành của hệ thống được gửi theo cụm. Thử nghiệm được tiến hành với kịch bản: (1) đối với thuật toán ABC truyền thống, hệ thống có 3 phần tử; (2) đối với thuật toán ElasticABC, hệ thống có 10 phần tử; (2) đối với thuật toán DCM, hệ thống có 50 phần tử và xem xét trường hợp thu gọn quy mô chỉ còn 25 phần tử. Việc lựa chọn giá trị cụ thể không giảm tính tổng quát của thuật toán do tham số đã được quy định một biến đầu vào.

Những kết quả chủ yếu đã đạt được như sau:

i. ElasticABC với cải tiến cốt lõi là tối ưu cấu trúc kết hợp khởi tạo phỏng đoán đã minh chứng khả năng cân bằng giữa khám phá và khai thác; tìm kiếm được hành trình gần tối ưu và thích nghi hiệu quả với điều kiện môi trường thông qua điều chỉnh có chọn lọc số lượng điểm trung gian. Thuật toán thể hiện tính ổn định cao, có khả năng xử lý các kịch bản khởi tạo "xấu" hoặc môi trường phức tạp.

ii. Kỹ thuật DeZigzagPath được thiết kế chuyên dụng cho ElasticABC, đã minh chứng được khả năng xử lý vấn đề gấp khúc cục bộ trong kết quả tìm kiếm, hoàn thiện được chất lượng hành trình thực tế và thể hiện tính ứng dụng rất cao.

iii. Kết quả đối sánh hoạt động của ElasticABC với thuật toán ABC truyền thống đã khẳng định được chất lượng vượt trội của thuật toán đề xuất.

iv. DCM với cách tiếp cận mềm trong phân cụm đã thể hiện được sự ổn định và tin cậy trong hoạt động, thích nghi linh hoạt với những biến động của môi trường cũng như khi thay đổi quy mô hệ thống. Đồng thời, hình thái cụm có sự giao thoa và chấp nhận chồng lấn, hấp thụ sự phức tạp của dữ liệu đầu vào và môi trường. Tham số chi phí và hàm mục tiêu toàn phương hoạt động như "công cụ" lựa chọn cấu hình cụm phù hợp. DCM là giải pháp phân cụm hoàn toàn phù hợp để làm nền tảng cho việc tổ chức quản lý trong hệ thống đa robot.

Kết quả thử nghiệm đã khẳng định ElasticABC hoàn toàn đáp ứng mục đích nghiên cứu thứ nhất và DCM hoàn toàn đáp ứng mục tiêu nghiên cứu thứ hai của Luận án.

Những công bố liên quan đến Chương 4 bao gồm: Công trình 1, 3 và 4 trong Danh mục các công trình khoa học. Ngoài ra, nghiên cứu sinh đã nộp bản thảo Công trình 7 cho tạp chí Array thuộc nhà xuất bản Elsevier.

Kết luận và hướng phát triển

Nghiên cứu sinh đã tiến hành những nghiên cứu khác nhau để phát triển được thuật toán ElasticABC, đảm bảo tối ưu toàn cục trong hoạch định đường đi đồng thời duy trì năng lực tìm kiếm để ứng phó với những biến đổi cục bộ, và phương pháp phân vùng DCM hỗ trợ quản lý hệ thống đa robot, phân chia robot thành những nhóm nhỏ qua đó giảm khối lượng dữ liệu vận hành của hệ thống cần trao đổi. Những đóng góp chính được tóm tắt như sau:

- Tìm hiểu về ứng dụng thực tiễn của thuật toán hoạch định đường đi kết hợp với quy tắc giao thông cụ thể để vận hành robot trong môi trường thực tế. Đồng thời, tập trung nghiên cứu về khía cạnh tối ưu của thuật toán ABC truyền thống, xem xét ở hai mô hình quần thể tập trung và phi tập trung. Kết quả đã được công bố trong Công trình 2 và 4 thuộc Danh mục các công trình khoa học.

- Phát triển biến thể ElasticABC ứng dụng cho hoạch định đường đi hệ thống đa robot, cải tiến thuật toán ABC truyền thống về tối ưu cấu trúc sử dụng cặp toán tử đối ngẫu Co và Dẫn kết hợp chiến lược khởi tạo phỏng đoán, tích hợp kỹ thuật xử lý hậu kỳ chuyên dụng DeZigzagPath. ElasticABC có khả năng cân bằng giữa khám phá và khai thác; đường đi của robot thích nghi với độ phức tạp của môi trường thông qua việc cơ chế tự động điều chỉnh số lượng điểm trung gian. Thuật toán hoạt động ổn định và tin cậy trong điều kiện thử nghiệm mô phỏng với nhiều kịch bản khác nhau, có khả năng xử lý tình huống khởi tạo "xấu" để tìm kiếm giải pháp gần tối ưu với chi phí thấp. Kết quả đã được hoàn thiện trong Công trình 7 thuộc Danh mục các công trình khoa học, đã nộp bản thảo cho tạp chí "Array" thuộc danh mục WoS/Scopus.

- Đề xuất phương pháp phân cụm DCM theo cách tiếp cận phân cụm mềm của mô hình GMM kết hợp thuật toán EM, sử dụng tham số chi phí δ_k và hàm mục tiêu toàn phương f_{obj} để lựa chọn cấu hình cụm có số lượng phần tử tương đối cân bằng. Mô hình phân cụm phân bố theo xác suất và chấp nhận sự chồng lấn linh hoạt. Thông qua các thử nghiệm mô phỏng với nhiều kịch bản khác nhau, DCM đã thể hiện được tính ổn định, khả năng thích nghi linh hoạt về hình thái cụm và tính độc lập với điều kiện môi trường cũng như quy mô hệ thống. Kết quả đã được công bố trong Công trình 1 và 3 thuộc Danh mục các công trình khoa học.

- Đề xuất hai giải pháp kỹ thuật xác định trạng thái chuyển động cùng với điều chỉnh hướng phát hiện vật cản cho các phần tử trong hệ thống đa robot; giải pháp đã được cấp bằng độc quyền giải pháp hữu ích số 3615 và bằng độc quyền sáng chế số 48666. Chúng thuộc về tính năng nhận thức của phần tử robot và hỗ trợ cho tính năng điều hướng cùng với bài toán hoạch định đường đi. Kết quả đã được công bố trong Công trình 5 và 6 thuộc Danh mục các công trình khoa học.

Hướng phát triển của luận án

Với mỗi phương pháp đề xuất trong luận án, nghiên cứu sinh vẫn để ngỏ các vấn đề cần xem xét kỹ lưỡng hơn trong các nghiên cứu tiếp theo. Cụ thể như sau:

- Nghiên cứu cơ chế lựa chọn thích nghi hệ số K, số lượng cụm, trong giải thuật DCM dựa trên các chỉ số định lượng từ dữ liệu đầu vào để tối ưu mô hình.

- Đánh giá hoạt động của giải thuật ElasticABC trong điều kiện môi trường có vật cản biên dạng có biên dạng phức tạp, như đa giác lõm, chữ U hoặc V, xử lý bài toán bẫy cực trị địa phương.

- Đánh giá hiệu suất hoạt động của giải thuật DCM và ElasticABC khi ứng dụng cho các hệ thống đa robot trong điều kiện vận hành thực tế.

Danh mục công trình khoa học

Bài báo tạp chí thuộc danh mục WoS hoặc Scopus

1. **Hung Truong Xuan**, Thang Pham Manh, Nha Nguyen Quang, Hanh Nguyen Thi Hong Hanh, "Dynamic Clustering of Multi-Mobile Robot System using Gaussian Mixture Model", *J. Robot. Control*, vol. 6, no. 5 SE-Articles, pp. 2129–2140, Aug. 2025, doi: 10.18196/jrc.v6i5.27184

Báo cáo hội nghị quốc tế

2. **Hung Truong Xuan**, Pham Manh Thang and Thuc Nguyen Van, "Digitizing Working Space of the Multi Mobile Robots System Using an Approximate Cell Decomposition Method", Proceedings of the 7th International Conference on Engineering Mechanics and Automation (ICEMA7), pp. 3-8, 2023, ISBN: 978-604-357-241-4, doi: 10.15625/vap.2023.0110.
3. **Hung X. Truong**, Thang M. Pham, Nha Q. Nguyen, Hanh T. H. Nguyen and Viet A. Dang, "Evaluation of Spatial Stability and Adaptability in a Dynamic Clustering Method for Multi-Robot Systems", Proceedings of the 8th International Conference on Engineering Mechanics and Automation (ICEMA8), 2025.
4. **Hung X. Truong**, Thang M. Pham, Nha Q. Nguyen, Hanh T. H. Nguyen and Viet A. Dang, "Artificial Bee Colony for Multi-Robot Path Planning: A Comparative Study of Population Structures", Proceedings of the 8th International Conference on Engineering Mechanics and Automation (ICEMA8), 2025.

Sở hữu trí tuệ

5. Nguyễn Thị Hồng Hạnh (VN); **Trương Xuân Hùng** (VN); Nguyễn Đức Minh (VN); Bằng độc quyền sáng chế số 48666

"Cụm cơ cấu điều chỉnh hướng và robot vận chuyển hàng hoá trong nhà kho bao gồm cụm cơ cấu điều chỉnh hướng này", 2025.

6. **Trương Xuân Hùng** (VN); Nguyễn Thị Hồng Hạnh (VN); Trịnh Thăng Long (VN); Nguyễn Văn Thúc (VN); Bằng độc quyền giải pháp hữu ích số 3615 "Phương pháp xác định trạng thái chuyển động của robot di động vận chuyển hàng hoá để phục vụ điều khiển và giám sát robot", 2024.

Bài báo tạp chí nộp cho tạp chí "Array" thuộc danh mục WoS/Scopus

7. An Elastic Artificial Bee Colony Algorithm with Dynamic Dimensionality for Multi-Robot Path Planning.