

BỘ GIÁO DỤC  
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC  
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



**Nguyễn Thị Thanh Vân**

**NGHIÊN CỨU NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG TRUYỀN THÔNG  
VÀ ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN HỌC SÂU TĂNG CƯỜNG  
TRONG ĐIỀU HƯỚNG TỐI ƯU CHO ROBOT DI ĐỘNG**

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN VÀ TỰ  
ĐỘNG HÓA**

**Mã số: 9 52 02 16**

**Hà Nội - 2024**

**Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ,  
Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam**

Người hướng dẫn khoa học:

Người hướng dẫn 1: TS. Ngô Mạnh Tiến, Viện Vật lý

Người hướng dẫn 2: TS. Nguyễn Công Lượng, Trường Đại học Phenikaa

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi ... giờ ..., ngày ... tháng ... năm 202....

Có thể tìm hiểu luận án tại:

1. Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
2. Thư viện Quốc gia Việt Nam

# MỞ ĐẦU

## 1. Tính cấp thiết của luận án

Nhằm đáp ứng nhu cầu của xã hội, số lượng robot di động trong các nhà máy ngày càng tăng một cách đáng kể. Ngoài ra, các thiết bị IoT (Internet of Things) cũng ngày một tăng trong các nhà máy. Điều này dẫn đến vấn đề chia sẻ không gian làm việc giữa các robot, giữa robot với các thiết bị khác và giữa robot với con người. Để đạt hiệu quả làm việc, các robot di động tại các nhà máy vừa cần hoàn thành nhiệm vụ di chuyển, vừa cần thực hiện trao đổi thông tin với hệ thống giúp việc quản lý cũng như vận hành trong toàn nhà máy được đảm bảo. Chính vì vậy, việc tích hợp truyền thông không dây cho robot di động là một giải pháp. Khi đó, robot di động đóng vai trò là một thành phần trong hệ thống IoT vừa giúp giảm bớt tiêu hao năng lượng tính toán cho robot vừa giải quyết vấn đề truyền thông trong nhà máy. Để đảm bảo robot vừa hoàn thành nhiệm vụ vừa truyền thông tin cậy với hệ thống, việc giải bài toán tối ưu quỹ đạo cho robot di động trong môi trường truyền thông không dây tại nhà máy là cần thiết. Từ đó, NCS chọn đề tài "*Nghiên cứu nâng cao chất lượng truyền thông và ứng dụng thuật toán học sâu tăng cường trong điều hướng tối ưu cho robot di động*".

## 2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án

- Nghiên cứu mô hình và thuật toán tối ưu hệ thống mạng nâng cao chất lượng truyền thông phục vụ hoạt động của robot di động.

- Nghiên cứu, phát triển các thuật toán tối ưu quỹ đạo với mục tiêu tối thiểu năng lượng tiêu thụ cho robot di động hoạt động trong môi trường truyền thông lý tưởng.

- Nghiên cứu, phát triển các hệ thống điều hướng cho robot di động kết hợp tối ưu quỹ đạo với truyền thông không dây và tối thiểu năng lượng tiêu thụ của hệ thống.

- Mô phỏng kiểm chứng và đánh giá hiệu quả của các thuật toán

và mô hình hệ thống đề xuất.

### **3. Các nội dung nghiên cứu chính của luận án**

#### **Về lý thuyết:**

- Nghiên cứu tổng quan về robot di động hoạt động trong môi trường truyền thông, tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước, từ đó rút ra các hướng nghiên cứu thích hợp cho luận án.

- Nghiên cứu, đề xuất mô hình và thuật toán tối ưu mạng hỗ trợ giúp mở rộng vùng phủ sóng và nâng cao chất lượng truyền thông không dây trong nhà máy.

- Xây dựng bài toán tối ưu quỹ đạo di chuyển cho robot trong nhà máy nhằm tối thiểu năng lượng tiêu thụ trong điều kiện truyền thông lý tưởng, từ đó xây dựng thuật toán giải quyết bài toán đó.

- Nghiên cứu, đề xuất hệ thống điều hướng cho robot di động trong môi trường điều kiện truyền thông chưa đảm bảo.

- Xây dựng bài toán tối ưu quỹ đạo di chuyển cho robot trong nhà máy nhằm tối thiểu năng lượng tiêu thụ trong môi trường truyền thông chưa đảm bảo, từ đó xây dựng thuật toán giải quyết bài toán đó.

- Nghiên cứu sử dụng các công cụ tối ưu để thực hiện mô phỏng.

#### **Về thực nghiệm:**

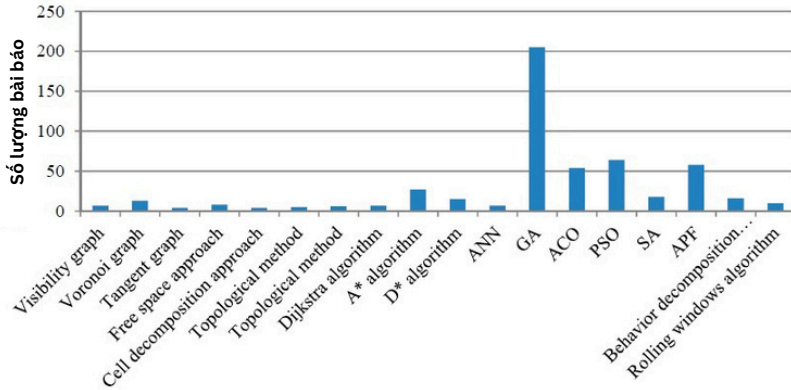
- Xây dựng các mô phỏng kiểm chứng hiệu quả của mô hình và thuật toán tối ưu mạng truyền thông không dây hỗ trợ hoạt động của robot di động.

- Xây dựng các mô phỏng kiểm chứng thuật toán tối ưu quỹ đạo cho robot di động trong môi trường truyền thông lý tưởng.

- Xây dựng các mô phỏng kiểm chứng thuật toán tối ưu quỹ đạo cho robot di động trong môi trường truyền thông chưa đảm bảo.

## **Chương 1. TỔNG QUAN VỀ VIỆC LẬP QUỸ ĐẠO CHO ROBOT DI ĐỘNG TRONG NHÀ MÁY**

### **1.1. Bài toán lập quỹ đạo cho robot di động**



Hình 1.2: Số lượng các công trình nghiên cứu về lập quỹ đạo cho robot dựa trên số liệu từ Engineering Village [2].

Trong suốt nhiều thập kỷ qua, lĩnh vực robot luôn được quan tâm, không ngừng phát triển và có ảnh hưởng lớn đến cuộc sống của con người [12]. Trong các nhà máy hiện đại, robot di động với khả năng di chuyển linh hoạt đóng một vai trò quan trọng trong các ứng dụng công nghiệp như robot vận chuyển hàng hóa, và các robot phục vụ các khâu chính trong dây chuyền sản xuất [13]. Chính vì vậy, robot di động đã và đang được nhiều nhà nghiên cứu cũng như các doanh nghiệp trong và ngoài nước quan tâm. Nhìn chung, cấu trúc của điều khiển chuyển động cho một Robot di động có thể chia ra 3 giai đoạn: Định vị, lập quỹ đạo chuyển động (Localization and Path Planning), điều khiển bám quỹ đạo (Trajectory Tracking), và điều khiển động cơ robot (Motor Control). Việc điều khiển chuyển động cho robot di động có hai vấn đề chính cần quan tâm đó là lập quỹ đạo chuyển động và thiết kế bộ điều khiển bám quỹ đạo. Ở luận án này, NCS quan tâm đến bài toán lập quỹ đạo chuyển động (trajectory planning) cho robot di động. Đây là lĩnh vực được quan tâm với số lượng lớn công trình nghiên cứu trong nhiều thập kỷ qua với rất nhiều thuật toán được đề xuất như tổng hợp trên Hình 1.2 [2].

## 1.2. Robot di động và truyền thông không dây

Theo xu hướng phát triển IoT (Internet of Things) trong công

ngành IIoT (Industrial IoT), các thiết bị trong nhà máy có xu hướng tích hợp các giao thức truyền thông. Sự kết nối của hàng loạt các thiết bị và yêu cầu về khả năng thu thập/chia sẻ dữ liệu thúc đẩy yêu cầu về chất lượng truyền thông giữa các thiết bị. Có hai vấn đề chính của hệ thống truyền thông hiện nay, một là vấn đề về độ tin cậy và độ trễ của hệ thống mạng, hai là vấn đề về vùng chết tín hiệu (vùng không nhận được tín hiệu).

Do đó, để đạt được sự tăng trưởng thông lượng bền vững của các mạng không dây trong nhà máy phục vụ hoạt động cho các robot di động với chi phí, độ phức tạp và tiêu thụ năng lượng thấp thì việc phát triển các công nghệ mới cùng với tối ưu hệ thống mạng là một vấn đề cấp bách.

### **1.3. Tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước**

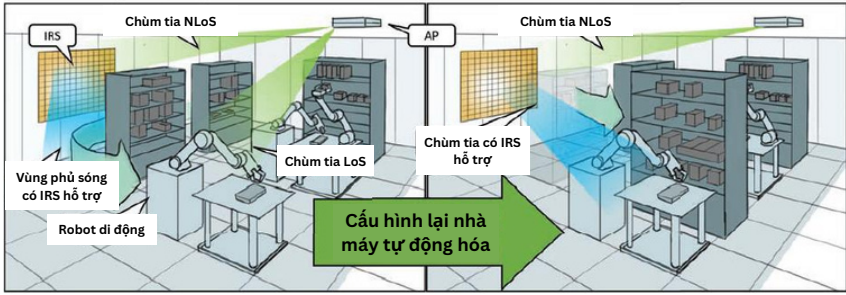
#### **1.3.1. Tình hình nghiên cứu trong nước**

Tại Việt Nam, việc lập quỹ đạo cho robot đã và đang được quan tâm trong công nghiệp và nghiên cứu. Trong công nghiệp, hiện nay, phần lớn robot trong hầu hết các nhà máy đều đang di chuyển với quỹ đạo đặt sẵn. Robot được dẫn đường nhờ các đường từ tính đặt trước dưới sàn di chuyển hoặc sử dụng các mã QR code trên sàn hay dùng một số công cụ dẫn đường khác. Tuy nhiên, các nghiên cứu vẫn đang nỗ lực với kỳ vọng robot có khả năng tự đưa ra được các quyết định tối ưu cho các nhiệm vụ [26-31].

#### **1.3.2. Tình hình nghiên cứu ngoài nước**

##### **Vấn đề lập quỹ đạo cho robot di động**

Để đảm bảo các robot không va chạm với vật cản trong quá trình di chuyển, các nghiên cứu trước đây về lập quỹ đạo cho robot đã đề xuất nhiều thuật toán cho các kịch bản ứng dụng khác nhau. Bằng cách chia không gian liên tục thành một mạng lưới với các điểm hữu hạn, các thuật toán lập quỹ đạo cho robot hiệu quả, bao gồm các thuật toán Dijkstra, A\*, và D\*, đã được phát triển để tìm đường đi ngắn nhất giữa hai vị trí trong môi trường tĩnh và động [32].



Hình 1.5: IRS giúp thay đổi vùng phủ sóng tương ứng với sự thay đổi layout của nhà máy. [4]

Với mục đích giảm năng lượng tiêu thụ và tăng hiệu quả sử dụng nguồn pin cho robot di động, các giải pháp thiết kế phần cứng cùng phần mềm đã được đề xuất trong nhiều công trình nghiên cứu. Một quỹ đạo tốt có thể giúp giảm đáng kể năng lượng cần tiêu thụ của robot. Tuy nhiên, bài toán tối ưu quỹ đạo nhằm tối thiểu năng lượng tiêu thụ cho robot là một thách thức bởi đây là một bài toán tối ưu không lồi. Các tác giả [39-45] đã đưa ra các giải pháp khác nhau cho việc tối thiểu năng lượng cho robot.

Các công trình [46-48] đề xuất sử dụng kỹ thuật học sâu tăng cường DRL (Deep Reinforcement Learning) tìm đường cho robot trong môi trường chưa biết trước hoặc biết trước một phần.

### **Tích hợp truyền thông không dây cho robot di động**

Đã có nhiều tác giả quan tâm đến việc tích hợp truyền thông cho hệ thống robot. Các công bố [49-50] đã đưa ra các giải pháp tối ưu hệ thống. Ngoài ra, các công bố [4-6] và [51] quan tâm đến việc sử dụng tấm phản xạ thông minh IRS (Intelligent Reflecting Surface) để hỗ trợ nâng cao chất lượng truyền thông không dây trong môi trường nhà máy nhằm tạo ra một môi trường vô tuyến có thể điều chỉnh được như trên hình 1.5.

## **1.4. Định hướng nghiên cứu của luận án**

Dựa trên các vấn đề từ bài toán tối ưu hệ thống phục vụ hoạt

động của robot di động, trong luận án này, NCS sẽ nghiên cứu 03 vấn đề. Thứ nhất là nghiên cứu mô hình và thuật toán nâng cao chất lượng truyền thông không dây trong nhà máy phục vụ hoạt động của robot di động. Khi vấn đề về chất lượng truyền thông không dây đã được giải quyết, giả sử tại mọi điểm trong quá trình di chuyển của robot đều thỏa mãn ràng buộc tốc độ truyền thông, lúc này môi trường truyền thông được gọi là lý tưởng. Vấn đề thứ hai là nghiên cứu các thuật toán lập quỹ đạo cho robot di động trong môi trường truyền thông lý tưởng. Trong thực tế, rất khó để đạt được môi trường truyền thông lý tưởng. Do đó, vấn đề thứ ba là nghiên cứu hệ thống điều hướng cho robot trong môi trường truyền thông chưa đảm bảo.

### **1.5. Kết luận chương 1**

Qua nghiên cứu, nhiệm vụ luận án sẽ giải quyết hai vấn đề chính, một là đề xuất mô hình và thuật toán tối ưu hệ thống mạng nhằm nâng cao chất lượng truyền thông không dây tại các nhà máy phục vụ hoạt động của robot di động, hai là đề xuất mô hình và thuật toán lập quỹ đạo nhằm tối ưu năng lượng tiêu thụ cho robot di động.

Các đóng góp của chương 1 được công bố ở công trình CT4 và CT5. Đây là những nghiên cứu ban đầu của NCS liên quan đến điều hướng cho robot. Công trình CT4 nghiên cứu cơ bản về định vị và điều hướng cho robot trong môi trường ROS (Robot Operating System). Công trình CT5 nghiên cứu ban đầu về vấn đề điều hướng cho robot trong ROS dựa trên nền học sâu tăng cường DRL (Deep Reinforcement Learning).

## **Chương 2. NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG TRUYỀN THÔNG TRONG NHÀ MÁY PHỤC VỤ HOẠT ĐỘNG CỦA ROBOT DI ĐỘNG**

### **2.1. Vấn đề tối ưu hiệu suất truyền thông không dây tại các nhà máy**

Trong môi trường nhà máy, ngoài robot di động còn có nhiều



thiết bị tham gia kết nối mạng như các máy tính xách tay, máy tính bảng, điện thoại di động, các thiết bị IoT không dây, các thiết bị truyền bluetooth, và nhiều thiết bị truyền thông khác. Một vấn đề đặt ra là làm sao để nhiều thiết bị cùng sử dụng chung tài nguyên của một hệ thống mạng mà vẫn đảm bảo được các yêu cầu cho hoạt động của từng thiết bị. Đây là thách thức thứ nhất đối với hệ thống truyền thông không dây trong nhà máy. Hơn thế nữa, trong môi trường nhà máy, có nhiều thiết bị, máy móc và nhiều bức tường chắn . . . Điều này tạo ra nhiều vùng trong không gian nhà máy không nhận được tín hiệu truyền thông không dây, vùng này gọi là vùng chết (dead zone).

Đây là thách thức thứ hai khi sử dụng truyền thông không dây trong nhà máy. Để khắc phục vấn đề thứ nhất cần thực hiện các biện pháp tối ưu hiệu suất của hệ thống mạng truyền thông không dây trong nhà máy. Tuy nhiên, các vấn đề tối ưu hệ thống mạng chỉ có thể khả thi khi tín hiệu truyền trong nhà máy luôn được đảm bảo, tức là cần phải khắc phục được thách thức thứ hai kể trên. Gần đây, một khái niệm mới về bề mặt phản xạ thông minh IRS (Intelligent Reflecting Surface) hay bề mặt cấu hình lại (Reconfigurable Intelligent Surface) đã được giới thiệu trong các nghiên cứu về truyền thông không dây [56] như là một giải pháp khắc phục vấn đề về vùng chết tín hiệu. IRSs có thể tạo ra một môi trường mạng không dây có thể lập trình được.

## **2.2. Mô hình hệ thống**

Luận án đã đề xuất một mô hình hệ thống mạng tích hợp truyền thông tin và thu hoạch năng lượng kết hợp với mạng D2D có IRS hỗ trợ, hệ thống được đặt tên là DED2D (integrated data and energy network and D2D communication coexistence system). Cụ thể, mạng chính gồm một BS và robot di động yêu cầu thông tin thông tin IUs (Information Users) và các thiết bị IoT yêu cầu năng lượng EUs (Energy harvested Users), và các thiết bị sử dụng truyền thông D2D dùng chung nguồn tài nguyên với mạng chính. Mô hình hệ thống thể hiện trên hình 2.3.

### **2.2.1. Tín hiệu nhận tại các robot di động**

### 2.2.2. Tín hiệu nhận tại các thiết bị IoT thu hoạch năng lượng

### 2.2.3. Tín hiệu nhận tại bộ thu D2D

### 2.2.4. Bài toán tối ưu

Luận án nghiên cứu một bài toán tối ưu hóa kết hợp tối ưu hóa i) bộ tạo chùm tia truyền thông tin cho robot di động, ii) ộ tạo chùm tia truyền năng lượng cho các thiết bị IoT, iii) tỷ lệ thời gian chia tỷ lệ của hệ thống TFIET, iv) công suất phát của các bộ phát D2D, và v) hệ số phản xạ của IRS. Mục tiêu là tối đa hóa thông lượng tối thiểu của robot di động trong khi đảm bảo yêu cầu năng lượng thu hoạch của các EUs và ngưỡng tốc độ truyền thông D2D. Do đó, bài toán tối ưu được mô tả dưới dạng toán học như sau:

$$\begin{aligned} & \max_{\bar{\mathbf{w}}, \bar{\mathbf{v}}, \mathbf{p}, \tau = (t_i, t_e) \in \mathbb{R}_+^2, \bar{\boldsymbol{\theta}}} f(\bar{\mathbf{w}}, \bar{\mathbf{v}}, \mathbf{p}, \tau, \bar{\boldsymbol{\theta}}) \\ & \triangleq \min_{d_i \in \mathcal{U}_I} t_i R_{t_i, d_i}(\bar{\mathbf{w}}, \mathbf{p}, \bar{\boldsymbol{\theta}}) \end{aligned} \quad (2.8a)$$

s.t. (2.1),

$$t_e \rho E_{t_e, e_j}(\bar{\mathbf{v}}, \mathbf{p}, \bar{\boldsymbol{\theta}}) \geq e_{min}, \forall e_j \in \mathcal{U}_E, \quad (2.8b)$$

$$t_i R_{t_i, k}(\bar{\mathbf{w}}, \mathbf{p}, \bar{\boldsymbol{\theta}}) + t_e R_{t_e, k}(\bar{\mathbf{v}}, \mathbf{p}, \bar{\boldsymbol{\theta}}) \geq R_{k, min}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (2.8c)$$

$$t_i + t_e \leq 1, \quad (2.8d)$$

$$t_i \sum_{d_i \in \mathcal{U}_I} \|\bar{\mathbf{w}}_{d_i}\|^2 + t_e \sum_{e_j \in \mathcal{U}_E} \|\bar{\mathbf{v}}_{e_j}\|^2 \leq P_{B, max}, \quad (2.8e)$$

$$\|\bar{\mathbf{w}}_{d_i}\|^2 \leq P_{B, max}; \|\bar{\mathbf{v}}_{e_j}\|^2 \leq P_{B, max}, \quad (2.8f)$$

$$p_k \leq P_{k, max}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (2.8g)$$

trong đó, các tham số và ràng buộc được mô tả chi tiết trong luận án.

## 2.3. Thuật toán tối ưu

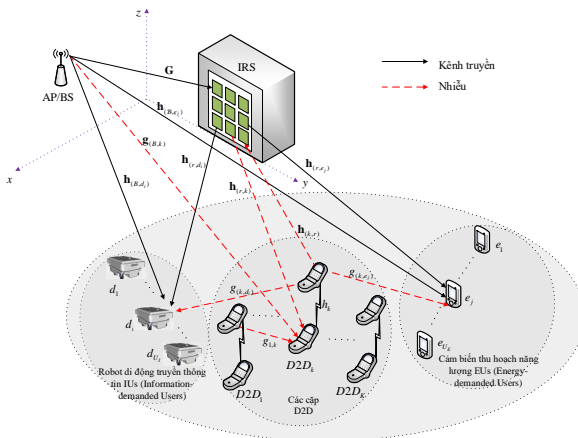
Trong phần này trình bày phương pháp để xấp xỉ hàm mục tiêu và các ràng buộc không lồi ở bài toán (2.8) về hai bài toán tối ưu lồi (2.23) và (2.37). Thuật toán 1 trình bày chi tiết các bước thực hiện tìm nghiệm tối ưu của bài toán gốc (2.8) dựa trên việc lặp đi lặp lại việc tìm

nghiệm của bài toán xấp xỉ cho đến khi thuật toán hội tụ. Nghiệm thu được được chứng minh là hội tụ.

#### 2.4. Kịch bản phân chia thời gian

Trong phần 2.3, luận án quan tâm đến hệ thống DED2D có IRS hỗ trợ, trong đó, các thiết bị bên phát D2D truyền tín hiệu trong suốt khoảng thời gian BS truyền thông tin và truyền năng lượng. Kịch bản N-OTA giúp tăng hiệu quả sử dụng băng tần nhưng đồng thời cũng làm tăng nhiều lên các phần tử của mạng. Trong phần này, luận án quan tâm đến hệ thống DED2D có IRS hỗ trợ và có phân chia thời gian OTA (orthogonal time allocation) giữa thời gian nhận thông tin của robot di động, thời gian nhận năng lượng của các thiết bị IoT và truyền thông D2D. Cụ thể, trong một khe thời gian, BS sẽ chia thành các khoảng thời gian riêng cho các việc truyền thông tin, truyền năng lượng, và thời gian dành cho truyền thông D2D. Khi đó, sẽ không có nhiễu từ truyền thông D2D đến mạng chính nhưng thời gian dành cho việc truyền thông tin và năng lượng từ BS sẽ bị giảm xuống. Do đó, thật thú vị khi thảo luận về hiệu quả của hai kịch bản N-OTA và OTA ở phần kết quả mô phỏng.

Bài toán tối ưu đặt ra ở kịch bản OTA tương tự như (1), trong đó, biến  $t_d$  thể hiện khoảng thời gian truyền thông D2D được tích hợp trong  $\tau$ , tức là,  $\tau = (t_i, t_e, t_d)$ . Về mặt toán học, bài toán tối ưu được



Hình 2.3: Mạng DED2D có IRS hỗ trợ.

mô tả như sau:

$$\max_{\bar{\mathbf{w}}, \bar{\mathbf{v}}, \mathbf{p}, \tau = (t_i, t_e, t_d) \in \mathbb{R}_+^3, \bar{\boldsymbol{\theta}}} f(\bar{\mathbf{w}}, \bar{\mathbf{v}}, \mathbf{p}, \tau, \bar{\boldsymbol{\theta}}) \triangleq \min_{d_i \in \mathcal{U}_I} t_i \tilde{R}_{t_i, d_i}(\bar{\mathbf{w}}, \bar{\boldsymbol{\theta}}) \quad (2.40a)$$

s.t. (2.1),

$$t_e \rho \tilde{E}_{t_e, e_j}(\bar{\mathbf{v}}, \bar{\boldsymbol{\theta}}) \geq e_{min}, \forall e_j \in \mathcal{U}_E, \quad (2.40b)$$

$$t_d \tilde{R}_{t_d, k}(\mathbf{p}, \bar{\boldsymbol{\theta}}) \geq R_{k, min}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (2.40c)$$

$$t_i + t_e + t_d \leq 1, \quad (2.40d)$$

$$t_i \sum_{d_i \in \mathcal{U}_I} \|\bar{\mathbf{w}}_{d_i}\|^2 + t_e \sum_{e_j \in \mathcal{U}_E} \|\bar{\mathbf{v}}_{e_j}\|^2 \leq P_{B, max}(1 - t_d), \quad (2.40e)$$

$$\|\bar{\mathbf{w}}_{d_i}\|^2 \leq P_{B, max}, \|\bar{\mathbf{v}}_{e_j}\|^2 \leq P_{B, max}, \quad (2.40f)$$

$$t_d p_k \leq P_{k, max}, \forall k \in \mathcal{K}. \quad (2.40g)$$

Tiếp theo, luận án trình bày phương pháp để xấp xỉ hàm mục tiêu và các ràng buộc không lồi ở bài toán (2.40) thành hai bài toán tối ưu lồi (2.48) và (2.55). Thuật toán 1 trình bày chi tiết các bước thực hiện tìm nghiệm tối ưu của bài toán gốc (2.8) dựa trên việc lặp đi lặp lại việc tìm nghiệm của bài toán xấp xỉ cho đến khi thuật toán hội tụ. Nghiệm thu được được chứng minh là hội tụ.

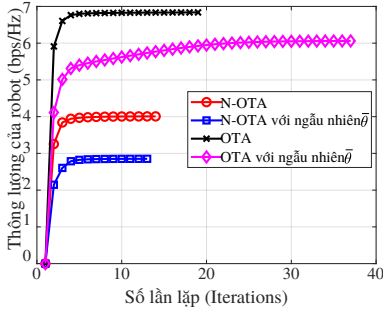
## 2.5. Đánh giá hiệu quả mô hình và thuật toán

Các tham số mô phỏng được trình bày cụ thể trong luận án và Bảng 2.1. Kết quả mô phỏng từ hình 2.4 đến hình 2.6 đã cho thấy hiệu quả của mô hình và các thuật toán đề xuất.

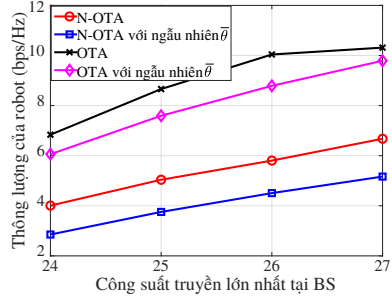
## 2.6. Kết luận chương 2

Chương 2 đã trình bày đề xuất mô hình và thuật toán để tối ưu hệ thống mạng trong các đô thị và nhà máy hỗ trợ hoạt động của các thiết bị đặc biệt là phục vụ hoạt động cho robot di động.

Nội dung của chương 2 được công bố trong công trình CT1. Công trình CT1 trình bày đề xuất một mô hình mạng không dây DED2D và thuật toán tối ưu mạng cho phép các robot di động truyền thông tin, các thiết bị IoT thu hoạch năng lượng và các thiết bị sử dụng phương

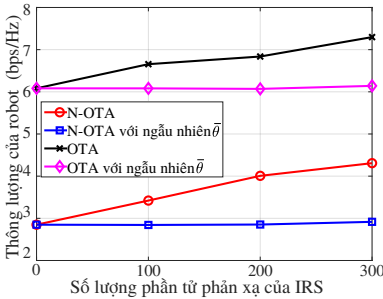


(a)

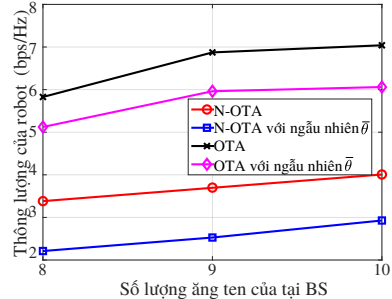


(b)

Hình 2.4: a) Độ hội tụ của các thuật toán và b) thông lượng dữ liệu thay đổi với công suất định mức của BS  $P_{B,max}$ .



(a)



(b)

Hình 2.6 : Thông lượng đạt được với a) số lượng các phần tử của IRS và b) số lượng ăng ten tại BS.

thức giao tiếp trực tiếp trong nhà máy có thể chia sẻ cùng băng thông mạng mà vẫn đạt được hiệu quả về truyền thông cho từng loại thiết bị.

## Chương 3. THUẬT TOÁN TỐI ƯU QUỸ ĐẠO CHO ROBOT DI ĐỘNG TRONG MÔI TRƯỜNG TRUYỀN THÔNG LÝ TƯỞNG

### 3.1. Tối ưu lời

### 3.2. Phát triển thuật toán tối ưu quỹ đạo cho robot di động

#### 3.2.1. Mục tiêu và các ràng buộc của bài toán

Quy đạo tìm thấy được kỳ vọng rằng sẽ di chuyển đến đích với quãng đường di chuyển nhỏ nhất. Giả sử robot làm việc trong môi trường công nghiệp, trong đó số lượng các chướng ngại vật được biểu diễn bởi một tập  $\mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$ . Không mất tính tổng quát, giả sử các chướng ngại vật đều có dạng hình tròn.

### 3.2.2. Thuật toán tối ưu quy đạo

$$\min_{\mathbf{q}} J \quad (3.23a)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{q}(1) = \mathbf{q}_s, \quad (3.23b)$$

$$\|\mathbf{q}(k+1) - \mathbf{q}(k)\| \leq \tau v_{\max}, \forall k \in (1, h), \quad (3.23c)$$

$$\|\mathbf{q}(k) - \mathbf{q}_m^O\| \geq d_m^r, \forall t \in (1, h), m \in (1, M), \quad (3.23d)$$

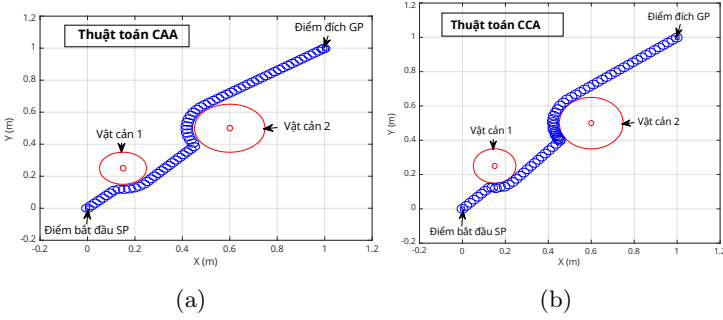
Như vậy bài toán tối ưu có dạng như (3.23), trong đó, ràng buộc (3.23b) là điểm bắt đầu SP (Start Point), ràng buộc (3.23c) là giới hạn vận tốc của robot, và (3.23d) là các ràng buộc tránh vật cản. Bài toán này là bài toán không lồi bởi vì ràng buộc (3.23d) là không lồi. Do đó, thuật toán xấp xỉ lồi được trình bày dưới đây để xấp xỉ bài toán (3.23) trở thành bài toán lồi để giải.

Thuật toán 1 mô tả khái quát thuật toán tìm được quy đạo tối ưu cho robot với tên gọi là thuật toán CAA (convex approximation algorithm).

### 3.2.3. Đánh giá kết quả

Trong phần này, các kết quả mô phỏng kiểm chứng hiệu quả của thuật toán đề xuất được trình bày. Các kết quả mô phỏng được thực hiện trên MATLAB, và bài toán tối ưu lồi được giải bằng gói CVX cùng với trình giải Mosek 9.1.9. Để so sánh, luận án đưa ra thuật toán tính toán dựa trên phương trình động học của robot là thuật toán CAA (conventional computing algorithm). Kết quả mô phỏng ở hình 3.2 thể hiện hiệu quả của thuật toán đề xuất.

## 3.3. Phát triển thuật toán tối thiểu năng lượng tiêu thụ



Hình 3.2: Quỹ đạo tối ưu của robot với (a) thuật toán CAA (b) thuật toán CCA.

Ở phần này, luận án quan tâm đến hàm mục tiêu là năng lượng tiêu thụ của robot. Tức là xem xét đến bài toán tối ưu quỹ đạo cho robot với mục tiêu là tối thiểu năng lượng tiêu thụ cho robot.

### 3.3.1. Mô hình hóa năng lượng tiêu thụ của robot di động

Tổng năng lượng tiêu thụ của robot có thể được viết lại dưới dạng sau:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{d=0}^{D-1} m \left( \frac{|\mathbf{q}_{d+1} - \mathbf{q}_d|}{\tau} \right)^2 + 2\mu mg \sum_{d=0}^{D-1} |\mathbf{q}_{d+1} - \mathbf{q}_d| + P_s(D-1)\tau, \quad (3.35)$$

trong đó,  $m$  là khối lượng của robot,  $g$  là gia tốc trọng trường, và  $\mu$  là hệ số ma sát trượt phụ thuộc vào dạng bề mặt môi trường robot làm việc,  $P_s$  là điện áp nguồn của hệ thống,  $D$  là số bước rời rạc hóa theo yêu cầu,  $d \in [0, D]$  là các bước theo thời gian,  $\mathbf{Q} = [\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_D]$ , và  $\bar{\mathbf{v}} = [v_1, v_2, \dots, v_D]$  lần lượt là quỹ đạo và vận tốc tương ứng với các bước thời gian trên, và  $\tau$  là khoảng thời gian cho một bước.

### 3.3.2. Các ràng buộc tránh va chạm

Trong môi trường làm việc của robot, chúng ta giả sử rằng các chướng ngại vật có dạng đa giác  $H$  cạnh. Cụ thể, giả sử có một tập  $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$  vật cản trong môi trường làm việc của robot.

### 3.3.3. Thuật toán tối ưu năng lượng tiêu thụ cho robot

Nhìn chung, chúng ta có thể thiết kế quỹ đạo cho robot giúp giảm tổng quãng đường di chuyển nhằm giảm năng lượng động học tiêu hao cho robot. Tuy nhiên, cần đảm bảo không xảy ra va chạm trong quá trình robot di chuyển. Thêm vào đó, chúng ta có thể giảm khoảng thời gian mỗi bước di chuyển để giảm năng lượng tiêu hao trên máy tính, các mạch điện tử và cảm biến. Tuy nhiên, điều này yêu cầu robot cần di chuyển nhanh hơn và có thể vượt ra khỏi khả năng của robot. Do đó, trong phần này, luận án xây dựng bài toán tối thiểu năng lượng tiêu thụ của robot bằng cách tối ưu quỹ đạo và thời gian mỗi bước di chuyển trong khi vẫn đảm bảo yêu cầu tránh vật cản.

Thuật toán tìm quỹ đạo tối ưu cho mục tiêu tối thiểu năng lượng trong trường hợp va chạm tĩnh được chỉ ra trong Thuật toán 3. Thuật toán này được đặt tên là Thuật toán OSOW để chỉ thuật toán giải quyết bài toán tối ưu quỹ đạo robot trong môi trường chỉ có các vật cản tĩnh (Only Static Obstacles in the robot's Workspace).

### 3.3.4. Bài toán tối ưu trong kịch bản môi trường có vật cản động

Trong phần này, luận án sẽ quan tâm đến kịch bản vật cản động xuất hiện trong quá trình robot di chuyển. Cụ thể, đối với vật cản tĩnh, các giả sử vẫn giữ nguyên như trong phần trước. Trước tiên, dựa vào thông tin các vật cản tĩnh, robot sẽ tính toán quỹ đạo tối ưu dựa trên Thuật toán 3, tức là Thuật toán OSOW giải bài toán (3.43). Sau đó, robot sẽ di chuyển dựa trên quỹ đạo này. Quỹ đạo này, tức là,  $\mathbf{Q} = [\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_D]$ , được gọi là quỹ đạo toàn cục. Trong quá trình robot di chuyển, tại bước  $i \in [0, D]$ , giả sử robot phát hiện có  $\mathcal{N}_i = \{1, \dots, N_i\}$  vật cản động MOs (moving obstacles). Mỗi vật cản động MO được giả sử có dạng hình tròn. Cụ thể, robot quan sát thấy được MO  $n_i$  có tâm tại  $\mathbf{q}_{n,i}^O = (x_{n,i}^O, y_{n,i}^O)$  di chuyển với vận tốc  $\bar{\mathbf{v}}_{n_i} = (v_{nx_i}, v_{ny_i})$ . Do yêu cầu tránh vật cản, quỹ đạo di chuyển tiếp theo của robot  $\mathbf{q}_{i,d_i} = (x_{i,d_i}, y_{i,d_i})$  với  $d_i \in [0, D_i]$  là số bước di chuyển cần thiết để đi qua  $N_i$  vật cản. Gọi



$\mathbf{Q}_i = [\mathbf{q}_{i,0}, \mathbf{q}_{i,1}, \dots, \mathbf{q}_{i,D_i}]$ , và  $\bar{\mathbf{v}}_i = [v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,D_i}]$  là tập các vị trí và vận tốc cho robot trong quá trình tránh vật cản. Theo đó,  $\mathbf{Q}_i$  được gọi là quỹ đạo cục bộ. Như vậy, điều kiện tránh vật cản lúc này được mô tả như sau

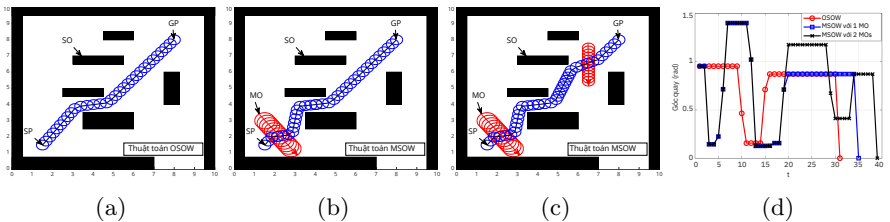
$$\|\mathbf{q}_{i,d_i} - \mathbf{q}_{n,d_i}^O\| \geq r_{n,i}^O + d_r + \delta, \forall n \in \mathcal{N}, d_i \in [0, D_i], \quad (3.50)$$

trong đó,  $r_{n,i}^O$  là bán kính của vật cản  $n$ , và  $\mathbf{q}_{n,d_i}^O = (x_{n,d_i}^O, y_{n,d_i}^O)$  là vị trí của vật cản  $n$  tại bước  $d_i$ . Đặt  $d_{i,r,n} = r_{n,i}^O + d_r + \delta$ . Bài toán tối thiểu năng lượng tiêu thụ của robot trong kịch bản tránh vật cản động sẽ có thêm các ràng buộc tránh vật cản động (3.50).

Như đã đề cập ở trên, robot sẽ di chuyển theo quỹ đạo cục bộ, tức là,  $\mathbf{Q}_i$ , để tránh các vật cản động, sau đó, robot sẽ quay trở lại quỹ đạo toàn cục, tức là,  $\mathbf{Q}$ , để di chuyển đến đích. Do đó, thuật toán tổng thể cho bài toán lập quỹ đạo cho robot trong môi trường có cả các SOs và MOs được trình bày ở Thuật toán 4. Thuật toán này được đặt tên là Thuật toán MSOW, nghĩa là thuật toán lập quỹ đạo cho robot trong môi trường chứa cả vật cản tĩnh và vật cản động (both Moving and Static Obstacles in the robot's Workspace).

### 3.3.5. Đánh giá kết quả

Phần này trình bày kết quả mô phỏng cho các thuật toán đề xuất. Các kết quả mô phỏng thể hiện tính hiệu quả của thuật toán đề xuất.



Hình 3.6: Quỹ đạo tối ưu của robot khi tối thiểu năng lượng tiêu thụ với a) kịch bản MSOW có 01 MO b) kịch bản MSOW có 02 MOs, c) ba kịch bản và d) Góc quay của robot tương ứng với các quỹ đạo tối ưu.

### 3.4. Kết luận chương 3

Qua trình bày trên, những đóng góp chính của chương như sau:

- Đề xuất thuật toán CAA để giải quyết bài toán tối ưu quỹ đạo cho robot di động trong môi trường truyền thông lý tưởng.

- Đề xuất thuật toán OSOW và MSOW để giải quyết bài toán lập quỹ đạo nhằm mục tiêu tối thiểu năng lượng tiêu thụ tương ứng với trường hợp vật cản tĩnh và vật cản động.

Đóng góp của chương 3 được công bố ở công trình CT2 và CT3. Công trình CT2 trình bày về các thuật toán dựa trên tối ưu lỗi tối ưu quỹ đạo cho robot trong môi trường nhà máy có vật cản động và tĩnh nhằm tối thiểu năng lượng tiêu thụ của robot. Công trình CT3 trình bày thuật toán dựa trên tối ưu lỗi tối ưu quỹ đạo cho robot trong môi trường nhà máy nhằm tối thiểu quãng đường di chuyển cho robot.

## Chương 4. THUẬT TOÁN TỐI ƯU QUỸ ĐẠO CHO ROBOT DI ĐỘNG TRONG MÔI TRƯỜNG TRUYỀN THÔNG CÓ STAR-IRS HỖ TRỢ

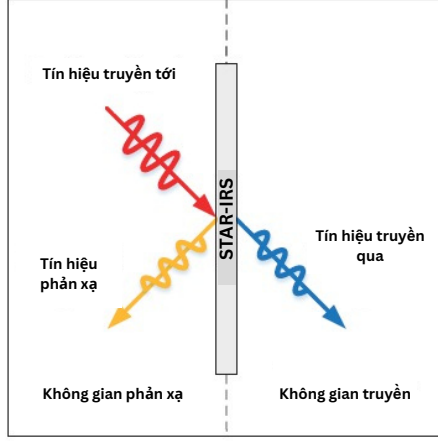
### 4.1. Mô hình hệ thống điều hướng cho robot di động có STAR-IRS hỗ trợ

#### 4.1.1. STAR-IRS

Một khái niệm mới của IRS là STAR-IRS (IRS có khả năng vừa truyền vừa phản xạ tín hiệu truyền đến) đã được đề xuất. Cụ thể, như được thể hiện trong Hình 4.1, tín hiệu có thể truyền đến một phần tử của STAR-RIS từ cả hai hướng của bề mặt. Một phần tín hiệu được phản xạ vào cùng phía không gian với tín hiệu đến, gọi là không gian phản xạ, và phần còn lại được truyền đến không gian đối diện với tín hiệu đến, tức là không gian truyền.

#### 4.1.2. Mô hình hệ thống đề xuất

Trong phần này, trước tiên NCS giới thiệu hệ thống điều hướng robot trong nhà trong đó, hệ thống truyền thông được hỗ trợ bởi STAR-IRS. Cụ thể, STAR-IRS hoạt động trong ở chế độ ES, như được minh



Hình 4.1: STAR-IRS. [7]

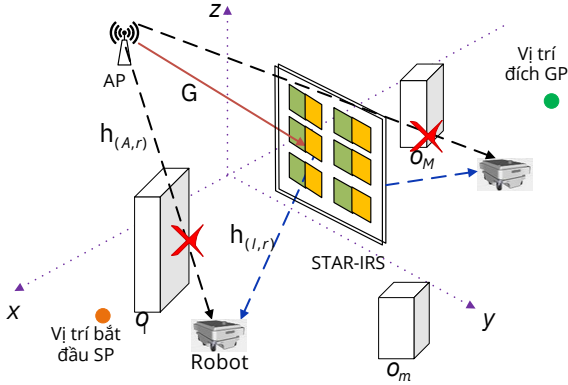
họa trong Hình 4.3. Cụ thể, luận án quan tâm đến mô hình hệ thống lập quỹ đạo cho robot trong nhà, bao gồm một AP một ăng-ten, và một robot di động có gắn một ăng-ten. Do môi trường phức tạp trong nhà máy thông minh trong tương lai, robot có thể gặp phải các chướng ngại vật, các kênh trực tiếp giữa AP và robot di động có thể không đủ ổn định hoặc thậm chí bị chặn. Để giải quyết vấn đề này, luận án đề xuất một hệ thống truyền thông được STAR-IRS hỗ trợ gồm  $N$  phần tử truyền và phản xạ tín hiệu, tập hợp các phần tử của STAR-IRS được ký hiệu là  $\mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$ . Về việc lắp đặt, STAR-IRS có thể được treo trên trần của nhà máy để có kênh truyền giữa AP và robot chất lượng cao trong toàn bộ không gian  $360^0$  quanh IRS. Đặt  $T$  là thời gian di chuyển của robot. Để đơn giản,  $T$  được chia thành  $L$  bước thời gian  $\delta$ , tức là  $T = L\delta$ .

#### 4.1.3. Mô hình tín hiệu

Tín hiệu nhận được của robot được mô hình hóa như sau:

$$y_l^c = (h_{A,r}(\mathbf{q}_l) + \mathbf{h}_{(L,r)}^H(\mathbf{q}_l)\bar{\Theta}_l^c \mathbf{g})\sqrt{p_l}s_l + n_l, \quad (4.10)$$

trong đó,  $c \in \{r, t\}$ ,  $p_l$  là công suất truyền từ AP đến robot,  $s_l$  là tín



Hình 4.3: Minh họa hệ thống điều hướng robot trong nhà có IRS hỗ trợ truyền thông.

hiệu truyền đến robot và  $n_l \sim \mathcal{CN}(0, 1)$  là nhiễu Gaussian (additive white Gaussian noise - AWGN) tại robot với công suất trung bình  $\sigma^2$  tại khe thời gian  $l$ . Khi đó, SINR tại robot là

$$\zeta_l^c = \frac{|h_{A,r}(\mathbf{q}_l) + \mathbf{h}_{(I,r)}^H(\mathbf{q}_l)\bar{\Theta}_l^c \mathbf{g}|^2 p_l}{\sigma^2}. \quad (4.11)$$

Do đó, tốc độ truyền thông đạt được tại robot là

$$R_l^c = \log_2 \left( 1 + \frac{|h_{A,r}(\mathbf{q}_l) + \mathbf{h}_{(I,r)}^H(\mathbf{q}_l)\bar{\Theta}_l^c \mathbf{g}|^2 p_l}{\sigma^2} \right). \quad (4.12)$$

#### 4.1.4. Bài toán điều hướng tối ưu cho robot di động

Năng lượng tiêu thụ của hệ thống bao gồm năng lượng tiêu thụ bởi robot, tức là  $E_R$  được mô tả như ở chương 3, và năng lượng tiêu thụ bởi AP, tức là,  $E_A = \sum_{l=1}^L p_l \delta$ . Đặt  $\mathbf{Q} = [\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_L]$  và  $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_L]$  là quỹ đạo của robot và công suất truyền từ AP đến robot tương ứng với quỹ đạo đó. Đặt  $\gamma$  là tốc độ truyền thông tối thiểu tại robot,  $p^{\max}$  là công suất truyền tối đa của AP. Bài toán tối ưu quỹ đạo cho robot nhằm tối thiểu năng lượng tiêu thụ của hệ thống có dạng:

$$\min_{\mathbf{Q}, \mathbf{P}, \Theta^c} W_1 E_R + W_2 E_A \quad (4.21a)$$

s.t. (4.3), (4.4), (4.5),

$$R_l^c \geq \gamma, \forall l \in \mathcal{L}, \quad (4.21b)$$

$$T \leq T^{\max}, \quad (4.21c)$$

$$p_l \leq p^{\max}, \forall l \in \mathcal{L}, \quad (4.21d)$$

$$\phi_{l,n}^c = \frac{\xi \pi}{2^{b-1}}, \xi \in \{0, 1, \dots, 2^b - 1\}, \forall n \in \mathcal{N}, l \in \mathcal{L}, c \in \{t, r\}, \quad (4.21e)$$

trong đó,  $W_1$  và  $W_2$  là các trọng số hàm mục tiêu lần lượt cho năng lượng tiêu thụ bởi robot và AP.

Bài toán tối ưu trên là bài toán không lồi nên rất khó để giải. Do đó, một thuật toán dựa trên kỹ thuật học tăng cường sâu sẽ được đề xuất và trình bày dưới đây.

## 4.2. Kỹ thuật học sâu tăng cường DRL (Deep Reinforcement Learning)

### 4.3. DRL áp dụng cho bài toán lập quỹ đạo cho robot di động

#### 4.3.1. Mô hình quy trình quyết định MDP (Markov Decision Process)

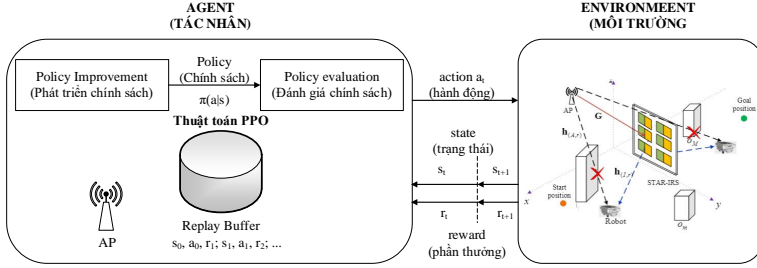
Bài toán cho nhiệm vụ lập quỹ đạo chuyển động của robot robot di động có thể được mô tả bởi một bài toán tối ưu được định nghĩa bởi  $\langle \mathcal{S}, \mathcal{A}, \mathcal{P}, \mathcal{R} \rangle$ , trong đó,  $\mathcal{S}$ ,  $\mathcal{A}$ ,  $\mathcal{P}$ , và  $\mathcal{R}$  lần lượt là không gian trạng thái (state space), không gian hành động (action space), hàm xác suất chuyển trạng thái (state transition probability function) và hàm thưởng (reward function).

Không gian trạng thái (State Space)

Không gian hành động (Action space)

Hàm thưởng (Reward function)

#### 4.3.2. Thuật toán PPO (Proximal Policy Optimization) tối thiểu năng lượng tiêu thụ cho hệ thống



Hình 4.6: Tổng quan thuật toán PPO tối ưu quỹ đạo cho robot.

Hình 4.6 mô tả thuật toán PPO áp dụng cho bài toán lập quỹ đạo cho robot di động trong nhà máy. Cụ thể, thuật toán 8 cho thấy các bước thực hiện của thuật toán PPO cho việc kết hợp tối ưu các tham số của hệ thống, quỹ đạo chuyển động của robot và tốc độ truyền thông.

#### 4.4 Đánh giá hiệu quả mô hình và thuật toán điều hướng cho robot di động

Với mục đích so sánh, luận án quan tâm đến các thuật toán sau:

- **PPO-STAR-IRS:** Đây là thuật toán dựa trên kỹ thuật học sâu tăng cường DRL được mô tả ở phần 4.3.2 (Thuật toán 8) được đề xuất sử dụng để giải bài toán tối ưu năng lượng tiêu thụ cho hệ thống.

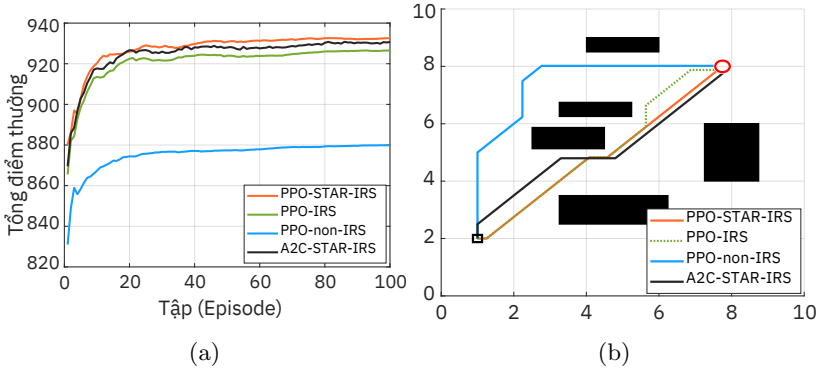
- **A2C-STAR-IRS:** Đây là thuật toán A2C (Advantage Actor Critic) áp dụng cho hệ thống điều hướng cho robot có STAR-IRS hỗ trợ, tương tự như thuật toán PPO-STAR-IRS nhưng hàm mục tiêu không có hàm  $\text{clip}(p_t(\theta), 1 - \epsilon, 1 + \epsilon)$ .

- **PPO-IRS:** Thuật toán này tương tự như thuật toán PPO-STAR-IRS nhưng sử dụng cho hệ thống có bề mặt chỉ phản xạ IRS hỗ trợ.

- **PPO-non-IRS:** Thuật toán này tương tự như thuật toán PPO-STAR-IRS nhưng sử dụng cho hệ thống không có IRS hỗ trợ.

Quan sát từ Hình 4.8 thấy rằng tất cả các thuật toán đều hội tụ đến các giá trị điểm thưởng ổn định sau khoảng 50 tập. Đáng chú ý, thuật toán PPO-STAR-IRS vượt trội hơn cả các thuật toán A2C-

STAR-IRS, PPO-IRS và PPO-non-IRS về tổng phần thưởng. Tổng thể, hệ thống được hỗ trợ bởi STAR-IRS chứng minh hiệu quả quỹ đạo vượt trội. Đặc biệt, sử dụng thuật toán dựa trên PPO cho kết quả tốt hơn A2C.

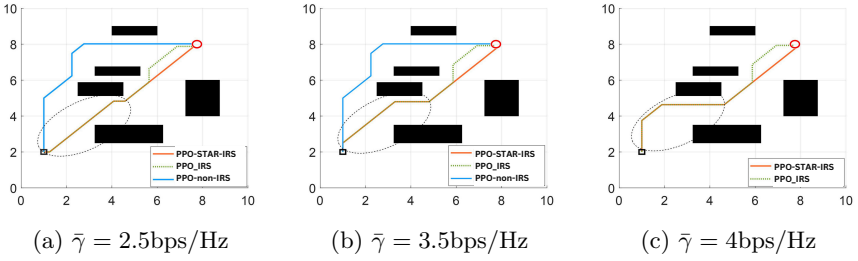


Hình 4.8: (a) Độ hội tụ của các thuật toán và (b) Quỹ đạo tối ưu thu được bởi các thuật toán.

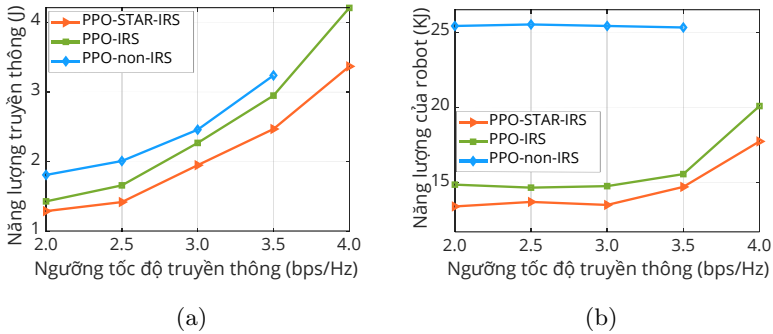
Tiếp theo, luận án xem xét tác động của yêu cầu về ngưỡng tốc độ truyền thông cho robot lên quỹ đạo tối ưu của robot. Như được thể hiện trong Hình 4.9, khi yêu cầu về tốc độ truyền thông tăng lên, robot cần phải tìm cách để đạt được yêu cầu đó. Điều này dẫn đến quỹ đạo của robot dài hơn. Sự khác biệt này thể hiện ở vùng được khoanh bằng các hình tròn màu đen trong các Hình 4.9(a), (b) và (c).

Đáng lưu ý khi yêu cầu ngưỡng tốc độ truyền thông tăng lên đến một mức nhất định (4.0 bps/Hz), lúc này, hệ thống không có IRS hỗ trợ không thể tìm thấy bất kỳ đường đi nào đáp ứng được yêu cầu đó. Ngoài ra, trong tất cả các kịch bản, quỹ đạo thu được bởi PPO-STAR-IRS luôn là ngắn nhất, và quỹ đạo thu được bởi PPO-non-IRS luôn là dài nhất.

Hình 4.10(a) và (b) lần lượt thể hiện sự ảnh hưởng của yêu cầu ngưỡng tốc độ truyền đối với năng lượng truyền thông và năng lượng tiêu thụ bởi robot.



Hình 4.9: Ảnh hưởng của ngưỡng yêu cầu tốc độ truyền thông đến quỹ đạo tối ưu của robot di động.



Hình 4.10: Ảnh hưởng của ngưỡng yêu cầu tốc độ truyền thông lên (a) năng lượng truyền thông và (b) năng lượng tiêu thụ bởi robot.

Tiếp theo, luận án xem xét đánh giá ảnh hưởng của số bit lượng tử độ dịch pha và số lượng phần tử của STAR-IRS đến hệ thống điều hướng cho robot di động có STAR-IRS hỗ trợ. Các kết quả thể hiện trên các Hình 4.11 và Hình 4.12 trong luận án.

#### 4.5. Kết luận chương 4

Những đóng góp chính của chương 4 như sau:

- Đề xuất mô hình hệ thống điều hướng cho robot trong môi trường nhà máy có STAR-IRS hỗ trợ.
- Đề xuất hệ thuật toán PPO-STAR-IRS để giải quyết bài toán lập quỹ đạo nhằm tối thiểu năng lượng tiêu thụ cho robot trong môi



trường truyền thông có STAR-IRS hỗ trợ.

Các đóng góp của chương 4 được công bố ở các công trình CT6 và CT7. Công trình CT6 trình bày việc đề xuất mô hình điều hướng cho robot trong môi trường truyền thông không dây có STAR-IRS hỗ trợ, từ đó đề xuất thuật toán tối ưu hệ thống nhằm tối thiểu quãng đường di chuyển cho robot dựa trên kỹ thuật DRL. Dựa trên các kết quả ban đầu đạt được từ công bố CT6, công trình CT7 phát triển thuật toán tối ưu hệ thống điều hướng cho robot trong môi trường truyền thông có STAR-IRS hỗ trợ nhằm tối thiểu năng lượng tiêu thụ cho hệ thống.

## KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Robot di động đã và đang được ứng dụng rộng rãi trong đời sống và thu hút được sự chú ý của nhiều nhà nghiên cứu. Theo xu hướng phát triển IoT, robot di động làm việc trong môi trường kết nối, vấn đề truyền thông và năng lượng tiêu thụ của robot là những vấn đề cần được quan tâm. Mặc dù mới dừng lại ở bước đầu nghiên cứu lý thuyết, các kết quả mô phỏng của luận án hứa hẹn mang lại hiệu quả ứng dụng cao.

Luận án đã đạt được mục tiêu đã đề ra là nghiên cứu đề xuất mô hình mạng và thuật toán tối ưu hệ thống mạng sử dụng trong nhà máy, từ đó đề xuất hệ thống điều hướng cho robot nhằm tối thiểu năng lượng tiêu thụ cho robot di động và hệ thống trong môi trường truyền thông lý tưởng và trong môi trường truyền thông có STAR-IRS hỗ trợ. Ngoài ra, luận án cũng đã mô phỏng và đánh giá các thuật toán và mô hình hệ thống đề xuất.

## NHỮNG ĐÓNG GÓP MỚI CỦA LUẬN ÁN

### ***1. Đề xuất mô hình mạng và thuật toán tối ưu nhằm nâng cao chất lượng truyền thông hỗ trợ hoạt động của robot di động.***

Hệ thống này được đề xuất dựa trên các nghiên cứu những lợi ích mà IRS mang lại cho hệ thống truyền thông không dây. Hệ thống này là chưa được đề xuất trước đây trên thế giới. Cụ thể, việc tích hợp hệ thống truyền thông tin và năng lượng kết hợp truyền thông D2D trong cùng băng tần cùng với các thuật toán đề xuất sử dụng đã không những nâng cao chất lượng truyền thông cho robot di động mà còn hỗ trợ các thiết bị IoT trong việc thu hoạch năng lượng góp phần đảm bảo tính bền vững của hệ thống.

### ***2. Đề xuất sử dụng thuật toán OSOW và MSOW tối ưu quỹ đạo cho robot di động trong điều kiện truyền thông lý tưởng.***

Thuật toán OSOW và MSOW dựa trên việc xấp xỉ hàm mục tiêu và các ràng buộc trở thành bài toán tối ưu lồi để giải. Kết quả mô phỏng đã tìm ra được quỹ đạo tối ưu giúp robot di chuyển đến đích với mức năng lượng tiêu thụ tối thiểu.

### ***3. Đề xuất sử dụng mô hình và thuật toán PPO-STAR-RIS tối ưu năng lượng cho robot di động trong môi trường truyền thông có STAR-IRS hỗ trợ.***

Thuật toán PPO-STAR-RIS dựa trên kỹ thuật DRL đã giúp giải quyết bài toán động với quỹ đạo và kênh thay đổi theo thời gian. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả của mô hình và thuật toán đề xuất.

*Ngoài ra, trong quá trình thực hiện luận án, các nghiên cứu đã được công bố ở các hội nghị khoa học và các tạp chí có uy tín trong nước và quốc tế.*

## DANH MỤC CÁC BÀI BÁO ĐÃ XUẤT BẢN LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. N. T. T. Van, H. T. Nguyen, N. C. Luong, N. M. Tien, D. Niyato, and D. I. Kim, "Intelligence Reflecting Surface-Aided Integrated Data and Energy Networking Coexisting D2D Communications," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, pp. 1–1, 2022, doi: 10.1109/TWC.2022.3181822.
2. N. T. T. Van, N. M. Tien, N. C. Luong, and H. T. K. Duyen, "Energy consumption minimization for autonomous mobile robot: A convex approximation approach," *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. 4, no. 3, pp. 403–412, 2023, doi: 10.18196/jrc.v4i3.17509.
3. N. T. T. Van, N. Manh Tien, H. T. K. Duyen, N. M. Cuong, and D. H. Duân, "A Convex Approximation Method to Optimize Trajectory for AGV Robot Motion Planning," in *Proceedings of the sixth Vietnam international conference and Exhibition on Control and Automation VCCA-2021*; ISBN 978-604-95-0875-2.
4. N. T. T. Van, N. Manh Tien, N. M. Cuong, H. T. K. Duyen, B. T. T. Ha, and B. V. Tuan, "Building SLAM system and Intelligent Navigation for Autonomous Mobile Robot base on ROS," in *Proceedings of the sixth Vietnam international conference and Exhibition on Control and Automation, VCCA-2021*; ISBN 978-604-95-0875-2.
5. N. T. T. Van, N. M. Tien, N. M. Cuong, H. T. K. Duyen, and N. D. Duy, "Constructing an Intelligent Navigation System for Autonomous Mobile Robot Based on Deep Reinforcement Learning". Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 251–261. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-76620-7\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-76620-7_22).
6. N. T. T. Van, N. M. Tien, N. C. Luong, and L. M. Khoi, "Simultaneously Transmitting And Reflecting (STAR) IRS Enhanced Mobile Robot Path Planning: A Reinforcement Learning based Approach," in *Proceedings of the seventh Vietnam international conference and Exhibition on Control and Automation, VCCA-2024*; ISBN 978-604-937-357-2.
7. N. T. T. Van, N. C. Luong, H. Le Hung, N. T. Hoa and N. M. Tien, "Minimizing Energy Consumption in Mobile Robotics with STAR-RIS in Smart Factories," *2024 Tenth International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*, Danang, Vietnam, 2024, pp. 741-746, doi: 10.1109/ICCE62051.2024.10634674.