

**ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM**

QUÁCH HẢI THỌ

**NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN MỘT SỐ GIẢI PHÁP HỖ TRỢ
ĐIỀU KHIỂN XE TỰ HÀNH**

Ngành: Hệ thống Thông tin

Mã ngành: 9480104

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

ĐÀ NẴNG, NĂM 2022

**Công trình được hoàn thành tại
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM**

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

1. PGS.TS HUỲNH CÔNG PHÁP
2. TS PHẠM ANH PHƯƠNG

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá Luận án cấp Trường (ngành Hệ thống Thông tin – mã ngành: 9480104) họp tại trường Đại học Sư phạm, Đại học Đà Nẵng ngày tháng năm 2022

Có thể tìm hiểu luận án tại:

Thư viện Quốc gia;

Thư viện Trường Đại học Sư phạm – Đại học Đà Nẵng.

PHẦN MỞ ĐẦU

1. GIỚI THIỆU

Cuộc cách mạng về khoa học công nghệ diễn ra từng ngày đang làm thay đổi toàn diện và sâu sắc cuộc sống cũng như quá trình sản xuất của con người. Trong đó, lĩnh vực công nghệ ô tô với xe tự hành là một lĩnh vực đang được các nhà nghiên cứu quan tâm phát triển. Xe tự hành sử dụng nhiều kỹ thuật và thiết bị để phát hiện môi trường xung quanh, từ đó hệ thống điều khiển sẽ phân tích thông tin thu nhận được từ môi trường xung quanh để điều chỉnh hướng di chuyển thích hợp và rất hữu ích trong việc lập kế hoạch cho một đường đi đến đích mong muốn.

Từ đó, đặt ra một số vấn đề: Xe tự hành nên được thiết kế như thế nào để có thể di chuyển đến đích trong môi trường phức tạp với các chướng ngại vật, với các quy định về luật giao thông, với các trường hợp phát sinh trong quá trình tham gia giao thông ... và có thể thực hiện các phản ứng trong các trường hợp, nhằm giảm thiểu các tai nạn giao thông.

2. TÍNH CẤP THIẾT CỦA LUẬN ÁN

Dù có nhiều vấn đề về mặt phương pháp luận đối với lĩnh vực nghiên cứu xe tự hành, nhưng những thách thức gặp phải và là nhiệm vụ đang được các nhà nghiên cứu quan tâm trong lĩnh vực xe tự hành là tạo ra quỹ đạo chuyển động tối ưu. Quỹ đạo được tạo ra sẽ gồm có những tiêu chí nhất định như tạo nên quá trình di chuyển trơn và mịn, tạo được sự thoải mái và đạt hiệu suất năng lượng tốt, đồng thời phải đáp ứng được các hạn chế phát sinh trong quá trình hoạt động của xe như các quy định về luật giao thông đường bộ, các yếu tố môi trường bên ngoài và những tình huống đa dạng, phức tạp mà chúng ta thường gặp trong điều kiện môi trường giao thông. Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu hướng đến chủ đề này, nhưng đây vẫn là những vấn đề nghiên cứu mở, có tính thời sự và thu hút được sự quan tâm của cộng đồng nghiên cứu. Ở Việt Nam, công nghệ tự hành được xếp vào danh mục công nghệ cao và được Chính phủ khuyến khích, tạo cơ chế để phát triển, tuy nhiên các kết quả đạt được còn hạn chế.

Với việc phân tích tình hình thực tiễn, cùng với mong muốn đóng góp cho sự phát triển trong lĩnh vực công nghệ ô tô tự hành, tôi đã nghiên cứu và thực hiện luận án này. Thông qua đề tài được thực hiện trong khuôn khổ luận án tiến sĩ chuyên ngành hệ thống thông tin, sẽ giải quyết một số vấn đề còn tồn tại nhằm nâng cao tính an toàn, đảm bảo được tính pháp lý và đạo đức trong hoạt động của xe tự hành. Cụ thể, luận án nghiên cứu phát triển một số giải pháp hỗ trợ điều khiển bằng việc xây dựng các mô-đun hỗ trợ ra quyết định điều khiển trong của xe tự hành. Chủ đề của luận án có ý nghĩa khoa học và thực tiễn, hướng tiếp cận giải quyết theo điều khiển tối ưu toán học và tính toán mềm – là các công cụ phù hợp với bối cảnh nghiên cứu và điều kiện hiện có.

3. MỤC TIÊU CỦA LUẬN ÁN

Mục tiêu tổng quát của luận án là nghiên cứu giải pháp vận hành hiệu quả xe tự hành thông qua điều khiển thông minh và tìm đường đi tối ưu, trong đó có tính đến yếu tố pháp lý và đạo đức, nhằm hỗ trợ điều khiển xe an toàn. Kết quả nghiên cứu của luận án có thể làm tiền đề để phát triển một số mô-đun trên xe tự hành, nhằm cải thiện hiệu suất, cải thiện tính năng an toàn trong quá trình hoạt động của xe tự hành.

Mục tiêu cụ thể của luận án là nghiên cứu phát triển một số giải pháp hỗ trợ điều khiển an toàn cũng như đảm bảo các yếu tố pháp lý và đạo đức, với các mô-đun được xây dựng như mô-đun thiết lập kế hoạch chuyển động, mô-đun hỗ trợ ra quyết định điều khiển, mô-đun hỗ trợ điều khiển chuyển động, mô-đun điều khiển theo dõi chuyển động và mô-đun lập kế hoạch chuyển động dự phòng.

Các giải pháp được đề xuất nghiên cứu phát triển như sau:

- Đề xuất giải pháp lập kế hoạch chuyển động bằng phương pháp tiếp cận dựa trên kỹ thuật lấy mẫu, để tạo ra quỹ đạo tối ưu từ tập các ứng viên quỹ đạo. Giải quyết bài toán đặt ra

của giải pháp này với mục tiêu không chỉ cải thiện hiệu quả tính toán mà còn xử lý tính bất định trong dữ liệu môi trường.

- Đề xuất giải pháp nhằm đảm bảo yếu tố pháp lý và đạo đức cho hoạt động của xe tự hành, bằng giải pháp thiết lập quỹ đạo chuyển động và mô hình ra quyết định điều khiển. Dựa trên yếu tố đạo đức và pháp lý sẽ xây dựng 02 mô-đun, bao gồm mô-đun thiết lập quỹ đạo chuyển động với tập ràng buộc là các luật giao thông đường bộ và mô-đun hỗ trợ ra quyết định điều khiển với các yếu tố về đạo đức của người lái xe để kiểm soát hoạt động của xe tự hành.

- Đề xuất giải pháp hỗ trợ điều khiển an toàn cho xe tự hành, gồm mô-đun hỗ trợ điều khiển chuyển động, mô-đun điều khiển theo dõi chuyển động và mô-đun lập kế hoạch chuyển động dự phòng.

Các mục tiêu liệt kê trên đây cũng mô tả phạm vi và đối tượng nghiên cứu của luận án. Cùng với đó thì phương pháp nghiên cứu được thực hiện trong luận án là phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp với thực nghiệm, mô phỏng và đánh giá để đánh giá tính hiệu quả của giải pháp đề xuất.

4. CÁC ĐÓNG GÓP CỦA LUẬN ÁN

Đóng góp thứ nhất của luận án là đề xuất phương án lập kế hoạch chuyển động bằng phương pháp tiếp cận dựa trên kỹ thuật lấy mẫu, với mục tiêu cải thiện hiệu quả tính toán và xử lý tính bất định trong dữ liệu môi trường, kỹ thuật này đơn giản, hiệu quả với thông tin thu nhận được từ tín hiệu cảm biến và hệ thống định vị.

Đóng góp thứ hai của luận án là xây dựng mô-đun giải quyết bài toán hỗ trợ ra quyết định điều khiển cho xe tự hành với tập ràng buộc là các quy định về luật giao thông đường bộ và đạo đức của người lái xe. Mô-đun hỗ trợ điều khiển này gồm giải pháp thiết lập quỹ đạo chuyển động và mô hình ra quyết định điều khiển.

Đóng góp thứ ba của luận án là nâng cao tính năng an toàn cho xe tự hành bằng việc xây dựng tập mô-đun hỗ trợ điều khiển an toàn bao gồm mô-đun thứ nhất là điều khiển theo dõi chuyển động, mô-đun thứ hai là hỗ trợ điều khiển chuyển động và mô-đun cuối cùng là mô-đun lập kế hoạch chuyển động dự phòng.

5. BỐ CỤC CỦA LUẬN ÁN

Nội dung của luận án, ngoài phần mở đầu và kết luận thì nội dung được xây dựng thành 04 chương như sau:

Chương 1. Tổng quan về điều khiển xe tự hành

Đề có cơ sở xây dựng giải pháp hỗ trợ điều khiển trong hoạt động của xe tự hành, nội dung chương này sẽ giới thiệu tổng quan về xe tự hành, với quá trình xây dựng, phát triển và xác định mức độ phân cấp theo hoạt động của xe tự hành. Đồng thời, sẽ trình bày các vấn đề tồn tại và từ đó đưa ra giải pháp xây dựng các mô-đun hỗ trợ, đó cũng là những mục tiêu cần thực hiện của luận án.

Và để giải quyết các vấn đề đặt ra của luận án, nội dung trong chương này sẽ trình bày các kiến thức chuẩn bị làm cơ sở lý luận để giải quyết bài toán, gồm có: xây dựng mô hình toán học, những phương pháp giải quyết bài toán sẽ nghiên cứu và các kết quả đã được nghiên cứu liên quan.

Nội dung chương này nằm trong bài báo số 3, số 4 và số 9 của tác giả.

Chương 2. Giải pháp đề xuất Tìm đường đi tối ưu cho xe tự hành

Nội dung chương này sẽ trình bày tổng quan các kỹ thuật thiết lập đường đi cho xe tự hành. Phân tích, đánh giá ưu và nhược điểm của từng kỹ thuật để làm cơ sở xây dựng mô-đun lập kế hoạch chuyển động cho xe tự hành bằng kỹ thuật dựa trên mẫu. Mô-đun này sẽ giải quyết bài toán tạo ra quỹ đạo tối ưu, đạt hiệu quả tính toán và xử lý tính bất định trong dữ liệu môi trường.

Nội dung chương này nằm trong bài báo số 9 và số 11 của tác giả.

Chương 3. Giải pháp đề xuất cho vấn đề pháp lý và đạo đức của xe tự hành

Nội dung chương này sẽ giải quyết vấn đề pháp lý và đạo đức cho hoạt động của xe tự hành, với hệ thống 02 mô-đun, gồm:

- Mô-đun lập kế hoạch chuyển động với tập ràng buộc là các luật giao thông đường bộ, mô-đun này sẽ giải quyết bài toán pháp lý khi tham gia giao thông của xe tự hành.
- Mô-đun hỗ trợ ra quyết định điều khiển với tập ràng buộc được xây dựng từ đặc tính hành vi của người lái xe, mô-đun này sẽ giải quyết bài toán đạo đức của người lái xe được áp dụng vào hệ thống mô-đun của xe tự hành.

Nội dung chương này nằm trong bài báo số 5 và số 7 của tác giả.

Chương 4. Giải pháp đề xuất hỗ trợ điều khiển an toàn xe tự hành.

Dựa trên vấn đề tồn tại và với các giải pháp, mục tiêu đặt ra, cùng với cơ sở lý luận và các công cụ toán học đã trình bày ở chương 1. Trong chương này sẽ xây dựng tập các mô-đun nhằm nâng cao hiệu quả và hỗ trợ điều khiển an toàn xe tự hành, với hệ thống 03 mô-đun, gồm:

- Mô-đun điều khiển theo dõi chuyển động sẽ giải quyết bài toán kiểm soát điều hướng với mong muốn quá trình chuyển động của xe được chính xác và ổn định.
- Mô-đun hỗ trợ điều khiển chuyển động với mục đích giải quyết tình huống đa dạng và phức tạp thường gặp trong điều kiện môi trường giao thông.
- Mô-đun lập kế hoạch chuyển động dự phòng nhằm giải quyết các tình huống đảm bảo an toàn cho xe khi tham gia giao thông với vận tốc lớn.

Nội dung chương này dựa vào kết quả nghiên cứu bài báo số 1, số 2, số 6, số 8 và số 10 của tác giả.

Cuối cùng là một số kết luận về luận án.

CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN CHUYÊN BỊ VỀ HỆ THỐNG XE TỰ HÀNH

Nội dung chương này sẽ trình bày tổng quan về xe tự hành, với quá trình xây dựng, phát triển và xác định mức độ phân cấp theo hoạt động của xe tự hành. Và để giải quyết các vấn đề đặt ra của luận án, nội dung trong chương này sẽ trình bày các kiến thức chuẩn bị làm cơ sở lý luận để giải quyết bài toán đặt ra, gồm có: xây dựng mô hình toán học, những phương pháp giải quyết bài toán sẽ nghiên cứu và các kết quả đã được nghiên cứu liên quan.

1.1 Tổng quan về xe tự hành

1.2 Những vấn đề tồn tại và hướng giải quyết đối với hệ thống mô-đun xử lý trong xe tự hành

1.2.1 Những vấn đề tồn tại

Lập kế hoạch chuyển động hay thiết lập đường đi là thành phần quan trọng để xác định quá trình di chuyển của xe, nó sẽ cung cấp cho xe tự hành một lộ trình đến các điểm mong muốn được an toàn và tránh được va chạm, quá trình lập kế hoạch chuyển động sẽ thực hiện việc tính toán bao gồm: xác định đường đi, động lực học của xe, khả năng cơ động của xe khi gặp chướng ngại vật, các quy tắc và hệ thống đường giao thông. Việc thiết lập đường đi không chỉ là việc di chuyển đến điểm đích cuối cùng, mà điểm khác biệt trong thiết lập đường đi của xe tự hành là việc thực hiện kế hoạch chuyển động phụ thuộc vào mạng lưới các quy tắc giao thông và những tính huống có thể xảy ra trong môi trường giao thông công cộng.

Với việc phân tích các vấn đề tồn tại trong hệ thống các mô-đun xử lý và từ đó sẽ nghiên cứu để đưa ra hướng khắc phục, đó cũng là mục tiêu đặt ra cần phải thực hiện trong luận án này. Cụ thể cần phải xây dựng các mô-đun sau: Mô-đun tìm đường đi tối ưu cho xe tự hành,

mô-đun giải quyết vấn đề pháp lý và đạo đức của xe tự hành và mô-đun hỗ trợ điều khiển an toàn cho xe tự hành.

1.2.2 Hướng giải quyết những vấn đề còn tồn tại

Để giải quyết những vấn đề còn tồn tại, trong luận án này sẽ đưa ra các giải pháp cụ thể đối với từng mô-đun như sau:

- Giải pháp cho Mô-đun 1: Xây dựng Mô-đun lập kế hoạch chuyển động bằng phương pháp tiếp cận dựa trên kỹ thuật lấy mẫu.

- Giải pháp cho Mô-đun 2: Xây dựng Mô-đun giải quyết vấn đề pháp lý và đạo đức của xe tự hành, gồm các mô-đun thành phần: Mô-đun thiết lập quỹ đạo chuyển động giải quyết vấn đề pháp lý của xe tự hành và Mô-đun hỗ trợ ra quyết định điều khiển giải quyết vấn đề đạo đức của xe tự hành.

- Giải pháp cho Mô-đun 3: Xây dựng Mô-đun hỗ trợ điều khiển an toàn cho xe tự hành, gồm các mô-đun thành phần: Mô-đun hỗ trợ điều khiển chuyển động, Mô-đun điều khiển theo dõi chuyển động và Mô-đun lập kế hoạch chuyển động dự phòng.

1.3 Kiến thức chuẩn bị

1.3.1 Biểu diễn làn đường và xây dựng mô hình động học của xe

1.3.2 Phương pháp Monte Carlo và bộ lọc phần tử

1.3.2.1 Phương pháp Monte Carlo

1.3.2.2 Bộ lọc phần tử (Particle filter)

1.3.3 Tổng quan về điều khiển dự báo theo mô hình

1.3.3.1 Điều khiển dự báo theo mô hình và xây dựng hàm mục tiêu

1.3.3.2 Lập kế hoạch chuyển động dựa trên mô hình điều khiển dự báo

1.4 Kết luận chương 1

Nội dung chương 1 đã trình bày giới thiệu tổng quan tài liệu về các vấn đề nghiên cứu đối với hệ thống xe tự hành, bao gồm quá trình hình thành và phát triển của hệ thống xe tự hành, hệ thống mô-đun xử lý, một số khó khăn cũng như việc khảo sát kỹ lưỡng với một loạt các công trình nghiên cứu gần đây đối với lĩnh vực này. Đây là các vấn đề được sử dụng để làm cơ sở cho việc xây dựng các mô-đun, nhằm nâng cao quá trình hoạt động trong việc lập kế hoạch chuyển động của xe tự hành ở luận án này.

Nội dung đã trình bày cho thấy còn rất nhiều vấn đề tồn tại trong nghiên cứu về lập kế hoạch chuyển động của xe tự hành. Tuy nhiên, do phạm vi nghiên cứu của luận án tập trung chủ yếu vào quá trình nâng cao hiệu quả hoạt động của các mô-đun hỗ trợ điều khiển, mô-đun tăng cường tính năng an toàn trong quá trình lập kế hoạch chuyển động cho xe tự hành, từ đó luận án sẽ tập trung vào việc đề xuất các phương pháp để giải quyết các vấn đề quan trọng như mục tiêu đã đặt ra, cụ thể như sau:

- Xây dựng phương án lập kế hoạch chuyển động bằng phương pháp tiếp cận dựa trên kỹ thuật lấy mẫu, kỹ thuật này đơn giản, hiệu quả với thông tin thu nhận được từ tín hiệu cảm biến và hệ thống định vị. Giải pháp xây dựng mô-đun lập kế hoạch chuyển động này được trình bày trong chương 2.

- Xây dựng mô-đun giải quyết bài toán hỗ trợ ra quyết định điều khiển cho xe tự hành dựa trên khía cạnh các quy định về luật giao thông đường bộ và đạo đức của người lái xe. Giải pháp đề xuất này được trình bày ở chương 3.

- Xây dựng mô-đun nâng cao tính năng an toàn cho xe tự hành, bằng giải pháp xây dựng tập mô-đun hỗ trợ điều khiển, bao gồm: mô-đun thứ nhất điều khiển theo dõi chuyển động, mô-đun thứ hai hỗ trợ điều khiển chuyển động và mô-đun cuối cùng là mô-đun lập kế hoạch chuyển động dự phòng. Nội dung cụ thể của giải pháp xây dựng 03 mô-đun này sẽ được trình bày ở chương 4.

CHƯƠNG 2

GIẢI PHÁP ĐỀ XUẤT TÌM ĐƯỜNG ĐI TỐI ƯU CHO XE TỰ HÀNH

Nội dung chương này sẽ trình bày giải pháp tìm đường đi tối ưu cho xe tự hành, bằng việc xây dựng mô-đun lập kế hoạch chuyển động dựa trên kỹ thuật lấy mẫu để giải quyết bài toán tạo ra quỹ đạo tối ưu, đạt được hiệu quả tính toán và xử lý tính bất định trong dữ liệu môi trường.

2.1 Đánh giá tổng quan về kỹ thuật thiết lập đường đi cho xe tự hành

Lập kế hoạch chuyển động trong xe tự hành là một chủ đề nghiên cứu trong nhiều thập kỷ qua. Hầu hết các nghiên cứu phân chia vấn đề thành 2 hướng gồm kế hoạch toàn cục và kế hoạch địa phương. Các kỹ thuật lập kế hoạch chuyển động có thể được chia thành 4 nhóm: Tìm kiếm trong đồ thị, dựa trên mẫu, nội suy và các phương pháp tối ưu

2.1.1 Lập kế hoạch chuyển động dựa trên đồ thị tìm kiếm

2.1.2 Lập kế hoạch chuyển động dựa trên mẫu

2.1.3 Lập kế hoạch chuyển động bằng đường cong nội suy

2.1.4 Lập kế hoạch chuyển động bằng phương pháp tối ưu

2.1.5 So sánh ưu và nhược điểm trong các kỹ thuật lập kế hoạch chuyển động

Với việc tổng hợp, phân tích kỹ thuật lập kế hoạch chuyển động của xe tự hành từ 2 quan điểm:

1. Đánh giá, phân loại các yếu tố kỹ thuật khác nhau trong quá trình xây dựng kế hoạch chuyển động, bao gồm: Tìm kiếm trong đồ thị, dựa trên mẫu, nội suy và phương pháp tối ưu.

2. Xem xét kết quả của các nhóm nghiên cứu trên thế giới đã thực hiện kỹ thuật xác lập kế hoạch chuyển động trên xe tự hành từ mô phỏng đến thực tế.

Từ đó nhận thấy rằng, các nhóm nghiên cứu sử dụng 2 thuật toán chính là nội suy và tìm kiếm trong đồ thị.

2.2 Xây dựng mô-đun lập kế hoạch chuyển động dựa trên kỹ thuật lấy mẫu

2.2.1 Phát biểu bài toán

Trong giải pháp đề xuất tìm đường đi tối ưu cho xe tự hành của luận án này, tôi đề xuất giải pháp xây dựng mô-đun lập kế hoạch chuyển động bằng kỹ thuật lấy mẫu dựa trên cấu trúc của bộ lọc phần tử. Mô-đun lập kế hoạch chuyển động này với mục tiêu đặt ra không chỉ cải thiện hiệu quả tính toán mà còn xử lý tính bất định trong dữ liệu môi trường và hệ thống phương tiện đề xuất.

2.2.2 Giải pháp lập kế hoạch chuyển động

Giải pháp lập kế hoạch chuyển động mà trong luận án này đề xuất được thực hiện dựa trên kỹ thuật lấy mẫu, nên các ứng viên quỹ đạo được quản lý lặp đi lặp lại để tạo ra quỹ đạo; để quản lý các ứng viên hiệu quả thì quy trình lọc phần tử được áp dụng và trong quá trình lập kế hoạch chuyển động này cần sử dụng 4 bước chính: cập nhật thời gian ứng viên, cập nhật dữ liệu môi trường, lựa chọn quỹ đạo và tái lấy mẫu mục tiêu chuyển động. Trong 4 bước này thì cập nhật thời gian của ứng viên quỹ đạo và cập nhật dữ liệu môi trường được thiết kế để xét tính không chắc chắn của dữ liệu định vị và dữ liệu môi trường trong quá trình lập kế hoạch chuyển động. Ngoài ra, bước tái lấy mẫu mục tiêu chuyển động nhằm cải thiện hiệu suất tính toán bằng cách quản lý các mục tiêu chuyển động của các ứng viên quỹ đạo.

Cụ thể các bước thực hiện như sau:

a. Khởi tạo

Khởi tạo mục tiêu chuyển động ban đầu (s_0^i, n_0^i) và trọng số q_0^i của các ứng viên quỹ đạo được thiết lập theo giá trị \mathcal{N} của các ứng viên quỹ đạo là giá trị có yếu tố quan trọng tác động đến hiệu năng tính toán trong phương pháp lập kế hoạch dựa trên mẫu; Do đó, việc xem xét để đưa ra một số \mathcal{N} của các ứng viên quỹ đạo thích hợp là vấn đề mà các giải pháp tính toán trong lập kế hoạch chuyển động phải tính đến.

Với giá trị \mathcal{N} của các ứng viên quỹ đạo, các mục tiêu chuyển động ban đầu (s_0^i, n_0^i) được thống nhất chọn dọc theo trục thẳng của xe và trọng số q_0^i của mỗi quỹ đạo sẽ được khởi tạo như sau: $q_0^i = 1/\mathcal{N}$

b. Cập nhật thời gian của ứng viên quỹ đạo

Thực hiện tương tự như cập nhật thời gian trong hoạt động của bộ lọc phần tử. Tuy nhiên, bản cập nhật thời gian của các ứng viên quỹ đạo được thực hiện với mô hình hệ thống được thiết kế dành cho chuyển động của xe là:

$$\begin{bmatrix} X_k^- \\ Y_k^- \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} X_{k-1}^+ \\ Y_{k-1}^+ \end{bmatrix}_e + \Delta T v_{k-1}^+ \begin{bmatrix} \cos(\theta_{k-1}^+) \\ \sin(\theta_{k-1}^+) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Trong đó: $[X \ Y]_e^T$ là vị trí xe được xác định trong hệ tọa độ Descartes, ΔT là khoảng thời gian cập nhật của hệ thống, v là vận tốc và θ là góc đảo lái.

Các ứng viên quỹ đạo là tập bao gồm đường dẫn và thông tin chuyển động được cập nhật để kết nối từ vị trí xe đến từng mục tiêu chuyển động; vì thông tin đường dẫn gồm vị trí (X, Y) , góc θ và độ cong κ của ứng viên quỹ đạo là biểu diễn chuyển động của xe dọc theo đường.

Kết quả cuối cùng, sẽ thu được là các ứng viên quỹ đạo có thể bao gồm một tập các nút quỹ đạo được cập nhật và thông tin chuyển động không cố định.

c. Cập nhật dữ liệu môi trường

Để tăng trọng số cho mỗi ứng viên quỹ đạo nằm ở trong làn đường thì yếu tố hình học của đường với khả năng thích ứng p_r được định nghĩa như sau:

$$p_r(z_k | \mathcal{X}_{i,k}^{j-}, m) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{|n_k^{j-} - n^{tar}|^2}{2\sigma_t^2}\right), & \text{nếu } |n_k^{j-} - n^{tar}| < 0.5W_{lane} \\ g_{o_\beta} \exp\left(-\frac{|n_k^{j-} - n^{o_\beta}|^2}{2\sigma_{o_\beta}^2}\right), & \text{nếu } |n_k^{j-} - n^{o_\beta}| < 0.5W_{lane} \\ 0 & \text{nếu } |n_k^{j-}| > n^{bou} \end{cases} \quad (2.8)$$

trong đó n^j là vị trí bên của nút quỹ đạo thứ j ; n^{tar} là vị trí bên của làn đường đích; n^{o_β} là vị trí bên của làn thứ β khác; n^{bou} là vị trí bên của ranh giới đường, σ_{o_t} là phân phối xác suất mục tiêu; σ_{o_β} là phân phối xác suất của làn thứ β khác.

Trong nghiên cứu này, giả định rằng hệ thống dữ liệu môi trường cung cấp cho hệ thống xử lý bản đồ chương ngại vật tĩnh và danh sách các chương ngại vật động từ dữ liệu của các thiết bị cảm biến.

d. Lựa chọn quỹ đạo

Việc lựa chọn quỹ đạo được thực hiện dựa trên trọng số cập nhật của các ứng viên quỹ đạo, quỹ đạo cuối cùng T_k^+ tại bước thời gian k được chọn trong bước lựa chọn quỹ đạo. Để chọn được quỹ đạo tối ưu, chúng ta tìm giá trị cực đại của phương pháp đánh giá quy nạp:

$$T_k^+ = \underset{T_k^+}{\operatorname{argmax}} [\hat{q}_k^i(T_k^{i-})] \quad (2.13)$$

trong đó argmax là hàm để tìm ứng viên quỹ đạo T_k^+ của miền \hat{q}_k^i mà tại đó giá trị đạt cực đại.

e. Tái lấy mẫu mục tiêu chuyển động

Bước tái lấy mẫu mục tiêu chuyển động này được thực hiện nếu thỏa mãn điều kiện $N_{eff} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N (q_k^i)^2} < \mu N$ [71]; trong đó N_{eff} là số ứng viên hiệu dụng, đại diện cho mức độ tập trung của trọng số; μ là tỷ lệ ngưỡng và là một yếu tố được thiết kế để sử dụng cho việc xác định tần suất của hoạt động tái lấy mẫu.

Nếu việc tái lấy mẫu được xác định, thì có 2 loại mục tiêu chuyển động được tái tạo: mục tiêu chuyển động cố định và mục tiêu chuyển động ngẫu nhiên. Để kiểm tra độ an toàn

của tất cả các làn đường, mục tiêu chuyển động cố định được tạo ra ở trung tâm của mỗi làn đường và có rất ít mục tiêu chuyển động được tái tạo thành mục tiêu chuyển động cố định; mà hầu hết các mục tiêu chuyển động được tái tạo bằng cách áp dụng kỹ thuật lấy mẫu có phương sai thấp dựa trên trọng số của các ứng viên quỹ đạo, kỹ thuật này có độ phức tạp tính toán thấp và độ phủ không gian tốt của không gian mẫu.

2.2.3 Mô phỏng thực nghiệm mô-đun lập kế hoạch chuyển động

Giải pháp được xây dựng trong mô-đun này dựa trên kỹ thuật lấy mẫu ngẫu nhiên, cho nên các trường hợp thực nghiệm giống nhau vẫn có thể có các kết quả khác nhau. Nhằm đảm bảo tính khách quan và tin cậy khi đánh giá, nên quá trình mô phỏng thực nghiệm trong môi trường Matlab được tiến hành nhiều lần trong cùng 1 kịch bản, kịch bản mô phỏng được tiến hành trên cung đường thẳng và đường cong với góc cua nhỏ, như sau:

Kịch bản 1: Kịch bản này được tiến hành trên đoạn đường thẳng (hình 2.17).

Kịch bản 2: Kịch bản này được tiến hành trên đoạn đường cong (hình 2.18).

Để đánh giá hiệu suất giải pháp lập kế hoạch chuyển động dựa trên thiết kế của bộ lọc phân tử, với quá trình lập kế hoạch chuyển động được thực hiện dựa trên kỹ thuật lấy mẫu ngẫu nhiên này, luận án này đã áp dụng phương pháp mô phỏng Monte Carlo với một kịch bản thử nghiệm được lặp lại nhiều lần và thực hiện đồng thời với phương pháp lập kế hoạch chuyển động bằng kỹ thuật cây RRT; kịch bản thử nghiệm được áp dụng giống nhau cho cả 2 phương pháp.

Quá trình đánh giá định lượng cho giải pháp, sẽ tiến hành phân tích thời gian tính toán và tỷ lệ thất bại với kịch bản mô phỏng như quá trình đánh giá hiệu suất, mỗi kịch bản thử nghiệm 50 lần cho các mô phỏng Monte Carlo, nếu quỹ đạo đã chọn gây ra va chạm trong quá trình mô phỏng thì trường hợp thử nghiệm này được đánh dấu là trường hợp lỗi. Kết quả thực hiện được trình bày trong bảng 2.2.

Như trong bảng 2.2, thời gian thực hiện của giải pháp đề xuất lớn hơn so với giải pháp sử dụng cây RRT cho cùng số lượng ứng viên; lý do là vì phương pháp này cần cập nhật thời gian lập kế hoạch quỹ đạo và tái lấy mẫu chuyển động cục bộ. Tuy nhiên, hiệu suất an toàn của giải pháp này là cao hơn, đồng thời giải pháp này có tỉ lệ thất bại thấp hơn mặc dù số lượng ứng viên nhỏ là do giải pháp này lặp đi lặp lại quá trình thay đổi mục tiêu chuyển động có sử dụng trọng số.

2.3 Kết luận chương 2

Trong chương này, nội dung trình bày với cơ sở lý luận là các kỹ thuật thiết lập đường đi đã được nghiên cứu trong thời gian qua, từ đó đề xuất giải pháp xây dựng mô-đun lập kế hoạch chuyển động dựa trên kỹ thuật lấy mẫu dựa trên cấu trúc của bộ lọc phân tử. Mô-đun lập kế hoạch chuyển động này với mục tiêu đặt ra không chỉ cải thiện hiệu quả tính toán mà còn xử lý tính bất định trong dữ liệu môi trường và hệ thống phương tiện đề xuất.

Kết quả đánh giá về điều kiện an toàn thì giải pháp đề xuất đã đạt được hiệu quả và phương pháp lập kế hoạch chuyển động này đã tạo ra một quỹ đạo tối ưu cho phép một xe tự hành có thể lái dọc theo đường và tránh chướng ngại vật an toàn. Để nâng cao hiệu quả tính toán và xem xét xác suất không chắc chắn của dữ liệu môi trường và định vị trên quỹ đạo tổng quát; thì hiệu suất của giải pháp đề xuất này còn phụ thuộc vào mô hình xác suất của hệ thống để tạo ra các trường khả năng thích ứng. Do đó, phân tích xác suất và phương pháp biểu diễn tình huống lái xe cần được tích hợp nhiều hơn đối với việc áp dụng vào xe thực tế.

CHƯƠNG 3

GIẢI PHÁP ĐỀ XUẤT CHO VẤN ĐỀ PHÁP LÝ VÀ ĐẠO ĐỨC TRONG HOẠT ĐỘNG CỦA XE TỰ HÀNH

Dựa trên vấn đề tồn tại với các giải pháp, mục tiêu, cùng với cơ sở lý luận và các công cụ toán học đã trình bày ở chương 1. Trong chương này sẽ xây dựng tập các mô-đun nhằm giải quyết vấn đề pháp lý và đạo đức trong hoạt động của xe tự hành. Tập mô-đun này gồm:

- Mô-đun hỗ trợ ra quyết định điều khiển để giải quyết bài toán đạo đức của người lái xe được áp dụng vào hệ thống mô-đun của xe tự hành, với tập ràng buộc được xây dựng từ đặc tính hành vi của người lái xe.

- Mô-đun thiết lập quỹ đạo chuyển động với tập ràng buộc là các luật giao thông đường bộ để giải quyết bài toán pháp lý khi tham gia giao thông của xe tự hành.

3.1 Xây dựng mô-đun hỗ trợ ra quyết định điều khiển

3.1.1 Phát biểu bài toán

Để giải quyết bài toán đặt ra trong quá trình thiết lập mô-đun này thì bài toán này phải được giải quyết trong từng tình huống cụ thể, như vậy chúng ta mới có thể đánh giá liệu quyết định hành vi điều hướng có phù hợp với các quy tắc đạo đức và pháp lý hay không.

Dựa trên việc phân tích, thông kê với hàng trăm bảng câu hỏi điều tra, phỏng vấn và kết hợp với các bối cảnh cụ thể của các tình huống khẩn cấp, các chỉ số đạo đức của việc ra quyết định hành vi điều khiển xe có thể được phân thành các vấn đề như sau [53]: Kiểu mục tiêu bất thường; Số lượng mục tiêu bất thường; Trạng thái đặc biệt của mục tiêu bất thường; Mức độ ưu tiên bảo vệ.

Trong bài toán này, chỉ chọn lựa 2 chỉ số đầu tiên là kiểu và số lượng của mục tiêu bất thường làm cơ sở để nghiên cứu, theo nguyên tắc lựa chọn các yếu tố đạo đức như sau: phân biệt người đi bộ, xe không có động cơ, không phân biệt độ tuổi và giới tính, không phân biệt giá trị tài sản của xe.

3.1.2 Xây dựng mô hình toán học cho mô-đun hỗ trợ ra quyết định điều khiển

Để mô-đun hỗ trợ ra quyết định xử lý thông tin mờ và có khả năng tự học, thì mô-đun này sẽ được xây dựng dựa trên mạng nơron mờ (FNN), cấu trúc mạng kết hợp nơron mờ được phân thành 02 lớp mạng con, gồm: lớp mạng tiền đề và lớp mạng hệ quả (hình 3.2), trong mỗi lớp mạng này sẽ chia thành các lớp mạng con.

Nguyên tắc cơ bản của mạng FNN là biểu thị cho mức độ thuộc về $u_f(u)$ của mỗi phần tử u với tập con mờ f bằng các giá trị số cụ thể, để có thể mô tả nhiều khái niệm mờ một cách định lượng, thì với các luật cụ thể như sau: Giả sử $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ biểu thị vector đầu vào, mỗi phần tử x_i là một biến ngôn ngữ mờ, thì:

$$R_f: \text{Nếu } x_1 \text{ là } A_1^j, x_2 \text{ là } A_2^j, \dots, x_n \text{ là } A_n^j \text{ Thì } y_j = p_{j0} + p_{j1}x_1 + \dots + p_{jn}x_n$$

Trong đó: R_j là luật mờ thứ j , A_i^j là giá trị ngôn ngữ thứ j của biến đầu vào x_i , y_i là giá trị đầu ra theo luật mờ p_{ji} là tham số hệ thống mờ.

3.1.1.1 Mạng tiền đề của FNN

Mạng tiền đề trong giải pháp này được chia thành 4 lớp con như sau:

Lớp 1: Lớp nhập.

Lớp 2: Lớp mờ hóa. Trong nghiên cứu này, hàm thuộc Gauss được tính như sau:

$$y = e^{-\frac{(x-c)^2}{\sigma^2}} \quad (3.1)$$

Trong đó các tham số c và σ là điểm trung tâm của hàm và độ rộng tương ứng của hàm thuộc Gauss.

Lớp 3: Lớp luật, mỗi nút trong lớp này tương ứng với một luật và lớp này được sử dụng để tính cường độ kích hoạt trọng số α_j của mọi luật mờ. Toán tử nhân liên tiếp được tính như sau: $\alpha_j = u_{A_1^j}(x_1) * u_{A_2^j}(x_2) * \dots * u_{A_n^j}(x_n)$ (3.2)

trong đó $u_{A_i}^j(x_i)$ là hàm phụ tương ứng.

Lớp 4: Lớp chuẩn hóa, được sử dụng để tính toán cường độ kích hoạt chuẩn hóa của các luật tương ứng, giá trị $\bar{\alpha}_j$ sẽ nhận giá trị xuất của lớp trước và sau đó tính tỷ số như sau:

$$\bar{\alpha}_j = \frac{\alpha_j}{\sum_{i=1}^m \alpha_i} \quad (3.3)$$

3.1.1.2 Mạng hệ quả của FNN

Mạng hệ quả trong bài toán này được chia thành 3 lớp, bao gồm các mạng con song song có cùng cấu trúc mạng, mỗi mạng tạo nên một biến đầu ra.

Lớp 5: Lớp nhập, để bù hằng số trong luật mờ, nút 0 của lớp này có giá trị $x_0 = 1$.

Lớp 6: Được sử dụng để tính toán các tham số hệ quả của các luật. Đặt trung bình trọng số đầu vào cho các luật không điều chỉnh như sau:

$$y_{ij} = p_{j0}^i + p_{j1}^i x_1 + \dots + p_{jn}^i x_n \quad (3.4)$$

Lớp 7: Lớp kết hợp các luật, ở lớp này chỉ có 1 nút tổng hợp kết quả xuất ra từ lớp trước. Giá trị xuất ở nút này là tổng các giá trị xuất ra từ lớp trước, được tính như sau:

$$y_i = \sum_{j=1}^m \bar{\alpha}_j y_{ij} \quad (3.5)$$

Trong đó y_i ($i = 1 \dots r$) là tổng trọng số của mỗi luật. Giá trị đầu ra của mạng tiền đề được sử dụng làm trọng số kết nối của lớp 7.

Việc thiết lập các tham số học của mạng FNN chủ yếu là trọng số kết nối p_{ji}^l của mạng hệ quả và giá trị trung tâm C_{ij} , độ rộng σ_{ij} ở hàm thành viên của mỗi nút trong lớp 2 ở mạng tiền đề.

3.1.3 Thiết lập tham số của mô-đun

Trong luận án này, chỉ đưa ra 16 chỉ số ảnh hưởng để thiết kế bảng câu hỏi điều tra, phỏng vấn theo tình huống khẩn cấp đã được đặt ra cho bài toán với hành vi băng qua đường tại vị trí đèn giao thông của mục tiêu bất thường. Trong luận án này đã sử dụng việc phân tích thành phần chính (PCA) để chuyển đổi nhiều chỉ số tương quan thành các chỉ số ít tương quan tuyến tính hơn.

Để đánh giá các chỉ số đưa ra, tôi tiến hành lập bảng khảo sát đánh giá hiệu quả với 16 chỉ số, kết quả số mẫu phát ra là 500 mẫu, số lượng câu hỏi đạt hiệu quả của các chỉ số chiếm 95%. Thông qua việc phân tích và xử lý dữ liệu bảng câu hỏi, các biến đầu vào của mô hình được xác định như bảng 3.2.

Bộ chỉ số của mô-đun ra quyết định cho thấy các yếu tố với hệ số tương quan lớn có tác động quan trọng với việc ra quyết định. Các chỉ số về loại mục tiêu bất thường, số lượng mục tiêu bất thường thì liên quan đến các vấn đề đạo đức, các chỉ số còn lại liên quan đến vấn đề pháp lý cho hoạt động của xe trên đường. Tuy nhiên, đối với chỉ số vạch kẻ đường, do tình huống đưa ra trong bài toán này diễn ra tại vạch dừng của đèn tín hiệu, thì vạch kẻ đường là đường liền với quy định không được lấn sang làn khác khi di chuyển, cho nên chỉ số này được loại bỏ do không cần thiết. Cuối cùng, các biến đầu vào của mô-đun chỉ còn lại 7 chỉ số.

Đối với giá trị đầu ra của mô hình quyết định (OD). Với tình huống khẩn cấp và nguy hiểm được đặt ra trong bài toán này là xe tự hành nằm ở làn đường giữa và mục tiêu bất thường hoạt động trước đầu các phương tiện tại vị trí làn đường giành cho người và phương tiện thô sơ băng qua đường. Trong trường hợp này, việc ra quyết định đối với hướng chuyển động của xe được phân thành 3 tình huống, gồm: Phanh + đi Thẳng, Phanh + rẽ Trái và Phanh + rẽ Phải.

3.1.4 Mô phỏng thực nghiệm mô-đun hỗ trợ ra quyết định điều khiển

Thực nghiệm đối với mô-đun hỗ trợ ra quyết định điều khiển được tiến hành với 6 kịch bản khác nhau, trong đó kịch bản mô phỏng với trường hợp 1 là tín hiệu đèn giao thông mới chuyển ở trạng thái xanh để cho phép xe di chuyển và cấm các đối tượng băng qua đường, và trường hợp 2 là đèn tín hiệu xanh đã sáng trong 1 khoảng thời gian trên 30s. Trong cả 2 trường

hợp của đèn tín hiệu thì mục tiêu bất thường được chọn để đánh giá là người đi bộ và xe thô sơ khi băng qua đường, vị trí của mục tiêu bất thường là khu vực đường băng ngang tại làn đường dành cho người đi bộ và được phân thành 2 vị trí: đã băng qua hoặc chưa vượt qua đường trung tâm, trạng thái của mục tiêu bất thường được xét đến là đang đứng yên hoặc di chuyển.

Dữ liệu thu nhận được thông qua khảo sát và phỏng vấn để mô phỏng, sẽ tiến hành đánh giá, so sánh với mô hình ra quyết định sử dụng mạng nơron lan truyền ngược (BPNN). Việc đánh giá mối quan hệ giữa các yếu tố ảnh hưởng đến quyết định và việc ra quyết định của mô hình như trong nghiên cứu [51], cụ thể sẽ tính toán và so sánh các giá trị sai số tuyệt đối trung bình (MAE) và độ lệch chuẩn (RMSE).

Với kết quả thực nghiệm, thì các yếu tố đạo đức và pháp lý đã được xét đến về mặt định lượng khi xây dựng mô-đun và áp dụng PCA để xác định 7 yếu tố ảnh hưởng chính làm biến đầu vào và việc ra quyết định điều khiển được phát triển để hoàn thành nhiệm vụ trong kế hoạch chuyển động OD1 (Phanh và đi thẳng), OD2 (Phanh và rẽ Trái), OD3 (Phanh và rẽ Phải) được tính là biến đầu ra cho mô-đun. Thực nghiệm cho thấy kết quả đầu ra của FNN có độ chính xác và sai số nhỏ hơn so với BPNN với các yếu tố đạo đức và pháp lý trong quá trình xây dựng ra quyết định. Mặc dù giải pháp này tích hợp các yếu tố đạo đức và pháp lý vào mô-đun hỗ trợ ra quyết định điều khiển xe, nhưng vẫn còn nhiều giới hạn khi mục tiêu cần đạt đến là xe tự hành sẽ không giảm thiểu chính xác hành vi của con người và trên thực tế, những vấn đề thực sự nảy sinh khi tương tác giữa con người và phương tiện tự hành diễn ra.

3.2 Xây dựng mô-đun thiết lập quỹ đạo chuyển động

3.2.1 Phát biểu bài toán

Ý tưởng chính khi xây dựng giải pháp lập quỹ đạo chuyển động là sử dụng phương pháp dựa trên điều khiển mô hình dự báo (MPC), trong đó tập ràng buộc được xây dựng như các mệnh đề logic, bao gồm các ràng buộc về vấn đề pháp lý và đạo đức của hành vi tham gia giao thông. Căn cứ vào các điều khoản quy định khi tham gia giao thông của pháp luật nước Việt Nam, luận án này biểu diễn các mệnh đề logic để đưa ra tập ràng buộc khi tham gia giao thông.

3.2.2 Xây dựng mô hình dự báo

Với ý tưởng sử dụng mô hình dự báo và phần đầu tiên của mô hình xe được đề xuất với vector trạng thái ω , vector điều khiển u để làm cơ sở cho vấn đề nghiên cứu như sau:

$$\omega = [s_x, v_x, s_y, v_y]^T \text{ và } u = [a_x, a_y]^T$$

trong đó, các giá trị s_x, s_y biểu diễn vị trí dọc và ngang, v_x, v_y là vận tốc và a_x, a_y là gia tốc của xe theo các trục x, y của xe trong hệ quy chiếu.

Từ đó, mô hình động lực học của xe được biểu diễn với các ma trận zero có kích thước phù hợp, như sau:

$$\dot{\omega}(t) = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix} \omega + \begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & B \end{bmatrix} u \quad (3.15)$$

$$\text{với } A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Trong bài toán này, giả định đưa ra rằng vector điều khiển u là một hàm hằng tại mỗi bước thời gian τ . Do đó, mô hình động lực học của xe được biểu diễn xấp xỉ với các giá trị ban đầu gồm vector trạng thái $\omega(k)$ và vector điều khiển $u(k)$ trong khoảng thời gian $[k\tau, (k+1)\tau]$ như sau:

$$\omega(k+1) = \begin{bmatrix} A^d & 0 \\ 0 & A^d \end{bmatrix} \omega(k) + \begin{bmatrix} B^d & 0 \\ 0 & B^d \end{bmatrix} u(k) \quad (3.16)$$

$$\text{với } A^d = \begin{bmatrix} 1 & \tau \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B^d = \begin{bmatrix} \tau \\ \tau^2 \end{bmatrix}$$

Nhằm đạt được hiệu quả tính toán với những hạn chế bởi hệ thống động học của xe cũng như các quy định về hướng chuyển động khi vượt chướng ngại vật trên đường, thì cần xét đến các ràng buộc về trạng thái $\omega(\cdot)$, tín hiệu điều khiển đầu vào $u(\cdot)$ và hướng chuyển động của xe $\theta(\cdot)$ phải thỏa mãn các điều kiện để khi xây dựng quỹ đạo chuyển động được khả thi.

Ngoài ra, trong bài toán này cần kết hợp thêm tập ràng buộc là các quy định về luật giao thông đường bộ. Các quy định này được xét như các mệnh đề logic và sẽ thực hiện việc chuyển đổi thành tập các bất đẳng thức tuyến tính với các biến nguyên.

3.2.3 Xác định hàm mục tiêu

Để xác định được hàm mục tiêu cho giải pháp này, thì cần phải đưa ra biến vector giá trị mới $\delta(k) = \{0,1\}^m$ và δ_r , trong đó $\delta(k)$ là tập hợp của tất cả các biến nhị phân kết quả từ việc xây dựng lại các quy định về luật giao thông đường bộ thành các bất đẳng thức tuyến tính và δ_r là quỹ đạo tham chiếu cho các biến nhị phân mà tại đây chúng ta có thể thực hiện các tùy chọn trên một số trạng thái nhị phân.

Như vậy, tại thời điểm $t = 0$ thì bài toán tối ưu của mô hình dự báo với hàm mục tiêu có thể được viết như sau:

$$\min_{u, \delta} J(\omega, u, \delta) = \sum_{k=0}^K (\|\omega(k) - \omega_r(k)\|_Q^2 + \|\delta(k) - \delta_r(k)\|_R^2 + \|u(k)\|_S^2 + \|\Delta u(k)\|_W^2) \quad (3.35)$$

Thỏa mãn điều kiện:

$$\omega(k+1) = \begin{bmatrix} A^d & 0 \\ 0 & A^d \end{bmatrix} \omega(k) + \begin{bmatrix} B^d & 0 \\ 0 & B^d \end{bmatrix} u(k) \quad \text{với } k = [0, \dots, K-1] \quad (3.36)$$

$$\omega(k) \in [\omega_{min}, \omega_{max}] \quad \text{với } k = [0, \dots, K] \quad (3.37)$$

$$\omega_{min} = [0, 0, s_{min_y}, v_{min_y}]^T \quad (3.38)$$

$$\omega_{max} = [\infty, v_{max_x}, s_{max_y}, v_{max_y}]^T \quad (3.39)$$

$$u(k) \in [u_{min}, u_{max}] \quad \text{với } k = [0, \dots, K] \quad (3.40)$$

$$u_{min} = [a_{min_x}, a_{min_y}]^T \quad (3.41)$$

$$u_{max} = [a_{max_x}, a_{max_y}]^T \quad (3.42)$$

$$\theta \in [\theta_{min}, \theta_{max}] \quad \text{với } \theta = \arctan(v_y/v_x) \quad (3.43)$$

$$v_y(k) \in [v_x(k) \tan(\theta_{min}), v_x(k) \tan(\theta_{max})] \quad \text{với } k = [0, \dots, K] \quad (3.44)$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad \text{với } k = [0, \dots, K] \quad (3.45)$$

$$C \begin{bmatrix} \omega \\ \omega_r \\ \delta \end{bmatrix} \leq D \quad (3.46)$$

với các ma trận C, D, Q, R, S và W là các ma trận trọng số dương có kích thước phù hợp, ràng buộc cuối cùng (3.46) là tập tất cả các quy định về luật giao thông đường bộ thành các bất đẳng thức tuyến tính được biểu diễn trong ma trận.

Từ ý tưởng đã nêu ra đối với bài toán này và nhằm mục đích đánh giá hiệu quả của giải pháp đối với môi trường hoạt động cụ thể của xe, thì hàm chi phí được xây dựng để hiệu quả kiểm soát hoạt động được tối ưu với điều kiện đặt ra ban đầu là vận tốc di chuyển của xe không đổi và độ lệch ngang xe sẽ thay đổi theo thời gian trong quãng đường di chuyển. Do đó, biểu thức $\|\delta(k) - \delta_r(k)\|_R^2$ trong bài toán tối ưu (3.35) sẽ không được xét đến, từ đó hàm chi phí được xây dựng trong mô-đun này được đưa ra như sau:

$$J = \sum_{k=0}^K (q_1(v_x(k) - v_r)^2 + q_2(y(k) - y_r(k))^2 + q_3(v_y(k))^2 + q_4(a_x(k))^2 + q_5(a_y(k))^2 + r_1(a_x(k) - a_x(k-1))^2 + r_2(a_y(k) - a_y(k-1))^2) \quad (3.47)$$

3.2.4 Mô phỏng thực nghiệm mô-đun thiết lập quỹ đạo chuyển động

Nhằm đảm bảo tính khách quan và tin cậy khi đánh giá thì quá trình tiến hành mô phỏng sẽ được thực hiện với các kịch bản khác nhau.

Kịch bản 1: Trong kịch bản này xe tự hành sẽ di chuyển vào một đoạn đường có giới hạn tốc độ (hình 3.5). Trong quá trình mô phỏng, với các thông số như đã trình bày, thì việc xây dựng các ràng buộc theo luật 7 (R7).

Kết quả mô phỏng cho thấy vận tốc di chuyển của xe từ vị trí T4 đến vị trí T10 theo kế hoạch chuyển động của xe giảm xuống dưới mức vận tốc $v_r \leq 40km/h$, như vậy bộ điều khiển chuyển động đã đạt hiệu quả áp dụng.

Kịch bản 2: Trong kịch bản này xe tự hành sẽ di chuyển cùng một làn đường với các xe khác và xe tự hành sẽ thực hiện thao tác vượt phải đối với xe phía trước (hình 3.6). Tại thời T3 phương tiện phía trước vận di chuyển với vận tốc không đổi, trong tình huống này thì xe tự hành hoặc phải giảm vận tốc $v_r \leq 30km/h$ hoặc phải thực hiện thao tác vượt xe nếu không sẽ xảy ra tai nạn. Trong quá trình thực hiện mô phỏng, sẽ chọn thao tác vượt xe và để đảm bảo vượt xe phía trước không vi phạm quy tắc giao thông đường bộ thì xe tự hành phải thực hiện thao tác vượt xe theo luật 2 (R2).

Kịch bản 3: Trong kịch bản này xe tự hành sẽ di chuyển qua một giao lộ, không có đèn tín hiệu giao thông, không có đường ưu tiên và không có xe ưu tiên.

Kết quả mô phỏng cho thấy vận tốc di chuyển của xe tự hành giảm khi chuẩn bị vào khu vực giao lộ và sau đó trở lại với vận tốc ban đầu, đồng thời di chuyển qua giao lộ sau tất cả các xe. Để có cơ sở so sánh, quá trình thực nghiệm sẽ thử tiến hành thay đổi vị trí của xe tự hành tại vị trí mới là (45,45), quan sát quá trình thì nhận thấy xe tự hành di chuyển qua giao lộ sau xe số 1 và số 2, nhưng trước xe số 3 và vận tốc của xe số 3 giảm khi vào giao lộ để nhường đường cho xe tự hành di chuyển qua.

3.3 Kết luận chương 3

Nội dung trong chương này, đã trình bày từ cơ sở lý luận với những lý thuyết cơ bản để xây dựng nên giải pháp lập kế hoạch chuyển động với những ràng buộc là các luật giao thông đường bộ hiện hành và đưa ra tình huống để xây dựng mô-đun hỗ trợ ra quyết định dựa trên vấn đề đạo đức của người lái xe trong tình huống khẩn cấp.

Trong mô-đun hỗ trợ ra quyết định thì các yếu tố thể hiện đạo đức và pháp lý đã được xét đến về mặt định lượng khi xây dựng mô-đun và áp dụng phương pháp phân tích thành phần chính (PCA) để xác định các yếu tố ảnh hưởng chính làm biến đầu vào và việc ra quyết định điều khiển được phát triển để hoàn thành nhiệm vụ trong kế hoạch chuyển động gồm: Phanh và đi thẳng, Phanh và rẽ Trái, Phanh và rẽ Phải được tính là biến đầu ra cho mô-đun này. Quá trình ra quyết định điều hướng này được thực hiện bằng mô hình kết hợp giữa hệ thống mờ và mạng nơron nhân tạo, đây cũng là yếu tố thành lập nên mô-đun ra quyết định điều khiển.

Trong mô-đun lập kế hoạch chuyển động với những ràng buộc là các luật giao thông đường bộ, thì đặc điểm chính của giải pháp này là tạo ra quỹ đạo tối ưu với phương pháp tiếp cận điều khiển dự báo dựa trên mô hình và tập ràng buộc được xây dựng từ các luật giao thông đường bộ. Cách tiếp cận này phù hợp với các điều kiện phức tạp của môi trường vì các ràng buộc này có thể phát sinh từ các khía cạnh khác nhau của việc lập kế hoạch chuyển động phải tuân thủ theo các quy tắc giao thông.

CHƯƠNG 4

GIẢI PHÁP ĐỀ XUẤT HỖ TRỢ ĐIỀU KHIỂN AN TOÀN XE TỰ HÀNH

Nội dung chương này sẽ trình bày giải pháp xây dựng mô-đun hỗ trợ điều khiển, với mục đích tạo ra những chuyển động an toàn cho xe tự hành, đáp ứng được các điều kiện giao thông với các tình huống đa dạng ở môi trường phức tạp.

Xây dựng mô-đun hỗ trợ điều khiển an toàn xe tự hành, với 3 mô-đun sau:

- Mô-đun hỗ trợ điều khiển chuyển động để giải quyết bài toán tạo ra quỹ đạo chuyển động an toàn cho xe tự hành, khi gặp các tình huống đa dạng và phức tạp trong điều kiện môi trường giao thông.

- Mô-đun điều khiển theo dõi chuyển động sẽ giải quyết bài toán kiểm soát điều hướng với mong muốn quá trình chuyển động của xe được chính xác và ổn định.

- Mô-đun lập kế hoạch chuyển động dự phòng để giải quyết các tình huống đảm bảo an toàn cho xe khi tham gia giao thông với vận tốc lớn, thời gian xử lý còn lại quá ngắn để thực hiện thao tác phanh khẩn cấp nhằm tránh các chướng ngại vật.

4.1 Cơ sở lý luận để xây dựng mô-đun

Để có cơ sở xây dựng các mô-đun hỗ trợ điều khiển nhằm nâng cao tính năng an toàn cho xe tự hành như bài toán ban đầu đã đặt ra trong luận án này, chúng ta cần phải xây dựng các mô hình tuyến tính trong cấu trúc xe tự hành như sau.

Xây dựng mô hình tuyến tính thì phương pháp tuyến tính phổ biến nhất là giả định góc nhỏ (khi $\delta < 5^0$ và $\cos(\delta) \approx 1$), khi đó mô hình động học phi tuyến của xe có thể viết lại như sau:

$$\dot{\beta} \approx \frac{F_{yf} + F_{yr}}{mU_x} - r \quad (4.1)$$

$$\dot{r} \approx \frac{aF_{yf} - bF_{yr}}{I_{zz}} \quad (4.2)$$

Tuy nhiên, trong trường hợp khi xe chuyển động theo hướng có độ cong lớn, thì góc lái có thể rất lớn và như vậy việc giả định góc lái nhỏ là không hợp lệ, đồng thời mô hình được biểu diễn bởi (4.1) và (4.2) sẽ không mô phỏng được phản ứng của xe ở những điều kiện vận hành hoạt động của xe.

Xem xét các giả định sau:

Giả định 1: Giả sử gia tăng góc lái được cố định ở tất cả các bước trên mỗi khoảng cách dự báo và không phụ thuộc vào chuỗi điều khiển $u(\cdot)$, nghĩa là:

$$\Delta \delta_a(k+i) = \Delta \delta_{N_p} \text{ với } i = 0, \dots, N_p - 1 \quad (4.3)$$

Trong đó, $\Delta \delta_a(k+i)$ là mức tăng góc lái ở bước thứ $i+1$ và $\Delta \delta_{N_p}$ là mức tăng cố định tương ứng và sẽ được xác định sau.

Giả định 2: Giả sử phương tiện sẽ di chuyển đến điểm mong muốn ở bước N_p của khoảng cách dự báo và sau đó sẽ hoạt động trên quỹ đạo mà không bị lệch. Vì vậy, hoạt động của xe ở bước N_p được giả sử ở trạng thái ổn định.

Theo các giả định ở trên thì giả thiết gia tăng góc lái có thể được tính như sau:

$$\Delta \delta_a(k+i) = \frac{\delta(k) - \delta_a(k+N_p-1)}{N_p} \text{ với } i = 0, \dots, N_p - 1 \quad (4.10)$$

Như vậy, có thể thấy rằng khi khả năng vận tốc của xe thay đổi thì mức tăng góc lái được xác định như sau:

$$\Delta \delta_{N_p} = \begin{cases} \Delta \delta_a & \text{nếu } |\Delta \delta_a| \leq \Delta \delta_{max} \\ \text{sign}(\Delta \delta) \cdot \Delta \delta_{max} & \end{cases} \quad (4.11)$$

và góc lái giả định ở mỗi khoảng cách dự báo là:

$$\delta_a(k+i) = \delta(k) + i \cdot \Delta \delta_{N_p} \quad (4.12)$$

với $i = 0, \dots, N_p - 1$

Kết hợp (4.12) với (1.1) và (1.2) sẽ có một phiên bản tuyến tính mới cho mô hình xe phi tuyến như sau:

$$\dot{\beta}(k+i) = \frac{F_{yf}(k+i) \cos(\delta_a(k+i)) + F_{yr}(k+i)}{mU_x} - r(k+i) \quad (4.13)$$

$$\dot{r}(k+i) = \frac{aF_{yf}(k+i) \cdot \cos(\delta_a(k+i)) - bF_{yr}(k+i)}{I_{zz}} \quad (4.14)$$

với $i = 0, \dots, N_p - 1$

Như vậy, các phương trình tuyến tính kết quả cho phương trình chuyển động được mô tả như sau:

$$\dot{\beta}(k+i) = \frac{F_{yf}(k+i) \cos(\delta_a(k+i)) + \left[\bar{F}_r - \bar{C}_r(\beta(k+i) - \frac{b.r(k+i)}{U_x} - \bar{\alpha}_r) \right]}{mU_x} - r(k+i) \quad (4.17)$$

$$\dot{r}(k+i) = \frac{aF_{yf}(k+i) \cdot \cos(\delta_a(k+i)) - b \left[\bar{F}_r - \bar{C}_r(\beta(k+i) - \frac{b.r(k+i)}{U_x} - \bar{\alpha}_r) \right]}{I_{zz}} \quad (4.18)$$

với $i = 0, \dots, N_p - 1$

Trong mô hình chuyển động, việc tạo các xấp xỉ góc nhỏ cho β và $\Delta\psi$, như sau:

$$\Delta\psi(k+i) = r(k+i) - U_x \kappa(k+i) \quad (4.19)$$

$$\dot{e}(k+i) = U_x(\beta(k+i) + \Delta\psi(k+i)) \quad (4.20)$$

$$\dot{s}(k+i) = U_x \quad (4.21)$$

với $i = 0, \dots, N_p - 1$

Do giả định tốc độ không thay đổi trên khoảng dự báo, thì khoảng cách dọc theo quỹ đạo có thể đưa một tiên nghiệm như sau:

$$s(k+i) = s(k) + \sum_{j=0}^i U_x \quad \text{với } i = 0, \dots, N_p \quad (4.22)$$

4.2 Xây dựng mô-đun điều khiển theo dõi chuyển động

4.2.1 Phát biểu bài toán

Mô-đun điều khiển theo dõi chuyển động được xây dựng với mục tiêu kiểm soát điều hướng, mong muốn quá trình chuyển động của xe tự hành được chính xác và ổn định, cũng đóng một vai trò quan trọng trong nhiệm vụ điều khiển hoạt động chuyển động của xe, đặc biệt khi xe hoạt động ở tốc độ cao. Cụ thể cho giải pháp thiết kế mô-đun điều khiển theo dõi chuyển động này là thực hiện việc kết hợp các yếu tố không chắc chắn biến đổi theo thời gian đến các dự báo chướng ngại vật di động vào trong bài toán tối ưu hóa, đồng thời đưa ra các ràng buộc cho giới hạn đường biên và chướng ngại vật di động mà vẫn duy trì được kế hoạch chuyển động của xe trong một khoảng thời gian giới hạn.

4.2.2 Giải pháp đề xuất

Bài toán được đưa ra cho mô-đun này là sử dụng độ lệch hướng chuyển động ban đầu $\Delta\psi$ như là một trạng thái tham chiếu điều khiển không làm tăng công suất của xe đến mức cực đại. Độ lệch hướng $\Delta\varphi$ là góc giữa vector vận tốc xe và hướng chuyển động, biểu thị độ lệch thực hướng chuyển động của xe và cũng chỉ hướng của độ lệch ngang xe, khi độ trượt bên β nhỏ và $\Delta\psi$ gần với giá trị $\Delta\varphi$, thì bộ điều khiển dựa trên $\Delta\psi$ có thể giữ độ lệch theo dõi trong phạm vi nhỏ. Tuy nhiên, khi sự khác biệt giữa $\Delta\psi$ và $\Delta\varphi$ lớn, đặc biệt gần với giới hạn xử lý mà góc trượt bánh xe sau cao và tỷ lệ chênh lệch cao thì dẫn đến giá trị trượt bên β cao. Bộ điều khiển dựa trên $\Delta\psi$ sẽ không giảm thiểu độ lệch theo dõi, điều này đặc biệt quan trọng đối với khi xe di chuyển qua góc cua có giới hạn về mặt vật lý của ma sát bánh xe, trong đó độ dốc β của xe có thể đạt tới 5° và không thể bỏ qua ở mức độ này.

Bằng việc sử dụng phương pháp rời rạc giữ mẫu bậc 0, chúng ta có thể lấy mô hình xe rời rạc từ phương trình (4.17)-(4.22), như sau:

$$x(k+1) = A_c x(k) + B_{F_{yf}} F_{yf}(k) + B_\kappa(k) + d_{\bar{\alpha}_r} \quad (4.24)$$

Trong đó: $x = [\beta \quad r \quad \Delta\psi \quad e]^T$ là vector trạng thái, và

$$A_c = \begin{bmatrix} \frac{-2\bar{C}_r}{mU_x} & \frac{2\bar{C}_r b}{mU_x^2} - 1 & 0 & 0 \\ \frac{2\bar{C}_r b}{I_{zz}} & -\frac{2\bar{C}_r b^2}{I_{zz}} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ U_x & 0 & U_x & 0 \end{bmatrix}, B_{F_{yf}} = \begin{bmatrix} \frac{2\cos(\delta+i)}{mU_x} \\ \frac{2a\cos(\delta+i)}{I_{zz}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B_\kappa = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -U_x \\ 0 \end{bmatrix}, d_{\bar{\alpha}_r} = \begin{bmatrix} \frac{2(\bar{F}_r + \bar{C}_r \bar{\alpha}_r)}{mU_x} \\ -\frac{2b(\bar{F}_r + \bar{C}_r \bar{\alpha}_r)}{I_{zz}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Trong quá trình xây dựng mô hình, việc thiết kế các ràng buộc an toàn được xác định bởi giới hạn của 2 chỉ số quan trọng về độ ổn định của xe. Theo các giả định đối với vấn đề khi di chuyển vào góc cua ở trạng thái ổn định và mô hình bánh xe đã cho, các giới hạn của β và r phản ánh khả năng cực đại của bánh xe.

Như vậy, bài toán tối ưu có thể được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta F_{yf}, \varepsilon_v} J_{N_p} &= \sum_{i=1}^{N_p} (\eta(k+i))^T Q \eta(k+i) + \sum_{i=1}^{N_c} R \left(\Delta F_{yf}(k+i) \right)^2 + W \varepsilon_v \\ &= \sum_{i=1}^{N_p} \xi(k+i)^T C^T Q C \xi(k+i) + \sum_{i=1}^{N_c} R \left(\Delta F_{yf}(k+i) \right)^2 + W \varepsilon_v \end{aligned} \quad (4.32)$$

Thỏa mãn điều kiện:

$$\begin{aligned} H_v \xi(k+i) &\leq G_v + \varepsilon_v \quad \text{với } \forall i \\ |\Delta F_{yf}(k+i)| &\leq \Delta F_{yf, \max} \quad \text{với } i = 0, \dots, N_c - 1 \\ \Delta F_{yf}(k+i) &= 0 \quad \text{với } i = N_c, N_c + 1, \dots, N_p - 1 \\ |F_{yf}(k+i)| &\leq F_{yf, \max} \quad \text{với } i = 0, \dots, N_c - 1 \end{aligned}$$

Trong đó $\Delta F_{yf} = [\Delta F_{yf}(k), \Delta F_{yf}(k+1), \dots, \Delta F_{yf}(k+N_c-1)]^T$ là chuỗi các mức tăng đều vào trong tương lai và Q, R và W là ma trận trọng số có kích thước phù hợp. $\Delta F_{yf, \max}$ và $F_{yf, \max}$ là khả năng thay đổi tốc độ và lực ngang xe cực đại.

Do $|H_v \xi(k)| \leq G_v$ dựa trên các giả định trạng thái ổn định, là trạng thái phương tiện có thể vượt qua giới hạn và vẫn quay trở lại trong phạm vi giới hạn sau một khoảng hoạt động ngắn. Để đảm bảo bài toán tối ưu luôn khả thi thì cần sử dụng thêm biến bù không âm ε_v , lúc này vector nghiệm của bài toán tối ưu trong (4.32) được mở rộng như sau:

$$\Delta U^* = [\Delta F_{yf}^*, \varepsilon_v^*]^T \quad (4.33)$$

Tối ưu đầu vào của lực ngang phía trước có đạt được hay không thì phụ thuộc vào yếu tố đầu tiên của chuỗi giải pháp tối ưu sau:

$$F_{yf}^* = F_{yf}(k-1) + \Delta F_{yf}^*(k) \quad (4.34)$$

Ngoài ra, góc lái δ sẽ được áp dụng cho xe, bằng cách ánh xạ $F_{yf}^*(k)$ vào phương trình $\delta = \beta + \frac{ar}{U_x} - f_{wheel}^{-1}(F_{yf})$

4.2.3 Mô phỏng thực nghiệm mô-đun theo dõi chuyển động

Quá trình mô phỏng thực nghiệm được tiến hành với 2 kịch bản trên 2 mô hình đường đi khác nhau (Hình 4.2a và 4.2b) có thiết kế các độ cong góc khác nhau, cấu trúc đường đi được phân thành 3 đoạn, điểm giữa của mỗi đoạn được xác định dùng để đánh giá so sánh.

Quá trình mô phỏng được tiến hành tiếp tục với 3 bộ điều khiển chuyển động bằng mô hình dự báo khác nhau, gồm: Bộ điều khiển tuyến tính, bộ điều khiển nguyên thủy và bộ điều khiển đề xuất. Trong đó, bộ điều khiển tuyến tính sử dụng góc lái làm đầu vào điều khiển, đồng thời sử dụng mô hình xe và bánh xe tuyến tính. Bộ điều khiển nguyên thủy sử dụng mô hình động xe và bánh xe phi tuyến như đã trình bày. Điểm khác biệt nữa là bộ điều khiển dùng làm tham chiếu sử dụng độ lệch ban đầu $\Delta\psi$ và độ lệch ngang e làm trạng thái tham chiếu, đồng thời bộ điều khiển dọc xe và giới hạn ổn định xe được sử dụng cho tất cả các trường hợp.

Kết quả mô phỏng cho thấy độ lệch ngang tuyệt đối $|\bar{e}|$, độ lệch chuẩn $\sigma(|e|)$ và giá trị cực đại của độ lệch ngang tuyệt đối $\max(|e|)$ của bộ điều khiển tuyến tính cao hơn nhiều so

với 2 bộ điều khiển còn lại. Ngoài ra, kết quả mô phỏng cho thấy góc lái của bộ điều khiển tuyến tính tiếp tục tăng cho đến khi đạt mức cực đại, cũng như độ lệch ngang xe vẫn tiếp tục tăng, nguyên nhân của hiện tượng này là do mô hình tuyến tính không dự báo được lực ngang bánh xe khi bánh xe đạt đến vùng phi tuyến tính. Mặt khác, các bộ điều khiển với mô hình động học đề xuất có thể duy trì độ lệch ngang trong một phạm vi nhỏ, điều này cho thấy phương pháp tuyến tính đã đề xuất trong mô-đun này có thể giữ đúng các đặc tính phi tuyến của xe ngay cả trong điều kiện tốc độ cao.

Phân hiệu suất của bộ điều khiển nguyên thủy và bộ điều khiển đề xuất khá gần nhau. Tuy nhiên, giá trị $|\bar{e}|$ và $\sigma(|e|)$ của bộ điều khiển đề xuất thấp hơn, nhưng giá trị $\max(|e|)$ lại gần như nhau. Như vậy, tại một thời điểm thì lực ngang phía trước cần thiết để giảm độ lệch tối thiểu đã vượt qua lực ma sát có thể sử dụng và sẽ không có vấn đề khác khi bộ điều khiển chuyển động có thể làm để đưa hoạt động của xe trở lại quỹ đạo chuyển động mong muốn với gia tốc ngang lớn.

Cuối cùng, với phương pháp so sánh bộ điều khiển tuyến tính, các kết quả mô phỏng đã chứng minh bộ điều khiển với mô hình tuyến tính trong mô-đun này có thể duy trì độ lệch trong phạm vi nhỏ, ngay cả dưới điều kiện gia tốc ngang lớn. Kết quả phân tích chỉ ra rằng bộ điều khiển chuyển động với độ lệch hướng trực tiếp làm giảm mức trung bình của độ lệch ngang tuyệt đối so với bộ điều khiển với độ lệch ban đầu, điều này chứng tỏ bộ điều khiển theo dõi chuyển động đề xuất có thể đảm bảo theo dõi chính xác và tính ổn định của xe dưới điều kiện tốc độ cao có thể áp dụng vào bài toán chuyển động của xe tự hành.

4.3 Xây dựng mô-đun hỗ trợ điều khiển chuyển động

4.3.1 Phát biểu bài toán

Nhằm đáp ứng tiêu chuẩn an toàn khi tham gia giao thông trong môi trường phức tạp, công cụ hỗ trợ điều khiển đang là vấn đề cần được quan tâm nhằm tạo ra những chuyển động an toàn cho xe tự hành. Mô-đun hỗ trợ điều khiển chuyển động được xây dựng nhằm tạo ra quỹ đạo chuyển động an toàn cho xe, việc thiết kế mô-đun hỗ trợ điều khiển này có 02 mục tiêu chính: thứ nhất là can thiệp tối thiểu - nghĩa là chỉ áp dụng kiểm soát tự trị khi cần thiết, thứ hai là đảm bảo an toàn - nghĩa là trạng thái không va chạm của xe được thực thi rõ ràng thông qua các ràng buộc tối ưu.

4.3.2 Giải pháp đề xuất

Bài toán cho mô-đun này được xây dựng dựa trên 02 nguyên tắc cơ bản: thứ nhất là can thiệp tối thiểu, thứ hai là đảm bảo tính an toàn nghĩa là xác suất va chạm liên quan đến môi trường xung quanh và những đối tượng tham gia giao thông khác phải nằm dưới ngưỡng nhất định. Và bài toán này được thực hiện trong các khoảng thời gian rời rạc $k \triangleq t_k$, với $t_k = t_0 + \sum_{i=1}^k \Delta t_i$ (t_0 là thời gian hiện tại, Δt_i là bước thời gian thứ i của kế hoạch).

Tại mỗi trạng thái nhất định, mỗi đối tượng tham gia giao thông sẽ chiếm một khoảng không gian $\mathcal{B}^i(z_k^i, \sigma_k^i, p_\epsilon) \subset \mathbb{R}^2$ có xác suất lớn hơn p_ϵ (p_ϵ là xác suất va chạm có thể xảy ra được chấp nhận), mô hình của đối tượng và khoảng không gian chiếm giữ này được thể hiện ở hình 4.4.

Giải pháp trong mô-đun này đưa ra là xây dựng một tối ưu hóa có ràng buộc về thời gian rời rạc chung ở m bước thời gian, với khoảng giới hạn thời gian $\tau = \sum_{k=1}^m \Delta t_k$, trong đó tập $z_{0:m} = [z_0, \dots, z_m] \in \mathbb{Z}^{m+1}$ là tập các trạng thái và tập đầu vào $u_{0:m-1} = [u_0, \dots, u_{m-1}] \in \mathcal{U}^m$.

Như vậy, mục tiêu của giải pháp là tính toán các giá trị đầu vào tối ưu $u_{0:m-1}^*$ cho xe tự hành với việc cực tiểu hàm chi phí $\hat{J}_h(u_{0:m-1}, u_0^h) + \hat{J}_t(z_{0:m}, u_{0:m-1})$.

Vấn đề tối ưu này tuân theo một tập các ràng buộc: thứ nhất là sử dụng mô hình chuyển tiếp của xe, thứ hai là ràng buộc không va chạm với các chướng ngại vật tĩnh và thứ ba là xác suất không xảy ra va chạm p_ϵ với các đối tượng tham gia giao thông.

Quỹ đạo tối ưu của xe được đưa ra như sau:

$$u_{0:m-1}^* = \arg \min_{u_{0:m-1}} \hat{J}_h(u_{0:m-1}, u_0^h) + \hat{J}_t(z_{0:m}, u_{0:m-1}) \quad (4.37)$$

Trong đó: $z_{k+1} = f(z_k, u_k)$; $\mathcal{B}(z_k) \cap \mathcal{O} = \emptyset$;

$\mathcal{B}(z_k) \cap \bigcup_{i \in \{1, \dots, n\}} \mathcal{B}^i(z_k^i, \sigma_k^i, p_\epsilon) = \emptyset$; $\forall k \in \{0, \dots, m\}$

$z_{0:m}^i, \delta_{0:m}^i$ với $i = 1, \dots, m$: là các tham số cho tất cả những đối tượng tham gia giao thông khác, z_0 là trạng thái ban đầu của xe.

Trong quá trình lập kế hoạch chuyển động, nếu đường dẫn thực tế lệch khỏi đường dẫn tham chiếu, thì lỗi độ trễ từ điểm xấp xỉ đầu tiên theo tiến trình thời gian đến điểm kế tiếp và lỗi vị trí được tham chiếu đến các đường ngang θ_k dọc theo đường tiếp tuyến t_k được xác định như sau:

$$e^{-l}(z_k, \theta_k) = \frac{t_k^T}{\|t_k\|} \begin{bmatrix} x_k - x^P(\theta_k) \\ y_k - y^P(\theta_k) \end{bmatrix} = -\cos\theta^P(\theta_k)(x_k - x^P(\theta_k)) - \sin\theta^P(\theta_k)(y_k - y^P(\theta_k)) \quad (4.42)$$

Lỗi chu tuyến được xác định bằng độ lệch của vị trí thực tế so với vị trí dự báo khi chiếu lên đường dẫn chuẩn như sau:

$$e^{-c}(z_k, \theta_k) = \frac{n_k^T}{\|n_k\|} \begin{bmatrix} x_k - x^P(\theta_k) \\ y_k - y^P(\theta_k) \end{bmatrix} = \sin\theta^P(\theta_k)(x_k - x^P(\theta_k)) - \cos\theta^P(\theta_k)(y_k - y^P(\theta_k)) \quad (4.43)$$

và lỗi chu tuyến là một tiêu chuẩn để thiết lập kế hoạch chuyển động tốt khi xe chuyển động không lệch khỏi đường dẫn tham chiếu nhất định. Do đó, hàm chi phí của điều khiển trạng thái dự báo được xây dựng dựa trên việc cân bằng giữa các yếu tố lỗi chu tuyến $e^{-c}(z_k, \theta_k)$, lỗi độ trễ $e^{-l}(z_k, \theta_k)$ và quá trình xây dựng đường xấp xỉ v_k để đạt được sự kết hợp tốt nhất, như sau:

$$J_{av}(z_k, \theta_k) = e_k^T Q e_k - v_k \quad (4.44)$$

với vector lỗi đường dẫn được hình thành từ lỗi độ trễ và lỗi chu tuyến như sau:

$$e_k = \begin{bmatrix} e^{-l}(z_k, \theta_k) \\ e^{-c}(z_k, \theta_k) \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

Do việc định hướng của xe đối với đường dẫn chỉ tương đối, nên cần phải đưa ra ràng buộc giữa hướng di chuyển của xe ϕ_k và hướng của đường dẫn $\theta^P(\theta_k)$, như sau:

$$\|\phi_k - \theta^P(\theta_k)\| \leq \Delta\theta_{max} \quad (4.47)$$

Trong trường hợp tổng quát, mô hình được đưa ra cho việc phát sinh các vị trí bất định của xe với độ bất định $\sigma_k = [\sigma_k^a, \sigma_k^b]^T$ tại thời điểm k và $\sigma = [\sigma^a, \sigma^b]^T$ là độ bất định phát sinh. Vì vậy, các giá trị phương sai được xác định xấp xỉ gần đúng để điều chỉnh hướng di chuyển của xe thẳng với trục chính của hình elip bao quanh. Việc phát sinh các vị trí bất định trong hướng ngang xe được giới hạn bởi một giá trị cực đại để xem xét tính hợp lý lưu lượng cực đại của các phương tiện đang lưu thông trên các làn đường hiện tại.

Như mục tiêu đặt ra ban đầu của giải pháp trong mô-đun này là can thiệp tối thiểu vào thao tác lái, nghĩa là hệ thống điều khiển chỉ can thiệp vào thao tác lái khi thực sự cần thiết với thời hạn can thiệp tối thiểu là:

$$J_h(z_k, u_k, u_0^h) = \begin{bmatrix} u_k^a - a_0^h \\ \delta - \delta_0^h \end{bmatrix}^T K \begin{bmatrix} u_k^a - a_0^h \\ \delta - \delta_0^h \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

với $u_0^h = [\delta_0^h, a_0^h]^T$ là giá trị sai lệch không thống nhất của trạng thái hệ thống, δ^h là giá trị về góc lái và a^h là giá trị gia tốc tại thời điểm t_k .

Cuối cùng, giải pháp đưa ra là vấn đề tối ưu hóa, vấn đề tối ưu hóa được thực hiện bằng yếu tố cực tiểu kết hợp tuyến tính giữa chi phí can thiệp vào hệ thống và chi phí quỹ đạo, như sau:

$$J_{av}(z_k, u_k, \theta_k, u_0^h) = \beta\omega(t_k)J_h(z_k, u_k, u_0^h) + (1 - \omega(t_k))J_t(z_k, u_k, \theta_k) \quad (4.54)$$

Trong đó, trọng số β và hàm phân rã theo dạng hàm mũ $\omega(t_k) = \exp(-\alpha t_k)$ được dùng để tăng cường giá trị đầu vào cho hệ thống. Với mục đích làm cho hệ thống có khả năng đáp ứng tốt với các đầu vào những vẫn phụ thuộc J_t để dịch chuyển về tương lai trong mô hình dự báo, luận án này đã lựa chọn giải pháp để làm như thế nào cho trọng số β đạt giá trị cao

và tại thời điểm 0.5s của bước thời gian thì $\omega(0.5s) = 0.1$. Với cách thực hiện như thế thì giải pháp đưa ra trong mô-đun này có thể lập kế hoạch thực hiện đầy đủ mà không cần phải dự báo quỹ đạo chuyển động theo kế hoạch. Như vậy, bài toán tối ưu phi tuyến với các ràng buộc về trạng thái, động lực học, đường dẫn và các chướng ngại vật được xây dựng như sau:

$$u_{0:m-1}^* = \arg \min_{u_{0:m-1}} \sum_{k=1}^m J_{av}(z_k, u_k, \theta_k, u_0^h) \Delta t_k \quad (4.55)$$

trong đó: $z_{k+1} = f(z_k, u_k)$; $\theta_{k+1} = \theta_k + v_k \Delta t_k$; $z_k \in [z_{min}, z_{max}]$; $u_k \in [u_{min}, u_{max}]$; $\|\dot{\phi}_k\| < \dot{\phi}_{max}$; $\|\phi_k - \phi^P(\theta_k)\| < \Delta\phi_{max}$; $d(z_k, \theta_k) \in [b_l(\theta_k) + \omega_{max}, b_r(\theta_k) - \omega_{max}]$; $c_k^{obs,i}(z_k) > 1$, $i = \{1, \dots, n\}$; $\forall k \in \{0, \dots, m\}$

4.3.3 Mô phỏng thực nghiệm mô-đun hỗ trợ điều khiển chuyển động

Thực nghiệm đối với mô-đun hỗ trợ điều khiển chuyển động được tiến hành với các kịch bản khác nhau và xe tự hành được điều khiển chuyển động với góc lái δ_0^h và gia tốc a_0^h mong muốn. Các biến đầu vào sẽ được xử lý bằng phương pháp điều khiển dự báo nhằm đảm bảo tạo ra quá trình chuyển động an toàn, đường dẫn tham chiếu và đường biên ranh giới bên trái b_l , bên phải b_r được thiết kế và xác định phù hợp với hệ thống đường giao thông.

Kịch bản 1: Trong kịch bản này xe tự hành sẽ chuyển động vào 1 góc cua.

Kịch bản 2: Trong kịch bản này, xe tự hành sẽ thực hiện kế hoạch chuyển động từ đường nhánh và rẽ trái để vào làn đường giao thông chính.

Trong quá trình thực nghiệm, chúng ta có thể thấy rằng yếu tố không chắc chắn trong dự báo của các phương tiện tham gia giao thông khác là điều rất quan trọng, vì các trạng thái tương lai của mô hình dự báo có thể đi lệch khỏi điểm dự báo mong muốn. Trong trường hợp bỏ qua các yếu tố không chắc chắn, thì quá trình lập kế hoạch chuyển động cần phải đưa ra những ràng buộc chính xác và cụ thể hơn nhằm đảm bảo yếu tố an toàn cho quá trình chuyển động của xe.

4.4 Xây dựng mô-đun lập kế hoạch chuyển động dự phòng

4.4.1 Phát biểu bài toán

Bài toán lập kế hoạch chuyển động dự phòng được xây dựng nhằm đáp ứng an toàn trong mọi tình huống tham gia giao thông. Đối với bài toán này thì quỹ đạo chuyển động của các đối tượng tham gia giao thông khác cần phải biết trước, từ đó xây dựng đường đi tối ưu dựa trên các đánh giá khả năng di chuyển của các đối tượng tham gia giao thông khác trong một khoảng thời gian nhất định, sau đó với mỗi quỹ đạo di chuyển sẽ tính toán các thao tác khẩn cấp thích ứng. Bài toán này vẫn gặp những thách thức khó khăn khi giải quyết như: Sự hiện diện của những chướng ngại vật di động, tác dụng kết hợp giữa động lực bên trong và cấu tạo của xe, chu kỳ lập kế hoạch và thời gian phản hồi không phù hợp.

Để giải quyết bài toán cho mô-đun lập kế hoạch chuyển động dự phòng, luận án sẽ thực hiện tiếp cận giải pháp điều khiển dự báo dựa trên mô hình kết hợp với các mô hình về động học của xe để xây dựng mô-đun.

4.4.2 Giải pháp đề xuất

Mô-đun lập kế hoạch chuyển động dự phòng nhằm đảm bảo an toàn cho xe tự hành bằng cách xây dựng một đường đi tối ưu dựa trên các đánh giá khả năng di chuyển của các đối tượng tham gia giao thông khác trong một khoảng thời gian nhất định, sau đó với mỗi quỹ đạo di chuyển sẽ tính toán các thao tác khẩn cấp thích ứng.

Phần đầu tiên của mô hình dự báo được đề xuất như sau:

$$\dot{S}_x = v \cos \theta \quad (4.56)$$

$$\dot{S}_y = v \sin \theta \quad (4.57)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v}{l \left[1 + \left[\frac{v}{v_{ch}} \right]^2 \right]} \delta \quad (4.58)$$

$$\dot{\delta} = u_1 \quad (4.59)$$

$$\dot{v} = u_2 \quad (4.60)$$

Trong đó: ký hiệu \dot{x} là đại diện cho đạo hàm đầu tiên của x ; S_x, S_y và v là vị trí tham chiếu của xe và vận tốc tương ứng; θ biểu thị hướng di chuyển của xe; δ là góc đảo lái của bánh xe; vận tốc và đạo hàm theo thời gian của vận tốc xe đóng vai trò là đầu vào u_1 và u_2 của hệ thống.

Mô hình này có những ưu điểm như sau: không có điểm kỳ dị tại $v = 0$ và cho phép phanh dừng xe hoàn toàn, đồng thời hệ thống động học không cứng nên các bước thời gian mô phỏng của bộ giải mã có kích thước khá lớn, do đó tốc độ tối ưu của mô hình tăng lên.

Để tính toán những hạn chế của lực kéo bánh xe, hệ thống dẫn động của xe cũng như quy định hướng đi khi vượt chướng ngại vật, thì một số ràng buộc cần đặt ra khi xây dựng quỹ đạo. Các ràng buộc được thiết lập về trạng thái và đầu vào phải được thỏa mãn các điều kiện sau: $v \in [0, v_{max}]$, $u_2 \in [a_{min}, a_{max}]$, $u_1 \in [\delta_{min}, \delta_{max}]$, $\delta \in [\delta_{min}, \delta_{max}]$, $d_r \in [d_{r,min}, d_{r,max}]$ và $(S_y, S_x) \in \text{lanes}$

Tuy nhiên, thay vì giải quyết bài toán hội tụ tối ưu về bên trái hoặc bên phải của chướng ngại vật, thì trong trường hợp này cần đưa ra các ràng buộc và quy định là những hạn chế nằm phía trước của xe. Do đó, cần đưa ra thêm biến $\xi_m(r)$, $m \in 1 \dots M$ được sử dụng để biểu thị vector có hướng từ tâm của các chướng ngại vật đến vị trí của xe. Ngoài ra, cần phải xác định thời gian dự báo $r \in T_{hor}$

$$t_{d_{min,m}} := \underset{t}{\operatorname{argmin}} d_m(r) \quad (4.72)$$

Tại thời điểm này, khoảng cách từ chướng ngại vật m đến xe có giá trị nhỏ nhất $d_m(r)$ với $n(r)$ là vector pháp tuyến đến quỹ đạo chuyển động $[S_x(r), S_y(r)]^T$.

Như vậy, việc xây dựng công thức cho trường hợp vượt chướng ngại vật bằng cách sử dụng tích vô hướng như sau: thao tác di chuyển bên trái (hay bên phải) chướng ngại vật phụ thuộc vào giá trị $t_{d_{min,m}}$ nếu $\xi_m^T(r) > 0$ sẽ vượt trái hoặc $\xi_m^T(r) < 0$ sẽ vượt phải. Việc xây dựng các ràng buộc này sẽ cung cấp những thao tác tránh chướng ngại vật được thực hiện hiệu quả và chính xác, kể cả trường hợp xe phải dừng lại bởi các chướng ngại vật phía trước.

Để đạt được quỹ đạo chuyển động tối ưu thì việc cần thiết là xử lý hàm chi phí đạt giá trị cực tiểu và đồng thời các ràng buộc cần được tách biệt nhau. Đối với các thao tác trong xử lý tình huống khẩn cấp của xe tự hành, thì ý tưởng xử lý là giảm vận tốc chuyển động của xe về giá trị tối thiểu

Như vậy, hàm chi phí J sẽ được xây dựng bằng việc kết hợp 2 thành phần là chi phí chuyển động và chi phí liên quan đến chướng ngại vật như sau:

$$J(x, u_1) = J_{mov}(x, u_1) + J_{objs}(x) \quad (4.75)$$

Đối với chi phí chuyển động sẽ được tính như sau:

$$J_{mov}(x, u_1) = \int_t^{t+T_{hor}} \left\{ u_1^2 + \sum_{i \in \{v, a, j, \theta, k\}} k_i \Delta_i^2(x, u_1) \right\} dr \quad (4.76)$$

Ý tưởng chính khi xây dựng kế hoạch chuyển động dự phòng gồm có 3 giai đoạn:

Giai đoạn 1: Tính toán khả năng hoạt động của các đối tượng xung quanh để xây dựng quỹ đạo chuyển động ban đầu.

Giai đoạn 2: Nhằm đảm bảo an toàn khi di chuyển trên quỹ đạo chuyển động ban đầu, tất cả các quỹ đạo có thể có của các phương tiện phía trước xe phải được xem xét [54]. Do đó, với một khoảng thời gian nhất định với bất kỳ quỹ đạo của phương tiện phía trước là như thế nào, thì hệ thống vận hành của xe tự hành đều có thể thực hiện một thao tác khẩn cấp để xe dừng lại một cách an toàn và hệ thống xử lý chuyển tiếp qua giai đoạn 3.

Giai đoạn 3: Thực hiện đánh giá các tiêu chuẩn nhằm đảm bảo an toàn (khoảng cách đến phương tiện phía trước, khoảng không gian tạo bởi tập quỹ đạo của phương tiện phía trước), sau đó hệ thống xử lý sẽ đưa ra đánh giá có nên thực hiện quỹ đạo dự phòng để đảm bảo an toàn hay không hoặc vẫn tiếp tục hoạt động theo quỹ đạo tối ưu ban đầu (Hình 4.11).

Để tính toán quỹ đạo có khả năng xảy ra nhất, việc so sánh đường đi hiện tại và vị trí trung tâm của làn đường cần phải thực hiện để đưa ra dự báo quỹ đạo có khả năng xảy ra nhất cho mỗi thời điểm t_i trong khoảng thời gian T_{h1} . Ngoài ra, tại mỗi thời điểm t_i sẽ có một vùng polygon được tạo bởi các quỹ đạo làm đại diện cho mỗi phương tiện phía trước sẽ được tính toán và các vùng dự đoán này được sử dụng như những ràng buộc trong việc tạo ra quỹ đạo di chuyển của xe tự hành.

Trong khoảng thời gian T_{h1} , sau khi các quỹ đạo di chuyển có thể xảy ra của các phương tiện phía trước được xác định, việc lựa chọn để tạo ra quỹ đạo tối ưu sẽ được thực hiện và quỹ đạo này được tạo ra với mục tiêu chính là tránh va chạm thông qua việc giảm vận tốc xe và tránh các trường hợp xe bị rung, giật nhằm để tạo nên một quỹ đạo mịn và trơn. Do đó, hàm chi phí (4.75) được thay đổi để kiểm soát độ lệch từ quỹ đạo tham chiếu (là vị trí trung tâm của mỗi làn đường) và để tránh các vùng dự đoán của phương tiện phía trước.

Như vậy, với mỗi phương tiện phía trước $OBJS_i$ $i \in \{1 \dots n\}$ sẽ có một dự báo vùng không gian đại diện tại mỗi thời điểm i và để tránh va chạm với các phương tiện phía trước thì ràng buộc liên quan đến khoảng cách giữa quỹ đạo được tạo ra và các đối tượng dự báo phải được xét đến. Khoảng cách tối thiểu d_i giữa hình chữ nhật r_i bao quanh xe và vùng dự báo của phương tiện phía trước $OBJS_i$ được tính tại thời điểm i (Hình 4.12) như sau:

$$d_i = \min_i distance (r_i, OBJS_i) \quad (4.84)$$

và khoảng cách tối thiểu d_i này sẽ được so sánh với một tham số λ để xác định có xảy ra va chạm với phương tiện $OBJS_i$ hay không, giá trị cực tiểu của hàm chi phí sẽ giảm thiểu sự biến thiên của vận tốc và chế độ tay lái như sau:

$$J_1 = \int_t^{t+T_{h1}} [\gamma_1 u_1^2 + \gamma_2 u_2^2 + \gamma_3 (\theta - \theta_r)^2 + \gamma_4 \delta^2 + \gamma_5 d_r^2] dr \quad (4.85)$$

Trong đó: thỏa mãn điều kiện (4.55) - (4.60), (4.65) - (4.70) và θ_r là hướng của quỹ đạo tham chiếu; dr là khoảng cách đến quỹ đạo tham chiếu; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5$ là những tham số trọng số.

Như vậy, hàm chi phí được xây dựng để tạo ra quỹ đạo tối ưu trong (4.85) với điểm khác biệt là vận tốc v giảm đến mức tối thiểu trong khoảng thời gian T_{h1} :

$$J_2 = \int_t^{t+T_{h1}} [\gamma_1 u_1^2 + \gamma_2 u_2^2 + \gamma_3 (\theta - \theta_r)^2 + \gamma_4 \delta^2 + \gamma_5 v^2] dr \quad (4.86)$$

Trong đó: thỏa mãn điều kiện (4.55)-(4.60), (4.65)-(4.70) và $(S_y, S_y) \in lanes \setminus OBJS_i$ và θ_r là hướng của quỹ đạo tham chiếu; dr là khoảng cách đến quỹ đạo tham chiếu; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5$ là những tham số trọng số.

4.4.2 Mô phỏng thực nghiệm mô-đun lập kế hoạch chuyển động dự phòng

Quá trình thực nghiệm mô phỏng đối với mô-đun này được tiến hành với 03 kịch bản khác nhau, trong đó kịch bản mô phỏng đầu tiên tìm kế hoạch chuyển động không xem xét các thao tác để tạo ra quỹ đạo dự phòng, 02 kịch bản sau được áp dụng thao tác này với các thông số khác nhau để có cơ sở đánh giá so sánh.

Kịch bản 1. Khi lập kế hoạch chuyển động cho xe tự hành thì chỉ có quỹ đạo dự báo của các phương tiện phía trước được tính toán.

Kịch bản 2. Cũng với kịch bản giao thông tương tự như kịch bản 1, nhưng ở kịch bản này kế hoạch chuyển động của xe tự hành được bổ sung các thao tác để tạo ra quỹ đạo dự

phòng và dự đoán khả năng chuyển động của các phương tiện phía trước ở mỗi bước thời gian.

Kịch bản 3. Trong kịch bản này thì phía trước xe tự hành sẽ xem xét 2 phương tiện cùng tham gia giao thông.

Vì xe tự hành có thể di chuyển được một khoảng cách đáng kể trong một thời gian ngắn (một phần nhỏ của giây) nên không thể bỏ qua khoảng thời gian được sử dụng để thực hiện tính toán và đưa ra giải pháp tối ưu, do đó trong quá trình thực hiện cần áp dụng bổ sung khoảng thời gian trễ theo dự đoán như trong [1] và do tính ổn định của mô hình dự báo nên bài toán tối ưu phi tuyến này có thể được thực hiện tuần tự [1] bằng phương pháp Runge-Kutta cổ điển (RK2) với kích thước mỗi bước là 0.02s.

4.5 Kết luận chương 4

Trong chương này, luận án cũng đã xây dựng tập mô-đun hỗ trợ điều khiển an toàn xe tự hành với 03 mô-đun gồm: mô-đun theo dõi chuyển động, hỗ trợ điều khiển chuyển động và lập kế hoạch chuyển động dự phòng cho xe tự hành.

Đặc điểm chính của mô-đun theo dõi chuyển động là giải pháp này được thực hiện bằng mô hình điều khiển dự báo, dựa trên mô hình tuyến tính cho phép theo dõi hướng chuyển động mong muốn và chính xác ở tốc độ cao với điều kiện gia tốc ngang lớn.

Đặc điểm của mô-đun hỗ trợ điều khiển chuyển động là rút ngắn chu kỳ lập kế hoạch chuyển động nhằm giảm thiểu độ lệch so với đầu vào của dự báo, trong khi vẫn đảm bảo an toàn theo kế hoạch chuyển động.

Mô-đun cuối cùng được sử dụng để lập kế hoạch chuyển động dự phòng nhằm đảm bảo an toàn cho xe tự hành, đặc điểm tối ưu của mô-đun này đạt được bằng cách xét quỹ đạo có khả năng của các phương tiện phía trước. Yếu tố an toàn được thực hiện bằng cách duy trì một hệ thống để tính toán mọi quỹ đạo có thể có của các phương tiện phía trước trong một khoảng thời gian nhất định.

KẾT LUẬN

Với mục tiêu của luận án là nghiên cứu đưa ra một số mô-đun hỗ trợ trong hệ thống tổng thể các mô-đun chung trong hệ thống điều khiển hoạt động, nhằm mục đích tăng cường hiệu suất hoạt động và cải thiện tính năng an toàn cho xe tự hành, kết quả nghiên cứu của luận án đã có một số kết quả mới như sau:

1. Đề xuất giải pháp lập kế hoạch chuyển động trong mô-đun lập kế hoạch chuyển động bằng phương pháp tiếp cận dựa trên mẫu để tạo ra quỹ đạo tối ưu từ tập các ứng viên quỹ đạo. Mục tiêu đặt ra không chỉ cải thiện hiệu quả tính toán mà còn xử lý tính bất định trong dữ liệu môi trường.

Giải pháp cải tiến này được thực hiện dựa trên kỹ thuật lấy mẫu, với quá trình hoạt động đệ quy và dựa trên phương pháp lọc phân tử nên quỹ đạo cuối cùng của các ứng viên được chọn bởi các lược đồ tối ưu xác suất; quá trình lọc phân tử được áp dụng trong lập kế hoạch chuyển động để quản lý các ứng viên hiệu quả và quy trình này sử dụng 04 bước chính: cập nhật thời gian ứng viên, cập nhật dữ liệu môi trường, lựa chọn quỹ đạo và tái lấy mẫu mục tiêu chuyển động. Trong 4 bước này thì cập nhật thời gian của ứng viên quỹ đạo và cập nhật dữ liệu môi trường được thiết kế để xét tính không chắc chắn của dữ liệu định vị và dữ liệu môi trường trong quá trình lập kế hoạch chuyển động. Ngoài ra, bước tái lấy mẫu mục tiêu chuyển động nhằm cải thiện hiệu suất tính toán bằng cách quản lý các mục tiêu chuyển động của các ứng viên quỹ đạo.

2. Xây dựng phương pháp luận và mô hình toán học để đưa ra giải pháp thiết lập 02 mô-đun lập quỹ đạo chuyển động và mô hình ra quyết định điều khiển với các yếu tố đảm bảo được khía cạnh đạo đức và pháp lý, trong đó quỹ đạo chuyển động được thiết lập với tập các ràng buộc là các quy định về luật giao thông đường bộ.

Mô-đun hỗ trợ ra quyết định là mô hình toán học của hệ thống ra quyết định, nó đóng vai trò quan trọng trong việc tránh va chạm và tránh các chướng ngại vật khi chuyển động. Mô-đun này được cho là có khả năng tự học để nó có thể được hoàn thiện trong quá trình tự học. Do đó, toàn bộ quá trình hoạt động của mô-đun này được tách thành 2 phần riêng biệt, bao gồm: phần 1 là mô hình lý thuyết, trong phần này sẽ xét đến các yếu tố tác động của việc ra quyết định trong tình huống khẩn cấp, các yếu tố tác động bao gồm các phương tiện tham gia giao thông, hệ thống đường giao thông, các yếu tố môi trường, cũng như các vấn đề về pháp luật và đạo đức, những yếu tố này được xem là các biến đầu vào của mô-đun và biến đầu ra của mô-đun này là quyết định hướng di chuyển của xe. Phần thứ 2 là hệ thống thu thập dữ liệu, dữ liệu trong phần này được thực hiện bằng khảo sát, phỏng vấn với các tình huống khẩn cấp như bài toán đưa ra với mục đích cung cấp dữ liệu huấn luyện cho mô-đun. Để mô-đun hỗ trợ ra quyết định xử lý thông tin mờ và có khả năng tự học, trong luận án này đã xây dựng mô-đun ra quyết định điều khiển dựa trên mạng nơron mờ (FNN). Kết quả nghiên cứu việc xây dựng mô-đun này được kiểm chứng bằng lập trình mô phỏng trên máy tính và đánh giá, so sánh với mạng nơron lan truyền ngược (BNN) để chứng minh tính hiệu quả của giải pháp đưa ra.

Mô-đun thiết lập quỹ đạo chuyển động được xây dựng dựa trên phương pháp điều khiển mô hình dự báo (MPC), trong đó tập ràng buộc bao gồm các ràng buộc về vấn đề pháp luật và đạo đức của hành vi tham gia giao thông được xây dựng như các mệnh đề logic và thực hiện việc chuyển đổi thành tập các bất đẳng thức tuyến tính với các biến nguyên. Trong luận án này, để giải quyết bài toán đưa ra và nhằm mục đích đánh giá hiệu quả của giải pháp đối với môi trường hoạt động cụ thể của xe, thì hàm chi phí được xây dựng để hiệu quả kiểm soát hoạt động được tối ưu với điều kiện đặt ra ban đầu là vận tốc di chuyển của xe không đổi và độ lệch ngang xe sẽ thay đổi theo thời gian trong quãng đường di chuyển.

Kết quả mô phỏng thực nghiệm với nhiều kịch bản giao thông khác nhau đối với mô-đun thiết lập quỹ đạo chuyển động nhằm mục đích xác định mục tiêu đặt ra của giải pháp là

tạo ra quỹ đạo tối ưu với phương pháp tiếp cận điều khiển dự báo dựa trên mô hình và tập ràng buộc được xây dựng từ các luật giao thông đường bộ.

3. Xây dựng phương pháp luận để thiết kế bộ điều khiển dự báo cho hệ phi tuyến và đề xuất giải pháp mới trong chiến lược tối ưu hóa của điều khiển dự báo hệ phi tuyến, cụ thể là xây dựng 03 mô-đun hỗ trợ điều khiển, bao gồm mô-đun thứ nhất là mô-đun hỗ trợ điều khiển chuyển động, mô-đun thứ hai là mô-đun điều khiển theo dõi chuyển động và mô-đun cuối cùng là mô-đun lập kế hoạch chuyển động dự phòng.

Việc xây dựng mô-đun hỗ trợ điều khiển chuyển động có 02 mục tiêu chính: thứ nhất là can thiệp tối thiểu, nghĩa là hệ thống hỗ trợ điều khiển chuyển động này chỉ áp dụng kiểm soát tự trị khi cần thiết; thứ hai là đảm bảo an toàn, nghĩa là trạng thái không va chạm của xe được thực thi rõ ràng thông qua các ràng buộc tối ưu.

Cụ thể cho giải pháp thiết kế mô-đun điều khiển theo dõi chuyển động này là thực hiện việc kết hợp các yếu tố không chắc chắn biến đổi theo thời gian đến các dự báo chướng ngại vật di động vào trong bài toán tối ưu hóa, đồng thời đưa ra các ràng buộc cho giới hạn đường biên và chướng ngại vật di động mà vẫn duy trì được kế hoạch chuyển động của xe trong một khoảng thời gian giới hạn.

Cuối cùng, mô-đun lập kế hoạch chuyển động dự phòng nhằm đảm bảo an toàn cho xe tự hành bằng cách xây dựng một đường đi tối ưu dựa trên các đánh giá khả năng di chuyển của các đối tượng tham gia giao thông khác trong một khoảng thời gian nhất định, sau đó với mỗi quỹ đạo di chuyển sẽ tính toán các thao tác khẩn cấp thích ứng.

Kết quả thực nghiệm dựa trên mô phỏng được tiến hành độc lập trên từng mô-đun, với các kịch bản khác nhau. Quá trình mô phỏng được tiến hành với các bộ điều khiển chuyển động bằng mô hình dự báo khác nhau, với phương pháp so sánh và đánh giá để kiểm tra tính hiệu quả của giải pháp đưa ra.

Trong tương lai, để tăng độ tin cậy của giải pháp này thì những thiết lập đã được thực nghiệm bằng mô phỏng sẽ được chuyển sang môi trường thực với xe thực nghiệm được trang bị đầy đủ các cảm biến, đồng thời khi thực nghiệm trên thực tế sẽ bổ sung một số yếu tố phân tích tính ổn định của hệ thống sao cho hành vi tham gia giao thông của các đối tượng được dự báo chính xác hơn. Việc triển khai rộng rãi giải pháp hỗ trợ điều khiển này cho các xe bán tự hành hay tự hành hoàn toàn trong các hệ thống điều khiển phương tiện sẽ có thể giảm thiểu được số lượng lớn các thiệt hại cũng như tạo ra một kế hoạch chuyển động an toàn cho tương lai.