

BỘ XÂY DỰNG

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

TRƯỜNG ĐẠI HỌC HÀNG HẢI VIỆT NAM



VŨ SƠN TÙNG

**NGHIÊN CỨU TỰ ĐỘNG ĐIỀU KHIỂN TÀU CẬP
CẦU DỰA TRÊN LÝ THUYẾT ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT**

Tóm tắt luận án tiến sĩ kỹ thuật

Ngành: Khoa học hàng hải; Mã số: 9840106

Chuyên ngành: Khoa học hàng hải

Hải Phòng – 2025

Công trình hoàn thành tại trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS.TS. Nguyễn Văn Sướng

Người hướng dẫn khoa học 2: PGS.TS. Nguyễn Thái Dương

Phản biện 1: PGS.TS. Hán Trọng Thanh

Phản biện 2: PGS.TS. Vương Đức Phúc

Phản biện 3: TS. Đinh Gia Huy

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án tiến sĩ cấp Trường
hợp tại Trường Đại học Hàng hải Việt Nam vào hồi 08 giờ 30 phút ngày
26 tháng 04 năm 2025

Có thể tìm hiểu luận án tại Thư viện Trường Đại học Hàng hải Việt
Nam

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Vào hội nghị lần thứ 99 năm 2018, tiểu ban an toàn hàng hải MSC của tổ chức hàng hải quốc tế IMO đã đưa ra khái niệm ban đầu về tàu thủy tự hành là tàu thủy tùy thuộc mức độ tự động hóa có thể hoạt động không phụ thuộc vào tác động của con người. Tiểu ban cũng chỉ ra tàu thủy tự hành là một trong các giải pháp hữu hiệu để giải quyết các vấn đề của ngành hàng hải đang nhận được nhiều quan tâm bao gồm: nâng cao an toàn hàng hải, phòng tránh các tai nạn hàng hải, giảm định biên thuyền viên, tiết kiệm năng lượng và nâng cao hiệu quả kinh tế. Xét về khía cạnh tự động điều khiển, các nghiên cứu về tàu tự hành bao gồm: tự động điều khiển tránh va chạm; tự động điều khiển giữ hướng; tự động điều khiển bám quỹ đạo; tự động điều khiển định vị động; tự động điều khiển tàu cập cầu; tự động điều khiển cân bằng tàu thủy; tự động điều khiển giảm lắc ngang tàu thủy,... Trong đó, tự động cập cầu là một trong những bài toán quan trọng và phức tạp, đặt ra nhiều khó khăn, thách thức cho các nhà nghiên cứu với các lý do chính như sau:

- Thứ nhất, tàu thủy trong quá trình cập cầu cần hành trình ở tốc độ thấp nên chịu ảnh hưởng lớn của nhiễu ngoại cảnh tác động, suy giảm tính năng điều động khi tàu phải hành trình ở trong khu vực nước hạn chế. Tuy nhiên, bộ điều khiển vẫn phải đảm bảo điều khiển tàu bám theo quỹ đạo cập cầu dự kiến khác nhau đồng thời điều khiển hướng mũi tàu theo hướng cập cầu. Đồng thời, tốc độ tàu cần được giảm dần, đảm bảo tốc độ tàu bằng không tại vị trí cầu tàu;

- Thứ hai, mô hình động học tàu thủy có tính bất định, tính chất phi tuyến cao;

Với những ưu điểm: có khả năng đưa hệ thống bám theo trạng thái đặt trước, bền vững với nhiễu bên ngoài tác động, dễ thiết kế, dễ kết hợp lai ghép với các phương pháp điều khiển khác, điều khiển trượt SMC (Sliding mode control) là loại điều khiển phi tuyến bền vững được sử dụng phổ biến để thiết kế các bộ điều khiển bám quỹ đạo, bộ điều khiển định vị động, bộ điều khiển giữ hướng,... trong các nghiên cứu về tự động điều khiển tàu thủy. Tuy nhiên, hiện nay rất ít nghiên cứu ứng dụng loại điều khiển này cho bài toán điều khiển tự động cập cầu tàu thủy.

Với ưu điểm của mạng nơ-ron nhân tạo có thể được sử dụng để xấp xỉ các thành phần phi tuyến bất định trong mô hình động lực tàu thủy, nhiều nhà nghiên cứu đã kết hợp mạng nơ-ron nhân tạo với các kỹ thuật điều khiển phi tuyến thành một bộ điều khiển kép như: bộ điều khiển bề mặt động kết hợp mạng nơ-ron; bộ điều khiển thích nghi PD kết hợp mạng nơ-ron; bộ điều khiển trượt kết hợp mạng nơ-ron,... Các bộ điều khiển kép được đề xuất đều có khả năng chứng minh tính ổn định của hệ thống theo lý thuyết ổn định Lyapunov đồng thời giải quyết được tác động của các thành phần phi tuyến bất định.

Trên cơ sở những phân tích nêu trên, việc kết hợp mạng nơ-ron nhân tạo với điều khiển trượt để giải quyết bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu là hướng nghiên cứu triển vọng. Do vậy, nghiên cứu sinh lựa chọn đề tài: ***Nghiên cứu tự động điều khiển***

tàu cập cầu dựa trên lý thuyết điều khiển trượt để xây dựng các bộ điều khiển cập cầu tàu thủy có xét đến các vấn đề phức tạp bao gồm tính bất định trong mô hình toán của tàu thủy, nhiễu ngoại cảnh tác động, lỗi trong cơ cấu chấp hành, và giới hạn tín hiệu điều khiển nằm trong vùng hoạt động của cơ cấu chấp hành trong bài toán điều khiển tàu thủy cập cầu mà các nghiên cứu trước đây chưa đề cập có ý nghĩa nhất định trong lĩnh vực điều khiển tàu cập cầu nói riêng cũng như tự động điều khiển tàu thủy nói chung.

2. Mục đích nghiên cứu đề tài

Đề tài được thực hiện nhằm mục đích sau đây:

- Nghiên cứu ứng dụng điều khiển trượt kết hợp với mạng nơ-ron nhân tạo, các cơ cấu thích nghi, cơ cấu điều khiển lỗi và thành phần tín hiệu điều khiển bão hòa để thiết kế các bộ điều khiển cập cầu tự động xét đến các yếu tố ảnh hưởng trong các điều kiện khác nhau;

- Chứng minh được tính ổn định và tính bền vững của hệ thống với nhiễu ngoại cảnh tác động;

- Kiểm chứng khả năng điều khiển của các bộ điều khiển cập cầu thông qua các mô phỏng số.

3. Phương pháp nghiên cứu đề tài

Đề tài sử dụng các phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp phương pháp mô phỏng để kiểm chứng khả năng điều khiển và tính ổn định của hệ thống tự động điều khiển được thiết kế.

Phương pháp nghiên cứu lý thuyết

- Nghiên cứu cơ sở lý thuyết về điều khiển trượt, mạng nơ-ron nhân tạo và điều khiển sửa lỗi;

- Nghiên cứu mô hình toán mô tả chuyển động của tàu thủy, điều khiển cơ cấu chấp hành tàu thủy và bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu;

- Nghiên cứu thiết kế các bộ điều khiển trượt giải quyết các bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu trong các điều kiện khác nhau;

- Chứng minh được tính ổn định của hệ thống điều khiển được thiết kế thông qua lý thuyết ổn định Lyapunov.

Phương pháp mô phỏng số

- Ứng dụng phần mềm Matlab để xây dựng mô hình tính toán và kiểm chứng tính chính xác, khả thi của các bộ điều khiển cập cầu tự động được thiết kế.

4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của đề tài

Đối tượng nghiên cứu của đề tài

Đối tượng nghiên cứu của đề tài là hệ thống tự động điều khiển cập cầu cho tàu tự hành có đủ cơ cấu chấp hành.

Phạm vi nghiên cứu của đề tài

- Phạm vi nghiên cứu của đề tài là nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển tự động tàu cập cầu với mô hình toán tàu thủy ba bậc tự do đủ cơ cấu chấp hành trên mặt phẳng nằm ngang trong các điều kiện sau: tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh

tác động; tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định; và khi cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành;

- Các bộ điều khiển được đề xuất không xét đến mô hình cơ cấu chấp hành của tàu, đưa ra tín hiệu điều khiển dưới dạng lực và mômen trên 3 trục chuyển động bao gồm chuyển động theo trục dọc tàu (*Surge*), chuyển động dịch chuyển ngang (*Sway*), chuyển động xoay (*Yaw*);

- Sử dụng phần mềm Matlab để mô phỏng kiểm chứng các bộ điều khiển được đề xuất.

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

Ý nghĩa khoa học của luận án

Luận án nghiên cứu và xây dựng được các bộ điều khiển trượt trên mặt trượt tốc độ cho bài toán tự động tàu cập cầu giải quyết các khía cạnh sau: khi tham số của mô hình tàu xác định; khi tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định; khi cơ cấu chấp hành bị lỗi; khi tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành bị giới hạn. Luận án góp phần bổ sung và phong phú thêm các phương pháp tự động điều khiển tàu cập cầu.

Ý nghĩa thực tiễn của luận án

Từ cơ sở lý thuyết đề xuất của luận án, có thể từng bước xây dựng thực nghiệm trên các tàu mô hình và thực nghiệm trên các tàu thực trong tương lai.

6. Những điểm đóng góp mới

Những điểm đóng góp mới của luận án được tóm tắt như sau:

- Hiện nay, điều khiển trượt mới được áp dụng trong bài toán cập cầu tự động cho tàu thủy trong một số ít nghiên cứu. Luận án đề xuất một bộ điều khiển trượt mới cho bài toán bài toán cập cầu tự động cho tàu thủy. Cụ thể là, điều khiển trượt trên mặt trượt tốc độ thực hiện 3 nhiệm vụ điều khiển tàu thủy bám quỹ đạo cập cầu, giảm tốc độ đồng thời dừng tàu ở vị trí cập cầu;

- Luật điều khiển trượt được tích hợp với các cơ cấu thích nghi và mạng nơ-ron để giải quyết các yếu tố bất định của mô hình toán chuyển động của tàu và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định;

- Khi có ảnh hưởng đồng thời của tham số của mô hình bất định, nhiễu ngoại cảnh tác động bất định, cơ cấu chấp hành bị lỗi và tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành bị giới hạn, bộ điều khiển được tích hợp thêm các cơ cấu điều khiển lỗi và thành phần tín hiệu điều khiển bão hòa. Bộ điều khiển cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu giải quyết đồng thời vấn đề lỗi cơ cấu chấp hành và tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành bị giới hạn chưa được đề cập trong các công trình nghiên cứu trước đây.

7. Kết cấu của luận án

Luận án được trình bày bao gồm 152 trang, 101 hình vẽ, 5 bảng biểu, phần mở đầu và 4 chương, phần kết luận, danh mục các công trình đã công bố liên quan đến tài luận án, tài liệu tham khảo và 3 phụ lục.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU TỰ ĐỘNG ĐIỀU KHIỂN TÀU CẬP CẦU

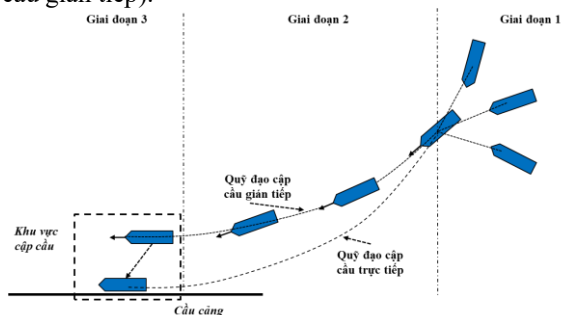
1.1 Tổng quan bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu

Trong quá trình thiết kế bộ điều khiển tự động tàu cập cầu, các nhà nghiên cứu cần phải đảm bảo hệ thống điều khiển thực hiện được các bước cơ bản sau để có thể tự động điều khiển tàu cập cầu an toàn và hiệu quả dựa trên lý thuyết điều động:

- Giai đoạn 1 - giai đoạn tiếp cận: Tàu lựa chọn và hành trình đến quỹ đạo tiếp cận cập cầu an toàn. Trong giai đoạn này, tốc độ tàu còn đủ lớn đảm bảo hiệu quả của bánh lái trong quá trình điều khiển tàu.

- Giai đoạn 2 - giai đoạn giảm tốc: Tàu hành trình trên quỹ đạo tiếp cận cập cầu đã lựa chọn và giảm tốc độ vòng quay chân vịt tiến tới dừng máy sử dụng trơn tiếp cận khu vực cập cầu. Trong giai đoạn này, hệ thống cần tính toán thời điểm giảm tốc độ và hiệu quả điều khiển của bánh lái và chân vịt để đảm bảo giữ được tàu chuyển động trên quỹ đạo tiếp cận đã lựa chọn và tốc độ tàu khi vào khu vực cập cầu gần như bằng không.

- Giai đoạn 3 - giai đoạn cập cầu: Giai đoạn này tốc độ tàu gần như bằng không, tàu không thể sử dụng được bánh lái và chân vịt hiệu quả để đưa tàu vào cập cầu. Trong giai đoạn này, đối với các tàu cỡ nhỏ hoặc điều kiện cập cầu cho phép, tàu sẽ tiếp cận cầu theo quỹ đạo cập cầu trực tiếp (hình 1.1) với khoảng cách an toàn để gửi dây buộc tàu. Đối với các tàu cỡ vừa và lớn hoặc có đủ cơ cấu chấp hành hoặc có sự hỗ trợ của tàu lai, tàu sẽ dừng ở khoảng cách đủ lớn so với cầu tàu, sử dụng hệ thống chân vịt mạn, hệ thống chân vịt bầu xoay hoặc với sự hỗ trợ kéo đẩy của tàu lai để có thể tiếp cận vào trong khu vực cầu tàu theo hướng mũi tàu gần như song song với cầu tàu (quỹ đạo cập cầu gián tiếp).

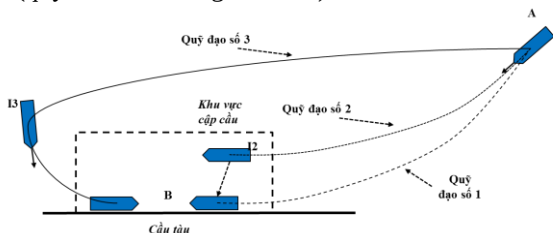


Hình 1.1. Quá trình điều khiển tàu cập cầu

Như vậy, khác với bài toán giữ hướng hoặc bám quỹ đạo thông thường, bộ điều khiển tự động cập cầu được thiết kế cần vừa đảm bảo bám quỹ đạo cập cầu được thiết kế trước vừa đảm bảo tốc độ theo yêu cầu cho phép trong điều kiện ngoại cảnh tác động.

Bộ tự động điều khiển tàu cập cầu được đề xuất cần đảm bảo điều khiển tàu bám theo quỹ đạo cập cầu dự kiến đồng thời phải giảm dần tốc độ để khi tàu đến vị trí cầu tàu tốc độ và gia tốc của tàu phải bằng 0, tránh hiện tượng quá tốc độ. Quỹ đạo cập cầu dự kiến sẽ được lựa chọn dựa trên các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình cập cầu như cỡ tàu, số lượng cơ cấu chấp hành (tàu lai, chân vịt mạn, bánh lái), điều kiện hàng hải của khu vực cảng (các hạn chế của cảng, mật độ tàu, mạn tàu cập cầu, điều kiện dòng chảy), điều kiện thời tiết (hướng và tốc độ gió). Dựa trên lý thuyết điều động, quỹ đạo cập cầu có thể được chia thành 3 loại quỹ đạo được điều chỉnh phù hợp với điều kiện thực tế:

- Quỹ đạo cập cầu trực tiếp: Tàu sẽ tiến hành tiếp cận và cập cầu trực tiếp vào cầu tàu (quỹ đạo số 1 trong hình 1.2).
- Quỹ đạo cập cầu gián tiếp với hướng cập cầu vuông góc với cầu tàu: Tàu sẽ được điều khiển dừng ở một khoảng cách thích hợp với cầu và hướng tàu gần như song song với cầu tàu (quỹ đạo số 2 trong hình 1.2).
- Quỹ đạo cập cầu gián tiếp với hướng cập cầu ngược hướng đến cầu: Tàu được điều khiển đến điểm quay tàu để quay tàu ngược hướng đến ban đầu của tàu, sau đó tiếp cận cập cầu tàu (quỹ đạo số 3 trong hình 1.2).



Hình 0.1. Thiết kế quỹ đạo cập cầu

Bộ điều khiển tự động tàu cập cầu cần thực hiện được việc điều khiển tàu theo các loại quỹ đạo cập cầu nêu trên để đảm bảo phù hợp các khu vực cảng, điều kiện hoàn cảnh cập cầu khác nhau.

1.2. Tổng quan về các công trình nghiên cứu về tự động điều khiển tàu cập cầu

Các nghiên cứu trên thế giới: Trong quá trình nghiên cứu tự động điều khiển tàu cập cầu, các nhà khoa học trên thế giới đã có nhiều hướng nghiên cứu khác nhau để thiết kế bộ điều khiển bắt đầu ngay từ những năm 1990. Về cơ bản, các bộ điều khiển tự động điều khiển tàu cập cầu được đề xuất từ các nghiên cứu đều dựa trên 3 xu hướng chính:

- Xu hướng dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo: Ưu điểm của các nghiên cứu theo xu hướng tiếp cận dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo là không cần sử dụng mô hình toán mô tả chuyển động chính xác của tàu đặc biệt trong điều kiện tàu hành trình với tốc độ thấp để tiếp cận khu vực cập cầu. Nhược điểm của các phương pháp này là đòi

hỏi một bộ dữ liệu đủ lớn để có thể huấn luyện trí tuệ nhân tạo tự đưa ra quyết định phù hợp đảm bảo thực hiện tự động điều khiển cập cầu an toàn. Do lượng thông tin cần xử lý lớn, yêu cầu cần phải có một bộ xử lý thông tin đủ mạnh để đảm bảo độ tin cậy và chính xác của các bộ điều khiển được đề xuất. Ngoài ra, các bộ điều khiển được đề xuất khó chứng minh được tính ổn định của hệ thống theo các tiêu chuẩn ổn định;

- Xu hướng dựa trên các phương pháp điều khiển phi tuyến sử dụng mô hình toán chuyển động của tàu: Ưu điểm của các nghiên cứu này là tính ổn định của hệ thống có thể được chứng minh theo lý thuyết ổn định Lyapunov. Nhược điểm của xu hướng tiếp cận này là cần mô hình động lực học mô tả chuyển động của tàu ở tốc độ thấp mô tả chính xác hoàn toàn chuyển động thực tế của tàu có tính đến các yếu tố bất định của các tham số mô hình và nhiều ngoại cảnh tác động. Hiện nay, mô hình toán chuyển động tàu thủy theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng nằm ngang do Fossen đề xuất được nhiều nghiên cứu sử dụng cho bộ điều khiển tự động tàu cập cầu;

- Xu hướng kết hợp trí tuệ nhân tạo và các phương pháp điều khiển phi tuyến: Về cơ bản, hai xu hướng nghiên cứu nêu trên đều có ưu và nhược điểm riêng. Do đó, các nhà nghiên cứu đã cố gắng kết hợp các ưu điểm của hai xu hướng trên, chủ yếu tập trung vào giải quyết các vấn đề điều khiển và tính toán quỹ đạo cập cầu. Mạng nơ-ron được sử dụng để xấp xỉ các thành phần phi tuyến bất định kết hợp sử dụng các kỹ thuật điều khiển phi tuyến thành một bộ điều khiển kép như: bộ điều khiển trượt kết hợp mạng nơ-ron; bộ điều khiển thích nghi trượt cuốn chiều backstepping kết hợp mạng nơ-ron;...

Các nghiên cứu trong nước: Hiện nay, tình hình nghiên cứu trong nước về tự động điều khiển tàu cập cầu là còn khá mới mẻ và chưa được đề cập đến nhiều trong các bài báo khoa học và tài liệu chuyên ngành, mới chủ yếu tập trung vào bài toán điều khiển tàu bám quỹ đạo, bám đường hoặc giữ hướng. Trên cơ sở tham khảo các tạp chí chuyên ngành hàng hải, chỉ có hai nghiên cứu về về tự động điều khiển tàu cập cầu. Trong các bài báo này, tác giả đã đưa ra bộ điều khiển tự động cập cầu sử dụng mạng nơ-ron tách kênh để tăng hiệu quả điều khiển chân vịt và bánh lái trong điều kiện hàng hải có và không xét đến ảnh hưởng của gió.

Từ các đánh giá tổng quan về các công trình nghiên cứu tự động điều khiển tàu cập cầu trong và ngoài nước, hiện mới chỉ có một số ít nghiên cứu tự động điều khiển tàu cập cầu sử dụng bộ điều khiển trượt. Trong các nghiên cứu nêu trên, bộ điều khiển được đề xuất đều còn có các hạn chế và các vấn đề cần giải quyết: xét đến ảnh hưởng của nhiều ngoại cảnh tác động và các thành phần bất định của mô hình; xét đến khả năng khi có cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành.

Các nghiên cứu tự động điều khiển sửa lỗi trong điều khiển tàu thủy mới tập trung điều khiển bám đường, bám quỹ đạo hoặc định vị động. Hiện nay chưa có nghiên cứu tự động điều khiển sửa lỗi cho bài toán tự động cập cầu cho tàu thủy.

1.3. Kết luận chương 1

Trong chương 1, luận án đã tập trung giải quyết được các nội dung:

- Phân tích yêu cầu của bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu. Phân tích các yêu cầu về thiết kế quỹ đạo cập cầu dự kiến để đảm bảo các bộ điều khiển tự động tàu cập cầu có thể thực hiện được nhiệm vụ tự động điều khiển tàu cập cầu phù hợp các khu vực cảng, điều kiện hoàn cảnh cập cầu khác nhau;

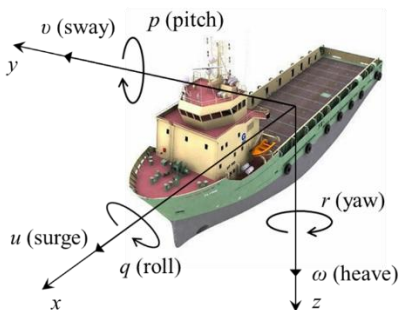
- Phân tích tổng quan về nghiên cứu tự động điều khiển tàu cập cầu đã được công bố trong và ngoài nước, phân tích ưu nhược điểm của từng nhóm phương pháp;

- Phân tích đánh giá được tính mới trong nghiên cứu bộ điều khiển tự động tàu cập cầu dựa trên lý thuyết điều khiển trượt được đề xuất trong luận án và hướng nghiên cứu của đề tài;

- Phân tích tổng quan về nghiên cứu tự động điều khiển sửa lỗi trong điều khiển tàu thủy. Đánh giá được tính mới trong nghiên cứu cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành.

CHƯƠNG 2. MÔ HÌNH TOÁN CHUYỂN ĐỘNG TÀU THỦY VÀ LÝ THUYẾT ĐIỀU KHIỂN ĐƯỢC SỬ DỤNG TRONG NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình toán học chuyển động của tàu



Hình 2.1. Chuyển động của tàu thủy theo 6 bậc tự do

Trong quá trình hàng hải, tàu thủy chuyển động theo 6 bậc tự do (hình 2.1) bao gồm: chuyển động theo trục dọc tàu (Surge); chuyển động dịch chuyển ngang (Sway); chuyển động theo trục thẳng đứng (Heave); chuyển động xoay (Yaw); chuyển động lắc ngang (Roll) và chuyển động lắc dọc (Pitch).

Mô hình toán học chuyển động của tàu theo 6 bậc tự do

$$\begin{cases} \dot{\eta} = J(\eta)v \\ M\ddot{\eta} + C(v)\dot{v} + D(v)v + g(\eta) = \tau + d_e \end{cases} \quad (2.12)$$

Trong đó: $\eta = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ là véc-tơ trạng thái của tàu; $v = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ là véc-tơ tốc độ của tàu; $J(\eta)$ là ma trận chuyển đổi giữa hệ tọa độ tàu và hệ tọa độ địa

tâm $\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A$ là ma trận quán tính với $\mathbf{M}_{RB}$ là ma trận quán tính cố định và $\mathbf{M}_A$ là ma trận quán tính do khối lượng tăng thêm; $\mathbf{C}(\mathbf{v}) = \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) + \mathbf{C}_A(\mathbf{v})$ là ma trận Coriolis và hướng tâm với $\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})$ là ma trận Coriolis và hướng tâm cố định và $\mathbf{C}_A(\mathbf{v})$ là ma trận Coriolis và hướng tâm do khối lượng tăng thêm; $\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \mathbf{D} + \mathbf{D}_n(\mathbf{v})$ là ma trận giảm chấn thủy động lực học với $\mathbf{D}$ là thành phần ma trận giảm chấn thủy động lực học tuyến tính và $\mathbf{D}_n(\mathbf{v})$ là thành phần ma trận giảm chấn thủy động lực học phi tuyến; $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ là véc-tơ lực và mômen hồi phục; $\boldsymbol{\tau}$ là véc-tơ lực và mômen điều khiển gây ra bởi các cơ cấu chấp hành của tàu; $\mathbf{d}_e = \mathbf{d}_{wind} + \mathbf{d}_{wave}$ là véc-tơ lực và mômen gây ra bởi nhiễu ngoại cảnh tác động bao gồm lực và mômen tác động của gió $\mathbf{d}_{wind}$ và của sóng $\mathbf{d}_{wave}$.

Mô hình toán chuyển động của tàu theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng ngang

Để giải quyết cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu, mô hình toán chuyển động của tàu theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng ngang được sử dụng bao gồm 3 chuyển động: chuyển động theo trục dọc tàu (*Surge*); chuyển động dịch chuyển ngang (*Sway*) và chuyển động xoay (*Yaw*). Các chuyển động theo trục thẳng đứng (*Heave*), chuyển động lắc ngang (*Roll*) và chuyển động lắc dọc (*Pitch*) bỏ qua không xét.

Mô hình toán động lực học 3 bậc tự do mô tả chuyển động trên mặt phẳng ngang của tàu được thể hiện như sau [20]:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} \\ \mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d}_e \end{cases} \quad (2.13)$$

Trong đó: $\boldsymbol{\eta} = [x \ y \ \psi]^T$ là véc-tơ thể hiện vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ ; $\mathbf{v} = [u \ v \ r]^T$ là tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r trong hệ tọa độ tàu; $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$ là ma trận chuyển đổi giữa hệ tọa độ tàu và hệ tọa độ địa tâm; $\mathbf{M}$ là ma trận quán tính; $\mathbf{C}(\mathbf{v})$ là ma trận Coriolis và hướng tâm; $\mathbf{D}$ là ma trận giảm chấn thủy động lực học; $\boldsymbol{\tau}$ là véc-tơ lực và mômen điều khiển gây ra bởi các cơ cấu chấp hành của tàu. Nếu tàu đủ cơ cấu chấp hành, $\boldsymbol{\tau} = [\tau_u \ \tau_v \ \tau_r]^T$ với τ_u, τ_v và τ_r là tín hiệu điều khiển từ 3 cơ cấu chấp hành (máy chính, chân vịt mạn, bánh lái, chân vịt bầu xoay) để thực hiện điều khiển trên ba trục tốc độ u, v, r ; $\mathbf{d}_e = [d_{eu} \ d_{ev} \ d_{er}]^T$ là véc-tơ lực và mômen do nhiễu ngoại cảnh tác động

Mô hình toán chuyển động của tàu theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng ngang khi tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} \\ \mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_o(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}_o\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d}_m + \mathbf{d}_e \end{cases} \quad (2.17)$$

Trong đó: d_m là thành phần bất định trong tham số của mô hình toán chuyển động của tàu; $C_o(v)$ là thành phần xác định của ma trận Coriolis và hướng tâm $C(v)$; D_o là thành phần xác định của ma trận giảm chấn thủy động lực học D .

2.2. Lý thuyết điều khiển trượt

Nghiên cứu sinh trình bày lý thuyết điều khiển trượt trong điều khiển tự động bao gồm luật tiếp cận, hiện tượng chattering và các kỹ thuật chống chattering.

2.3. Nhận dạng mô hình bằng mạng nơ-ron nhân tạo

Nghiên cứu sinh trình bày lý thuyết chung về nhận dạng mô hình bằng mạng nơ-ron nhân tạo, lý thuyết mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF.

2.4. Tổng quan về điều khiển sửa lỗi

Lỗi được xác định là một sai lệch không được cho phép ra khỏi điều kiện thông thường của ít nhất một đặc tính đặc trưng hoặc một tham số của hệ thống. Ảnh hưởng của một lỗi gây ra giảm chất lượng điều khiển của hệ thống thậm chí gây hỏng toàn bộ hệ thống.

Lỗi thường được phân loại theo vị trí xảy ra lỗi bao gồm:

- Lỗi cơ cấu chấp hành;
- Lỗi cảm biến;
- Lỗi trong thành phần của hệ thống.

Bộ điều khiển có khả năng tự động bù lỗi xảy ra trong hệ thống đồng thời duy trì ổn định và chất lượng điều khiển trong phạm vi cho phép được gọi là một bộ điều khiển sửa lỗi FTC. Có nhiều kỹ thuật khác nhau được áp dụng cho điều khiển sửa lỗi FTC. Điều khiển sửa lỗi FTC được chia thành 2 loại chính: kỹ thuật sửa lỗi chủ động và kỹ thuật sửa lỗi thụ động.

2.5. Cơ cấu chấp hành cho tàu thủy

Nghiên cứu sinh trình bày lý thuyết chung về điều khiển cơ cấu chấp hành tàu thủy, điều khiển cơ cấu chấp hành khi xét đến khả năng bị lỗi cơ cấu chấp hành.

2.6. Kết luận chương 2

Trong chương 2, luận án đã phân tích và trình bày các vấn đề sau:

- Phân tích mô hình toán chuyển động tàu thủy bao gồm: mô hình 6 bậc tự do, mô hình 3 bậc tự do trên mặt phẳng nằm ngang dạng đủ cơ cấu chấp hành; mô hình 3 bậc tự do trên mặt phẳng nằm ngang dạng đủ cơ cấu chấp hành khi tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định.
- Trình bày về lý thuyết điều khiển trượt, lý thuyết sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo để nhận dạng mô hình, lý thuyết điều khiển sửa lỗi, lý thuyết điều khiển cơ cấu chấp hành tàu thủy khi xét đến khả năng cơ cấu chấp hành bị lỗi làm nền tảng làm nền tảng để thiết kế các bộ tự động điều khiển tàu cập cầu được đề xuất chương 3 của luận án.

CHƯƠNG 3. TỰ ĐỘNG ĐIỀU KHIỂN TÀU CẬP CẦU DỰA TRÊN LÝ THUYẾT ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT

3.1. Tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động dựa trên bộ điều khiển trượt

Bộ điều khiển được đề xuất sử dụng mặt trượt tốc độ để đảm bảo đưa tàu bám theo quỹ đạo cập cầu dự kiến đồng thời giảm dần tốc độ để cập cầu tàu. Để đơn giản hóa quá trình thiết kế bộ điều khiển, quá trình thiết kế bộ điều khiển chia thành 2 bước sau:

- Bước thứ nhất thiết kế tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ xoay mũi mong muốn (u_d, v_d, r_d) từ vị trí và hướng mũi tàu mong muốn (x_d, y_d, ψ_d) dựa trên quỹ đạo cập cầu dự kiến. Tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ xoay mũi mong muốn (u_d, v_d, r_d) được thiết kế sẽ đảm bảo sai số bám vị trí và hướng mũi tàu tiến dần về 0 trong thời gian hữu hạn. Yêu cầu của bước này là tại vị trí cập cầu, tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ xoay mũi mong muốn (u_d, v_d, r_d) bằng 0.

- Bước thứ hai sử dụng lý thuyết điều khiển trượt để thiết kế luật điều khiển để đảm bảo đưa được tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ xoay mũi thực tế của tàu đến giá trị mong muốn.

Thiết kế tốc độ mong muốn

Định lý 1: Thiết kế tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ quay mong muốn (u_d, v_d, r_d) như sau:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ v_d \\ r_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_d - \tanh(k_x e_x) \\ \dot{y}_d - \tanh(k_y e_y) \\ \dot{\psi}_d - \tanh(k_\psi e_\psi) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Trong đó, $k_x, k_y, k_\psi > 0$ là hệ số khuếch đại điều khiển có giá trị dương.

Nếu sai số tốc độ (e_u, e_v, e_r) tiến đến 0 thì sẽ đảm bảo sai số bám vị trí và hướng mũi tàu sẽ tiến đến 0 trong thời gian hữu hạn.

Thiết kế bộ điều khiển trượt cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động

Đối với bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động, mô hình chuyển động của tàu (2.13) được sử dụng (không xét đến thành phần bất định do tham số của mô hình bất định $\mathbf{d}_m$ như trong mô hình chuyển động của tàu khi tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định (2.17)).

Chọn mặt trượt như sau:

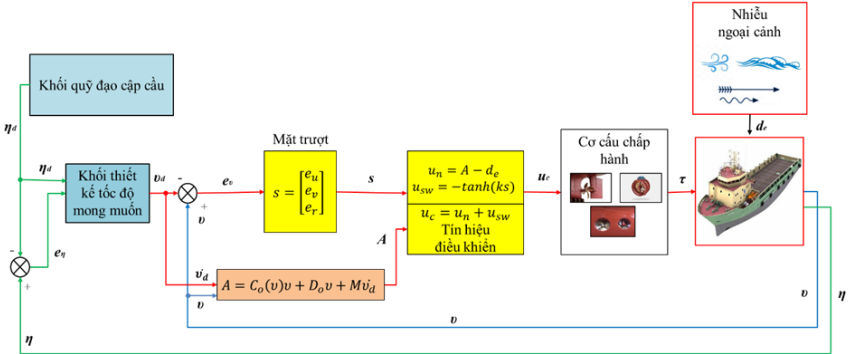
$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_r \end{bmatrix} = \mathbf{e}_v \quad (3.11)$$

Để đảm bảo các thành phần vận tốc của tàu tiến tới mặt trượt trong thời gian hữu hạn, thiết kế tín hiệu điều khiển theo lý thuyết đã được trình bày trong phần 2.2 như sau:

$$\mathbf{u}_c = \mathbf{A} - \mathbf{d}_e - \mathbf{k} \operatorname{sgn}(\mathbf{s}) \quad (3.19)$$

Để giảm hiện tượng chattering, thay thế hàm không liên tục $\text{sgn}()$ bằng hàm liên tục tron gần đúng $\tanh()$, khi đó công thức (3.19) được viết lại như sau :

$$u_c = A - d_e - \tanh(ks)$$



Hình 3.1. Sơ đồ mô tả thuật toán của bộ điều khiển trượt tự động điều khiển tàu cập cầu

3.2. Tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định dựa trên bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo

Bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định

Phương trình động lực học 3 bậc tự do mô tả chuyển động trên mặt phẳng ngang của tàu khi tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định (2.17) được viết lại như sau:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = J(\eta)v \\ M\dot{v} + C_o(v)v + D_o v = \tau + F_t \end{cases} \quad (3.24)$$

Trong đó: F_t là véc-tơ hàm bất định tổng hợp của nhiễu ngoại cảnh bất định và các thành phần bất định trong các tham số $C(v)$, $D(v)$ của mô hình tàu trên 3 chuyển động theo trục dọc tàu (Surge); chuyển động dịch chuyển ngang (Sway) và chuyển động xoay (Yaw).

Tương tự như bộ điều khiển được đề xuất trong chương 3, mặt trượt sai số tốc độ với tốc độ mong muốn được thiết kế trong phần 3.1.2.1 cũng được sử dụng.

Để đảm bảo các thành phần vận tốc của tàu tiến tới mặt trượt trong thời gian hữu hạn, ta thiết kế tín hiệu điều khiển theo lý thuyết đã được trình bày trong phần 2.2 như sau:

$$u_c = A - F_t - k \operatorname{sgn}(s) \quad (3.30)$$

Thiết kế luật điều khiển thích nghi sử dụng mạng nơ-ron

Trong luật điều khiển, do F_t là véc-tơ bất định tổng hợp của nhiều ngoại cảnh bất định và tham số của mô hình toán chuyển động của tàu bất định, mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF được sử dụng để thay thế véc-tơ F_t trong tín hiệu điều khiển bằng hàm xấp xỉ $\hat{F}_t$.

Mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF được sử dụng trong bộ điều khiển gồm 3 tín hiệu vào là 3 sai số tốc độ (e_u, e_v, e_r); 1 lớp ẩn gồm n nút; 3 tín hiệu ra là 3 tín hiệu xấp xỉ ($\hat{F}_{tu}, \hat{F}_{tv}, \hat{F}_{tr}$) được vào tín hiệu điều khiển (theo Hình 3.2). Mạng nơ-ron được huấn luyện online trong quá trình điều khiển từ 3 tín hiệu vào là 3 sai số tốc độ (e_u, e_v, e_r) để đưa ra 3 tín hiệu ra là 3 tín hiệu xấp xỉ ($\hat{F}_{tu}, \hat{F}_{tv}, \hat{F}_{tr}$).

Khi đó, hàm xấp xỉ $\hat{F}_t$ được xác định như sau:

$$\hat{F}_t = \hat{W}^T h(e_v) \quad (3.33)$$

Trong đó: $\hat{W}^T$ là véc-tơ ma trận trọng số của mạng RBF NN.

Do đó, tín hiệu điều khiển được thể hiện như sau:

$$\tau = u_c = A - \hat{F}_t - k \operatorname{sgn}(s) \quad (3.34)$$

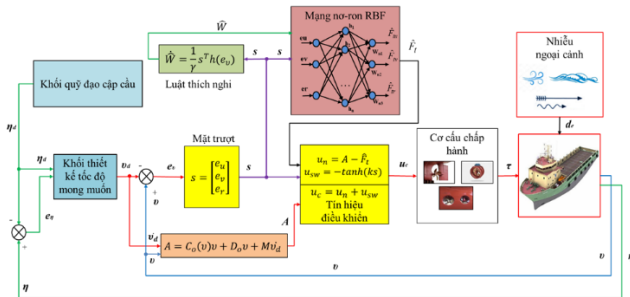
Luật điều khiển thích nghi được thiết kế như sau:

$$\dot{\hat{W}} = \frac{1}{\gamma} s^T h(e_v) \quad (3.38)$$

Với γ là một hằng số dương.

Để giảm hiện tượng chattering, thay thế hàm không liên tục $\operatorname{sgn}()$ bằng hàm liên tục tron gần đúng $\tanh()$, công thức (3.35) được viết lại như sau :

$$u_c = A - \hat{F}_t - \tanh(ks) \quad (3.39)$$



Hình 3.3. Sơ đồ mô tả thuật toán của bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo động điều khiển tàu cập cầu

3.3. Tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành dựa trên bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi

3.3.1. Bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi sử dụng mạng nơ-ron cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành

Thiết kế bộ điều khiển sửa lỗi thích nghi sử dụng mạng nơ-ron cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi

Bộ điều khiển được đề xuất sẽ sử dụng mặt trượt tốc độ để đảm bảo đưa tàu bám theo quỹ đạo cập cầu dự kiến đồng thời giảm dần tốc độ để cập cầu tàu. Để đơn giản hóa quá trình thiết kế bộ điều khiển và giải quyết tác động khi cơ cấu chấp hành bị lỗi và vẫn đề giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành, ta chia thành 3 bước sau:

- Bước thứ nhất sẽ thiết kế tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ xoay mũi mong muốn (u_d, v_d, r_d) từ vị trí và hướng mũi tàu mong muốn (x_d, y_d, ψ_d) dựa trên quỹ đạo cập cầu dự kiến tương tự như bộ điều khiển được đề xuất trong phần 3.1 và 3.2.

- Bước thứ hai sử dụng lý thuyết điều khiển trượt để thiết kế luật điều khiển để đảm bảo đưa được tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ xoay mũi thực tế của tàu đến giá trị mong muốn. Thành phần bất định do tham số của mô hình toán chuyển động của tàu bất định được xấp xỉ mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF NN. Các nhiễu ngoại cảnh bất định và thành phần bất định do lỗi của cơ cấu chấp hành được tập hợp thành một véc-tơ bất định tổng hợp. Kết hợp với kỹ thuật điều khiển thích nghi hệ số khuếch đại, tín hiệu điều khiển được thiết kế bao gồm 2 tín hiệu điều khiển hiệu chỉnh: tín hiệu hiệu chỉnh thứ nhất được sử dụng để giải quyết tác động của véc-tơ bất định tổng hợp; tín hiệu hiệu chỉnh thứ hai được sử dụng thích nghi khi cơ cấu chấp hành bị lỗi.

- Bước thứ ba: Do hệ số khuếch đại của các tín hiệu hiệu chỉnh luôn tăng trong quá trình điều khiển dưới tác động của luật điều khiển thích nghi hệ số khuếch đại, tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành có thể vượt quá giới hạn cho phép của tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành. Tín hiệu điều khiển bão hòa được thiết kế trong tín hiệu điều khiển để đảm bảo không vượt quá giới hạn cho phép.

Tương tự như bộ điều khiển được đề xuất trong phần 3.1., mặt trượt sai số tốc độ với tốc độ mong muốn được thiết kế trong phần 3.1.2.1 cũng được sử dụng.

Trong công thức (3.45), do $\mathbf{d}_m$ là véc-tơ bất định do tham số của mô hình toán chuyển động của tàu bất định, mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF được sử dụng để thay thế véc-tơ $\mathbf{d}_m$ bằng hàm xấp xỉ $\hat{\mathbf{d}}_m$.

Mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF được sử dụng trong bộ điều khiển gồm 3 tín hiệu vào là 3 sai số tốc độ (e_u, e_v, e_r); 1 lớp ẩn gồm n nút; 3 tín hiệu ra là 3 tín hiệu xấp xỉ ($\hat{d}_{mu}, \hat{d}_{mv}, \hat{d}_{mr}$) được vào tín hiệu điều khiển (hình 3.4). Mạng nơ-ron được huấn luyện online trong quá trình điều khiển từ 3 tín hiệu vào là 3 sai số tốc độ (e_u, e_v, e_r) để đưa ra 3 tín hiệu ra là 3 tín hiệu xấp xỉ ($\hat{d}_{mu}, \hat{d}_{mv}, \hat{d}_{mr}$).

Để đảm bảo các thành phần vận tốc của tàu tiến tới mặt trượt trong thời gian hữu hạn, ta thiết kế tín hiệu điều khiển theo lý thuyết đã được trình bày trong phần 2.2 như sau:

$$\mathbf{u}_c = \mathbf{A} - \hat{\mathbf{d}}_m - \mathbf{k} \operatorname{sgn}(\mathbf{s}) - \lambda |\mathbf{A}| \operatorname{sgn}(\mathbf{s}) \quad (3.56)$$

Luật thích nghi được thiết kế như sau:

$$\dot{\hat{\mathbf{W}}} = \frac{1}{\gamma} \mathbf{s}^T \mathbf{h}(\mathbf{e}_v) \quad (3.57)$$

$$\dot{\mathbf{k}} = \mathbf{a}_k |\mathbf{s}| \quad (3.58)$$

$$\dot{\lambda} = \mathbf{a}_\lambda |\mathbf{A}| |\mathbf{s}| \quad (3.59)$$

Trong đó: γ là một hằng số dương, $\mathbf{a}_k$ và $\mathbf{a}_\lambda$ là các tốc độ thích nghi.

Để giảm hiện tượng chattering, thay thế hàm không liên tục $\operatorname{sgn}()$ bằng hàm liên tục tron gần đúng $\tanh()$, khi đó công thức (3.56) được viết lại như sau:

$$\mathbf{u}_c = \mathbf{A} - \hat{\mathbf{d}}_m - \tanh(\mathbf{k}\mathbf{s}) - |\mathbf{A}| \tanh(\lambda \mathbf{s}) \quad (3.60)$$

3.3.2. Thiết kế tín hiệu điều khiển bão hòa khi có bộ giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành

Ta giả sử tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành được giới hạn như sau:

$$\mathbf{u}_{cl} \leq \mathbf{u}_c \leq \mathbf{u}_{cu} \quad (3.70)$$

Trong đó: $\mathbf{u}_{cl}$ và $\mathbf{u}_{cu}$ là chặn dưới và chặn trên của tín hiệu điều khiển $\mathbf{u}_c$.

Do đó, để giải quyết vấn đề này, một tín hiệu điều khiển bão hòa được đưa vào trong tín hiệu điều khiển. Khi đó, tín hiệu điều khiển được điều chỉnh lại khi qua bộ điều khiển bão hòa như sau:

$$\mathbf{u}_{cs} = \operatorname{sat}(\mathbf{u}_c - \mathbf{a}_s \mathbf{s}) = \begin{cases} \mathbf{u}_c - \mathbf{a}_s \mathbf{s} & \text{khi } \mathbf{u}_{cl} \leq (\mathbf{u}_c - \mathbf{a}_s \mathbf{s}) \leq \mathbf{u}_{cu} \\ \mathbf{u}_{cu} & \text{khi } (\mathbf{u}_c - \mathbf{a}_s \mathbf{s}) > \mathbf{u}_{cu} \\ \mathbf{u}_{cl} & \text{khi } (\mathbf{u}_c - \mathbf{a}_s \mathbf{s}) < \mathbf{u}_{cl} \end{cases} \quad (3.71)$$

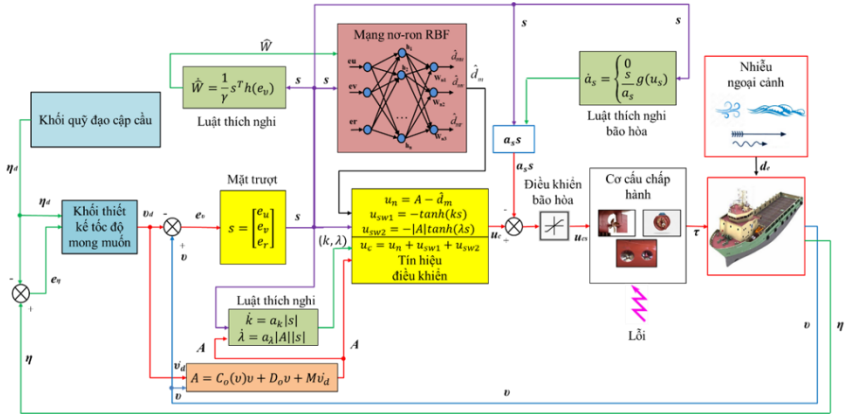
Trong đó: $\mathbf{a}_s \geq 0$ là hệ số điều khiển khuếch đại bão hòa.

Luật điều khiển thích nghi cho tín hiệu điều khiển bão hòa được thiết kế như sau:

$$\dot{\mathbf{a}}_s = \begin{cases} 0 & \text{khi } \mathbf{u}_{cl} \leq (\mathbf{u}_c - \mathbf{a}_s \mathbf{s}) \leq \mathbf{u}_{cu} \\ \frac{\mathbf{s}}{\mathbf{a}_s} \mathbf{g}(\mathbf{u}_s) & \text{khi } (\mathbf{u}_c - \mathbf{a}_s \mathbf{s}) > \mathbf{u}_{cu} \text{ hoặc } (\mathbf{u}_c - \mathbf{a}_s \mathbf{s}) < \mathbf{u}_{cl} \end{cases} \quad (3.72)$$

Trong đó:

$$g(u_s) = \begin{cases} (u_c - u_{cu}) \text{ khi } u_c > u_{cu} \text{ và } s < 0 \\ (u_c - u_{cl}) \text{ khi } u_c < u_{cl} \text{ và } s > 0 \\ 0 \text{ trong các điều kiện còn lại} \end{cases} \quad (3.73)$$



Hình 3.5. Sơ đồ mô tả thuật toán của bộ điều khiển sửa lỗi thích nghi cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành

3.4. Kết luận chương 3

Trong chương 3, luận án đã giải quyết được các vấn đề sau:

- Xây dựng thuật toán thiết kế bộ điều khiển trượt cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động. Chứng minh được tính ổn định của bộ điều khiển được đề xuất theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov;
- Xây dựng thuật toán thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định. Chứng minh được tính ổn định của bộ điều khiển được đề xuất theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov;
- Xây dựng thuật toán thiết kế bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành. Chứng minh được tính ổn định của bộ điều khiển được đề xuất theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov.

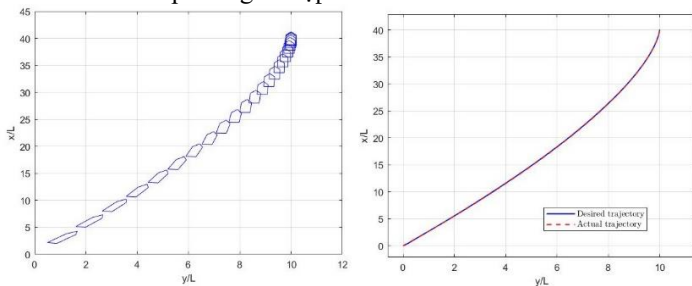
CHƯƠNG 4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG ĐÁNH GIÁ CÁC BỘ ĐIỀU KHIỂN ĐƯỢC ĐỀ XUẤT

4.1. Mô hình tàu được sử dụng cho mô phỏng

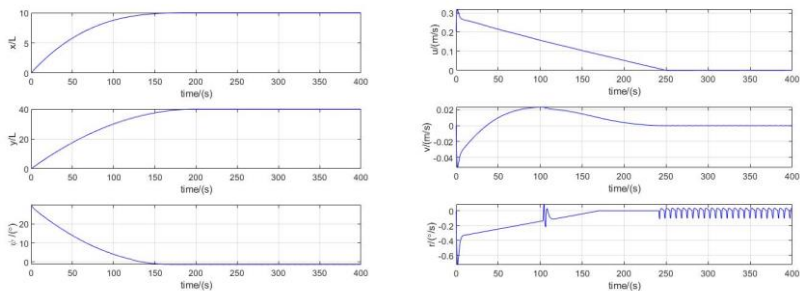
Nhằm đánh giá khả năng điều khiển của bộ điều khiển được đề xuất, tác giả sử dụng mô hình tàu “Cyber ship II”, là bản sao tỉ lệ 1:70 của một tàu dịch vụ được phát triển bởi viện Marine Cybernetics. Đây là tàu đủ cơ cấu chấp hành với 2 chân vịt và 2 bánh lái, và 1 chân vịt mũi. Thông số động học của mô hình tàu “Cyber ship II” được tham khảo trong tài liệu [55].

4.2. Kết quả mô phỏng Matlab của bộ điều khiển trượt cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động

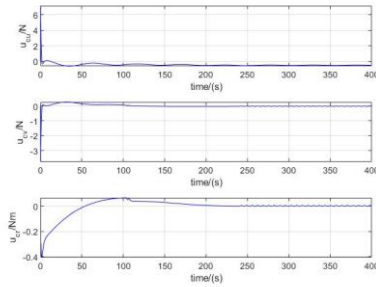
Bộ điều khiển trượt tự động tàu cập cầu (SMC) đã điều khiển được tàu từ vị trí ban đầu đến được vị trí cầu tàu và hoàn thành công việc cập cầu dưới tác động của nhiễu ngoại cảnh theo cả 3 phương án cập cầu khác nhau.



Hình 4.1. Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)



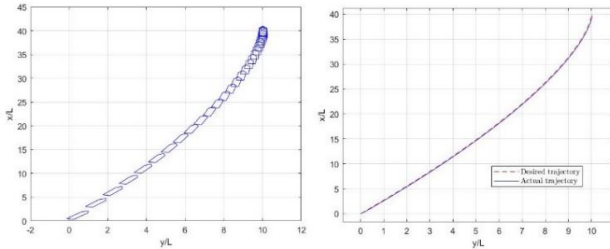
Hình 4.2. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ và đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)



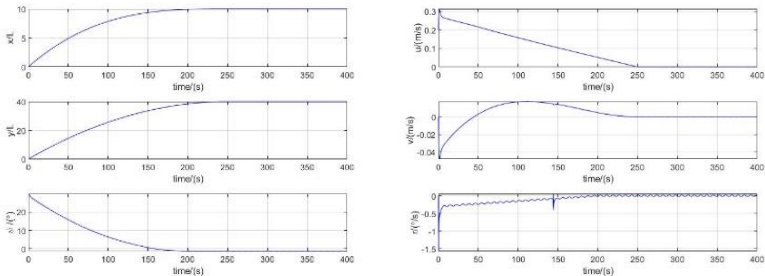
Hình 4.3. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)

4.3. Kết quả mô phỏng Matlab của bộ điều khiển trượt thích nghi cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định

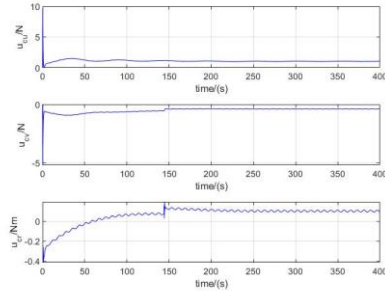
Bộ điều khiển ANNSMC đã điều khiển được tàu từ vị trí ban đầu đến được vị trí cầu tàu và hoàn thành công việc cập cầu dưới tác động của véc-tơ bất định tổng hợp theo cả 3 phương án cập cầu khác nhau.



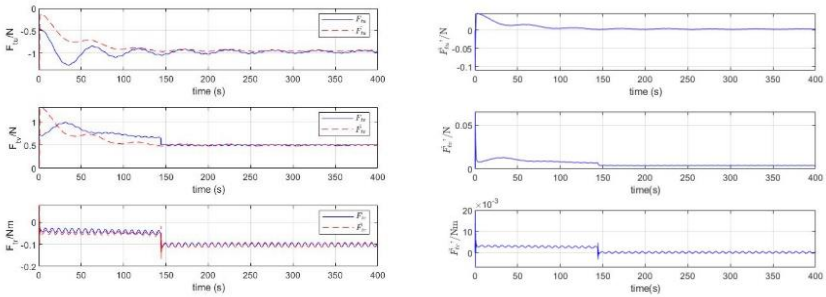
Hình 4.13. Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)



Hình 4.14. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ và đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)



Hình 4.15. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cấp cầu trực tiếp (Plan 1)



Hình 4.16. So sánh véc-tơ hàm bất định tổng hợp F_t và véc-tơ hàm xấp xỉ $\hat{F}_t$ và đồ thị véc-tơ sai số của mạng nơ-ron RBF

Mạng nơ-ron RBF có khả năng xấp xỉ véc-tơ hàm bất định tổng hợp F_t với sai số $\hat{F}_t$ gần bằng 0. Mặc dù vậy, bộ điều khiển ANNSMC vẫn xảy ra hiện tượng chattering do ảnh hưởng của các thành phần bất định ngẫu nhiên biến đổi nhanh theo thời gian.

4.4. Kết quả mô phỏng Matlab của bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu khi cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển

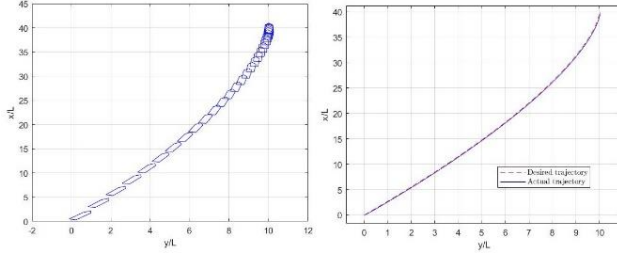
Khả năng điều khiển của bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo (ANNFTSMC) sẽ được đánh giá trong các trường hợp sau:

- Tự động cập cầu khi cơ cấu chấp hành không xảy ra lỗi;
- Tự động cập cầu khi cơ cấu chấp hành xảy ra lỗi;
- Tự động cập cầu khi có cấu chấp hành xảy ra lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành.

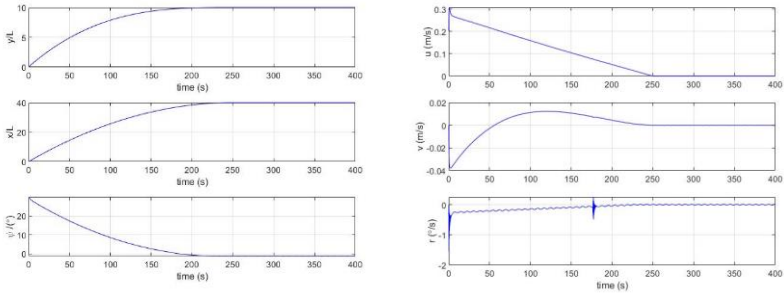
4.4.1. Tự động cập cầu khi cơ cấu chấp hành không xảy ra lỗi

Mô phỏng được thực hiện khi cơ cấu chấp hành không xảy ra lỗi hay hệ số sức khỏe của cơ cấu chấp hành $H=1$.

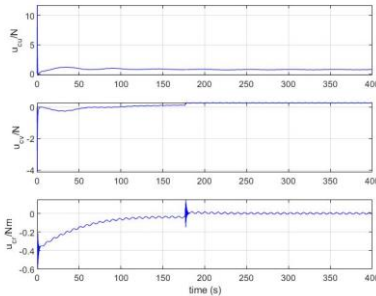
Bộ điều khiển ANNFTSMC đã điều khiển được tàu từ vị trí ban đầu đến được vị trí cầu tàu và hoàn thành công việc cập cầu dưới tác động của véc-tơ bất định tổng hợp theo cả 3 phương án cập cầu khác nhau.



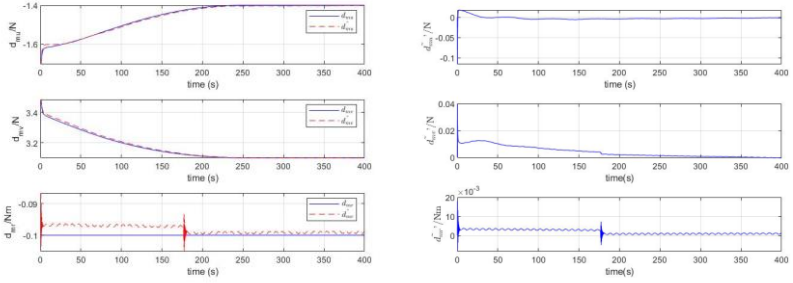
Hình 4.31. Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)



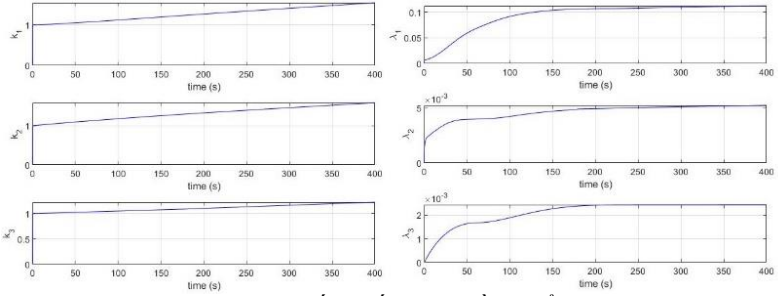
Hình 4.32. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x, y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)



Hình 4.33. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)



Hình 4.34. So sánh véc-tơ bất định do mô hình toán chuyển động của tàu bất định d_m và véc-tơ hàm xấp xỉ $\tilde{d}_m$ và đồ thị véc-tơ sai số của mạng nơ-ron RBF



Hình 4.35. Hệ số khuếch đại điều khiển k và λ

Mạng nơ-ron RBF có khả năng xấp xỉ véc-tơ hàm bất định do tham số của mô hình bất định d_m với sai số $\tilde{d}_m$ gần bằng 0. Mặc dù vậy, bộ điều khiển ANNFTSMC vẫn xảy ra hiện tượng chattering do ảnh hưởng của các thành phần bất định ngẫu nhiên biến đổi nhanh theo thời gian.

4.4.2. Tự động cập cầu khi cơ cấu chấp hành xảy ra lỗi

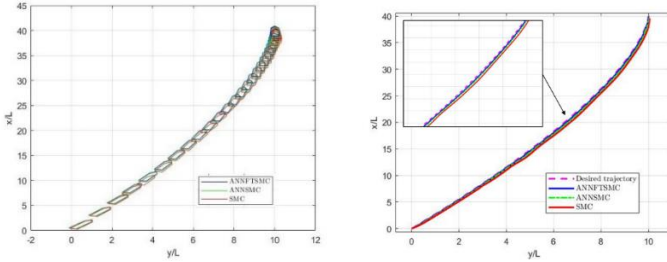
Mô phỏng được thực hiện khi các cơ cấu chấp hành bị lỗi một phần (khi lực đẩy tạo ra bị suy giảm so với lực đẩy theo yêu cầu) trên cả 3 chuyển động: chuyển động theo trục dọc tàu (Surge); chuyển động dịch chuyển ngang (Sway) và chuyển động xoay (Yaw) tại các thời điểm khác nhau. Hệ số sức khỏe của các cơ cấu chấp hành theo 3 chuyển động trên mặt phẳng nằm ngang như sau:

$$h_1 = \begin{cases} 1 & \text{khi } t < 30s \\ 0.4 & \text{khi } t \geq 30s \end{cases}; h_2 = \begin{cases} 1 & \text{khi } t < 50s \\ 0.5 & \text{khi } t \geq 50s \end{cases}; h_3 = \begin{cases} 1 & \text{khi } t < 80s \\ 0.6 & \text{khi } t \geq 80s \end{cases} \quad (4.3)$$

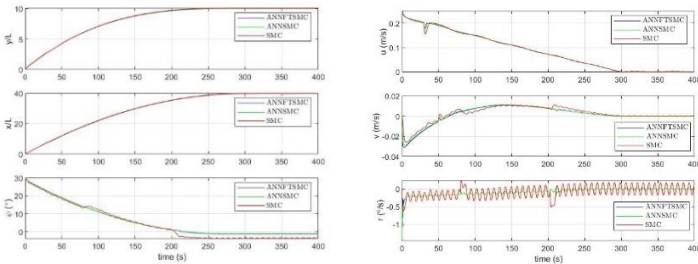
Để đánh giá khả năng điều khiển của bộ điều khiển trượt sửa lỗi ANNFTSMC trong phần 3.3, mô phỏng sẽ được thực hiện so sánh với các bộ điều khiển trượt SMC được đề xuất trong phần 3.1 và bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron

nhân tạo ANNSMC được đề xuất trong phần 3.2. Sai số bình phương trung bình sau được sử dụng để so sánh chất lượng bám quỹ đạo của các bộ điều khiển:

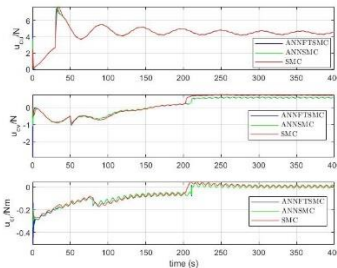
$$E_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{e_x^2 + e_y^2}; \quad E_{\psi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{e_{\psi}^2} \quad (4.6)$$



Hình 4.52. Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) với các bộ điều khiển khác nhau khi có lỗi cơ cấu chấp hành



Hình 4.53. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ và đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) khi có lỗi cơ cấu chấp hành



Hình 4.54. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) khi có lỗi cơ cấu chấp hành

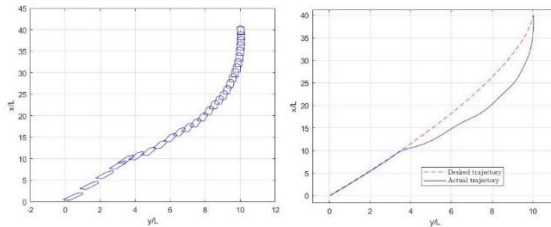
Bảng 4.2. So sánh sai số bình phương trung bình giữa các bộ điều khiển khác nhau

Sai số bình phương trung bình	Phương án cập cầu trực tiếp Plan 1		Phương án cập cầu gián tiếp Plan 2		Phương án cập cầu gián tiếp Plan 3	
	$\ E_{xy}\ $	$\ E_{\psi}\ $	$\ E_{xy}\ $	$\ E_{\psi}\ $	$\ E_{xy}\ $	$\ E_{\psi}\ $
ANNFTSMC	0.1345	0.0167	0.0757	0.0198	0.0793	0.0206
ANNSMC	0.2976	0.0191	0.1594	0.0267	0.1277	0.0231
SMC	1.12	1.467	4.64	11.9	4.18	13.16

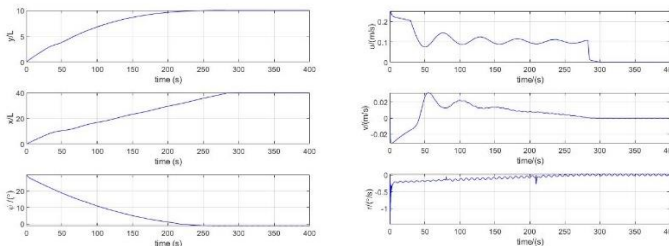
Theo cả 3 phương án cập cầu khác nhau, bộ điều khiển ANNFTSMC có khả năng bám theo quỹ đạo cập cầu dự kiến tốt hơn bộ điều khiển ANNSMC và SMC. Theo bảng 4.2, sai số bình phương trung bình E_{xy} và E_{ψ} cho thấy bộ điều khiển ANNFTSMC nhỏ hơn so với bộ điều khiển ANNSMC và SMC.

4.5.3. Tự động cập cầu khi cơ cấu chấp hành xảy ra lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành.

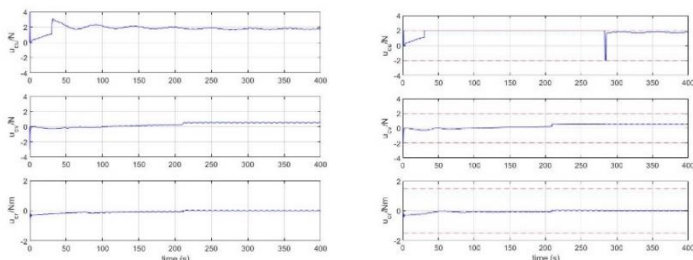
Trong mô phỏng này, cơ cấu chấp hành bị lỗi tương tự như trong các trường hợp mô phỏng được trình bày trong phần 4.5.2. Tuy nhiên, giới hạn cho phép tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành theo tài liệu [54] như sau $[-2N \ 2N]$, $[-2N \ 2N]$, $[-1.5Nm \ 1.5Nm]$.



Hình 4.70. Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành



Hình 4.71. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ và đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành



Hình 4.72. So sánh tín hiệu điều khiển khi không có và có giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành với phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)

Dưới tác dụng khi cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành, chất lượng bám quỹ đạo của tàu không tránh khỏi bị ảnh hưởng tuy nhiên bộ điều khiển ANNFTSMC vẫn có khả năng đưa tàu cập cầu đến vị trí, hướng mũi tàu dự kiến đồng thời các vận tốc tàu về không tại vị trí cầu tàu. Khi có giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành, tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành được giữ trong giới hạn cho phép trong suốt quá trình cập cầu.

4.5. Kết luận chương 4

Trong chương 4, luận án đã giải quyết được các vấn đề sau:

- Thực hiện mô phỏng Matlab cho thấy các bộ điều khiển được đề xuất có khả năng điều khiển tàu cập cầu theo các phương án cập cầu dự kiến khác nhau;

- Bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo có khả năng giải quyết ảnh hưởng của thành phần bất định của tham số mô hình tàu và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định trong quá trình điều khiển tàu cập cầu. Mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF có khả năng xấp xỉ được véc-tơ bất định tổng hợp với sai số nhỏ;

- Bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi có khả năng điều khiển tàu cập cầu trong điều kiện không và có lỗi một phần của các cơ cấu chấp hành. Bộ điều khiển sửa lỗi thụ động nên không cần bộ nhận dạng và phát hiện lỗi, hạn chế các cảm biến cần thiết, đơn giản hóa trong quá trình thiết kế. Tác động của thành phần bất định do tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định đều được bộ điều khiển giải quyết. Khi có giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành, bộ điều khiển vẫn hoạt động ổn định đạt được yêu cầu tự động điều khiển tàu cập cầu;

- Trên cơ sở so sánh các bộ điều khiển được đề xuất trong chương 3 trong điều kiện khi có lỗi một phần các cơ cấu chấp hành, bộ điều khiển sửa lỗi thích nghi ANNFTSMC đề xuất trong phần 3.3 có khả năng điều khiển bám quỹ đạo cập cầu và hướng cập cầu dự kiến tốt hơn so với các bộ điều khiển trượt SMC đề xuất trong phần 3.1 và bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo ANNSMC đề xuất trong phần 3.2.

KẾT LUẬN

1. Những vấn đề đã được giải quyết

Trong quá trình thực hiện đề tài, luận án đã đạt được mục đích nghiên cứu đề ra, với các kết quả cụ thể như sau:

- Đã nghiên cứu thiết kế được bộ điều khiển trượt cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động. Luận án đã chứng minh được bộ điều khiển đề xuất ổn định theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov;

- Đã nghiên cứu thiết kế được bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định. Luật điều khiển trượt được tích hợp với các cơ cấu thích nghi và mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm để giải quyết yếu tố bất định của mô hình toán chuyển động của tàu và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định. Luận án đã chứng minh được bộ điều khiển đề xuất ổn định theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov;

- Đã nghiên cứu thiết kế được bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành. Khi có ảnh hưởng đồng thời của tham số của mô hình bất định, nhiễu ngoại cảnh tác động bất định, cơ cấu chấp hành bị lỗi một phần và tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành bị giới hạn, bộ điều khiển được tích hợp thêm các cơ cấu điều khiển lỗi và thành phần tín hiệu điều khiển bão hòa. Luận án đã chứng minh được bộ điều khiển đề xuất ổn định theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov. Bộ điều khiển cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu giải quyết đồng thời vấn đề lỗi cơ cấu chấp hành và tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành bị giới hạn chưa được đề cập trong các công trình nghiên cứu trước đây;

- Thực hiện mô phỏng kiểm chứng tính ổn định và khả năng điều khiển của các bộ điều khiển được đề xuất.

Như vậy, với các kết quả đã đạt được của luận án, luận án có những đóng góp nhất định về mặt khoa học và thực tiễn.

2. Hướng nghiên cứu tiếp theo của đề tài

Những vấn đề trong quá trình thực hiện đề tài, luận án còn chưa giải quyết được và sẽ được tiếp tục nghiên cứu trong các công trình nghiên cứu tiếp theo bao gồm:

- Bộ điều khiển sửa lỗi mới xét đến trường hợp cơ cấu chấp hành bị lỗi một phần. Trường hợp cơ cấu chấp hành bị kẹt, lỗi toàn phần chưa được xét đến. Ngoài ra, lỗi cảm biến và lỗi thành phần trong hệ thống cũng chưa được xem xét;

- Bộ điều khiển chưa giải quyết được hoàn toàn hiện tượng chattering;

- Bộ điều khiển chưa được kiểm nghiệm trên một mô hình tàu thực tế hoặc trên một con tàu thực.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN ĐỀ TÀI LUẬN ÁN

I. Công trình công bố trong nước

1. Vũ Sơn Tùng, Nguyễn Thái Dương, Nguyễn Văn Sướng (2024). *Phân tích tổng quan nghiên cứu điều khiển sửa lỗi trong điều khiển tàu thủy*, Tạp chí Giao thông vận tải, số tháng 12/2024, ISSN 2354-0818, tr 136-139.

2. Vũ Sơn Tùng, Nguyễn Thái Dương, Nguyễn Văn Sướng (2024). *Nghiên cứu tự động điều khiển tàu thủy cập cầu dựa trên bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi khi có cơ cấu chấp hành bị lỗi*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, số 79 - 08/2024, ISSN 1859-316X, tr 13-19.

3. Vũ Sơn Tùng, Nguyễn Thái Dương, Nguyễn Văn Sướng (2023). *Nghiên cứu tự động điều khiển cập cầu cho tàu biển với nhiễu ngoại cảnh tác động bất định dựa trên bộ điều khiển trượt tích hợp bộ quan sát nhiễu phi tuyến*, Tạp chí Giao thông vận tải, số tháng 12/2023, ISSN 2354-0818, tr. 86-88.

4. Vũ Sơn Tùng, Nguyễn Thái Dương, Nguyễn Văn Sướng (2023). *Nghiên cứu tự động điều khiển cập cầu cho tàu biển dựa trên bộ điều khiển trượt với các quỹ đạo cập cầu khác nhau*, Tạp chí Giao thông vận tải, số tháng 09/2023, ISSN 2354-0818, tr. 135-138.

II. Công trình công bố quốc tế

1. Vu Son Tung, Nguyen Thai Duong, Dang Van Hai, Nguyen Van Suong (2025). *Adaptive neural network fault-tolerant sliding mode control for ship berthing with actuator faults and input saturation*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 17, 100644, ISSN 2092-6782, Accepted, (SCIE, Q2). <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2025.100644>

2. Vu Son Tung, Nguyen Thai Duong, Nguyen Van Suong (2022). *A study on auto-berthing controller based on sliding mode control with different berthing plan*, The 20th Asia Maritime & Fisheries University Forum 2022, pp. 222-238.

3. Vu Son Tung, Nguyen Thai Duong, Nguyen Van Suong (2022). *Adaptive neural network sliding mode auto-berthing controller for full-actuated vessel with uncertain dynamics and unknown disturbances*, The 20th Asia Maritime & Fisheries University Forum 2022, pp. 239-252.