

BỘ GIAO THÔNG VẬN TẢI

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

TRƯỜNG ĐẠI HỌC HÀNG HẢI VIỆT NAM



NGUYỄN HỮU QUYỀN

**NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP ĐIỀU KHIỂN BÁM QUỲ ĐẠO TÀU
THỦY CỎ RÀNG BUỘC TÍN HIỆU VÀ BẤT ĐỊNH HÀM Ở ĐẦU VÀO**

Tóm tắt luận án tiến sĩ kỹ thuật

NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN VÀ TỰ ĐỘNG HÓA

MÃ SỐ: 9520216

CHUYÊN NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN VÀ TỰ ĐỘNG HÓA

Công trình được hoàn thành tại Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.

Người hướng dẫn khoa học: **PGS. TS. Trần Anh Dũng**

Phản biện 1: **GS.TS Nguyễn Doãn Phước**

Phản biện 2: **PGS.TS Nguyễn Tiến Ban**

Phản biện 3: **PGS.TS Lưu Kim Thành**

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án tiến sĩ cấp Trường họp tại Trường Đại học Hàng hải Việt Nam vào hồi.....giờ.....phút ngày....tháng....năm....20..

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

Nghị quyết số 36-NQ/TW chỉ rõ chiến lược phát triển bền vững kinh tế biển Việt Nam đến năm 2030 tầm nhìn đến năm 2045. Trong những năm gần đây, các cơ sở nghiên cứu, nhà máy đóng tàu và các doanh nghiệp vận tải biển trong nước đã không ngừng nâng cao năng lực thiết kế, đổi mới về mặt công nghệ, áp dụng khoa học kỹ thuật tiên tiến nhất để thiết kế đóng mới hàng loạt tàu chở hàng với trọng tải lớn, tàu nghiên cứu biển, tàu kiểm ngư, tàu chuyên dụng cảnh sát biển và bộ đội biên phòng,... Cùng với sự phát triển bùng nổ của công nghệ điện tử-tin học và cách mạng công nghiệp 4.0 là việc áp dụng các trang thiết bị kỹ thuật, công nghệ tự động hóa hiện đại trên những con tàu này trong các hệ thống như: lái tự động, điều khiển tàu bám quỹ đạo, hệ thống ổn định động...

Trong lĩnh vực nghiên cứu, các nhà khoa học trong và ngoài nước đã không ngừng quan tâm, nghiên cứu tổng hợp các bộ điều khiển áp dụng cho tàu thủy. Từ những bộ điều khiển kinh điển như PID [28], điều khiển tuyến tính LQR (Liner Quadratic Regulator), LQG (Linear Quadratic Gaussian) [33],... đến các bộ điều khiển phi tuyến mang tính thời sự như: Backstepping [70], [63], trượt SMC (Sliding Mode Control) [10], [48], điều khiển mặt động DSC (Dynamic Surface Control) [22], điều khiển thích nghi [68], [75] hay các bộ điều khiển phi tuyến kết hợp với điều khiển mờ, Neural để giải quyết các yếu tố bất định trong mô hình tàu [14],... Bài toán nghiên cứu về điều khiển chuyển động tàu thủy đặt ra nhiều khó khăn, thách thức với các nhà khoa học khi nghiên cứu. Bởi lý do, tàu thủy là phương tiện hàng hải hoạt động trong môi trường phức tạp và không có cấu trúc xác định, chịu sự tác động của yếu tố nhiễu ngẫu nhiên: sóng, gió và dòng chảy... thứ hai, mô hình động lực học của tàu thủy là mô hình phi tuyến bất định, các tham số trong mô hình tàu phụ thuộc vào các biến trạng thái điều khiển [24].

Tổng quan các công trình cho thấy chưa có công trình nào giải quyết kết hợp chung những vấn đề như: bám quỹ đạo, ràng buộc tín hiệu điều khiển, sử dụng mô hình tàu có chứa thành phần bất định và nhiễu tác động ngẫu nhiên... trong một bộ điều khiển.

Do đó việc nghiên cứu, áp dụng một phương pháp điều khiển mới để điều khiển chuyển động tàu thủy đáp ứng yêu cầu trên sẽ phần làm phong phú thêm các phương pháp điều khiển và nâng cao chất lượng điều khiển chuyển động tàu thủy.

2. Mục đích và nhiệm vụ của đề tài

Mục đích của đề tài là nghiên cứu ứng dụng điều khiển dự báo theo mô hình MPC (Model Predictive Control) với nguyên tắc trượt dọc trên trục thời gian RHC (Receding Horizon Control), trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến để thiết kế bộ điều khiển tàu thủy bám quỹ đạo, có ràng buộc tín hiệu và bất định hàm ở đầu vào.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của luận án

Đối tượng nghiên cứu của đề tài

Đối tượng nghiên cứu của luận án là tàu nổi, choán nước, có mô hình toán dạng thiếu cơ cấu chấp hành (Underactuated) trong bài toán điều khiển tàu bám theo quỹ đạo đặt.

Phạm vi nghiên cứu của đề tài

Nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển bám theo quỹ đạo đặt đối với mô hình toán tàu nổi, choán nước, ba bậc tự do dạng thiếu cơ cấu chấp hành, xét trên mặt phẳng ngang khi có ràng buộc tín hiệu điều khiển và bất định hàm ở đầu vào (không xét đến mô hình cơ cấu thực hiện của tàu). Mô hình toán mô tả động lực học tàu thủy trên mặt phẳng ngang có chứa thành phần bất định, chịu ảnh hưởng của yếu tố nhiễu ngẫu nhiên từ môi trường ngoài. Tàu hoạt động ở chế độ chạy kiểm tra tính năng điều động, quay trở trong điều kiện hạn chế về sóng, gió, dòng chảy... không lớn hơn cấp 5, điều này có nghĩa là các nhiễu ngẫu nhiên tác động từ môi trường là không lớn.

4. Phương pháp nghiên cứu

Sử dụng phương pháp nghiên cứu đi từ phân tích, đánh giá và sau đó tổng hợp.

5. Ý nghĩa lý luận và thực tiễn

Về mặt phương pháp luận, luận án hướng tới.

Luận án đưa ra phương pháp luận, đề xuất áp dụng một bộ điều khiển phi tuyến mới để điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt. Cụ thể là, bộ điều khiển theo nguyên lý RHC (trượt dọc trên trục thời gian), trên nền điều khiển dự báo MPC cho đối tượng tàu thủy, có mô hình toán dạng thiếu cơ cấu chấp hành dựa trên kỹ thuật tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến. Luận án sẽ góp phần bổ sung và làm phong phú thêm các phương pháp điều khiển chuyển động tàu thủy.

Về mặt thực tiễn, với mô hình và thuật toán điều khiển đề xuất, luận án hướng tới.

Kết quả của luận án sẽ hiện thực hóa vấn đề điều khiển chuyển động đối tượng có mô hình toán dạng thiếu cơ cấu chấp hành bám theo quỹ đạo đặt. Cụ thể là tàu thủy, đối tượng có tính phi tuyến lớn, trong mô hình có chứa thêm thành phần bất định và chỉ có hai tác động điều khiển là bánh lái và chân vịt chính phía sau lái.

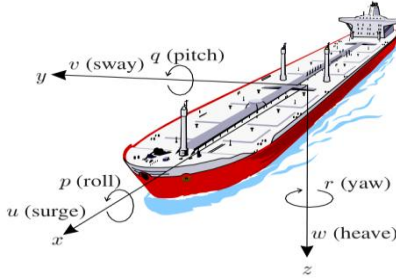
6. Bố cục của luận án

Nội dung luận án được trình bày trong 4 chương.

CHƯƠNG 1 MÔ HÌNH TOÁN VÀ TỔNG QUAN BÀI TOÁN ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG TÀU THỦY

1.1. Mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy

Động lực học tàu thủy áp dụng bởi định luật Newton, trong đó coi tàu thủy như một vật rắn chuyển động trong môi trường chất lỏng và chuyển động của tàu thủy gồm 6 bậc tự do (6 DOF: Degree Of Freedom) [24], [29]. Các thành phần chuyển động tàu thủy được mô tả như hình 1.1 bao gồm các chuyển động: trượt dọc (surge), trượt ngang (sway), trượt đứng (heave), lắc ngang (roll), lắc dọc (pitch) và quay trở (yaw).



Hình 1.1 Mô tả trạng thái chuyển động tàu thủy [24]

Mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy 6 bậc tự do

Động lực học mô tả chuyển động tàu thủy 6 bậc tự do được viết tổng quát như sau [28]

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{v} \\ M\dot{\underline{v}} + C(\underline{v})\underline{v} + D(\underline{v})\underline{v} + g(\underline{\eta}) = \underline{\tau} + \underline{\tau}_w \end{cases} \quad (1.12)$$

trong đó: $\underline{\eta} = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ r]^T \in R^6$ - véc-tơ vị trí, hướng trong hệ tọa độ trái đất (e-frame),

$J(\underline{\eta})$ - ma trận chuyển đổi, $\underline{v} = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T \in R^6$ - véc-tơ vận tốc dài và vận tốc góc trong hệ tọa độ gắn với thân tàu (b-frame), M - ma trận quán tính, $C(\underline{v})$ là ma trận coriolis và hướng tâm, $D(\underline{v})$ - ma trận giảm chấn phi tuyến thủy động lực học. $\underline{\tau}_w$ - nhiễu tác động từ môi trường, $\underline{\tau}$ - lực và mô-men được tạo ra bởi cơ cấu thực hiện.

Mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy ba bậc tự do

Chuyển động của tàu thủy xét trong mặt phẳng ngang với mô hình ba bậc tự do theo [25] được cho bởi (1.13) khi bỏ qua thành phần lắc ngang p , lắc dọc q , trượt đứng w .

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{\nu} \\ M\dot{\underline{\nu}} + C(\underline{\nu})\underline{\nu} + D(\underline{\nu})\underline{\nu} + g(\underline{\eta}) = \underline{\tau} + \underline{\tau}_w \end{cases} \quad (1.13)$$

trong đó: $\underline{\eta} = [x \ y \ \psi]^T \in R^3$, $\underline{\nu} = [u \ v \ r]^T \in R^3$, $J(\underline{\eta}), M, C(\underline{\nu}), D(\underline{\nu}) \in R^3$ và

$\underline{\tau} \in R^3 = [\tau_u \ \tau_v \ \tau_r]^T$ - là lực và mô-men được tạo ra bởi cơ cấu thực hiện của tàu.

Theo Fossen [24], [28] nếu $\underline{\tau} \in R^3 = [\tau_u \ \tau_v \ \tau_r]^T$ thì mô hình toán được gọi là mô hình đủ cơ cấu chấp hành (Full Actuated).

Nếu $\underline{\tau} = [\tau_u \ 0 \ \tau_r]^T$ tức là trong mô hình toán của tàu không có thành phần lực gây ra trượt ngang τ_v (phần tử thực hiện không có cơ cấu đẩy ngang) thì mô hình toán được gọi là mô hình thiếu cơ cấu chấp hành (Underactuated).

Mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành trên mặt phẳng ngang dạng mô hình xác định.

Mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành trên mặt phẳng ngang dạng xác định mô tả như (1.29) có được khi giả định rằng các thông số của ma trận M , $C(\underline{\nu})$, $D(\underline{\nu})$ trong (1.13) là xác định được hoàn toàn, các thành phần khó xác định coi như bằng không, $g(\underline{\eta}) = 0$ và không có nhiễu tác động [21].

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{\nu} \\ M\dot{\underline{\nu}} + C(\underline{\nu})\underline{\nu} + D(\underline{\nu})\underline{\nu} + g(\underline{\eta}) = F\underline{\tau} \end{cases} \quad (1.29)$$

trong đó: $\underline{\eta} = [x \ y \ \psi]^T \in R^3$, $\underline{\nu} = [u \ v \ r]^T \in R^3$, F - ma trận phân bổ lực, với tàu thủy chỉ có 2 cơ cấu thực hiện là chân vịt và bánh lái chính phía sau lái thì ma trận phân bổ

lực được đưa ra như sau: $F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, khi đó $\underline{\tau} = [\tau_u \ \tau_r]^T$.

Mô hình toán bất định mô tả chuyển động tàu thủy ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành trên mặt phẳng ngang.

Thực tế việc xác định hệ số trong ma trận $M, C(\underline{\nu})$ trong (1.13) chỉ là tương đối và dựa trên nhiều giả thiết, đồng thời việc xác định đầy đủ những hệ số trong ma trận suy giảm thủy động lực học phi tuyến $D(\underline{\nu})$ là rất phức tạp, ngoài ra các thành phần hệ số trong các ma trận trên còn phụ thuộc vào các yếu tố khác như trọng tải hàng hóa trên tàu, phụ thuộc vào vùng nước tàu di chuyển qua. Do đó có thể đưa ra mô hình toán tàu thủy ba bậc tự do dạng thiếu cơ cấu chấp hành thể hiện đầy đủ tính chất động học của con tàu bằng cách gộp những thành phần bất định (không xác định) trong mô hình toán và nhiễu từ môi trường bên ngoài tác động vào đối tượng thành một véc-tơ bất định, được luận án ký hiệu là $\underline{\Delta}(\underline{\eta}, \underline{\nu})$. Khi đó mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành trên mặt phẳng ngang có chứa thành phần bất định được đưa ra như sau [16], [18], [21]:

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{v} \\ M\dot{\underline{v}} + C(\underline{v})\underline{v} + D(\underline{v})\underline{v} + g(\underline{\eta}) = F\underline{\tau} + \underline{\Delta}(\underline{\eta}, \underline{v}) \end{cases} \quad (1.33)$$

trong đó: $\underline{\Delta}(\underline{\eta}, \underline{v})$ - véc-tơ lực và mô-men từ các thành phần bất định của mô hình tàu và nhiễu loạn tác động từ môi trường bên ngoài.

1.2. Tổng quan các nghiên cứu về điều khiển chuyển động tàu thủy

1.2.1. Tình hình nghiên cứu trong nước

Trong những năm gần đây với sự phát triển của ngành công nghiệp đóng tàu, điều khiển chuyển động tàu thủy đã được các nhà khoa học trong nước quan tâm, nghiên cứu như: Tác giả công trình [3] nghiên cứu ứng dụng kỹ thuật tự động hóa và vi xử lý cho hệ thống lái tàu dùng cho những con tàu đóng tại Việt Nam, công trình [7] nghiên cứu kiến trúc hướng mô hình kết hợp với Real Time UML/MARTE trong thiết kế hệ thống điều khiển cho phương tiện không người lái tự hành trên mặt nước. Công trình [8] đã nghiên cứu ứng dụng lý thuyết hiện đại vào điều khiển lái tàu, sử dụng lý thuyết điều khiển thích nghi, trượt, Backstepping và mạng Neural để điều khiển bám quỹ đạo cho tàu nổi có mô hình đủ cơ cấu chấp hành sử dụng mô hình toán 3 bậc tự do.

1.2.2. Tình hình nghiên cứu ngoài nước

Tổng quan về điều khiển chuyển động tàu thủy đủ cơ cấu chấp hành: đối với tàu với mô hình đủ cơ cấu chấp hành tổng quan lại có 3 hướng nghiên cứu chính.

Nghiên cứu xây dựng bộ điều khiển lái tự động tàu thủy với mô hình tuyến tính sử dụng điều khiển kinh điển PID với mô hình tàu dạng đơn giản hóa NOMOTO bậc một, bậc hai, hay các bộ điều khiển tuyến tính LQR (Linear Quadratic Regulator), LQG (Linear Quadratic Gaussin) trong [24], [28].

Điều khiển phi tuyến với các bộ điều khiển như: Backstepping [23], [71], điều khiển trượt SMC (Sliding Mode Control) [37], [47], điều khiển bề mặt động DSC (Dynamic Surface Control) [61], điều khiển cửa sổ động DWC (Dynamic Windown based Control) [49], điều khiển dự báo MPC (Model Predictive Control) [52], điều khiển thích nghi [42],...trong bài toán điều khiển bám quỹ đạo và định vị động.

Các bộ điều khiển kép như: Backstepping - Neural trong [15], [73], [76], Backstepping - thích nghi trong [61], Backstepping - trượt thích nghi trong [37], đưa ra đề giải quyết các yếu tố bất định trong mô hình tàu và nhiễu ngẫu nhiên tác động từ môi trường.

Tổng quan về điều khiển chuyển động tàu thủy thiếu cơ cấu chấp hành: Các phương pháp điều khiển chuyển động tàu thiếu cơ cấu chấp hành rất phong phú và đa dạng, được tổng hợp lại như sau:

Điều khiển tuyến tính sử dụng mô hình đơn giản của NOMOTO, mô hình tuyến tính Sway-Yaw...sử dụng trong bài toán ổn định hướng đi [36], [50] trong bài toán điều khiển hệ thống lái tự động ổn định tàu theo hướng đi cho trước.

Điều khiển phi tuyến sử dụng mô hình phi tuyến đơn giản hóa của Norrbín với mục đích ổn định hướng đi trong công trình [66] hay bộ điều khiển theo luật điều khiển H_∞ thiết kế với mục đích ổn định giảm lắc ngang trên tàu Container trong công trình [34].

Điều khiển phi tuyến sử dụng mô hình đối tượng phi tuyến trong bài toán điều khiển tàu bám quỹ đạo với các bộ điều khiển phi tuyến như: Backstepping [16], [17], [30], điều khiển trượt SMC [60], điều khiển bề mặt động DSC [22], điều khiển dự báo MPC [48], [53], [62] đã được nghiên cứu và áp dụng trong bài toán điều khiển với mô hình tàu xác định. Để giải quyết bài toán khi mô hình tàu có chứa thành phần bất định, một số giải pháp được các tác giả đưa ra như: sử dụng phép biến đổi tọa độ [67], sử dụng bộ lọc Kalman UKF (Unscented Kalman Filter) để loại bỏ nhiễu nhiều ẩn trong mô hình toán

[69], sử dụng phương trình động lực học sai lệch Serret-Frenet [70].

Một số công trình đã kết hợp một số lý thuyết hiện đại lại với nhau tạo thành bộ điều khiển kép như: điều khiển trượt (SMC) kết hợp Neural [14], điều khiển thích nghi kết hợp Neural [63], trượt thích nghi [72], trượt thích nghi kết hợp bộ quan sát phi tuyến [68], [75], thích nghi Neural kết hợp trượt - Backstepping [64] nhằm nâng cao chất lượng điều khiển chuyển động tàu thủy.

1.3. Hướng nghiên cứu của luận án

Vấn đề đặt ra trong luận án

Từ phân tích tổng quan trên, luận án đặt ra hướng nghiên cứu là: nghiên cứu ứng dụng một phương pháp điều khiển mới, để giải quyết kết hợp chung những vấn đề như bám quỹ đạo, ràng buộc tín hiệu điều khiển, mô hình tàu có chứa thành phần bất định và nhiễu tác động ngẫu nhiên trong một bộ điều khiển, với mục đích điều khiển đối tượng tàu nổi có mô hình toán dạng thiếu cơ cấu chấp hành bám theo quỹ đạo đặt. Cụ thể bộ điều khiển đề xuất là bộ điều khiển dự báo MPC theo nguyên lý trượt dọc trên trục thời gian (receding horizon) [54], dựa trên kỹ thuật tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến.

Ý nghĩa ràng buộc tín hiệu điều khiển

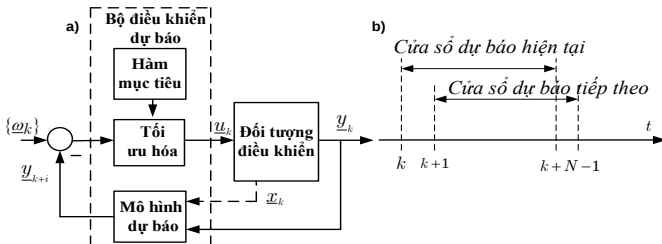
Đối với tàu thủy, góc bẻ lái β luôn được giới hạn là $35^0(\text{port}) \leq \beta \leq 35^0(\text{starboard})$. Còn ở chế độ lái tự động góc bẻ lái được giới hạn $10^0(\text{port}) \leq \beta \leq 10^0(\text{starboard})$. Ở những phương pháp điều khiển chuyển động tàu thủy hiện có đã trình bày ở trên các điều kiện ràng buộc về tín hiệu góc bẻ lái này nếu như bắt buộc phải được thỏa mãn thì luôn được chuyển sang phần nhiệm vụ của cơ cấu chấp hành thông qua các thiết bị hạn chế tín hiệu (saturation devices). Điều này dẫn tới vấn đề khi thiết kế bộ điều khiển, để đạt được mục tiêu điều khiển tàu bám theo quỹ đạo đặt thì góc bẻ lái có khi phải lớn hơn giá trị quy định góc bẻ lái ở trên rất nhiều. Do đó vấn đề ràng buộc tín hiệu điều khiển cần được đặt ra khi thiết kế bộ điều khiển chuyển động tàu thủy.

CHƯƠNG 2 ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG TÀU THỦY BẮM QUỸ ĐẠO ĐẶT VỚI BỘ ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO CÓ RÀNG BƯỚC TÍN HIỆU ĐIỀU KHIỂN KHI MÔ HÌNH TÀU XÁC ĐỊNH

Nhiệm vụ của luận án là thiết kế bộ điều khiển chuyển động tàu thủy bám theo quỹ đạo đặt, tín hiệu điều khiển bị ràng buộc và trong mô hình có chứa thành phần bất định và nhiễu tác động ngẫu nhiên. Trên cơ sở đó, luận án định hướng sẽ áp dụng nguyên lý điều khiển dự báo MPC [5], [13], [32], [45], [59] hệ tuyến tính áp dụng cho đối tượng phi tuyến (tàu thủy) dựa trên kỹ thuật tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến dọc trục thời gian để giải quyết nhiệm vụ điều khiển đặt ra cho luận án.

2.1. Cấu trúc, nguyên lý điều khiển dự báo

Hình 2.1 mô tả cấu trúc và nguyên lý làm việc trượt dọc trên trục thời gian của bộ điều khiển MPC, theo tài liệu [5], [54].



Hình 2.1 Cấu trúc và nguyên lý làm việc của hệ điều khiển dự báo [5].

Chúng được thiết kế dựa trên mô hình toán dạng rời rạc của đối tượng điều khiển, có cấu trúc gồm 3 khối chính.

Khối mô hình dự báo: có nhiệm vụ tại thời điểm k hiện tại, dựa vào mô hình toán của đối tượng điều khiển, nó xác định truy hồi các đầu ra tương lai $\underline{y}_{k+i}$, $i=1, \dots, N$ (trong đó N là số cửa sổ dự báo) thuộc cửa sổ dự báo hiện tại, nó là một véc-tơ hàm dự báo đầu ra phụ thuộc các đầu vào tương lai.

Khối hàm mục tiêu: được xây dựng từ nhiệm vụ điều khiển đặt ra mà ở đây là tín hiệu đầu ra $\underline{y}_k$ của hệ phải bám theo được tín hiệu đặt $\underline{w}_k$ mong muốn, tức là phải tạo ra được: $\lim_{k \rightarrow \infty} \underline{e}(p) = \mathbf{0}$, trong đó $\underline{e}(p) = \underline{y}_k(p) - \underline{w}_k$.

Khối tối ưu hóa: có nhiệm vụ tìm nghiệm tối ưu của bài toán tối ưu có ràng buộc.

$$\underline{p}^* = \arg \min_{\underline{p} \in P} J_k(\underline{p}) \quad (2.8)$$

Với U là tập giá trị điều kiện ràng buộc về tín hiệu điều khiển, $J_k(\underline{p})$ là hàm mục tiêu.

Giải pháp điều khiển dự báo hệ song tuyến trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến dọc theo trục thời gian

Nguyên lý điều khiển dự báo hệ tuyến tính cũng được áp dụng cho các hệ phi tuyến nói chung. Tuy nhiên, vấn đề chính là làm thế nào để có được công thức xác định đầu ra dự báo một cách đơn giản hơn là trực tiếp thực hiện việc xác định các hàm hợp phi tuyến, tức là phải tìm được các hàm $\underline{h}_i(\cdot)$ trong (2.18):

$$\begin{aligned} \underline{y}_{k+i} &= \underline{g}(\underline{x}_{k+i}) = \underline{g}(f(\underline{x}_{k+i-1}, \underline{u}_{k+i-1})) = \underline{g}(f(f(\underline{x}_{k+i-2}, \underline{u}_{k+i-2}), \underline{u}_{k+i-1})) \\ &= \dots \triangleq \underline{h}_i(\underline{x}_k, \underline{u}_k, \underline{u}_{k+1}, \dots, \underline{u}_{k+i-1}) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Giải pháp này đã được trình bày trong [1], [5] sẽ được luận án áp dụng, có tên gọi là dự báo đầu ra thông qua tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến dọc theo trục thời gian. Luận án chỉ giới hạn tư tưởng giải pháp này cho hệ song tuyến với mô hình giống như mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy ba bậc tự do trong mặt phẳng ngang.

Hệ song tuyến chuyển thành hệ song tuyến có chứa thành phần tích phân (2.23).

$$\begin{cases} \underline{z}_{k+1} = \bar{A}(\underline{z}_k) \underline{z}_k + \bar{B}(\underline{z}_k) \Delta \underline{u}_k \\ \underline{y}_k = \bar{C}(\underline{z}_k) \underline{z}_k. \end{cases} \quad (2.23)$$

Giải pháp là tìm cách xác định các đầu ra dự báo $\underline{y}_{k+i}$, $i=1, 2, \dots, N$ cho hệ mà tránh phải sử dụng tới phép tính hàm hợp cho ở công thức (2.18). Để làm được điều này, thì do ở thời điểm k hiện tại, véc-tơ trạng thái $\underline{z}_k$ là đã biết, nên mô hình song tuyến (2.23), trong khoảng thời gian rất nhỏ $kT_a \leq t < kT_a + \delta$ với T_a là chu kỳ trích mẫu và δ là khoảng thời gian thực hiện một vòng lặp, sẽ xấp xỉ được bởi mô hình tuyến tính tham số hằng LTI (Linear Time Invariant), ký hiệu mô hình đó là $\mathcal{H}_k$:

$$\mathcal{H}_k: \begin{cases} \underline{z}_{k+1} = \bar{A}_k \underline{z}_k + \bar{B}_k \Delta \underline{u}_k \\ \underline{y}_k = \bar{C}_k \underline{z}_k \end{cases} \text{ với } \bar{A}_k = \bar{A}(\underline{z}_k), \bar{B}_k = \bar{B}(\underline{z}_k), \bar{C}_k = \bar{C}(\underline{z}_k) \quad (2.24)$$

Tuy rằng mô hình xấp xỉ LTI $\mathcal{H}_k$ trong (2.24) này chỉ có nghĩa trong khoảng thời gian rất nhỏ, song nó sẽ được sử dụng để dự báo tín hiệu đầu ra trong toàn bộ cửa sổ dự báo của một chu kỳ. Sử dụng mô hình tuyến tính (2.24) để xác định các đầu ra dự báo.

Một số giải pháp nâng cao chất lượng bộ điều khiển dự báo được luận án sử dụng: Để nâng cao chất lượng bộ điều khiển dự báo, luận án đưa ra và áp dụng hai giải pháp. Một là, nâng cao tốc độ hội tụ của sai lệch bám nhờ hiệu chỉnh tín hiệu đặt theo nguyên lý học lặp ILC (Iterative Learning), tư tưởng này đã được giới thiệu trong tài liệu [5]. Hai là, lọc nhiễu và chuyển phân hồi trạng thái thành phân hồi đầu ra nhờ bộ quan sát Kalman mở rộng EKF (Extended Kalman Filter).

2.2. Giải pháp điều khiển tối ưu hóa có ràng buộc với bộ điều khiển MPC

Các phương pháp giải quyết bài toán tối ưu hóa có ràng buộc thường sử dụng như: SQP (sequential quadratic optimization), phương pháp (interior point) [5], [11], phương pháp GA (Genetic Algorithm) và PSO (Particle Swarm Optimization) [12], [37], [42] mặc dù sử dụng rất thuận tiện khi đã được cụ thể hóa bằng lệnh trong Matlab. Tuy nhiên, đối với bộ điều khiển theo nguyên lý Receding Horizon như MPC thì mỗi vòng lặp của bộ điều khiển phải giải bài toán tối ưu một lần, điều này có thể dẫn tới thời gian tính toán lệnh tối ưu hóa có ràng buộc vượt quá khoảng thời gian cho phép thực hiện một vòng lặp. Bởi vậy, luận án sẽ sử dụng kỹ thuật ước lượng xấp xỉ đã được giới thiệu trong [2], [5] để giải quyết bài toán tối ưu có ràng buộc. Kỹ thuật này được xây dựng dựa trên nhận xét rằng tín hiệu điều khiển $\underline{u}_k$ thay đổi theo từng vòng lặp với $k = 0, 1, 2, \dots$ và phụ thuộc vào việc chọn ma trận xác định dương R_k, Q_k . Do đó bài toán tối ưu có ràng buộc được giải quyết thông qua việc điều chỉnh ma trận xác định dương R_k, Q_k theo từng vòng lặp.

2.3. Thiết kế bộ điều khiển MPC điều khiển chuyển động tàu bám quỹ đạo đặt, có ràng buộc tín hiệu điều khiển khi mô hình tàu xác định

Mô hình động lực học tàu thủy ba bậc tự do, thiếu cơ cấu chấp hành trên mặt phẳng ngang dạng mô hình xác định (không chứa thành phần bất định) theo [21] được viết lại như sau:

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{v}, \quad \underline{\eta} \in \mathbb{R}^3, \quad \underline{v} \in \mathbb{R}^3 \\ M\underline{\dot{v}} + [C(\underline{v}) + D(\underline{v})]\underline{v} + \underline{g}(\underline{\eta}) = F\underline{\tau}, \quad \underline{\tau} \in \mathbb{R}^2, F \in \mathbb{R}^{3 \times 2} \end{cases} \quad (2.40)$$

Nhiệm vụ điều khiển là xây dựng được bộ điều khiển để đầu ra $\underline{\eta}$ của hệ bám theo được quỹ đạo mẫu $\underline{\eta}_d(t) = \underline{w}(t)$ cho trước, đồng thời thỏa mãn các điều kiện ràng buộc

$$-\tau_{r,gh} \leq \tau_r \leq \tau_{r,gh} \quad (2.41)$$

trong đó $\tau_{r,gh}$ - giá trị giới hạn đặt mô-men của bánh lái (giá trị này tỷ lệ với độ lớn của góc bẻ lái và coi như tương đương với ràng buộc về độ lớn góc bẻ lái).

2.3.1. Thiết kế bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái (MPC-S: MPC-State) điều khiển tàu chuyển động bám quỹ đạo đặt khi mô hình tàu xác định

Mô hình toán tàu thủy ba bậc tự do trong mặt phẳng ngang (2.40) được chuyển về dạng song tuyến chính tắc (2.45) để thiết kế bộ điều khiển bằng cách đặt biến:

$\underline{x}_1 = \underline{\eta}$, $\underline{x}_2 = \underline{v}$, $\underline{u} = \underline{\tau}$ và $\underline{x} = \text{col}(\underline{x}_1, \underline{x}_2)$, cũng như ký hiệu:

$$A(\underline{x}) = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & J(\underline{x}_1) \\ -G(\underline{x}_1) & -M^{-1}[C(\underline{x}_2) + D(\underline{x}_2)] \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ M^{-1}F \end{pmatrix}, \quad C = (I_3, \mathbf{0}_{3 \times 3}) \quad (2.44)$$

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = A(\underline{x})\underline{x} + B\underline{u} \\ \underline{y} = \underline{\eta} = (I_3, \mathbf{0}_{3 \times 3})\underline{x} = C\underline{x} \end{cases} \quad (2.45)$$

Xây dựng mô hình dự báo trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình dọc trục thời gian:

Mô hình liên tục (2.45) được chuyển về dạng rời rạc (2.46) bằng cách sử dụng công thức xấp xỉ: $\dot{x}(t) \approx [x((k+1)T_a) - x(kT_a)]/T_a$

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = [I_6 + T_a A(\underline{x}_k)] \underline{x}_k + T_a B \underline{u}_k \\ \underline{y}_k = C \underline{x}_k \end{cases} \quad (2.46)$$

trong đó: $\underline{x}_k = \underline{x}(kT_a)$, $\underline{u}_k = \underline{u}(kT_a)$, $\underline{y}_k = \underline{y}(kT_a)$. Xét tại thời điểm k hiện tại, nếu như véc-tơ trạng thái $\underline{x}_k$ là đã biết, có thể là do đo hoặc do quan sát được từ những dữ liệu vào/ra $\underline{u}_{k-1}$, $\underline{y}_k$, thì trong một khoảng thời gian đủ nhỏ, mô hình song tuyến (2.46) sẽ xấp xỉ được bởi mô hình tuyến tính tham số hằng $\mathcal{H}_k$ như (2.47).

$$\mathcal{H}_k: \begin{cases} \underline{z}_{k+1} = \bar{A}_k \underline{z}_k + \bar{B} \Delta \underline{u}_k \\ \underline{y}_k = \bar{C} \underline{z}_k \end{cases} \quad (2.47)$$

trong đó: $\underline{z}_k = \text{col}(\underline{x}_k, \underline{u}_{k-1}) \in \mathbb{R}^8$, $\Delta \underline{u}_k = \underline{u}_k - \underline{u}_{k-1} \in \mathbb{R}^2$ (2.48)

$$\bar{A}_k = \begin{pmatrix} I_6 + T_a A(\underline{x}_k) & T_a B \\ \mathbf{0}_{2 \times 6} & I_2 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{8 \times 8}, \bar{B} = \begin{pmatrix} T_a B \\ I_2 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{8 \times 2}, \bar{C} = (C, \mathbf{0}_{3 \times 2}) \in \mathbb{R}^{3 \times 8} \quad (2.49)$$

Từ mô hình xấp xỉ tuyến tính từng đoạn $\mathcal{H}_k$ với $k=0,1, \dots$ cho ở (2.47), xác định được công thức dự báo xấp xỉ cho tín hiệu đầu ra $\underline{y}_{k+i}$, $i=1,2, \dots, N$ của hệ (2.46) thuộc cửa sổ dự báo hiện tại $[k, N)$, như sau:

$$\underline{y}_{k+i} = \bar{C} \bar{A}_k^i \underline{z}_k + \bar{C} \bar{A}_k^{i-1} \bar{B} \Delta \underline{u}_k + \bar{C} \bar{A}_k^{i-2} \bar{B} \Delta \underline{u}_{k+1} + \dots + \bar{C} \bar{B} \Delta \underline{u}_{k+i-1},$$

viết chung các đầu ra tương lai đó lại với nhau theo cấu trúc véc-tơ, sẽ có:

$$\begin{aligned} \underline{y}_k &= \begin{pmatrix} \underline{y}_{k+1} \\ \underline{y}_{k+2} \\ \vdots \\ \underline{y}_{k+N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{C} \bar{B} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \dots & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \bar{C} \bar{A}_k \bar{B} & \bar{C} \bar{B} & \dots & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{C} \bar{A}_k^{N-1} \bar{B} & \bar{C} \bar{A}_k^{N-2} \bar{B} & \dots & \bar{C} \bar{B} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \underline{u}_k \\ \Delta \underline{u}_{k+1} \\ \vdots \\ \Delta \underline{u}_{k+N-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{C} \bar{A}_k \\ \bar{C} \bar{A}_k^2 \\ \vdots \\ \bar{C} \bar{A}_k^N \end{pmatrix} \underline{z}_k \\ &= H_k \underline{p} + \underline{b}_k \end{aligned} \quad (2.50)$$

trong đó $\underline{p}$ là véc-tơ các tín hiệu đầu vào tương lai cần phải được xác định.

Xây dựng khối hàm mục tiêu của bộ điều khiển MPC: Để đầu ra của hệ (2.45) bám theo được dãy tín hiệu đặt $\{\underline{w}_k\}$ cho trước, hàm mục tiêu đưa ra như sau:

$$J_k'(\underline{p}) = \underline{p}^T \left(H_k^T Q_k H_k + R_k \right) \underline{p} + 2(\underline{b}_k - \underline{r}_k)^T Q_k H_k \underline{p} \xrightarrow{\underline{p}} \min. \quad (2.54)$$

Xây dựng khối tối ưu hóa của bộ điều khiển: Nhiệm vụ của khối tối ưu hóa, là xác định nghiệm của bài toán tối ưu:

$$\underline{p}^* = \arg \min_{\underline{p} \in P} J_k'(\underline{p}) \quad (2.55)$$

có tập ràng buộc P được suy ra từ điều kiện ràng buộc (2.41). Giải pháp để tìm nghiệm

của bài toán tối ưu có ràng buộc sử dụng kỹ thuật ước lượng xấp xỉ thông qua thay đổi tham số hàm mục tiêu. Nghiệm $\underline{p}^*$ của bài toán tối ưu (2.55) có hàm mục tiêu cho ở (2.54) sẽ là:

$$\underline{p}^* = \left(H_k^T Q_k H_k + R_k \right)^{-1} H_k^T Q_k (\underline{b}_k - \underline{r}_k). \quad (2.56)$$

Khi đã có $\underline{p}^*$ ta cũng có được tín hiệu điều khiển $\underline{u}_k$ cho hệ điều khiển chuyển động tàu thủy (2.40) ở thời điểm hiện tại k , suy ra từ công thức (2.48), như sau:

$$\underline{u}_k = \underline{u}_{k-1} - \left(I_2, \mathbf{0}_{2 \times 2(N-1)} \right) \underline{p}^* \quad (2.57)$$

và nó sẽ được đưa vào để điều khiển trong phạm vi một khoảng thời gian trích mẫu T_a .

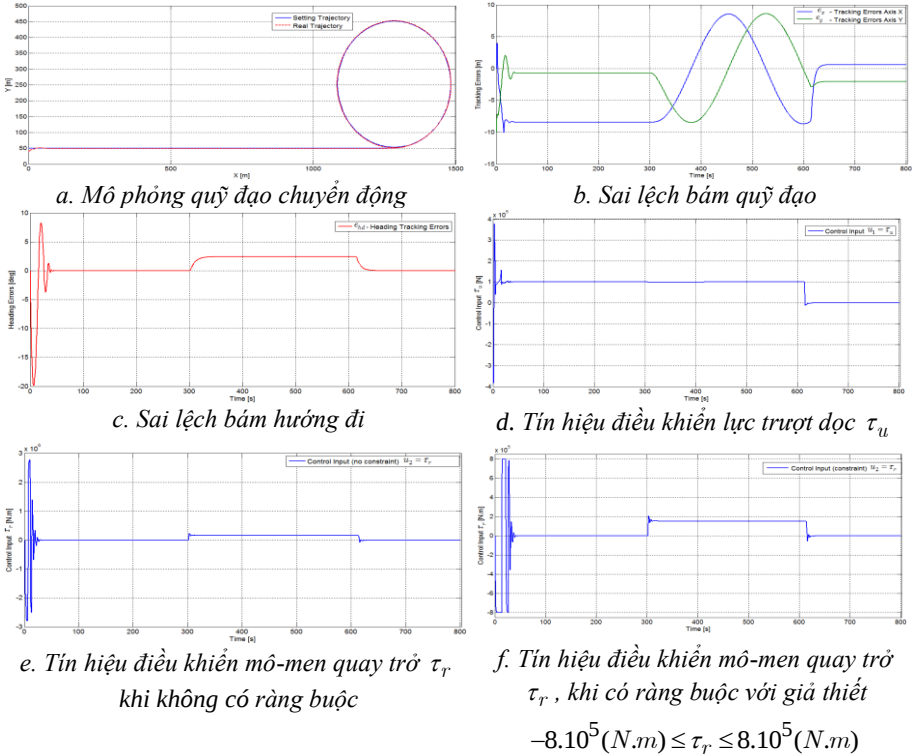
Mô phỏng bộ điều khiển MPC-S

Đối tượng và quỹ đạo mô phỏng: Thông số kỹ thuật của tàu sử dụng để mô phỏng được lấy từ tài liệu [21]. Để kiểm tra chất lượng bám quỹ đạo của bộ điều khiển đề xuất, luận án đưa ra hai quỹ đạo đặt thường áp dụng với tàu biển trong quá trình chạy kiểm tra đặc tính điều động và quay trở của tàu như sau:

Quỹ đạo 1: tàu chạy theo quỹ đạo đường thẳng, sau đó tàu chạy lượn vòng tròn với bán kính lượn vòng 200(m), luận án gọi là quỹ đạo hình tròn.

Quỹ đạo 2: tàu chạy theo đường thẳng, sau đó chạy quỹ đạo zíc-zắc hình sin với biên độ 175m, sau đó chạy tiếp với quỹ đạo thẳng, luận án gọi là quỹ đạo hình sin.

Kết quả mô phỏng bộ điều khiển MPC-S với quỹ đạo hình tròn



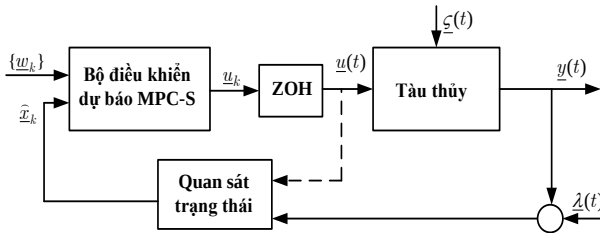
Hình 2.7 Kết quả mô phỏng, kiểm chứng bộ điều khiển MPC-S với quỹ đạo hình tròn

Nhận xét:

Kết quả mô phỏng cho thấy khi thử nghiệm với quỹ đạo đặt là hình tròn, thì quỹ đạo đầu ra của bộ điều khiển MPC-S bám theo quỹ đạo đặt với chất lượng tốt khi tín hiệu điều khiển $u_2 = \tau_r$ có ràng buộc. Sai lệch bám quỹ đạo e_x, e_y , sai lệch bám hướng e_{hd} có giá trị nhỏ so với quỹ đạo chuyển động của tàu. Sai lệch bám quỹ đạo và hướng ở thời điểm ban đầu phụ thuộc rất nhiều vào việc cài đặt tọa độ vị trí và hướng ban đầu của tàu $x(0), y(0), \psi(0)$. Tín hiệu điều khiển có độ quá điều chỉnh nhỏ. Ở thời điểm ban đầu cả hai tín hiệu điều khiển lớn, bị dao động, độ quá điều chỉnh lớn là do việc cài đặt quỹ đạo đặt và quỹ đạo thực ở thời điểm ban đầu là khác nhau, $y_d(0) = 50, y(0) = 30$. Chất lượng bộ điều khiển dự báo MPC-S còn phụ thuộc vào việc chọn các giá trị của ma trận xác định dương Q, R và cửa sổ dự báo N . Nếu cửa sổ dự báo được chọn càng lớn thì sai lệch bám càng nhỏ nhưng kéo theo khoảng tính toán (thời gian trượt) càng tăng.

2.3.2. Thiết kế bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra (MPC-O) theo nguyên lý tách để điều khiển chuyển động tàu bám quỹ đạo đặt với mô hình tàu xác định

Bộ điều khiển phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách là sự ghép nối giữa bộ điều khiển phản hồi trạng thái MPC-S và một bộ quan sát trạng thái như mô tả trên hình 2.9. Với cấu trúc này, định hướng của luận án sẽ xây dựng một bộ quan sát trạng thái mới cho đối tượng tàu thủy với giả thiết là không có nhiễu đo. Còn nếu như các giá trị đo được từ hệ thống còn bị lẫn nhiễu đo thì định hướng sử dụng bộ quan sát Kalman mở rộng (EKF).



Hình 2.9 Cấu trúc bộ điều khiển phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách, điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt.

Xây dựng bộ quan sát trực tiếp trạng thái từ mô hình liên tục

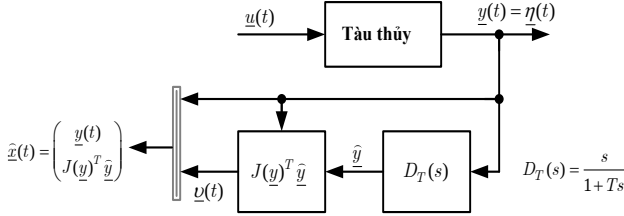
Phương pháp quan sát trực tiếp (QSTT) được xây dựng trực tiếp từ mô hình liên tục (2.40), trên cơ sở giả thiết rằng phép đo tín hiệu đầu ra $\underline{y}(t) = \underline{\eta}(t)$ là chính xác (thực tế hiện nay thì tín hiệu $\underline{\eta}(t)$ gồm tọa độ vị trí và hướng đi của tàu được xác định chính xác thông qua thiết bị GPS và la bàn điện gắn trên tàu). Nhiệm vụ còn lại là từ đó xác định được các véc-tơ trạng thái $\underline{x} = \text{col}(\underline{\eta}, \underline{v})$ của hệ liên tục (2.45). Từ quan hệ giữa hai thành phần trạng thái $\underline{\eta}(t), \underline{v}(t)$ ở mô hình (2.40) có được: $\underline{v}(t) = J(\underline{\eta})^T \underline{\dot{\eta}} = J(\underline{y})^T \underline{\dot{y}}$, nếu như đã có được giá trị đạo hàm $\underline{\dot{y}}(t)$ của tín hiệu đầu ra $\underline{y}(t)$. Để làm được điều này ta sẽ sử dụng khâu vi phân quán tính bậc nhất (khâu DT1), là một khâu hợp thức, Causal:

$$D_T(s) = \frac{s}{1 + Ts} \quad \text{với hằng số } T > 0 \text{ rất nhỏ tùy chọn,} \quad (2.58)$$

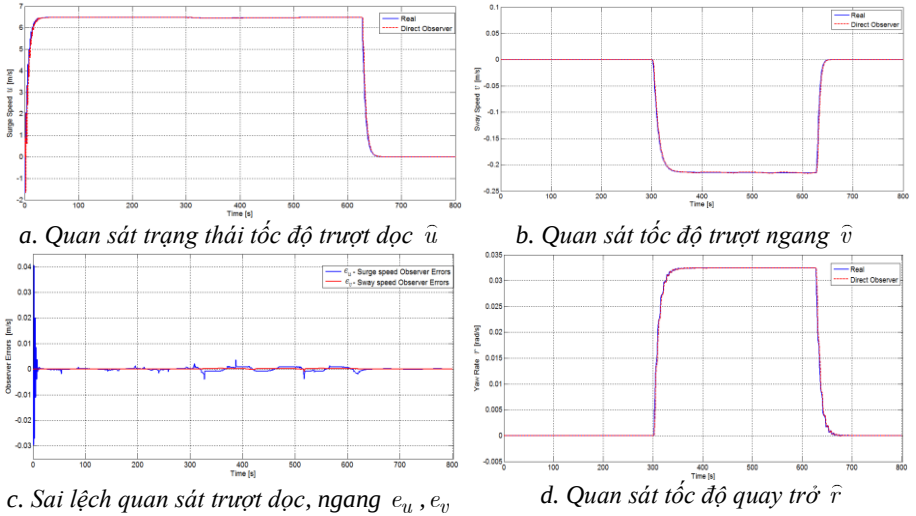
có đầu vào là $\underline{y}(t)$. Do ở đây có $T \approx 0$ nên đầu ra của nó, ký hiệu bởi $\hat{\underline{y}}(t)$ sẽ là:

$$\underline{v}(t) = J(\underline{\eta})^T \underline{\dot{\eta}} = J(\underline{y})^T \underline{\dot{y}} \approx J(\underline{y})^T \hat{\underline{y}}$$

với $\hat{y}(t)$ là đầu ra của khâu DT1 cho ở (2.58) có đầu vào là $y(t)$ ta sẽ có được đầy đủ véc-tơ trạng thái $\hat{x}(t) = \text{col}\left(y(t), J(y)^T \hat{y}\right)$ của mô hình tàu thủy ba bậc tự do. Hình (2.10) mô tả cấu trúc của bộ quan sát trạng thái trực tiếp từ mô hình liên tục.



Hình 2.10 Quan sát trạng thái trực tiếp từ mô hình liên tục tàu thủy ba bậc tự do
Mô phỏng, kiểm chứng bộ quan sát trực tiếp với quỹ đạo hình tròn



Hình 2.11 Đồ thị mô phỏng kết quả bộ QSTT khi tàu chạy quỹ đạo hình tròn.

Nhận xét, đánh giá chất lượng bộ QSTT đã xây dựng:

Kết quả mô phỏng cho thấy tín hiệu trạng thái quan sát được từ bộ QSTT bám rất tốt tín hiệu trạng thái thực, sai lệch quan sát giữa tín hiệu quan sát được và tín hiệu thực tương đối nhỏ. Sai lệch quan sát giảm dần và tiệm cận về 0 theo thời gian. Tốc độ hội tụ phụ thuộc vào giá trị đặt ban đầu cho trạng thái quan sát. Ngoài ra sai lệch quan sát còn phụ thuộc vào thời gian thực hiện phép tính đạo hàm trong khâu vi phân quán tính bậc nhất (DT1), thời gian này càng nhỏ thì chất lượng quan sát càng tốt. Mặc dù bộ QSTT sử dụng khâu DT1 là khâu có trễ song tín hiệu quan sát được bám rất tốt tín hiệu thực, lý do là vì tàu thủy là đối tượng có quán tính và thông số biến đổi chậm.

Cấu trúc bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra với bộ QSTT (MPC-O)

Hình 2.16 dưới đây minh họa một cấu trúc điều khiển dự báo phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách sử dụng phương pháp quan sát trạng thái trực tiếp. Về bản chất chỉ là sự ghép nối của thuật toán điều khiển phản hồi trạng thái (thuật toán MPC-S) và bộ quan sát trạng thái trực tiếp được xây dựng từ mô hình liên tục của đối tượng điều khiển.

định dạng song tuyến trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến dọc theo trục thời gian. Kết quả mô phỏng bộ điều khiển MPC-S và MPC-O cho chất lượng bám quỹ đạo tốt.

Xây dựng được bộ quan sát trạng thái trực tiếp từ mô hình liên tục của đối tượng với giả thiết không có nhiễu đo cho kết quả quan sát bám tốt với tín hiệu thực, đề xuất kết hợp bộ QSTT với bộ quan sát Kalman mở rộng EKF trong bước khởi tạo ban đầu để giải quyết trường hợp mô hình trạng thái có lẫn nhiễu đo.

CHƯƠNG 3 ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG TÀU THỦY BÁM QUỸ ĐẠO ĐẶT VỚI BỘ ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO KHI MÔ HÌNH TÀU CÓ CHỨA THÀNH PHẦN BẤT ĐỊNH

Nội dung chính chương này, luận án sẽ giải quyết vấn đề thiết kế bộ khiển dự báo trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến dọc theo trục thời gian để điều khiển chuyển động tàu bám quỹ đạo đặt khi mô hình tàu có chứa thành phần bất định (mô hình bất định). Với định hướng đó luận đó sẽ đề xuất xây dựng mô hình bù bất định và phương pháp ước lượng thành phần bất định mới cho tàu thủy.

3.1. Cấu trúc mô hình bù thành phần bất định

Mô hình tàu thủy ba bậc tự do có xét đến thành phần bất định được viết lại như sau:

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{\nu} \\ M\dot{\underline{\nu}} + C(\underline{\nu})\underline{\nu} + D(\underline{\nu})\underline{\nu} + g(\underline{\eta}) = F\underline{\tau} + \underline{\Delta}(\underline{\eta}, \underline{\nu}) \end{cases} \quad (3.1)$$

trong đó: $\underline{\Delta}(\underline{\eta}, \underline{\nu})$ - là những thành phần bất định (không xác định) trong mô hình toán và nhiều ngẫu nhiên từ môi trường tác động vào đối tượng.

Mô hình (3.1) được chuyển về dạng song tuyến (3.4) như đã thực hiện với mô hình tàu xác định bằng cách đặt các biến mới $\underline{x}_1 = \underline{\eta}$, $\underline{x}_2 = \underline{\nu}$, $\underline{u} = \underline{\tau}$, $\underline{x} = \text{col}(\underline{x}_1, \underline{x}_2)$ và

$\underline{d}(\underline{x}, t) = \underline{\Delta}'(\underline{\eta}, \underline{\nu})$, trong đó $\underline{\Delta}'(\underline{\eta}, \underline{\nu})$ - là thành phần bất định của $\underline{\Delta}(\underline{\eta}, \underline{\nu})$ thuộc không gian ảnh của ma trận phân bố lực F và ký hiệu:

$$A(\underline{x}) = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & J(\underline{x}_1) \\ -G(\underline{x}_1) & -M^{-1}[C(\underline{x}_2) + D(\underline{x}_2)] \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ M^{-1}F \end{pmatrix}, \quad C = (I_3, \mathbf{0}_{3 \times 3}) \quad (3.3)$$

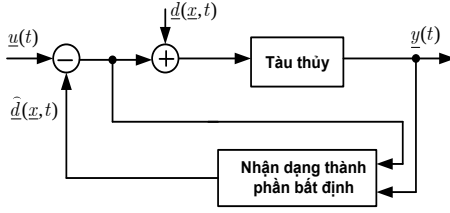
$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = A(\underline{x})\underline{x} + B[\underline{u} + \underline{d}(\underline{x}, t)] \\ \underline{y} = C\underline{x} = \underline{\eta} \end{cases} \quad (3.4)$$

Nếu so sánh mô hình (3.4) với mô hình xác định đã có ở (2.45) thì ở mô hình có chứa thành phần bất định (3.4) có thêm thành phần bất định $\underline{d}(\underline{x}, t)$.

Giải pháp của luận án là sẽ nhận dạng và bù thành phần bất định này. Khi đó, nếu ký hiệu kết quả nhận dạng thành phần bất định đó là:

$$\widehat{\underline{d}}(\underline{x}, t) \approx \underline{d}(\underline{x}, t) \text{ với sai lệch } \|\widehat{\underline{d}}(\underline{x}, t) - \underline{d}(\underline{x}, t)\| \leq \delta_e \text{ vô cùng nhỏ,} \quad (3.5)$$

thì sau khi bù $\widehat{\underline{d}}(\underline{x}, t)$ ở đầu vào cho hệ bất định (3.4), nó sẽ trở về gần giống như hệ có mô hình xác định (2.45) (chỉ sai khác một lượng vô cùng bé là δ_e ở đầu vào) mà luận án đã xây dựng các bộ điều khiển dự báo cho nó. Cấu trúc bù bất định được đề xuất như hình 3.2.



Hình 3.2 Bù thành phần bất định cho hệ có mô hình bất định để nó tương đương như hệ có mô hình xác định.

3.2. Giải pháp bù thành phần bất định

Thông thường, khi gặp thành phần bất định $\underline{d}(x, t)$ trong mô hình đối tượng điều khiển, phương pháp phổ thông nhất hiện nay được áp dụng là dùng mạng Neural. Bởi vậy, việc áp dụng mạng Neural để bù bất định sẽ không còn mang tính thời sự và không hứa hẹn có tính mới của luận án.

Sau đây luận án sẽ đề xuất riêng một phương pháp ước lượng xấp xỉ $\hat{\underline{d}}(x, t) \approx \underline{d}(x, t)$ trên cơ sở sử dụng mô hình không liên tục của đối tượng, phương pháp này cũng đã được đề cập trong [6]. Cơ sở cho việc đề xuất này dựa trên nhận xét rằng tàu thủy không phải là một hệ biến đổi nhanh, nên giữa hai lần khoảng thời gian trượt (khoảng thời gian này rất nhỏ) ta có thể xem thành phần bất định đó là hằng số, tức là trong suốt quá trình điều khiển $\underline{d}(x, t)$ sẽ được xem như là hàm bất định hằng số từng đoạn.

Xét mô hình tàu thủy ba bậc tự do trên mặt phẳng ngang dạng mô hình liên tục (3.1). Bây giờ được viết dưới dạng không liên tục ở thời điểm k hiện tại (nhờ phép biến đổi rời rạc hóa và tuyến tính hóa từng đoạn mô hình dọc trục thời gian) với thành phần bất định hàm $\underline{d}_k$, nhưng đã được bù bất định bởi tín hiệu bất định đã ước lượng được $\hat{\underline{d}}_{k-1}$ có từ vòng điều khiển trước đó như mô tả ở hình 3.2. Nó sẽ có mô hình là:

$$\underline{v}_k = \hat{A}(\underline{v}_{k-1})\underline{v}_{k-1} + \hat{B}[u_{k-1} + \underline{d}_k - \hat{\underline{d}}_{k-1}] \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \hat{A}(\underline{v}_k) &= I_3 - T_a M^{-1} [C(\underline{v}_k) + D(\underline{v}_k)] \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, \\ \text{trong đó: } \hat{B} &= T_a M^{-1} F \in \mathbb{R}^{3 \times 2}, \underline{u}_k = \underline{\tau}_k = \underline{\tau}(kT_a), \underline{d}_k = \underline{d}(kT_a) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Ký hiệu tiếp mô hình mẫu lý tưởng tương ứng (không chứa thành phần bất định) cũng ở thời điểm k là:

$$\underline{v}_k = \hat{A}(\underline{v}_{k-1})\underline{v}_{k-1} + \hat{B}(u_{k-1} - \hat{\underline{d}}_{k-1}). \quad (3.8)$$

trong đó $\underline{v}_k$ là trạng thái của mô hình mẫu lý tưởng (không chứa thành phần bất định). Khi đó, do có cùng đầu vào u_{k-1} nên sai lệch $\underline{\varepsilon}_k = \underline{v}_k - \underline{v}_k$ giữa hai mô hình này hoàn toàn phụ thuộc vào thành phần bất định $\underline{d}_k$. Điều đó giúp ta có thể xác định xấp xỉ $\hat{\underline{d}}_k \approx \underline{d}_k$ từ sai lệch mô hình $\underline{\varepsilon}_k$ phục vụ việc bù bất định ở vòng lặp sau, tức là ở thời điểm $k+1$. Từ (3.6) và (3.8) có được sai lệch mô hình $\underline{\varepsilon}_k = \underline{v}_k - \underline{v}_k$ như sau:

$$\begin{aligned} \underline{\varepsilon}_k &= \hat{A}(\underline{v}_{k-1})\underline{v}_{k-1} + \hat{B}[u_{k-1} + \underline{d}_k - \hat{\underline{d}}_{k-1}] - \hat{A}(\underline{v}_{k-1})\underline{v}_{k-1} - \hat{B}(u_{k-1} - \hat{\underline{d}}_{k-1}) \\ &= \hat{A}(\underline{v}_{k-1})\underline{v}_{k-1} - \hat{A}(\underline{v}_{k-1})\underline{v}_{k-1} + \hat{B}\underline{d}_k \end{aligned} \quad (3.9)$$

Suy ra, trong trường hợp ma trận $\hat{B}$ có đủ hạng là 2, thì:

$$\underline{d}_k \approx \hat{\underline{d}}_k = \left(\hat{B}^T \hat{B} \right)^{-1} \hat{B}^T \left[\varepsilon_k - \hat{A}(\underline{v}_{k-1}) \underline{v}_{k-1} + \hat{A}(\underline{v}_{k-1}) \underline{v}_{k-1} \right] \quad (3.10)$$

và đó chính là công thức xác định xấp xỉ bất định $\hat{\underline{d}}_k \approx \underline{d}_k$. Sau khi có được $\hat{\underline{d}}_k$ ta sẽ tiến hành bù đầu vào của hệ (3.4) ở thời điểm $k+1$ như minh họa ở hình 3.2. trong trường hợp thành phần bất định nằm trong ma trận tham số $A(\underline{x})$, tức là khi đó có $A(\underline{x}, \underline{d})$ thay vì chỉ có $A(\underline{x})$ trong mô hình (3.4). Đây là trường hợp mà ma trận $D(\underline{v})$ hoặc cũng có thể là ma trận $M, C(\underline{v})$ trong mô hình liên tục (3.1) có chứa thêm tham số bất định. Lúc này, do hệ là thiếu cơ cấu chấp hành, song nếu thành phần bất định $\underline{d}$ đó lại thuộc không gian ảnh $\text{Im}(B)$, tức là $\underline{d} \in \text{Im}(B)$, thì ta luôn viết lại hệ đã cho thành:

$$\begin{aligned} A(\underline{x}, \underline{d})\underline{x} &= A'(\underline{x})\underline{x} + \left[A(\underline{x}, \underline{d}) - A'(\underline{x}) \right] \underline{x} \\ &= A'(\underline{x})\underline{x} + \underline{d} \end{aligned} \quad (3.11)$$

với $\underline{d} = B\underline{d}' = \left[A(\underline{x}, \underline{d}) - A'(\underline{x}) \right] \underline{x}$, trong đó $\underline{d}'$ là thành phần bất định mới thay cho $\underline{d}$ ban đầu và $A'(\underline{x})$ là thành phần ma trận tham số không chứa $\underline{d}$ của $A(\underline{x}, \underline{d})$. Vậy khi đó bài toán lại trở về dạng có bất định nằm ở kênh đầu vào như của mô hình (3.4).

Mô phỏng bộ ước lượng bù bất định

Để kiểm tra chất lượng bộ ước lượng thành phần bất định đã xây dựng. Luận án tiến hành thử nghiệm với hai trường hợp tín hiệu bất định khác nhau.

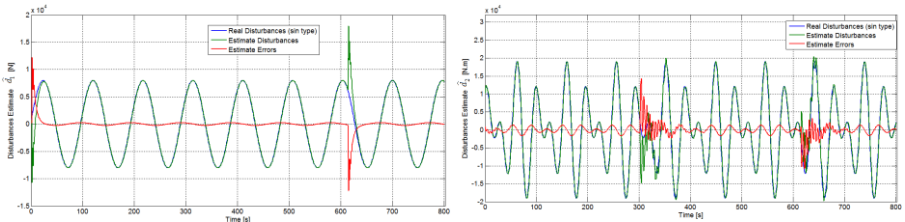
Thứ nhất: tín hiệu bất định hàm ở đầu vào là các nhiễu bất định từ bên ngoài môi trường tác động vào (tương đương với các tác động của sóng, gió, dòng chảy....). Dạng tín hiệu bất định này được thử nghiệm gồm: dạng hình sin (giống như các tài liệu [14] và [21]), dạng bất định ngẫu nhiên (random), dạng bất định xung vuông.

Thứ hai: tín hiệu bất định là thành phần sinh ra từ mô hình do sự thay đổi của ma trận thủy động lực học $D(\underline{v})$ (tức là trường hợp bất định nằm ở ma trận $A(\underline{x}, \underline{d})$ của (3.4) như đã đề cập trong luận án.

Mô phỏng kiểm chứng bộ ước lượng với tín hiệu bất định dạng hàm bất định tác động từ bên ngoài

Giả thiết tín hiệu bất định gồm 2 thành phần $\underline{d} = (d_1, d_2)$ với d_1 có tác động tương đương với lực gây ra trượt dọc (τ_u) và d_2 có tác động tương đương với mô-men quay trở (τ_r) có độ lớn và dạng giả thiết như sau:

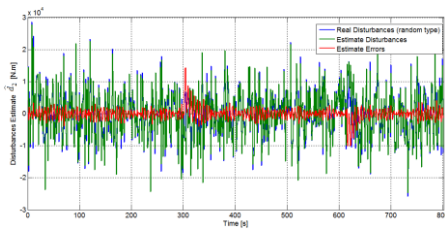
$$d_1 = (0.008\sin(0.1t) + 0.01) \cdot 10^6 (N), \quad d_2 = (0.001\sin(0.2t) + 0.01\cos(0.3t)) \cdot 10^6 (N.m)$$



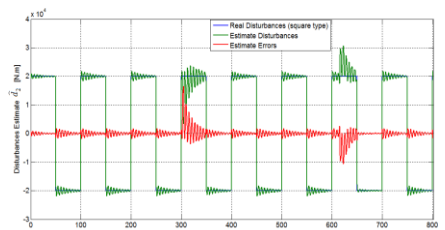
a. Ước lượng $\hat{d}_1$ từ thành phần d_1

b. Ước lượng $\hat{d}_2$ từ thành phần d_2

Hình 3.3 Mô phỏng ước lượng $\hat{d}_1, \hat{d}_2$ từ thành phần bất định d_1, d_2 dạng sóng hình Sin



Hình 3.4 Ước lượng $\hat{d}_2$ từ d_2 dạng Random

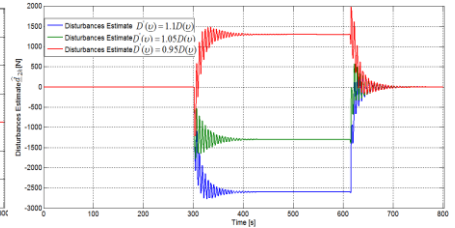
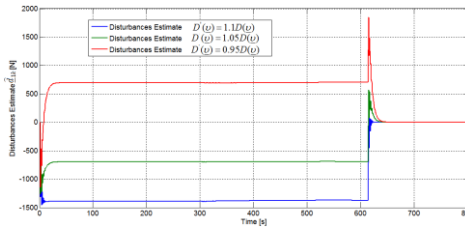


Hình 3.5 Ước lượng $\hat{d}_2$ từ d_2 xung vuông

Mô phỏng kiểm chứng bộ ước lượng với tín hiệu bất định sinh ra từ mô hình đối tượng

Để kiểm chứng bộ ước lượng trong trường hợp tín hiệu bất định sinh ra từ mô hình do sự thay đổi của ma trận thủy động lực học $D(\underline{v})$. Luận án tiến hành kiểm tra thành phần bất định ước lượng được $\hat{d}_1, \hat{d}_2$ khi thay đổi tăng, giảm hệ số ma trận thủy động lực học $D(\underline{v})$ trong mô hình liên tục của đối tượng với các trường hợp như sau:

$$D'(\underline{v}) = 1.1D(\underline{v}), \quad D'(\underline{v}) = 1.05D(\underline{v}), \quad D'(\underline{v}) = 0.95D(\underline{v}).$$



a. Ước lượng $\hat{d}_1$ từ thay đổi ma trận $D(\underline{v})$ b. Ước lượng $\hat{d}_2$ từ thay đổi ma trận $D(\underline{v})$

Hình 3.6 Kết quả ước lượng thành phần bất định $\hat{d}_1, \hat{d}_2$ khi thay đổi hệ số ma trận thủy động lực học $D(\underline{v})$ trong mô hình.

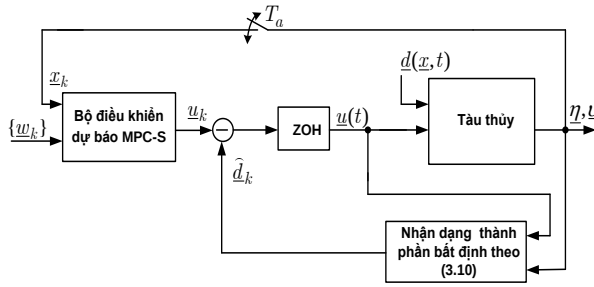
Đánh giá bộ ước lượng bù bất định:

Từ kết quả mô phỏng của hai trường hợp trên cho thấy bộ ước lượng đã ước lượng tốt tín hiệu bất định giả thiết đưa ra với sai lệch ước lượng nhỏ. Chất lượng của bộ ước lượng bất định phụ thuộc vào giá trị ước lượng ban đầu $\hat{d}(0)$. Nếu nó được chọn ban đầu càng gần giá trị thực thì chất lượng ước lượng càng tốt. Tuy nhiên, không phụ thuộc vào giá trị ban đầu được chọn, sai lệch ước lượng luôn giảm dần và tiệm cận về 0. Chất lượng bộ ước lượng bất định còn phụ thuộc vào độ lớn và dạng của tín hiệu bất định, nếu biên độ tín hiệu bất định càng lớn thì sai lệch ước lượng cũng lớn theo. Ngoài ra nó còn phụ thuộc vào thời gian trượt dọc trên trục thời gian của bộ điều khiển.

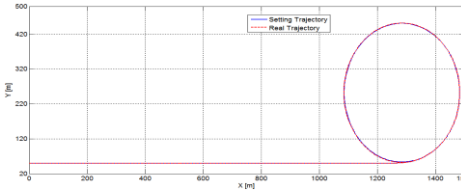
3.3. Thiết kế bộ điều khiển dự báo điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt khi mô hình có bất định hàm ở đầu vào

3.3.1. Thiết kế bộ điều khiển dự báo bù bất định phản hồi trạng thái (DMPC-S)

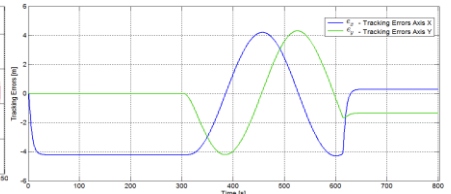
Khi kết hợp thuật toán điều khiển dự báo phản hồi trạng thái (thuật toán MPC-S) cùng với cơ cấu bù bất định mô tả ở hình 3.2, ta sẽ được thuật toán điều khiển dự báo phản hồi trạng thái tương ứng, nhưng bây giờ ứng dụng được cho cả hệ có thành phần bất định hàm ở kênh đầu vào. Cấu trúc bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái có bù bất định (DMPC-S) được minh họa như hình 3.7 dưới đây.



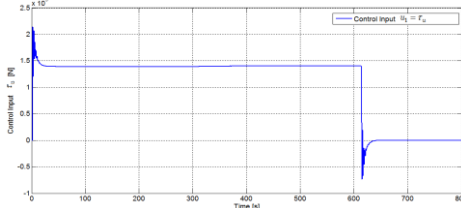
Hình 3.7 Cấu trúc bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái có bù bất định DMPC-S
Mô phỏng bộ điều khiển dự báo bù bất định phản hồi trạng thái DMPC-S



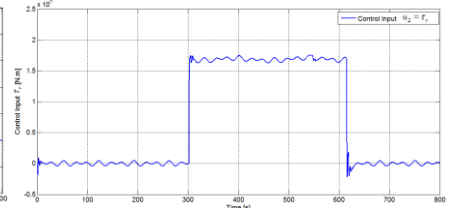
a. Kết quả mô phỏng quỹ đạo chuyển động



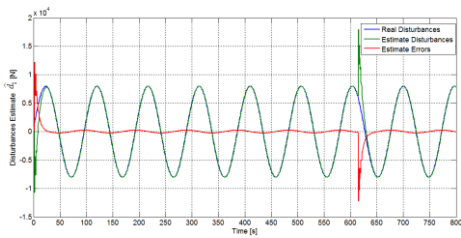
b. Sai lệch bám quỹ đạo



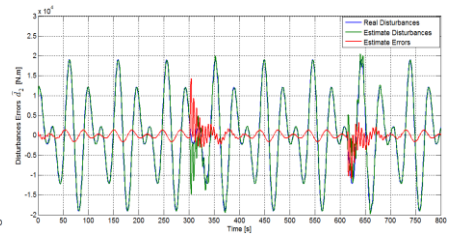
c. Tín hiệu điều khiển τ_u chưa bù bất định



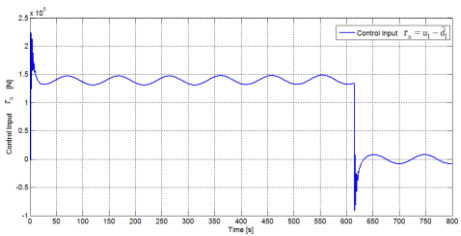
d. Tín hiệu điều khiển τ_r chưa bù bất định



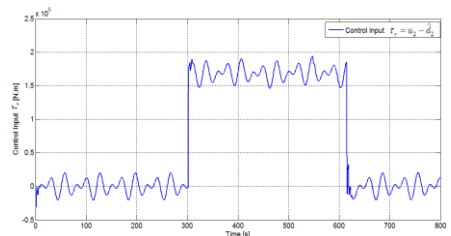
e. Ước lượng bất định $\hat{d}_1$ từ d_1 giả thiết



f. Ước lượng bất định $\hat{d}_2$ từ d_2 giả thiết



g. Tín hiệu điều khiển τ_u khi bù bất định



h. Tín hiệu điều khiển τ_r khi bù bất định

Hình 3.9 Kết quả mô phỏng, kiểm chứng bộ điều khiển DMPC-S - quỹ đạo tròn

Nhận xét:

Kết quả mô phỏng bộ điều khiển DMPC-S với quỹ đạo đặt hình tròn khi có tín hiệu bất định hàm ở đầu vào với giả thiết tín hiệu bất định gồm hai thành phần có giá trị:

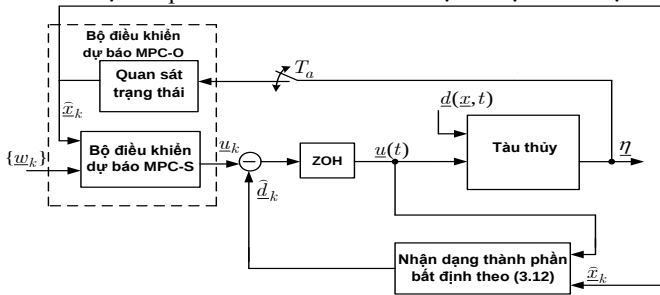
$d_1 = (0.008\sin(0.1t) + 0.01).10^6 (N)$, $d_2 = (0.001\sin(0.2t) + 0.01\cos(0.3t)).10^6 (N.m)$ cho kết quả tín hiệu quỹ đạo đầu ra của bộ điều khiển DMPC-S vẫn bám tốt theo quỹ đạo đặt, điều này chứng tỏ tín hiệu bất định đã được ước lượng tốt và bù vào tín hiệu điều khiển. Sai lệch bám quỹ đạo e_x, e_y , bám hướng e_{hd} tương đối nhỏ. Tín hiệu bất định ước lượng được $\hat{d}_1, \hat{d}_2$ từ tín hiệu bất định giả thiết d_1, d_2 có sai lệch bám nhỏ. Tín hiệu điều khiển lực trượt dọc $u_1 = \tau_u$, mô-men quay trở $u_2 = \tau_r$ có độ quá điều chỉnh nhỏ. Hai tín hiệu điều khiển u_1, u_2 có sự khác nhau giữa trường hợp bù và chưa bù phần bất định. Sự khác nhau là do trong trường hợp có thành phần bất định thì tín hiệu điều khiển được bù thêm một lượng bất định ước lượng được từ bộ ước lượng. Chất lượng bộ điều khiển DMPC-S cũng phụ thuộc vào việc chọn ma trận xác định dương Q, R , số cửa sổ dự báo N và khoảng thời gian trượt T_a (receding horizon).

3.3.2. Thiết kế bộ điều khiển dự báo bù bất định phản hồi đầu ra (DMPC-O)

Giống như DMPC-S, thuật toán phản hồi đầu ra có bù bất định là sự ghép nối của bộ điều khiển phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách MPC-O-QSTT và bộ ước lượng bù bất định theo (3.10). Tuy nhiên, do ở đây ta không có được trạng thái $\underline{v}_k = [u \ v \ r]^T$ từ hệ thống (không đo được), mà chỉ có thể quan sát được hoặc nhờ bộ quan sát trực tiếp, hoặc nhờ bộ lọc Kalman mở rộng (EKF), nên công thức xác định tín hiệu bù bất định cho ở (3.10) được viết lại thành:

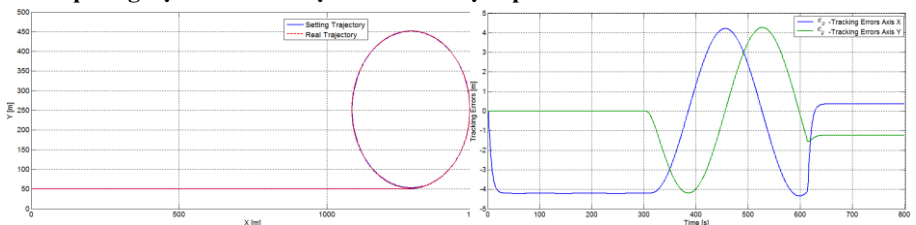
$$\hat{\underline{d}}_k = (\hat{B}^T \hat{B})^{-1} \hat{B}^T \left[(\hat{\underline{v}}_k - \underline{v}_k) - \hat{A}(\hat{\underline{v}}_{k-1})\hat{\underline{v}}_{k-1} + \hat{A}(\underline{v}_{k-1})\underline{v}_{k-1} \right]. \quad (3.12)$$

Cấu trúc điều khiển dự báo phản hồi đầu ra có bù bất định được minh họa như hình 3.11.



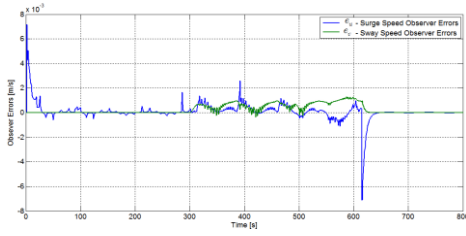
Hình 3.11 Cấu trúc bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra có bù bất định- DMPC-O

Mô phỏng bộ điều khiển dự báo bù bất định phản hồi đầu ra DMPC-O

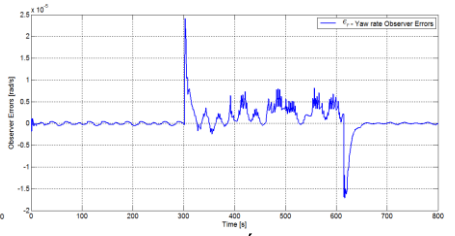


a. Kết quả mô phỏng quỹ đạo chuyển động

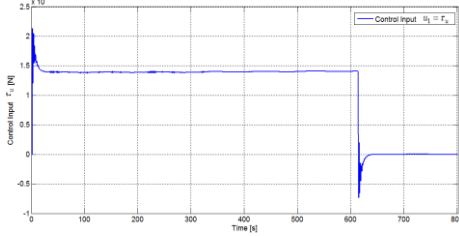
b. Sai lệch bám quỹ đạo



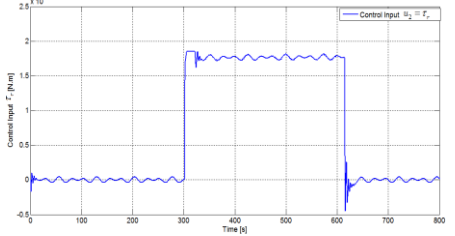
c. Sai lệch quan sát trượt dọc, ngang e_u, e_v



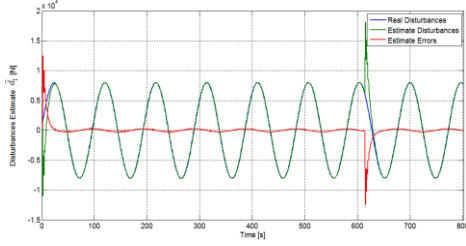
d. Sai lệch quan sát tốc độ quay trở e_r



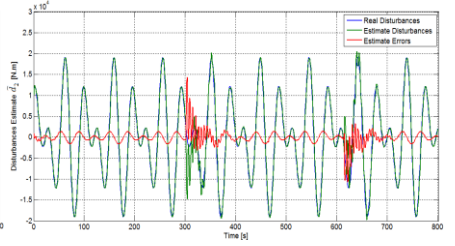
e. Tín hiệu điều khiển τ_u chưa bù bất định



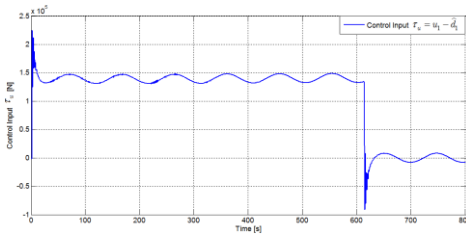
f. Tín hiệu điều khiển τ_r chưa bù bất định



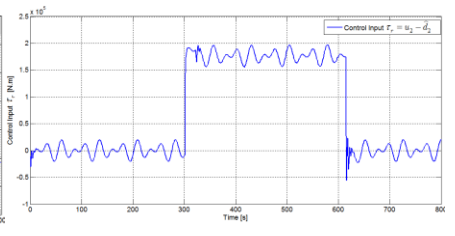
g. Ước lượng bất định $\hat{d}_1$ từ d_1 giả thiết



h. Ước lượng bất định $\hat{d}_2$ từ d_2 giả thiết



i. Tín hiệu điều khiển τ_u khi bù bất định



j. Tín hiệu điều khiển τ_r khi bù bất định

Hình 3.13 Kết quả mô phỏng, kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển DMPC-O

Nhận xét:

Kết quả mô phỏng bộ điều khiển DMPC-O với quỹ đạo đặt hình tròn với tín hiệu bất định hàm ở đầu vào được giả thiết gồm hai thành phần $d = (d_1, d_2)$ cho kết quả tín hiệu quỹ đạo đầu ra của bộ điều khiển DMPC-O bám tốt theo quỹ đạo đặt, chứng tỏ tín hiệu bất định đã được ước lượng và bù tốt trong bộ điều khiển. Sai lệch bám quỹ đạo e_x, e_y lớn nhất 4.2 m, sai lệch bám hướng đi e_{hd} tương đối nhỏ khoảng 1.5 độ. Tín hiệu bất định ước lượng được $\hat{d}_1, \hat{d}_2$ từ tín hiệu bất định giả thiết d_1, d_2 có sai lệch bám nhỏ. Tín hiệu quan sát được từ bộ QSTT có sai lệch bám e_u, e_v, e_r nhỏ. Tín hiệu điều khiển lực

trượt dọc $u_1 = \tau_u$, mô-men quay trở $u_2 = \tau_r$, có độ quá điều chỉnh nhỏ. Hai tín hiệu điều khiển τ_u, τ_r có sự khác nhau giữa trường hợp khi chưa bù và khi bù thành phần bất định hàm, sự khác nhau này là do trong trường hợp mô hình có thành phần bất định thì tín hiệu điều khiển được bù thêm một lượng bất định ước lượng được. Dấu và độ lớn tín hiệu điều khiển τ_u, τ_r khi được bù bất định có xu hướng bù (khử) thành phần bất định giả thiết tác động vào đối tượng.

3.4. Kết luận

3.4.1. Những vấn đề đã thực hiện được

Chương 3 của luận án đã giải quyết được các vấn đề sau: Xây dựng được mô hình bù bất định với tín hiệu bất định hàm ở đầu vào cho đối tượng tàu thủy có mô hình song tuyến. Xây dựng được phương pháp ước lượng và bù bất định mới trên cơ sở tàu thủy là đối tượng có tham số động học biến đổi chậm. Xây dựng được thuật toán bộ điều khiển dự báo bù bất định phản hồi trạng thái (DMPC-S) và phản hồi đầu ra (DMPC-O) trên cơ sở kết hợp bộ điều khiển MPC-S, MPC-O và bộ ước lượng bù bất định. Kết quả mô phỏng bộ điều khiển DMPC-S, DMPC-O cho quỹ đạo đầu ra bám theo quỹ đạo đặt với sai lệch bám nhỏ.

3.4.2. Các vấn đề còn tồn tại

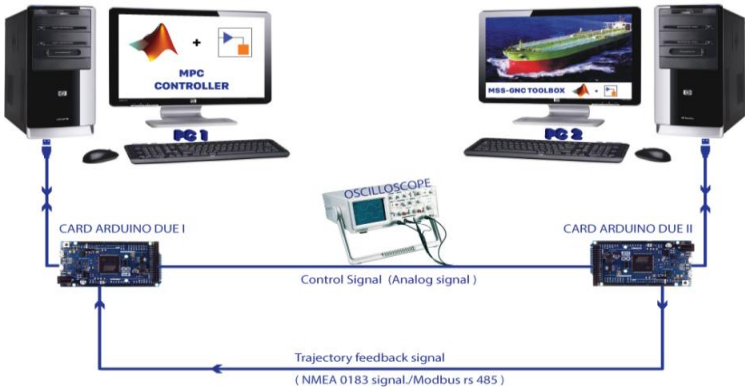
Trong quá trình thiết kế bộ điều khiển DMPC-S, DMPC-O thuật toán chưa đưa ra được quy luật cụ thể để chọn các ma trận xác định dương Q, R trong các bộ điều khiển. Hiện tại, chúng mới chỉ được chỉnh định theo các kết luận định tính.

CHƯƠNG 4 XÂY DỰNG MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM, KIỂM CHỨNG, ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG BỘ ĐIỀU KHIỂN ĐÃ ĐỀ XUẤT

4.1. Xây dựng mô hình thực nghiệm, kiểm chứng bộ điều khiển MPC đề xuất theo phương pháp HIL (Hardware In the Loop)

Cấu trúc mô hình thực nghiệm HIL với bộ điều khiển MPC

Cấu trúc mô hình thực nghiệm HIL với bộ điều khiển MPC đề xuất có cấu trúc như hình 4.3 bao gồm: máy tính 1 cài đặt bộ điều khiển MPC, máy tính 2 cài đặt đối tượng điều khiển, 2 Card giao tiếp Matlab Arduino Due để truyền nhận dữ liệu điều khiển.



Hình 4.3 Cấu trúc mô hình thực nghiệm HIL với bộ điều khiển MPC đề xuất

Bộ điều khiển MPC: thiết kế theo thuật toán DMPCO được cài đặt trên máy tính số 1 (PC1) và Card giao tiếp Arduino Due 1.

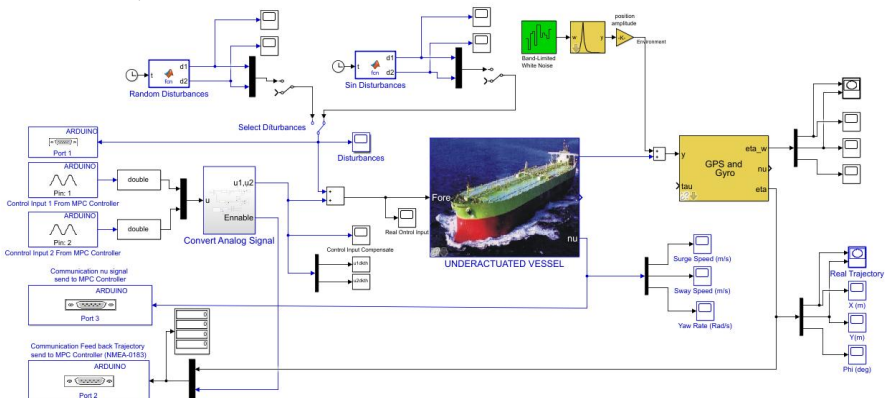
Đối tượng điều khiển (tàu thủy): trong phần thực nghiệm này luận án sử dụng mô hình tàu đã được xây dựng, thiết kế sẵn trong Tool box: MSS-GNC TOOLBOX (thư viện mô

phòng hệ thống điều khiển, dẫn đường trong lĩnh vực Hàng hải) và được cài đặt vào thư viện Simulink của Matlab trên máy tính 2. Mô hình tàu được thiết kế trong Tool box: MSS-GNC TOOLBOX giống như mô hình tàu thực, có đầy đủ những tính chất động học của đối tượng tàu thực.

Tín hiệu điều khiển từ bộ điều khiển τ_u, τ_r MPC (trên PC1) đưa sang điều khiển đối tượng (trên PC2) thông qua tín hiệu truyền nhận Analog (tín hiệu tương tự) giữa 2 Card Arduino Due với mục đích để kiểm tra ảnh hưởng của nhiễu môi trường tới tín hiệu điều khiển. Và việc sử dụng tín hiệu điều khiển dạng tương tự (Analog) 0-10V cũng là để phù hợp với thực tế trong bộ điều khiển chuyển động tàu thủy.

Tín hiệu quỹ đạo và hướng đi của tàu (trên PC2) phản hồi về bộ điều khiển MPC (trên PC1) thông qua truyền thông tín hiệu giữa hai Card arduino Due 1, 2. Tín hiệu quỹ đạo, hướng đi thực của tàu được chuyển sang tín hiệu theo chuẩn Hàng hải NMEA 0183 với mục đích kiểm tra ảnh hưởng của nhiễu môi trường tới việc truyền dẫn tín hiệu quỹ đạo và hướng tàu theo chuẩn Hàng hải quốc tế NMEA 0183. Thực tế trên tàu thủy tín hiệu quỹ đạo, hướng tàu lấy từ GPS và la bàn điện cũng là tín hiệu theo chuẩn NMEA0183. Để mô hình thực nghiệm gần với mô hình thực tế, trên mô hình đối tượng sử dụng thiết bị thư viện *Model Environment* trong MSS-GNC Tool box.

Mô hình tàu, mô hình nhiễu bất định và tham số cài đặt trên hình 4.8.

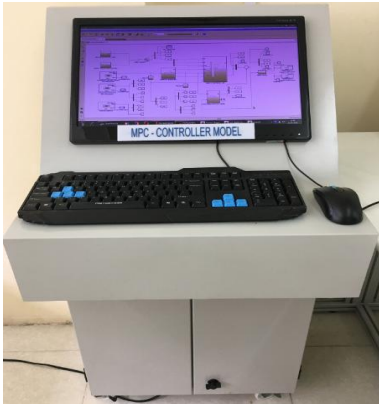


Hình 4.8 Mô hình đối tượng trong thư viện MSS - GNC Toolbox được cài đặt trên PC2

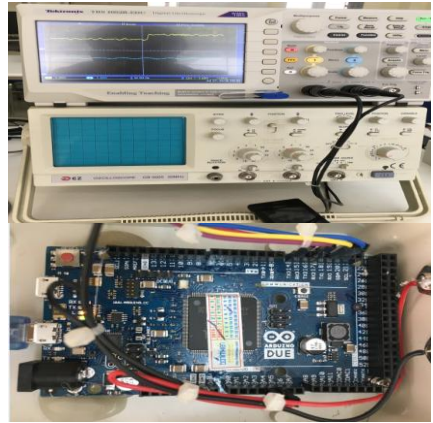
Hình ảnh mô hình vật lý thực nghiệm HIL với bộ điều khiển MPC đề xuất



a. Hình ảnh tổng thể mô hình vật lý



b. Hình ảnh dàn lái bộ điều khiển MPC

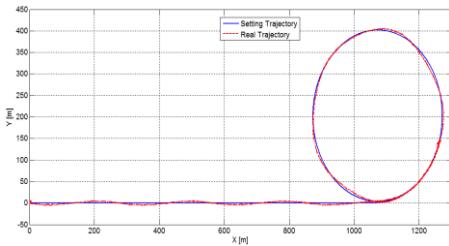


c. Hình ảnh bộ đo tín hiệu Oscilloscope và Card kết nối Arduino Due

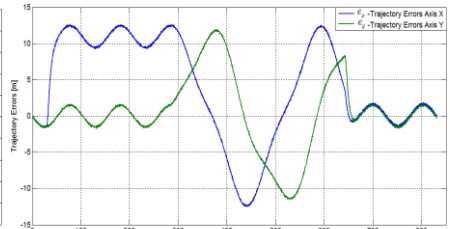
Hình 4.12 Hình ảnh mô hình vật lý thực nghiệm tại phòng thí nghiệm Mô hình hóa tại trường Đại học Hàng hải Việt Nam

4.2. Kết quả thực nghiệm, kiểm chứng bộ điều khiển MPC đề xuất

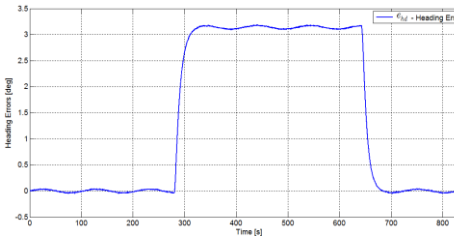
Để kiểm tra, đánh giá chất lượng thuật toán bộ điều khiển, chất lượng bộ quan sát trực tiếp và bộ ước lượng bù bất định đề xuất khi thử nghiệm với đối tượng có mô hình và đặc tính giống đối tượng tàu thực (mô hình tàu trong Tool Box MSS-GNC) và kiểm tra ảnh hưởng của những tác động môi trường tới tín hiệu truyền dẫn và bộ điều khiển. Luận án tiến hành cài đặt thực nghiệm bộ điều khiển theo thuật toán DMPC-O. Bởi bộ điều khiển DMPC-O là sự ghép nối của thuật toán MPC-S, bộ quan sát trực tiếp và bộ ước lượng bù bất định. Thực nghiệm theo phương pháp HIL thu được kết quả như sau:



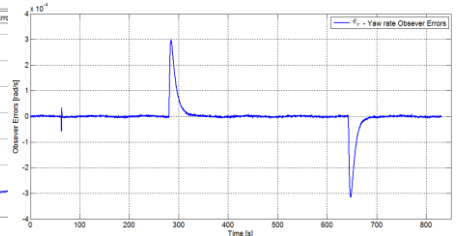
a. Quỹ đạo tàu mô hình MSS-GNC



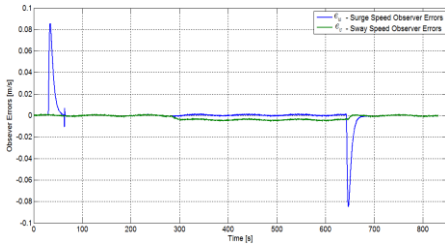
b. Sai lệch bám quỹ đạo e_x, e_y



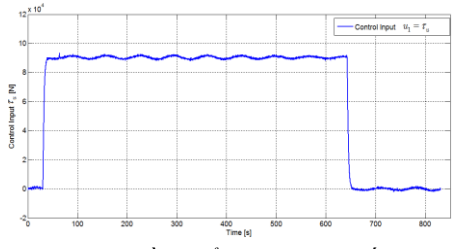
c. Sai lệch bám hướng đi e_{hd}



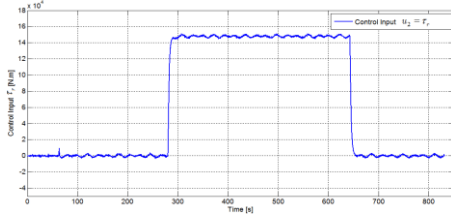
d. Sai lệch quan sát tốc độ quay trở e_r



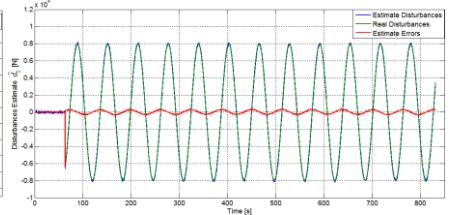
e. Sai lệch quan sát trượt dọc, ngang e_u, e_v



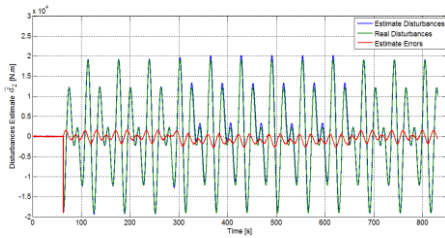
f. Tín hiệu điều khiển τ_u chưa bù bất định



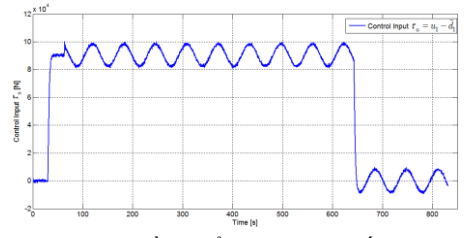
g. Tín hiệu điều khiển τ_r chưa bù bất định



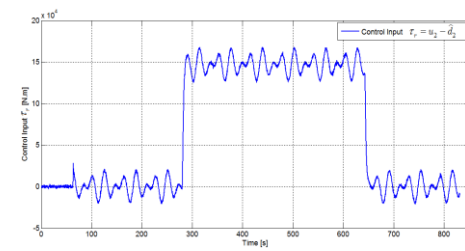
h. Ước lượng bất định $\hat{d}_1$ từ d_1 giả thiết



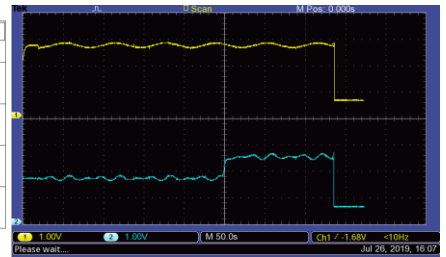
i. Ước lượng bất định $\hat{d}_2$ từ d_2 giả thiết



j. Tín hiệu điều khiển τ_u khi bù bất định



k. Tín hiệu điều khiển τ_r khi bù bất định



l. Tín hiệu τ_u, τ_r đo từ Oscilloscope

Hình 4.13 Kết quả thực nghiệm HIL với bộ điều khiển DMPC-O-quỹ đạo hình tròn

Nhận xét:

Kết quả thực nghiệm bộ điều khiển đề xuất DMPC-O với đối tượng là mô hình tàu trong MSS-GNC Tool box cho các đặc tính về quỹ đạo, đặc tính về bộ QSTT, đặc tính bộ ước lượng bù bất định và đặc tính tín hiệu điều khiển giống như mô phỏng (quỹ đạo bám tốt, tín hiệu ước lượng với sai lệch nhỏ, bộ ước lượng bất định ước lượng tốt tín hiệu bất định theo giả thiết).

Tuy nhiên so với kết quả khi mô phỏng bộ điều khiển DMPC-O hình 3.13 kết quả thực nghiệm có đặc điểm như sau:

Quỹ đạo thực nghiệm với mô hình tàu trong MSS-GNC Tool Box có hiện tượng dao động nhỏ, điều này thể hiện tính quán tính của đối tượng tàu thực. Sai lệch bám quỹ đạo,

bám hướng, sai lệch quan sát tốc độ trượt dọc, trượt ngang, tốc độ quay trở lớn hơn so với kết quả khi mô phỏng hình 3.13, (nhưng vẫn có giá trị nhỏ so với quỹ đạo chuyển động của tàu).

Các đặc tính tín hiệu điều khiển, tín hiệu quan sát, tín hiệu bộ ước lượng có trễ một thời gian ngắn so với khi mô phỏng một khoảng thời gian (tương ứng với khoảng thời gian của một nhịp truyền nhận tín hiệu qua đường truyền vật lý).

Thời gian đáp ứng điều khiển có chậm hơn khi điều khiển qua đường truyền vật lý. Tín hiệu điều khiển đối tượng $u_1 = \tau_u, u_2 = \tau_r$ thông qua truyền nhận tín hiệu tương tự có hiện tượng dao động nhỏ do ảnh hưởng của nhiễu môi trường

Tín hiệu quỹ đạo và hướng đi thực của tàu dưới dạng tín hiệu NMEA0183 trên nền Modbus RS485 chịu ảnh hưởng rất ít bởi môi trường ngoài.

4.3 Kết luận

Thông qua thực nghiệm theo phương pháp HIL bộ điều khiển DMPC-O với mô hình tàu trên MSS-GNC đã kiểm nghiệm được: chất lượng bộ điều khiển MPC, bộ QSTT, bộ ước lượng bù bất định khi có ảnh hưởng của môi trường vật lý. Kiểm nghiệm được chất lượng tín hiệu điều khiển khi truyền trong môi trường vật lý. Thực nghiệm cho thấy chất lượng bộ điều khiển, bộ QSTT, bộ ước lượng và bù bất định cho kết quả tốt giống với kết quả khi mô phỏng và đúng với lý thuyết đặt ra.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Những vấn đề đã được giải quyết

Quá trình thực hiện đề tài, luận án đã giải quyết được những nội dung sau:

1. Đã nghiên cứu xây dựng được thuật toán bộ điều khiển dự báo MPC trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến cho đối tượng tàu thủy có mô hình toán dạng thiếu cơ cấu chấp hành khi mô hình tàu xác định và mô hình tàu có chứa thành phần bất định. Luận án chứng minh được bộ điều khiển đề xuất là ổn định tiệm cận. Điểm mới của thuật toán này là sử dụng nguyên lý điều khiển MPC tuyến tính để điều khiển đối tượng phi tuyến (tàu thủy), trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến dọc theo trục thời gian. Ưu điểm của bộ điều khiển này là số lệnh tính toán ít, thời gian tính toán nhanh, giải quyết bài toán tối ưu đơn giản.
2. Đã nghiên cứu và xây dựng được bộ quan sát trạng thái mới theo phương pháp quan sát trực tiếp từ mô hình liên tục tàu thủy ba bậc tự do trên mặt phẳng ngang với giả thiết là không có nhiễu đo.
3. Đã nghiên cứu và xây dựng được phương pháp ước lượng và bù thành phần bất định mới (phương pháp xấp xỉ thành phần bất định dựa trên cơ sở tối ưu hóa sai lệch so với mô hình mẫu) để giải quyết bài toán điều khiển chuyển động tàu thủy khi mô hình có chứa thành phần bất định.
4. Xây dựng được mô hình thực nghiệm theo phương pháp HIL để kiểm nghiệm chất lượng bộ điều khiển đề xuất.

Những vấn đề còn tồn tại

Những vấn đề trong quá trình thực hiện đề tài mà luận án còn bỏ ngỏ, chưa giải quyết được gồm có:

1. Chưa đưa ra được nguyên tắc chọn hai ma trận đối xứng xác định dương Q, R ở bước khởi tạo ban đầu trong các lưu đồ thuật toán một cách tốt nhất.
2. Bộ điều khiển chưa được thử nghiệm trong môi trường thực trên tàu biển.

CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

I. Công trình công bố trong nước

- 1 **Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng, Phạm Kỳ Quang** (2015): *Ổn định lắc ngang tàu thủy sử dụng phương pháp toàn phương gián tiếp*. Tạp chí KHCNHH-Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, số 42, 04-2015, trang 40
- 2 **Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng, Phạm Kỳ Quang** (2015): *Điều khiển tối ưu toàn phương tuyến tính chuyển động tàu thủy*. Tạp chí KHCNHH-Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, số 43, 08-2015, trang 23-27
- 3 **Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng**, (2016): *Nâng cao chất lượng ổn định hướng đi tàu thủy sử dụng bộ quan sát trạng thái*. Hội nghị quốc tế khoa học công nghệ Hàng hải 26-29/10/2016. ISBN: 978-604-937-127-1, trang 373-379
- 4 **Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng** (2017), “*Điều khiển chuyển động tàu cánh ngầm sử dụng phương pháp thích nghi trực tiếp*”, Tuyển tập công trình KHCN – Hội thảo điều khiển và tự động hóa cho phát triển bền vững CASD – 2017, trang 29.
- 5 **Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng**, (2019): *Ổn định hướng đi tàu thủy dựa trên điều khiển dự báo theo mô hình*. Tạp chí KHCNHH-Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, số 58, 04-2019, trang 27-31
- 6 **Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng**, (2019): *Điều khiển chuyển động theo quỹ đạo tàu thủy thiếu cơ cấu chấp hành dựa trên mô hình dự báo hệ song tuyến*. Tạp chí GTVT-Bộ giao thông vận tải, số 05/2019, trang 126-129
- 7 **Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng**, (2019): *Thiết kế bộ điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt dựa theo nguyên lý RHC trên nền LQR*. Tạp chí KHCN-Trường Đại học giao thông vận tải Hồ Chí Minh, số 32-05/2019, trang 41-46
- 8 **Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng, Trương Công Mỹ** (2019): *Xây dựng bộ điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo dựa trên mô hình dự báo theo nguyên lý tách khi có ràng buộc tín hiệu điều khiển*. Tạp chí KHCNHH-Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, số 59, 08-2019, trang 47-52.
- 9 **Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng**, (2019): *Điều khiển bám quỹ đạo tàu nổi thiếu cơ cấu chấp hành dựa trên mô hình dự báo kết hợp bù thành phần bất định*. Hội nghị - Triển lãm quốc tế lần thứ 5 về Điều khiển và Tự động hoá -VCCA-2019, N₀. ID42.

II. Công trình công bố quốc tế

- 1 **Nguyen, Huu-Quyen, Tran, Anh-Dung, Nguyen, Trong-Thang**, (2019): *The Bilinear Model Predictive Method-based Motion Control System of Underactuated-Ship with Uncertain Model in the Disturbance*. **Processes** 7, no.7:445. (ISI, SCIE, SCOPUS, IF=1.963)