

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG MPC-LTI CHO ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN LÀN XE TỰ HÀNH

RESEARCH ON APPLYING MPC-LTI FOR LANE-CHANGING CONTROL OF AUTONOMOUS VEHICLES

Trần Văn Lợi^{1,*}, Nguyễn Hùng Mạnh², Trần Xuân Nhã¹

¹Trường Đại học Giao thông vận tải

²Trường Đại học Điện lực (EPU)

Email: *tvloi_ph@utc.edu.vn;

manhnh@epu.edu.vn;

6251040090@st.utc2.edu.vn

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu xe tự hành, việc điều khiển chuyển làn là một bài toán quan trọng đòi hỏi khả năng bám quỹ đạo tham chiếu với độ chính xác và ổn định cao. Bài báo trình bày phương pháp điều khiển dự báo mô hình (Model Predictive Control - MPC) áp dụng cho hệ thống tuyến tính bất biến theo thời gian (Linear Time-Invariant - LTI), cụ thể trong trường hợp vận tốc của xe được coi không đổi. Mục tiêu chính của nghiên cứu là khảo sát và hiệu chỉnh các hệ số trọng số trong hàm chi phí toàn phương (quadratic cost function), nhằm xác định bộ tham số tối ưu cho việc bám quỹ đạo hiệu quả. Hiệu suất của bộ điều khiển được đánh giá thông qua các mô phỏng trên nhiều dạng quỹ đạo khác nhau. Kết quả mô phỏng cho thấy việc tối ưu hóa các tham số không chỉ cải thiện độ chính xác bám quỹ đạo mà còn tăng cường độ mượt và độ ổn định của xe, đồng thời thỏa mãn các ràng buộc vật lý và hệ thống. Phương pháp này cho thấy tiềm năng ứng dụng điều khiển cho các hệ thống xe tự hành.

Từ khóa: Ô tô tự lái (Autonomous Vehicles); Điều khiển tối ưu (Optimal Control); Điều khiển dự báo mô hình (Model Predictive Control); Hệ thống bất biến theo thời gian (LTIs-Linear Time Invariant System).

ABSTRACT

In autonomous vehicle research, lane-changing control is a key challenge requiring precise and stable trajectory following. This paper introduces a Model Predictive Control (MPC) approach applied to a Linear Time-Invariant (LTI) system, assuming constant vehicle speed. The study focuses on tuning the weighting coefficients in the quadratic cost function to optimize parameters for effective trajectory tracking. Controller performance is assessed through simulations across various trajectories. Results demonstrate that parameter optimization enhances tracking accuracy, vehicle smoothness, and stability while meeting physical and system constraints. The method shows promise for autonomous vehicle control applications.

Keywords: Autonomous Vehicles; Optimal Control; Model Predictive Control; LTIs-Linear Time Invariant System.

1. GIỚI THIỆU

Điều khiển quỹ đạo chính xác, đặc biệt là trong các tình huống chuyển làn hoặc bám làn, là một yêu cầu quan trọng đối với chuyển động an toàn và hiệu quả của xe tự hành. Trong số các kỹ thuật điều khiển tiên tiến, điều khiển dự báo mô hình (Model Predictive Control - MPC) có ưu điểm nổi trội nhờ khả năng xử lý các ràng buộc của hệ thống và tối ưu hóa hiệu năng điều khiển trong một khoảng thời gian dự đoán [1]. MPC đặc biệt phù hợp với các bài toán điều khiển phương tiện phức tạp, đòi hỏi sự cân bằng giữa độ chính xác bám quỹ đạo và các yếu tố như cảm giác của hành khách và giới hạn vật lý của xe [1, 2].

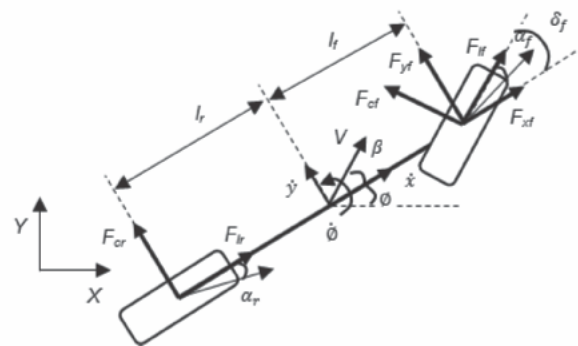
Các mô hình phức tạp như hệ thống biến thiên tuyến tính theo tham số (Linear Parameter-Varying - LPV) cho phép mô tả chính xác động học phi tuyến của xe dưới các điều kiện vận hành thay đổi. Tuy nhiên mô hình tuyến tính bất biến theo thời gian (Linear Time-Invariant - LTI) vẫn được coi là bước khởi đầu để đơn giản hóa bài toán thiết kế bộ điều khiển. Khi xem xét các chế độ vận tốc không đổi hoặc thay đổi chậm, mô hình LTI kết hợp với MPC (MPC-LTI) vẫn đem lại sự cân bằng hợp lý giữa độ phức tạp tính toán và hiệu quả điều khiển [3].

Phương pháp MPC-LTI đã được đưa ra trong nhiều nghiên cứu [1, 2, 3], tuy nhiên việc tinh chỉnh các tham số ma trận trọng số (Q, R, S) trong hàm chi phí của bộ điều khiển đóng vai trò quyết định đến chất lượng điều khiển. Chúng ảnh hưởng trực tiếp đến sự ưu tiên giữa việc giảm thiểu sai số bám quỹ đạo và hạn chế nỗ lực điều khiển (ví dụ: góc đánh lái), qua đó tác động đến độ ổn định và độ mượt của chuyển động.

Bài báo nghiên cứu nhằm ứng dụng và đánh giá bộ điều khiển MPC-LTI cho bài toán điều khiển chuyển làn của xe tự hành trong điều kiện vận tốc không đổi. Đóng góp chính của bài báo là khảo sát ảnh hưởng của việc điều chỉnh các ma trận trọng số Q, R và S trong hàm chi phí toàn phương của MPC đến hiệu suất bám quỹ đạo, độ mượt và sự ổn định của xe thông qua các mô phỏng với các quỹ đạo đặt ra. Mục tiêu là tìm ra một bộ tham số tối ưu, cung cấp cơ sở cho việc triển khai thực tế bộ điều khiển.

2. MÔ HÌNH HÓA VÀ THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

2.1. Mô hình động lực học ô tô



Hình 1. Mô hình động lực học ô tô 1 vết bánh xe

Trong nghiên cứu này, mô hình động lực học quay vòng ô tô 1 vết 2 bậc tự do (Bicycle model – 2 DOF) [2, 4] được xem xét để mô tả bài toán quỹ đạo chuyển động của xe (hình 1).

Thiết lập hệ phương trình động lực học theo phương ngang của xe [2, 4]:

$$\begin{cases} m(\ddot{y} + \dot{x}\phi) &= F_{yf} + F_{yr} \\ I_z\ddot{\phi} &= l_f F_{yf} - l_r F_{yr} \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó: m - Khối lượng của xe (toàn tải); I_z - Mô men quán tính của xe quanh trục

thẳng đứng đi qua trọng tâm; Oxy - Tọa độ gắn với trọng tâm của xe; F_{yf} , F_{yr} - Lực ngang tác dụng lên lốp trước và lốp sau của xe; l_f , l_r - Khoảng cách từ tâm khối lượng của xe đến trục trước và trục sau.

Khi quay vòng dưới tác dụng của lực ly tâm, thông qua sự tương tác giữa bánh xe và mặt đường, phản lực ngang từ mặt đường tác dụng lên các bánh xe trước, sau được giả thiết tuyến tính hoá [4].

$$\begin{cases} F_{yf} = C_{yf}\alpha_f \\ F_{yr} = C_{yr}\alpha_r \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó: C_{yf} , C_{yr} và α_f , α_r lần lượt là hệ số độ cứng góc quay vòng và góc trượt ngang của bánh trước, sau. Các góc trượt ngang được xác định bởi các phương trình sau [4]:

$$\begin{cases} \alpha_f = \delta_f - \tan\left(\frac{\dot{y} + l_f\dot{\phi}}{\dot{x}}\right) = \delta_f - \left(\frac{\dot{y} + l_f\dot{\phi}}{\dot{x}}\right) \\ \alpha_r = -\tan\left(\frac{\dot{y} - l_r\dot{\phi}}{\dot{x}}\right) = \left(\frac{\dot{y} - l_r\dot{\phi}}{\dot{x}}\right) \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó, $\delta_{f,r}$ là góc quay bánh xe dẫn hướng trước, sau. Ở đây, chỉ bánh xe trước dẫn hướng ($\delta_r = 0$).

Việc xác định quỹ đạo chuyển động của xe được biểu diễn trong hệ quy chiếu quán tính với hệ trục tọa độ OXY, mối quan hệ giữa 2 hệ tọa độ:

$$\dot{Y} = \dot{x} \sin \phi + \dot{y} \cos \phi \quad (4)$$

Phương trình động lực học của xe theo phương ngang được biểu diễn lại:

$$\begin{cases} m(\ddot{y} + \dot{x}\dot{\phi}) = (C_{yf}(\delta_f - \frac{\dot{y} + l_f\dot{\phi}}{\dot{x}}) + C_{yr}\frac{\dot{y} - l_r\dot{\phi}}{\dot{x}}) \\ I_z\ddot{\phi} = (l_f C_{yf}(\delta_f - \frac{\dot{y} + l_f\dot{\phi}}{\dot{x}}) - l_r C_{yr}\frac{\dot{y} - l_r\dot{\phi}}{\dot{x}}) \end{cases} \quad (5)$$

Biểu diễn hệ phương trình trong không gian trạng thái:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu \\ Y = CX \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó, $x = [\dot{y}, \phi, \dot{\phi}, y]$, là vector trạng thái, $y = [\phi, y]$ là đầu ra của hệ thống, $u = \delta_f$ là đầu vào điều khiển, và A, B, C là các ma trận trạng thái, điều khiển và đầu ra, được cho bởi:

$$A = \begin{bmatrix} -2\frac{C_{yf}+C_{yr}}{m\dot{x}} & 0 & -\dot{x} - 2\frac{C_{yf}-C_{yr}}{m\dot{x}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -2\frac{C_{yf}-C_{yr}}{m\dot{x}} & 0 & -2\frac{C_{yf}l_f^2-C_{yr}l_r^2}{m\dot{x}} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 2\frac{C_{yf}}{m} \\ 0 \\ 2\frac{C_{yf}l_f}{I_z} \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.2. Thiết kế bộ điều khiển MPC

Điều khiển dự báo mô hình (MPC) được lựa chọn do khả năng giải quyết hiệu quả các bài toán điều khiển tối ưu với nhiều ràng buộc, phù hợp cho hệ thống xe tự hành. Nguyên lý cơ bản của MPC là sử dụng mô hình động lực học của hệ thống để dự đoán các trạng thái tương lai trong một khoảng thời gian hữu hạn, gọi là chân trời dự đoán (N_p). Tại mỗi bước thời gian k , bộ điều khiển sẽ giải một bài toán tối ưu nhằm tìm ra chuỗi tín hiệu điều khiển tối ưu $\Delta u_{k+i/k}$ ($i=0, \dots, N_{p-1}$) bằng cách cực tiểu hóa một hàm chi phí, thường có dạng toàn phương [2, 3].

Hàm chi phí này phản ánh mục tiêu điều khiển, bao gồm việc giảm thiểu sai lệch giữa quỹ đạo dự đoán và quỹ đạo tham chiếu, đồng thời hạn chế nỗ lực điều khiển và thỏa mãn các ràng buộc vật lý của xe (ví dụ: giới hạn góc lái,

tốc độ thay đổi góc lái). Mô hình dự đoán được sử dụng trong bộ điều khiển MPC thực hiện việc rời rạc hóa của mô hình động lực học LTI đã được trình bày trong phương trình:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{X}_k + \mathbf{B}_d \mathbf{u} \\ \mathbf{Y}_k = \mathbf{C}_d \mathbf{X}_k \end{cases} \quad (8)$$

Để tích hợp các ràng buộc lên tín hiệu điều khiển (góc quay bánh xe dẫn hướng δ) và tốc độ thay đổi của nó ($\Delta\delta$) vào bài toán tối ưu một cách trực tiếp, kỹ thuật tăng cường trạng thái (state augmentation) được áp dụng. Vector trạng thái mới được định nghĩa là $\widetilde{\mathbf{X}}_k = [\mathbf{X}_k^T, \delta_{k-1}]^T$, và đầu vào mới là tốc độ thay đổi góc lái $\Delta u_k = \Delta\delta_k$. Mô hình dự đoán tăng cường (hàm chi phí) có dạng [2, 3]:

$$\begin{cases} \widetilde{\mathbf{X}}_{k+1} = \widetilde{\mathbf{A}}_d \widetilde{\mathbf{X}}_k + \widetilde{\mathbf{B}}_d \Delta \widetilde{\mathbf{u}}_k \\ \widetilde{\mathbf{Y}}_k = \widetilde{\mathbf{C}}_d \widetilde{\mathbf{X}}_k \end{cases} \quad (9)$$

Trong đó, các biến trạng thái mới được bổ sung:

$$\begin{aligned} \widetilde{\mathbf{X}}_k &= \begin{bmatrix} \mathbf{X}_k \\ \delta_{k-1} \end{bmatrix}; \widetilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & \mathbf{B}_d \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix}; \widetilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_d \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}; \\ \widetilde{\mathbf{C}} &= [\mathbf{C}_d \quad 0]; \widetilde{\mathbf{X}}_{k+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{k+1} \\ \delta_k \end{bmatrix}; \\ &\Delta u_k, \Delta u_{k+1}, \dots, \Delta u_{k+N_p-1} \end{aligned} \quad (10)$$

2.3. Điều khiển tối ưu bằng hàm chi phí bậc 2

Việc tìm ra giá trị $\Delta\delta_k$ tối ưu cho mỗi bước thời gian cần phải dựa vào hàm chi phí bậc hai. Hàm điều khiển này thực hiện việc giảm đi sai số giữa giá trị quỹ đạo tham chiếu và giá trị dự đoán sao cho giá trị đầu ra của hàm (J) là nhỏ nhất [1, 2, 3, 5, 6].

$$\mathbf{e} = \mathbf{Y}_{\text{ref}} - \mathbf{Y}_{\text{pred}}; \quad (11)$$

$$\min J = \frac{1}{2} \mathbf{e}_{k+N}^T \mathbf{S} \mathbf{e}_{k+N} + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} [\mathbf{e}_{k+i}^T \mathbf{Q} \mathbf{e}_{k+i} + \Delta\delta_{k+i}^T \mathbf{R} \Delta\delta_{k+i}] \quad (12)$$

$$\text{st : } \mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{X}_k + \mathbf{B}_d \mathbf{u}; \Delta u_{\min} \leq \Delta u \leq \Delta u_{\max}$$

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \quad (13)$$

Trong hàm chi phí (12), các ma trận trọng số Q, R, và S đóng vai trò quyết định đến hành vi của bộ điều khiển. Cụ thể như sau: Q xác định mức độ ưu tiên cho việc giảm thiểu sai số giữa quỹ đạo thực tế và quỹ đạo tham chiếu (Q lớn có nghĩa bộ điều khiển quan tâm nhiều vào việc giảm sai số bám quỹ đạo); R điều chỉnh nỗ lực điều khiển biên độ của góc lái δ (R tăng sẽ hạn chế sự thay đổi lớn của góc lái giúp chuyển hướng mượt hơn nhưng độ chính xác bám quỹ đạo có thể giảm); S đánh giá sai số cuối cùng tại chân trời dự đoán, giúp đảm bảo xe không chỉ bám quỹ đạo tốt mà còn đạt được trạng thái mong muốn ở cuối chân trời. Việc lựa chọn hợp lý các ma trận này giúp đóng vai trò quan trọng để đạt được sự cân bằng giữa độ chính xác và độ mượt của chuyển động.

Ở phương trình chi phí ($\min J$), e biểu thị sai số giữa giá trị kết quả tham chiếu và giá trị kết quả dự đoán tại miền thời gian phía trước. Cụ thể hơn $\frac{1}{2} \mathbf{e}_{k+N}^T \mathbf{S} \mathbf{e}_{k+N}$ đánh giá mức độ ưu tiên của sai số kết quả cuối cùng trong chuỗi điều khiển. Trong khi đó, $\mathbf{e}_{k+i}^T \mathbf{Q} \mathbf{e}_{k+i}$ đánh giá mức độ ưu tiên của sai số quá trình và $\Delta\delta_{k+i}^T \mathbf{R} \Delta\delta_{k+i}$ đánh giá nỗ lực điều khiển. Qua biến đổi, đưa hàm J về dạng [3, 5, 6]:

$$J'' = \frac{1}{2} \Delta\delta_{\sigma}^T \bar{\mathbf{H}} \Delta\delta_{\sigma} + [\widetilde{\mathbf{X}}_k^T \quad \bar{\mathbf{r}}_{\sigma}^T] \bar{\mathbf{F}}^T \Delta\delta_{\sigma} \quad (14)$$

Áp dụng hàm suy giảm độ dốc vào phương trình trên:

$$\Delta J'' = \bar{\mathbf{H}} \Delta\delta_{\sigma} + \bar{\mathbf{F}} \begin{bmatrix} \widetilde{\mathbf{X}}_k \\ \bar{\mathbf{r}}_{\sigma} \end{bmatrix} = 0 \quad (15)$$



Từ đây tìm ra được chuỗi giá trị điều khiển để đưa vào mô hình động lực học của xe tự hành:

$$\Delta\delta_{\sigma} = -\bar{H}^{-1}\bar{F}\begin{bmatrix} \bar{X}_k \\ \bar{r}_{\sigma} \end{bmatrix} \quad (16)$$

3. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ

3.1. Các thông số cho mô phỏng

Các thông số của xe tự hành được sử dụng cho mô phỏng được đưa ra ở bảng 1.

Bảng 1. Thông số xe tự hành

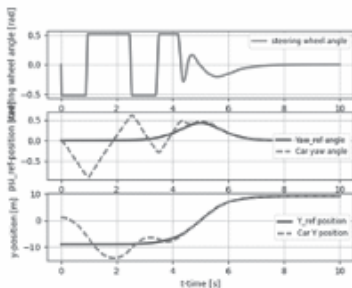
Tham số	Giá trị	Tham số	Giá trị
m	1500	l_f	2
I_z	3000	l_r	3
C_{af}	19000	$\dot{x}$	20
C_{ar}	33000	hz	45

3.2. Mô phỏng và kết quả

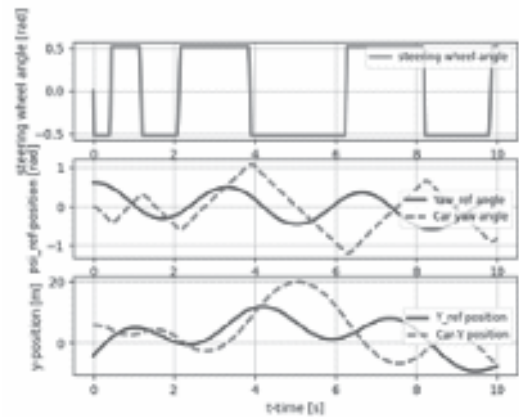
Mô phỏng với bộ tham số ban đầu trong MPC:

$$S=1\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Q=1\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R=1[1]; \quad (17)$$

Kết quả mô phỏng như thể hiện trên hình 2, 3.



Hình 2. [1] Mô phỏng 1 - Quỹ đạo đường cong.



Hình 3. [2] Mô phỏng 1 - Quỹ đạo đường sin.

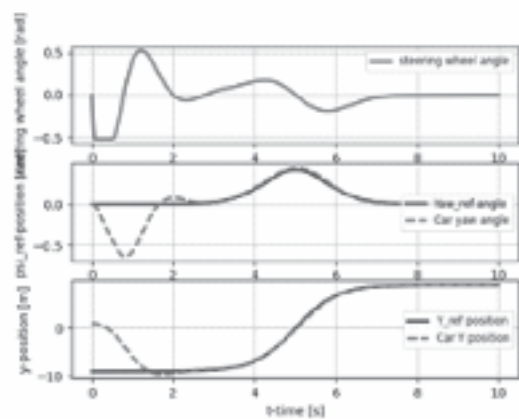
Nhận xét: Với bộ tham số bộ điều khiển gốc (17), bộ điều khiển trạng thái chuyển làn thực hiện tốt ở quỹ đạo cong nhưng tại quỹ đạo hình sin (yêu cầu đánh lái nhiều) kém hiệu quả.

*) Mô phỏng được điều chỉnh bộ tham số tối ưu trong MPC:

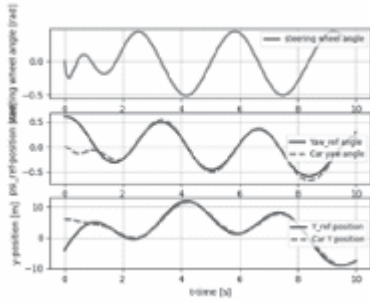
$$S=17.3e1\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad Q=25.3e3\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$R=27.5e4[1]$$

Kết quả mô phỏng như thể hiện trên hình 4, 5.



Hình 4. [3] Mô phỏng 2 - Quỹ đạo đường cong.



Hình 5. [4] Mô phỏng 2 - Quỹ đạo đường sin.

Nhận xét: Với bộ tham số tối ưu (18), bộ điều khiển MPC-LTI cho thấy sự cải thiện vượt trội trên cả hai loại quỹ đạo. Việc tinh chỉnh các ma trận trọng số (S , Q , R) giúp đạt được sự cân bằng tốt hơn giữa độ chính xác bám quỹ đạo và độ mượt của chuyển động. Đặc biệt, khả năng xử lý quỹ đạo hình sin – vốn đòi hỏi điều khiển phức tạp – được cải thiện đáng kể. Như vậy, việc hiệu chỉnh các tham số trong hàm chi phí góp phần cải thiện đáng kể hiệu suất của bộ điều khiển.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã trình bày việc thiết kế và mô phỏng bộ điều khiển dự báo mô hình tuyến tính bất biến theo thời gian (MPC-LTI) cho bài toán điều khiển phương ngang (chuyển làn/bám làn) của xe tự hành với giả thiết vận tốc không đổi.

Kết quả mô phỏng trên các quỹ đạo tham chiếu bao gồm đường cong đơn giản và đường hình sin phức tạp, đã khẳng định vai trò quan trọng của việc lựa chọn các ma trận trọng số Q , R , và S trong hàm chi phí. Bộ tham số ban đầu cho thấy khả năng điều khiển chấp nhận được trên quỹ đạo đơn giản nhưng hiệu suất suy giảm đáng kể trên quỹ đạo hình sin, thể hiện qua sai số bám lớn và dao động trong tín hiệu điều khiển (góc lái). Ngược lại, sau khi thực hiện tối ưu hóa các trọng số này, bộ điều khiển MPC-LTI đã thể hiện sự cải thiện vượt trội. Khả năng bám theo

quỹ đạo tham chiếu trở nên chính xác hơn đáng kể, đồng thời chuyển động của xe cũng mượt và ổn định hơn, ngay cả đối với quỹ đạo đòi hỏi sự thay đổi hướng liên tục.

Kết quả cho thấy, ngay cả trong khuôn khổ MPC-LTI với giả thiết vận tốc không đổi, việc hiệu chỉnh cẩn thận các tham số trong hàm chi phí là yếu tố quyết định để đạt được hiệu suất điều khiển mong muốn, cân bằng giữa độ chính xác và độ mượt. Nghiên cứu đã cung cấp một minh chứng thực tiễn về tiềm năng của phương pháp MPC-LTI và nhấn mạnh tầm quan trọng của bước hiệu chỉnh tham số điều khiển.

Hướng phát triển trong tương lai có thể tập trung vào việc mở rộng phương pháp sang sử dụng mô hình biến thiên theo tham số (MPC-LPV) với giả thiết vận tốc không đổi, cho phép bộ điều khiển thích ứng tốt hơn với các điều kiện vận hành thực tế đa dạng hơn. ♦

Ngày nhận bài: 12/5/2025

Ngày phản biện: 02/6/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Alcalá, E., Puig, V., & Quevedo, J. (2019), "LPV-MPC control for autonomous vehicles". IFAC PapersOnLine, 52(28), 106-113.
- [2]. Kebbaty, Y., Puig, V., Ait-Oufroukh, N., Vigneron, V., & Ichalal, D. (n.d.), "Optimized adaptive MPC for lateral control of autonomous vehicles". IFAC-PapersOnLine. Manuscript submitted for publication.
- [3]. Kebbaty, Y., Ait Oufroukh, N., Vigneron, V., & Ichalal, D. (2022), "Coordinated PSO-PID based longitudinal control with LPV-MPC based lateral control for autonomous vehicles". 20th European Control Conference (ECC 2022) (pp. 518-523). London, United Kingdom.
- [4]. H.B. Pacejka, (2008), "Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility". International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, (August 2012), 37-41.
- [5]. B. Zhang, C. Zong, G. Chen, and B. Zhang, "Electrical Vehicle Path Tracking Based Model Predictive Control with a Laguerre Function and Exponential Weight". IEEE Access, vol. 7, pp. 17082-17097, 2019.
- [6]. Guo, D. Cao, H. Chen, Z. Sun, and Y. Hu, "Model predictive path following control for autonomous cars considering a measurable disturbance: Implementation, testing, and verification". Mech. Syst. Signal Process., vol. 118, pp. 41-60, 2019.