

NGHIÊN CỨU, XÂY DỰNG GIẢI PHÁP ĐIỀU KHIỂN CHO Ô TÔ TỰ HÀNH, ỨNG DỤNG MÔ HÌNH ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO RESEARCH AND BUILDING A AUTONOMOUS VEHICLES CONTROL STRATEGY BY APPLICATION OF MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC)

TRẦN THÀNH LAM*, ĐỖ VĂN TỬ, NGUYỄN SĨ ĐỈNH, LÃ QUỐC TIỆP

Khoa Động lực, Học viện Kỹ thuật Quân sự

*Email liên hệ: lam.tranhanh@lqdtu.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo trình bày cơ sở lý thuyết về mô hình điều khiển dự báo Model Predictive Control (MPC). Nghiên cứu xây dựng thuật toán điều khiển, cũng như hệ phương trình động lực học tương đương của phương tiện. Ứng dụng phần mềm Matlab - Simulink mô phỏng và đánh giá kết quả nghiên cứu khi cho ô tô tự hành trong điều kiện chuyển làn đơn. Từ các kết quả chính của nghiên cứu, so sánh, đánh giá được hiệu quả của bộ điều khiển MPC thích ứng khi ứng dụng cho ô tô tự hành, thông qua các thông số: quỹ đạo của ô tô theo phương ngang, góc quay vành tay lái và góc quay thân xe.

Từ khóa: Điều khiển dự báo, phương tiện tự hành, động lực học phương tiện, điều khiển phương tiện.

Abstract

This paper presents the theoretical basis of the Model Predictive Control (MPC). Research to establish the control algorithm, the physical diagram of the autopilot system, as well as the equivalent system of dynamic equations of the vehicle. Matlab - Simulink software is applied to simulate and evaluate research results when self-driving cars change lanes. Evaluation parameters are horizontal trajectory, steering wheel and yaw angle of the vehicle. In addition, the main results of the study are also used to compare the performance of standard and adaptive MPC controllers.

Keywords: Model Predictive Control, autonomous vehicle, vehicle dynamics, vehicle control.

1. Đặt vấn đề

Việc nghiên cứu các giải pháp điều khiển phương tiện tự hành dựa trên động lực học chuyển động của phương tiện là một chủ đề được nhiều nhà nghiên cứu

quan tâm. Hiện nay có năm cấp độ tự hành chính của phương tiện, đó là: Cấp độ 1 (hỗ trợ người lái); Cấp độ 2 (ô tô tự đánh lái, tăng tốc và phanh dưới sự giám sát của lái xe); Cấp độ 3 (tự lái có điều kiện; có lái xe); Cấp độ 4 (tự lái có điều kiện, không lái xe); Cấp độ 5 (tự lái không điều kiện, tự lái hoàn toàn). Mục tiêu của quá trình điều khiển ô tô tự hành là thay đổi quỹ đạo chuyển động của ô tô, một cách tự động, dựa trên khả năng dự báo và phát hiện vật cản trên đường. Thực tế người lái luôn duy trì quỹ đạo chuyển động của ô tô theo quỹ đạo mong muốn bằng cách tác động trực tiếp vào vành tay lái, bàn đạp ga, bàn đạp phanh và các thao tác điều khiển khác. Như vậy để phương tiện có thể tự hành hoàn toàn (cấp độ 5), thì sự can thiệp trực tiếp của người lái vào các cơ cấu chấp hành trên phương tiện sẽ được hạn chế, thay vào đó là các hệ thống điều khiển tự động. Có thể kể đến hệ thống lái điều khiển điện, hệ thống điều khiển tăng tốc và phanh, hệ thống ổn định và kiểm soát an toàn của ô tô khi quay vòng hoặc chuyển làn. Trong thời gian vừa qua đã có nhiều nghiên cứu trong và ngoài nước đề cập tới nghiên cứu các giải pháp điều khiển ô tô tự hành. Tuy nhiên do tính chất phức tạp của vấn đề này, việc áp dụng cụ thể các giải pháp điều khiển lên một hệ thống trong ô tô cần có thêm nhiều công trình nghiên cứu.

2. Cơ sở lý thuyết

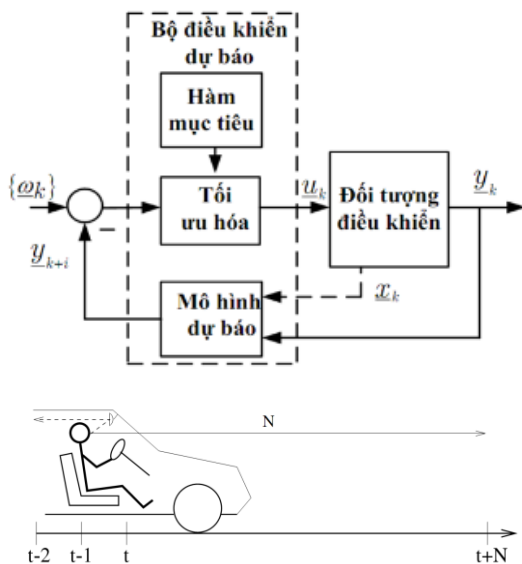
2.1. Cơ sở lý thuyết mô hình điều khiển dự báo MPC

Hiện nay điều khiển dự báo là chiến lược điều khiển được sử dụng phổ biến nhất trong việc điều khiển quá trình. Bộ điều khiển dự báo dùng một mô hình để đoán trước đáp ứng tương lai của đối tượng điều khiển tại các thời điểm rời rạc trong một phạm vi dự báo (Prediction horizon) nhất định. Dựa vào đáp ứng dự báo này, một thuật toán tối ưu hoá được sử dụng để tính toán chuỗi tín hiệu điều khiển tương lai trong phạm vi điều khiển (Control horizon) sao cho sai lệch giữa đáp ứng dự báo bởi mô hình và tín hiệu chuẩn cho trước là tối thiểu. Phương pháp điều khiển dự báo là phương pháp tổng quát thiết kế bộ điều khiển trong miền thời gian có thể áp dụng cho hệ tuyến tính cũng như hệ phi tuyến.

Các bước cơ bản khi xây dựng mô hình điều khiển dự báo MPC là:

- Sử dụng một mô hình để dự báo giá trị đầu ra của quá trình ở các thời điểm trong tương lai;
- Tính toán lần lượt các tín hiệu điều khiển bằng cách tối thiểu hoá phiếm hàm mục tiêu.
- Mỗi lần (tại thời điểm hiện tại t) các tín hiệu điều khiển được dự báo thì chỉ có tín hiệu đầu tiên được đưa đến tác động vào quá trình. Có rất nhiều các thuật toán MPC (Ví dụ như LRPC: LongRange Predictive Control,...), sự khác nhau giữa chúng là sử dụng các mô hình khác nhau để biểu diễn quá trình, nhiễu và hàm mục tiêu (Cost Function) được tối ưu hoá.

Nguyên lý hoạt động của MPC: Nguyên lý điều khiển của MPC được thể hiện trên Hình 1.



Hình 1. Cấu trúc và nguyên lý làm việc của mô hình điều khiển dự báo [1]

Phạm vi dự báo N : Số bước thời gian dự đoán trong tương lai được gọi là phạm vi dự báo. Ứng với mỗi bước dự báo, bộ điều khiển sẽ thực thi một nhiệm vụ điều khiển từ t đến $t+N$. Trong thực tế phạm vi dự báo phải được lựa chọn phù hợp, ví dụ khi ô tô chuyển động với vận tốc 80km/h, thời gian phanh khẩn cấp 5s. Tuy nhiên nếu phạm vi dự báo là 2s, gặp vật cản, xe chỉ có thể dừng lại sau khi va chạm. Nếu N quá lớn, dẫn đến lãng phí tài nguyên tính toán của hệ thống.

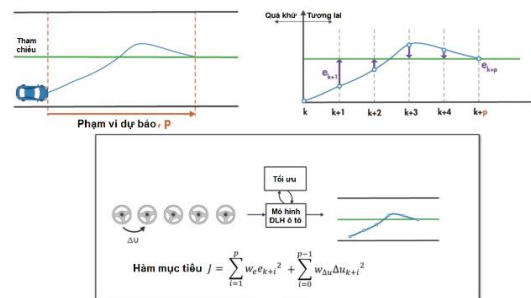
Thời gian lấy mẫu Δ_t : Thời gian nhỏ nhất có thể mà bộ điều khiển thực hiện thuật toán điều khiển. Thông qua thời gian lấy mẫu có thể xác định được tốc độ xử lý của bộ điều khiển, cũng như khả năng đáp ứng với các tín hiệu kích thích đầu vào hoặc nhiễu

theo thời gian thực. Nếu nó quá lớn, khi xảy ra nhiễu, bộ điều khiển sẽ không thể phản ứng với nhiễu đủ nhanh. Ngược lại, nếu thời gian lấy mẫu quá nhỏ, bộ điều khiển có thể phản ứng nhanh hơn với các nhiễu và sự thay đổi tín hiệu đầu vào, điều này có thể dẫn đến sự cố tràn dữ liệu tính toán.

Phạm vi điều khiển c : Một thông số thiết kế khác của MPC là phạm vi điều khiển. Trong tập hợp các hành động điều khiển trong tương lai dẫn đến đầu ra được dự đoán của đối tượng, số lượng hành động điều khiển đến bước thời gian m được gọi là phạm vi điều khiển, với đầu vào được giữ không đổi. Mỗi hành động điều khiển trong phạm vi điều khiển có thể được coi là một biến tự do cần được tính toán bởi quá trình tối ưu hóa. Do đó, phạm vi điều khiển càng nhỏ, khối lượng tính toán càng ít.

Ngoài ra khi thiết kế mô hình điều khiển dự báo MPC cần quan tâm đến các thông số khác như các ràng buộc (Constraints), trọng số (Weight).

Với bài toán tự hành, để giữ cho ô tô di chuyển theo một quỹ đạo tham chiếu cho trước, trong trường hợp cố định chân ga, vận tốc dọc không đổi, bộ điều khiển MPC cần xác định quỹ đạo thực tế gần nhất với tham chiếu, thông qua tối ưu hóa phiếm hàm mục tiêu J . Ô tô tự hành thông thường phải thỏa mãn các điều kiện ràng buộc cứng và ràng buộc mềm nhằm xác định phạm vi hoạt động, điều kiện môi trường, điều kiện an toàn khi chuyển động.



Hình 2. Mô hình điều khiển dự báo MPC cho ô tô tự hành

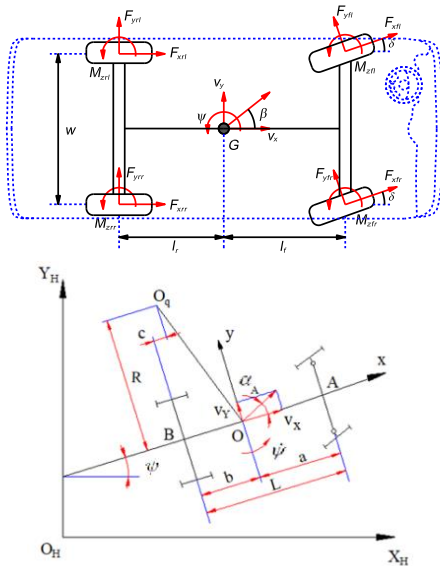
Trong đó: e_{k+i} : Sai số quỹ đạo theo phương ngang; Δu : Bước thay đổi góc quay vành tay lái; p : Phạm vi dự báo; $w_e, w_{\Delta u}$: Các hệ số hiệu chỉnh sai số quỹ đạo và bước thay đổi góc lái, có thể ở dạng hàm mũ hoặc hằng số.

2.2. Mô hình khảo sát động lực học ô tô

Để nghiên cứu động lực học chuyển động của ô tô một cách tổng quát, mô hình nghiên cứu phải được xây dựng trong không gian. Nếu xem ô tô như một vật rắn chuyển động trong hệ tọa độ không gian ba chiều cố định Oxyz thì chuyển vị của trọng tâm ô tô được xem

xét bởi sáu thành phần, gồm chuyển vị dọc theo 3 trục và quay quanh 3 trục. Trong bài báo này, tác giả tiến hành khảo sát động lực học chuyển động của ô tô trong mặt phẳng đường Oxy, phương thẳng đứng Oz, áp dụng mô hình lớp phi tuyến HSRI để tính toán lực ngang, lực dọc và mô men quanh trục z của bánh xe [2].

- *Mô hình khảo sát chuyển động của ô tô trong mặt phẳng đường:*



Hình 3. Mô hình hai vết khảo sát động lực học ô tô trong mặt phẳng đường [3]

Gia tốc của ô tô theo phương dọc xe Ox:

$$a_x = \dot{v}_x - v_y \dot{\psi} \quad (1)$$

Phương trình cân bằng lực theo phương dọc xe:

$$F_{srl} \cos \delta - F_{srl} \sin \delta + F_{srr} \cos \delta - F_{srr} \sin \delta + F_{srl} + F_{srr} = m_x a_x \quad (2)$$

Gia tốc của ô tô theo phương ngang Oy:

$$a_y = \dot{v}_y + v_x \dot{\psi} \quad (3)$$

Phương trình cân bằng lực theo phương ngang Oy:

$$F_{srl} \cos \delta + F_{srl} \sin \delta + F_{srr} \cos \delta + F_{srr} \sin \delta + F_{srl} + F_{srr} = m_y a_y \quad (4)$$

Góc lắn lệch lớp trước, bên trái:

$$\alpha_{fl} = \delta - \arctan \left(\frac{v_y + l_f \dot{\psi}}{v_x + \frac{w}{2} \dot{\psi}} \right) \quad (5)$$

Góc lắn lệch lớp trước, bên phải:

$$\alpha_{fr} = \delta - \arctan \left(\frac{v_y + l_f \dot{\psi}}{v_x - \frac{w}{2} \dot{\psi}} \right) \quad (6)$$

Góc lắn lệch lớp sau, bên trái:

$$\alpha_{rl} = -\arctan \left(\frac{v_y - l_r \dot{\psi}}{v_x - \frac{w}{2} \dot{\psi}} \right) \quad (7)$$

Góc lắn lệch lớp sau, bên phải:

$$\alpha_{rr} = -\arctan \left(\frac{v_y - l_r \dot{\psi}}{v_x + \frac{w}{2} \dot{\psi}} \right) \quad (8)$$

Gia tốc góc quay thân xe:

$$\dot{\psi} = \frac{1}{I_z} \Gamma \quad (9)$$

$$\Gamma = l_f (F_{x-fl} \sin \delta + F_{y-fl} \cos \delta) - \frac{w}{2} (F_{x-fl} \cos \delta - F_{y-fl} \sin \delta) + l_f (F_{x-fr} \sin \delta + F_{y-fr} \cos \delta) + \frac{w}{2} (F_{x-fr} \cos \delta - F_{y-fr} \sin \delta) - l_r (F_{x-rl} + F_{x-r}) - \frac{w}{2} (F_{x-rl} - F_{x-r}) \quad (10)$$

Phương trình xác định quỹ đạo theo phương dọc Ox_H và phương ngang Oy_H của ô tô:

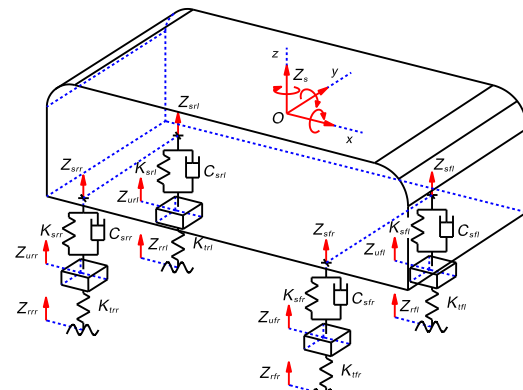
$$v_{xH} = v_x \cos(\psi) - v_y \sin(\psi) \quad (11)$$

$$v_{yH} = v_x \sin(\psi) + v_y \cos(\psi) \quad (12)$$

Từ hai phương trình trên suy ra:

$$x_H = \int v_{xH} dt; \quad y_H = \int v_{yH} dt$$

- *Mô hình khảo sát động lực học của ô tô theo phương thẳng đứng Oz:*



Hình 4. Mô hình không gian, khảo sát động lực học của ô tô theo phương thẳng đứng [2]

Hệ ngoại lực và mô men ngoại lực tác dụng lên ô tô khi khảo sát động lực học theo phương thẳng đứng như sau [4]:

$$F_{sfl} + F_{dfl} + F_{sfr} + F_{dfr} + F_{srl} + F_{drl} + F_{srr} + F_{drr} = m_s \ddot{Z}_s \quad (13)$$

$$(F_{sfl} + F_{dfl} + F_{sfr} + F_{dfr})b - (F_{srl} + F_{drl} + F_{srr} + F_{drr})a = I_p \dot{\theta} \quad (14)$$

$$(F_{sfl} + F_{dfl} + F_{srl} + F_{drl}) \frac{\omega}{2} - (F_{sfr} + F_{dfr} + F_{srr} + F_{drr}) \frac{\omega}{2} = I \ddot{\phi} \quad (15)$$

Phương trình động lực học theo phương dọc của lớp trước bên trái:

$$F_{uf} - F_{sfl} - F_{dfl} = m_{uf} \ddot{Z}_{uf} \quad (16)$$

Phương trình động lực học theo phương dọc của lớp trước bên phải:

$$F_{uf} - F_{sfr} - F_{dfr} = m_{uf} \ddot{Z}_{ufr} \quad (17)$$

Phương trình động lực học theo phương dọc của lớp sau bên trái:

$$F_{ur} - F_{srl} - F_{drl} = m_{ur} \ddot{Z}_{ur} \quad (18)$$

Phương trình động lực học theo phương dọc của lớp sau bên phải:

$$F_{ur} - F_{srr} - F_{drr} = m_{ur} \ddot{Z}_{urr} \quad (19)$$

Tải trọng thẳng đứng tác dụng lên mỗi bánh xe được xác định như sau:

$$\begin{aligned} F_{zfl} &= \frac{m_s g b}{2(a+b)} + m_{uf} g + F_n \\ F_{zfr} &= \frac{m_s g b}{2(a+b)} + m_{ufr} g + F_n \\ F_{zrl} &= \frac{m_s g a}{2(a+b)} + m_{ur} g + F_n \\ F_{zrr} &= \frac{m_s g a}{2(a+b)} + m_{urr} g + F_n \end{aligned} \quad (20)$$

Tải trọng thẳng đứng, cùng với tác dụng lên mỗi lớp xe, cùng với độ trượt theo thời gian là giá trị đầu vào cho mô hình lớp HSRI.

Mô hình lớp phi tuyến HSRI

Trong mô hình HSRI các thành phần lực ngang và lực dọc được xác định bởi công thức sau [1]:

$$F_x = -c_s \frac{s_x}{1 - s_x} f(L) \quad (21)$$

$$F_y = -c_\alpha \frac{s_y}{1 - s_y} f(L) \quad (22)$$

Trong đó: F_x là lực dọc tại lớp xe; F_y là lực ngang; c_s là độ cứng dọc của lớp; c_α là độ cứng góc của lớp; s_x, s_y là độ trượt theo phương dọc và phương ngang của lớp xe.

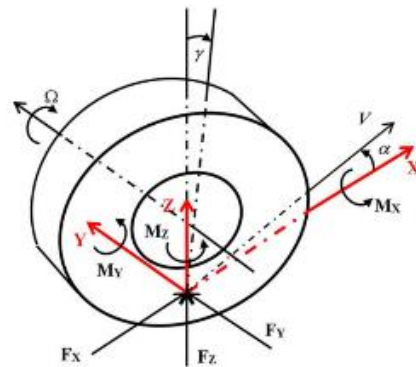
Ngoài ra ta có giá trị $f(L)$ theo vùng trượt và bám như sau:

$$f(L) = \begin{cases} 1 & L \geq 1 \\ L(2-L) & L < 1 \end{cases} \quad (23)$$

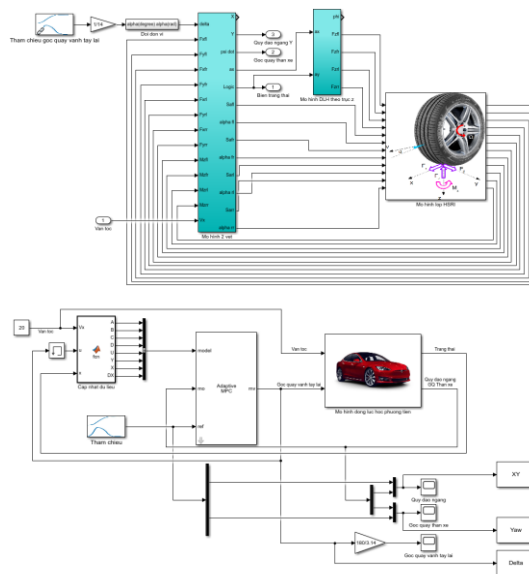
Trong đó $L \geq 1$ thuộc vùng bám, $L < 1$ thuộc vùng trượt

$$L = \frac{1}{2} \mu_0 (1 - A v_x) F_z (1-s) \left[(c_s s)^2 + (c_\alpha \tan^2 \alpha)^2 \right]^{-1/2} \quad (24)$$

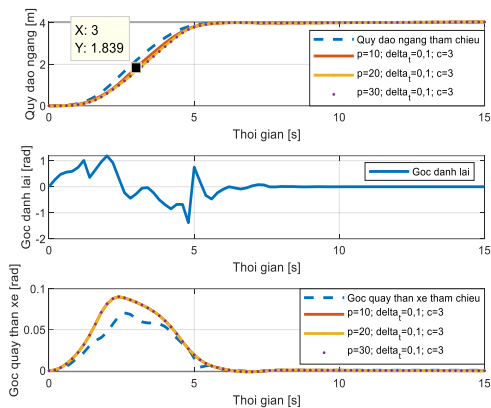
Với: μ_0 là hệ số bám; A là hệ số kể đến ảnh hưởng của vận tốc xe; F_z là thành phần lực theo phương thẳng đứng; v_x là vận tốc chuyển động của ô tô; s là hệ số độ trượt của lớp tương ứng.



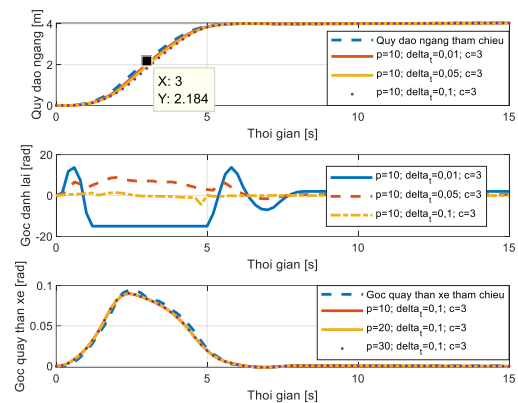
Hình 5. Biểu diễn các thành phần lực và mô men với mô hình lớp HSRI [4]



Hình 6. Chương trình khảo sát MPC thích ứng



Hình 7. Đồ thị so sánh giá trị tham chiếu và MPC tiêu chuẩn



Hình 8. Đồ thị so sánh giá trị tham chiếu và MPC thích ứng

3. Kết quả mô phỏng và bàn luận

Tiến hành khảo sát quỹ đạo của ô tô tự hành trong bài toán chuyển làn đơn với mô hình điều khiển MPC thích ứng, mô đun điều khiển MPC thích ứng (Adaptive MPC) cho phép thay đổi vận tốc chuyển động của ô tô theo điều kiện cho trước mà vẫn đảm bảo chất lượng của quá trình điều khiển. Mô đun MPC thích ứng thuộc thư viện của phần mềm Matlab - Simulink [5], các thông số sử dụng để đánh giá là quỹ đạo chuyển động của ô tô theo phương ngang và vận tốc góc quay thân xe. Điều kiện khảo sát: thay đổi thời gian lấy mẫu, phạm vi dự báo và phạm vi điều khiển.

Kết quả khảo sát:

Để đánh giá hiệu quả của mô hình MPC thích ứng, tiến hành thay đổi các tham số của mô hình MPC.

Trường hợp 1: Vận tốc chuyển động của ô tô 30 km/h; phạm vi dự báo lần lượt $p_1=10$; $p_2=20$; $p_3=30$; thời gian lấy mẫu $\Delta t=0,1$ s, phạm vi điều khiển $c=3$.

Từ đồ thị khảo sát ta thấy khi phạm vi dự báo $p=10$, sai lệch giữa quỹ đạo tham chiếu và quỹ đạo thực tế là nhỏ nhất. Xét tại thời điểm $t=3$ s, giá trị quỹ đạo ngang tương ứng là 1,839m trong khi đó giá trị quỹ đạo tham chiếu là 2,184m, sai lệch tương đối 15,79%. Như vậy khi thay đổi phạm vi dự báo, thời gian lấy mẫu không đổi, sai số giữa đường tham chiếu và đường thực tế là khá lớn.

Trường hợp 2: Vận tốc chuyển động của ô tô 30 km/h; phạm vi dự báo $p=10$; thời gian lấy mẫu lần lượt là $\Delta t_1=0,01$ s; $\Delta t_2=0,05$ s; $\Delta t_3=0,1$ s phạm vi điều khiển $c=3$.

Tại thời điểm $t=3$ s, quỹ đạo ngang tham chiếu 2,184m. Sai số quỹ đạo ngang thực tế và tham chiếu nhỏ nhất khi thời gian lấy mẫu $\Delta t_1=0,01$ s, quỹ đạo ngang thực tế trong trường hợp này 2,028m. Sai số tương đối nhỏ nhất 7,14%. Như vậy để nâng cao độ

chính xác của mô hình điều khiển dự báo, cần phải tăng thời gian lấy mẫu của mô hình.

4. Kết luận

- Bài báo đã tiến hành xây dựng mô hình khảo sát động lực học của ô tô tự hành, có sử dụng mô hình điều khiển dự báo MPC.

- Nghiên cứu và thiết kế bộ điều khiển MPC thích ứng điều khiển ô tô tự hành di chuyển theo quỹ đạo tham chiếu, bộ điều khiển thích ứng với ưu điểm có thể cập nhật trạng thái chuyển động của ô tô theo thời gian, cho phép thay đổi vận tốc chuyển động, phù hợp cho nghiên cứu ô tô tự hành chuyển động theo các chu trình thử trong tương lai.

- Xây dựng chương trình tính toán và mô phỏng hệ thống điều khiển ô tô tự lái trong phần mềm Matlab & Simulink. Từ các kết quả thu được chứng tỏ bộ điều khiển hoạt động ổn định và có thể áp dụng nghiên cứu và phát triển cho xe ô tô tự hành trong thực tế.

5. Phụ lục

Các thông số kỹ thuật của ô tô khảo sát	Giá trị
Khối lượng xe không tải, m_l [kg]	1575
Khối lượng không được treo phía trước bên trái/ phải, $m_{ufr} = m_{ufr}$ [kg]	60
Khối lượng không được treo phía sau bên trái/ phải, $m_{urr} = m_{urr}$ [kg]	60
Mômen quán tính khối lượng phần treo theo trục x, I_x [kgm ⁻²]	600
Mômen quán tính khối lượng phần treo theo trục y, I_y [kgm ⁻²]	1810
Mômen quán tính khối lượng theo trục z, I_z [kgm ⁻²]	2875

Các thông số kỹ thuật của ô tô khảo sát	Giá trị
Khoảng cách từ trọng tâm phần treo đến cầu trước, a [m]	1,813
Khoảng cách từ trọng tâm phần treo đến cầu trước, b [m]	1,298
Chiều rộng cơ sở, w [m]	1,655
Độ cứng của hệ thống treo trước, $K_{sfl} = K_{sfr}$ [Nm ⁻¹]	19000
Độ cứng của hệ thống treo sau, $K_{srl} = K_{srr}$ [Nm ⁻¹]	33000
Hệ số cản của hệ thống treo trước, $C_{sfl} = C_{sfr}$ [Nsm ⁻¹]	750
Hệ số cản của hệ thống treo sau, $C_{srl} = C_{srr}$ [Nsm ⁻¹]	750
Độ cứng của lốp, $K_{tfl} = K_{tfr} = K_{trl} = K_{trr}$ [Nm ⁻¹]	200000
Mômen quán tính khối lượng bánh xe, I_w [kgm ⁻²]	1

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyễn Hữu Quyền, Luận án Tiến sỹ, “Nghiên cứu giải pháp điều khiển bám quỹ đạo tàu thủy có ràng buộc tín hiệu và bất định hàm ở đầu vào”, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, 2019.

[2] Trần Thành Lam, Nguyễn Mạnh Hùng, Võ Quốc Đại, *Ước lượng các thành phần lực trong tương tác lốp đường, trạng thái chuyển động của ô tô bằng mô hình lốp HSRI và mô hình động lực học 14 bậc tự do*, Tạp chí Cơ khí Việt Nam, 2020.

[3] Reza N. Jazar, *Vehicle Dynamics - Theory and Application*. Springer Nature, 2017.

[4] Luo, W., G. Wu, and S. Zheng, “Design of vehicle sideslip angle observer with parameter adaptation based on HSRI tire model” *Automotive Engineering*, Vol. 35, No. 3, pp.249-55, 2013.

[5] MATLAB 2018 Toolbox, “How to Design an MPC Controller with Simulink and Model Predictive Control Toolbox”.

Ngày nhận bài:	30/6/2021
Ngày nhận bản sửa:	05/8/2021
Ngày duyệt đăng:	15/8/2021