

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG BỘ ĐIỀU KHIỂN RISE BẢO HÒA ĐIỀU KHIỂN ĐỒNG BỘ GÓC QUAY BÁNH XE DẪN HƯỚNG VÀ GÓC QUAY VÀNH TAY LÁI TRONG HỆ THỐNG LÁI STEER-BY-WIRE

SIMULATION RESEARCH ON RISE SATURATION CONTROLLER FOR SYNCHRONIZATION CONTROL OF ROAD WHEELS AND STEERING WHEEL IN STEER-BY-WIRE SYSTEM

Nguyễn Xuân Tuấn¹, Đinh Thị Thanh Huyền^{2*}

¹Khoa Công nghệ Ô tô, Trường Cơ khí – Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông Vận tải

TÓM TẮT

Bài báo này nghiên cứu mô phỏng phương pháp điều khiển RISE bão hòa cho hệ thống lái steer-by-wire (SBW), đánh giá chất lượng điều khiển góc quay bánh xe dẫn hướng bám quỹ đạo góc quay tham chiếu khi xe di chuyển ở nhiều dải tốc độ, trên các biên dạng mặt đường ướt và khô, trong nhiều chu trình lái khác nhau. Chất lượng điều khiển bám quỹ đạo được đánh giá trên các chỉ số sai số bình phương trung bình (RMS) và giá trị lớn nhất (max) của sai số bám quỹ đạo và tín hiệu điều khiển. Chất lượng điều khiển của bộ điều khiển RISE bão hòa được so sánh với hai bộ điều khiển khác là bộ điều khiển PD và H_∞ .

Từ khoá: Hệ thống lái Steer-by-wire; Điều khiển bão hòa; Điều khiển phi tuyến.

ABSTRACT

The paper studies on simulations for saturated RISE control method for the steer-by-wire (SBW) system to evaluate the synchronization control performance of road wheels and steering wheel, under different vehicle velocities, dry and wet road surfaces, and different driving maneuvers. The tracking performance is evaluated on the root square error (RMS) and maximum (max) index values of tracking errors and input control signals. The control performance of the saturated RISE control is compared to two other controllers: PD and H_∞ controllers.

Keywords: Steer-by-wire system; Saturation control; Nonlinear control.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Với sự phát triển nhanh chóng của xu hướng xe điện, công nghệ x-by-wire đã trở thành hướng nghiên cứu thu hút rất nhiều sự quan tâm trong sự phát triển của ngành công nghiệp ô tô với việc nghiên cứu phát triển hầu

hết các bộ phận của xe hiện đại, chẳng hạn như brake-by-wire, steer-by-wire, throttle-by-wire, accelerate-by-wire, hay shift-by-wire. Trong hệ thống lái steer-by-wire (SBW), so với hệ thống lái truyền thống thì trục cơ khí kết nối vô lăng và bánh răng lái đã bị loại bỏ. Lệnh điều khiển lái từ người lái không còn được truyền trực tiếp



xuống bánh xe dẫn hướng thông qua kết nối cơ khí nữa mà thông qua giao tiếp điện tử bằng dây. Thay thế cho sự liên kết vật lý giữa vô lăng và các bánh xe dẫn hướng, hệ thống SBW khai thác một động cơ điện để tạo ra mô-men dẫn động cho bánh xe dẫn động trước tương ứng theo chuyển động quay của vô lăng, và một động cơ điện khác để tạo ra mô-men phản hồi duy trì cảm giác lái cho người lái. Hệ thống SBW có một số ưu điểm vượt trội như giảm thiểu các bộ phận cơ khí tạo ra không gian cabin rộng hơn, loại bỏ vị trí cố định của vô lăng để có thể tự do sắp xếp thiết kế nội thất ô tô, giảm thương tích do va chạm với vô lăng trong các vụ tai nạn ô tô [1]-[3].

Hai vấn đề điều khiển quan trọng trong hệ thống lái SBW bao gồm việc duy trì sự đồng bộ giữa vô lăng và các bánh xe dẫn hướng và mang lại cảm giác lái như đối với hệ thống lái thông thường. Trọng tâm của nghiên cứu này là vấn đề điều khiển đồng bộ của hệ thống con cơ cấu lái chủ động (the active steering mechanism) bảo đảm sự đồng bộ giữa bánh xe trước với hiệu lệnh lái của người lái [4]. Trong hệ thống lái SBW, khi người lái quay vô lăng, góc quay vô lăng được ghi lại bằng cảm biến góc gắn trên trục lái để cung cấp cho cơ cấu lái chủ động làm góc quay tham chiếu cho bánh xe dẫn hướng bám theo tương ứng.

Bộ điều khiển RISE bảo hòa [5], [6] là một luật điều khiển đưa ra một mô-men điều khiển liên tục, được xây dựng dựa trên hàm tanh, do đó có độ lớn giới hạn để dẫn động đồng bộ tương ứng giữa góc quay bánh xe dẫn hướng và góc tham chiếu đầu vào của người lái xe, bất kể ảnh hưởng của các nhiễu loạn bên ngoài như mô-men cản quay, ma sát giữa các bộ phận khác nhau trong cơ cấu lái chủ động... Bộ điều khiển bảo hòa này cần duy trì chất lượng điều khiển ở các vận tốc xe khác nhau, các biên dạng mặt đường khác nhau. Điều này cần tiếp tục nghiên cứu đánh giá thông qua nhiều trường hợp mô phỏng khác nhau.

Bài báo này được bố trí như sau. Phần 2 trình bày lại về mô hình động lực học cho hệ thống lái SBW, bộ điều khiển RISE bảo hòa. Phần 3 là các kết quả mô phỏng được thực hiện ở nhiều chu kỳ lái khác nhau, nhiều vận tốc xe khác nhau và trong hai điều kiện mặt đường khác nhau. Phần 4 là phần kết luận của bài báo.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC CỦA HỆ THỐNG LÁI SBW VÀ BỘ ĐIỀU KHIỂN RISE BẢO HÒA

2.1. Phương trình chuyển động thân xe và mô hình động lực học hệ thống lái SBW

Phương trình chuyển động phẳng của xe được mô tả bằng mô hình xe phẳng bốn bánh. Dưới các giả thiết: góc đánh lái δ_f tương đối nhỏ, xe chạy với vận tốc không đổi, tức là $\beta \ll 1$, $V_x = V = \text{const}$, và $\left|\frac{L\gamma}{2V}\right| \ll 1$, thì mô hình xe bốn bánh được đơn giản hóa thành mô hình xe đạp, với 02 bậc tự do: góc trượt thân xe β , vận tốc lệch thân xe γ . Phương trình không gian trạng thái chuyển động của thân xe được xác định như sau [7]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-C_f - C_r}{mV} & -1 + \frac{C_r l_r - C_f l_f}{mV^2} \\ \frac{C_r l_r - C_f l_f}{I_z} & \frac{-C_f l_r^2 - C_r l_f^2}{I_z V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{C_f}{mV} \\ \frac{C_f l_f}{I_z} \end{bmatrix} \delta_f. \quad (1)$$

Gia tốc ngang a_y có thể được tính như sau: $a_y \approx V(\gamma + \dot{\beta})$. Trong (1), I_z là mô-men quán tính của xe, m là khối lượng xe; C_p , C_r là hệ số độ cứng lốp trước và lốp sau khi quay vòng; l_p , l_r lần lượt là khoảng cách từ tâm bánh trước và bánh sau đến trọng tâm (CG) của xe.

Hệ thống lái SBW bao gồm hai hệ thống con: cơ cấu vô lăng (phần trên) và cơ cấu lái chủ động (phần dưới). Phương trình động lực học của cơ cấu lái được nghiên cứu trong [8]-[10], như sau:

$$J_{eq}\ddot{\delta}_f + B_{eq}\dot{\delta}_f + g(\delta_f, \dot{\delta}_f) + \tau_f + \tau_e = k_{cr}u(t) \quad (2)$$

Trong (2): J_{eq} và B_{eq} biểu thị quán tính tổng hợp và hệ số giảm chấn của cơ cấu lái chủ động SBW; $g(\delta_f, \dot{\delta}_f)$ trình bày phần động lực học chưa được mô hình hóa; τ_f là ma sát giữa các bộ phận trong cơ cấu lái; $\tau_e(t)$ ký hiệu mô-men cản quay, u là mô-men điều khiển từ động cơ dẫn động cơ cấu lái; và k_{cr} là tỉ số giữa góc quay của tay lái và góc lái của bánh trước.

2.2. Bộ điều khiển RISE bão hòa

Nhiệm vụ chính của cơ cấu lái chủ động (phần dưới) là điều khiển động cơ DC phía dưới để buộc điều khiển góc đánh lái δ_f của bánh xe dẫn hướng đảm bảo bám quỹ đạo tham chiếu từ vành tay lái δ_{fr} , bất chấp sự tác động của nhiễu tác động ngoài và các thành phần không xác định trong hệ thống SBW. Trong đó, quỹ đạo tham chiếu từ vành tay lái δ_{fr} là đại lượng tương ứng tỉ lệ với góc quay của vành tay lái δ_h , được giảm đi n_{sr} lần, với n_{sr} là tỉ số truyền của hệ thống lái, tức $\delta_{fr} = \delta_h/n_{sr}$. Do đó, xe có thể bám quỹ đạo mong muốn [11], [12]. Từ mục tiêu điều khiển, các sai số điều khiển và sai số điều khiển phụ trợ được định nghĩa như sau:

$$e \triangleq \delta_f - \delta_{fr}, r \triangleq \dot{e} + \alpha_1 \tanh(e) + \tanh(e_f) \quad (3)$$

Trong (3) thì $e_f(t) \in \mathbb{R}$ là một tín hiệu phụ trợ, có phương trình động lực được cho bởi:

$$\dot{e}_f \triangleq \cosh^2(e_f) \left(-kr + \tanh(e) - \lambda \tanh(e_f) \right) \quad (4)$$

với $\alpha_1, k, \lambda \in \mathbb{R}^+$ là các hằng số điều khiển dương.

Theo yêu cầu cường độ của tín hiệu điều khiển không được vượt quá giới hạn cho phép, dựa vào các bước thiết kế bộ điều khiển, luật điều khiển $u(t)$ được thiết kế như sau:

$$u = k \tanh(v), \quad (5)$$

Trong đó, tín hiệu v được thiết kế để cung cấp phản hồi mong muốn và loại bỏ các nhiễu loạn trong hệ thống lái SBW, cụ thể:

$$v = \cosh^2(v) \left\{ \frac{\alpha_2}{k_{cr}} \tanh(r) + \frac{\alpha_3}{k_{cr}} r + \beta_u \operatorname{sgn}(e) \right\} \quad (6)$$

với $\alpha_2, \alpha_3, \beta_u \in \mathbb{R}^+$ là các hằng số điều khiển dương.

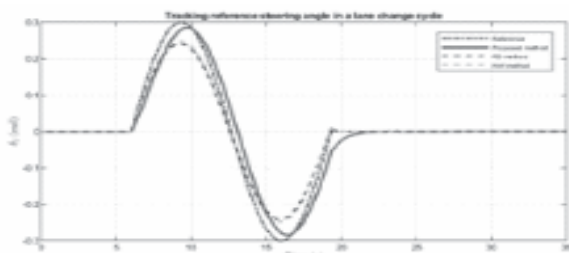
3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Bộ điều khiển RISE bão hòa cho hệ thống lái SBW trong (5), (6) được kiểm chứng kết quả điều khiển thông qua mô phỏng Matlab, trong các thao tác lái khác nhau, điều kiện mặt đường ướt và khô, và vận tốc xe ở các dải tốc độ khác nhau. Các thông số động học và động lực học của hệ thống lái SBW sử dụng cho mô phỏng được nêu trong Bảng 1 của [4], nhiễu ma sát τ_f được chọn là hàm tanh của vận tốc góc lái $\dot{\delta}_f$, tức $\tau_f = F_s \tanh(\dot{\delta}_f)$. Mô-men cản quay $\tau_e(t)$ được ước tính theo giả định rằng góc trượt của lớp trước nhỏ hơn 4° áp dụng trong vùng tuyến tính của động lực học lớp, như $\tau_e = -(t_m + t_p)C_f \left(\beta + \frac{V_f}{V} - \delta_f \right)$, trong đó hệ số độ cứng lớp trước C_p khoảng cách từ tâm bánh trước đến trọng tâm của xe l_p , vệt cơ học t_m và vệt khí nén t_p trong mô phỏng được cho trong Bảng 1 của [4]. Hệ số độ cứng lớp trước và lớp sau khi quay vòng khác nhau ở các điều kiện đường khác nhau. Để mô phỏng cho các điều kiện đường khác nhau, hệ số độ cứng lớp khi vào cua $C_f = C_r$ được chọn là $C_f = C_r = 45000$ (N/rad) cho mặt đường nhựa ướt và $C_f = C_r = 80000$ (N/rad) cho mặt đường nhựa khô. Mô phỏng được thử nghiệm ở một số vận tốc xe V là 40km/h, 60km/h, 80km/h và 100km/h.

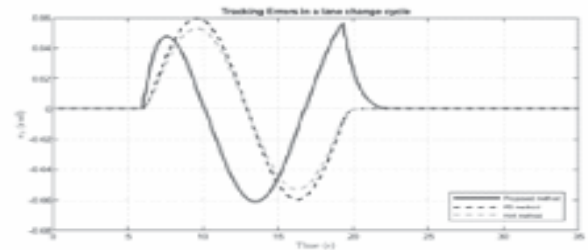
Các giá trị của tham số điều khiển của bộ điều khiển RISE được chọn là $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$ 

$= 16,5$, $k = 155$, $\lambda = 25$ và $\beta_u = 0,1$, với các giá trị trạng thái ban đầu của hệ thống lái SBW là $\delta_f(0) = 0$, $\dot{\delta}_f(0) = 0$, $\beta(0) = 0$, và $\gamma(0) = 0$. Để xác thực hiệu suất lái, các mô phỏng được thực hiện trên hệ thống lái SBW để so sánh bộ điều khiển bão hòa RISE với hai bộ điều khiển khác là bộ điều khiển PD và H_∞ .

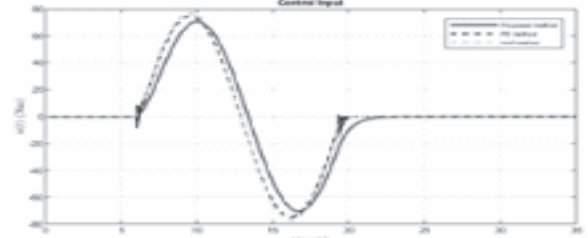
Mô phỏng cho các chu trình lái xe khác nhau được thực hiện với các điều kiện mặt đường khác nhau (ướt và khô) và vận tốc xe khác nhau để đánh giá hiệu quả bám quỹ đạo của bộ điều khiển RISE bão hòa. Kết quả mô phỏng bám quỹ đạo của xe trong chu trình lái đổi làn và lái rẽ được thể hiện trong hình 1 và 2, trong đó, hình a biểu diễn kết quả bám quỹ đạo, hình b thể hiện sai số bám quỹ đạo, hình c là tín hiệu điều khiển tương ứng của ba bộ điều khiển, và hình d là quỹ đạo của xe trong mô phỏng với vận tốc xe 60km/h và điều kiện mặt đường khô ướt hoặc khô. Có thể thấy rõ kết quả bám quỹ đạo của cả 03 bộ điều khiển rất tốt trong trường hợp mô phỏng này. Tuy nhiên, bộ điều khiển đề xuất vẫn cho kết quả tốt hơn so với bộ điều khiển PD và H_∞ . Sai số bám quỹ đạo của bộ điều khiển đề xuất nhỏ nhất trên các hình a, b, quỹ đạo chuyển động của xe bám sát chính xác quỹ đạo tham chiếu trên các hình d, trong khi đó, đầu vào điều khiển yêu cầu của bộ điều khiển đề xuất là nhỏ nhất.



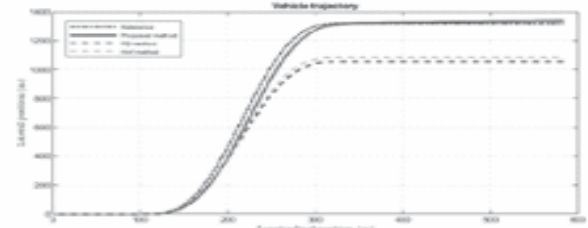
(a) Kết quả bám quỹ đạo trong chu kỳ lái đổi làn



(b) Sai số bám quỹ đạo trong chu kỳ lái đổi làn

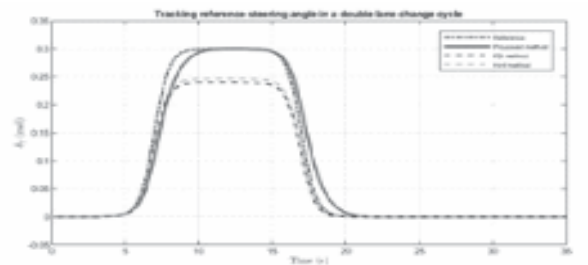


(c) Tín hiệu điều khiển trong chu kỳ lái đổi làn

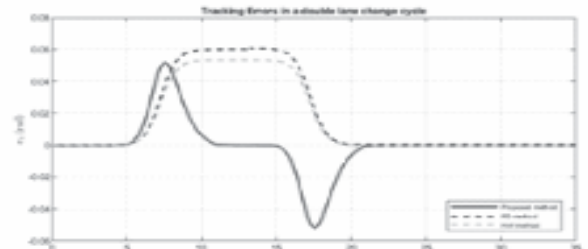


(d) Quỹ đạo của xe trong chu kỳ lái đổi làn.

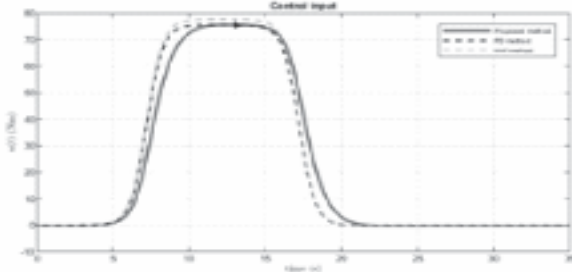
Hình 1. Kết quả mô phỏng chu trình chuyển làn với vận tốc 60km/h và điều kiện đường ướt.



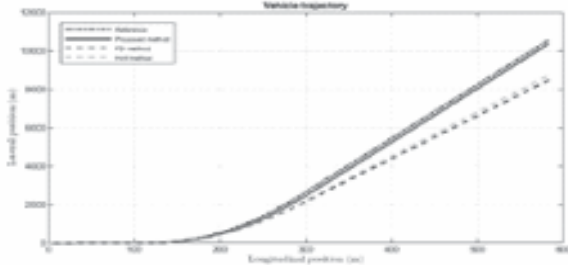
(a) Kết quả bám quỹ đạo trong chu kỳ lái rẽ.



(b) Sai số bám quỹ đạo trong chu kỳ lái rẽ.



(c) Tín hiệu điều khiển trong chu kỳ lái rẽ.

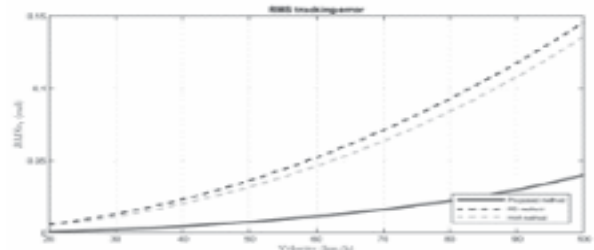


(d) Quỹ đạo của xe trong chu kỳ lái rẽ.

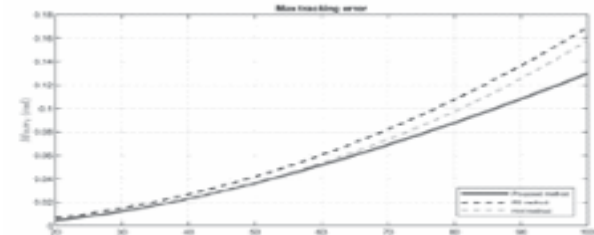
Hình 2. Kết quả mô phỏng chu trình rẽ với vận tốc 60km/h và điều kiện đường khô.

Kết quả mô phỏng ở hình 1 và 2 là kết quả mô phỏng tại những điều kiện lái nhất định. Tuy nhiên, để đảm bảo đánh giá chất lượng điều khiển ở nhiều điều kiện khác nhau, các mô phỏng được thực hiện ở nhiều dải vận tốc khác nhau thay đổi từ 20-100km/h. Chất lượng điều khiển bám quỹ đạo được đánh giá dựa trên các chỉ số RMS và giá trị lớn nhất của sai số bám quỹ đạo và tín hiệu điều khiển. Các chỉ số này được đánh giá ở các vận tốc khác nhau và kết quả so sánh giữa các bộ điều khiển được thể hiện ở hình 3. Đáng lưu ý rằng trong phạm vi tốc độ xe mô phỏng từ 20-100km/h, giá trị RMS và giá trị lớn nhất của sai số bám quỹ đạo của bộ điều khiển RISE bảo hòa là nhỏ nhất trong ba bộ điều khiển được so sánh, giá trị RMS và giá trị lớn nhất của tín hiệu điều khiển yêu cầu của bộ điều khiển đề xuất nhỏ hơn tín hiệu điều khiển của 2 bộ điều khiển PD và H_{∞} trong dải tốc độ khoảng nhỏ hơn 85km/h; ở dải tốc độ cao từ 85-100km/h thì tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển RISE bảo hòa lớn hơn so với hai bộ điều khiển còn lại, tuy nhiên vẫn

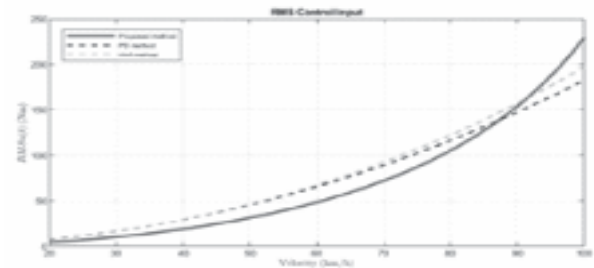
nằm trong giới hạn chấp nhận được của tín hiệu điều khiển.



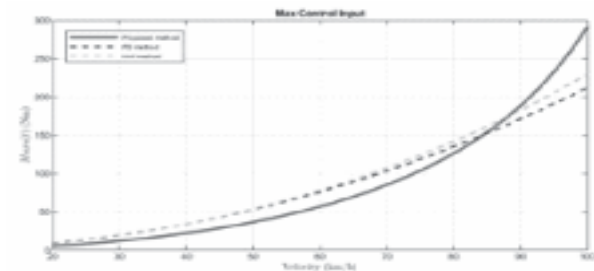
(a) Chỉ số RMS của sai số điều khiển ở các vận tốc xe khác nhau.



(b) Chỉ số giá trị lớn nhất của sai số điều khiển ở các vận tốc xe khác nhau.



(c) Chỉ số RMS của tín hiệu điều khiển ở các vận tốc xe khác nhau.



d) Chỉ số giá trị lớn nhất của tín hiệu điều khiển ở các vận tốc xe khác nhau.

Hình 3. Chỉ số RMS và chỉ số giá trị lớn nhất của sai số điều khiển và tín hiệu điều khiển của chu trình lái đổi làn, mặt đường khô trên các vận tốc xe khác nhau từ 20-100km/h.



Nhìn chung, có thể thấy rõ là kết quả bám quỹ đạo của bộ điều khiển RISE bão hòa là sát nhất với góc tham chiếu của vành tay lái, trong khi đó, yêu cầu của tín hiệu điều khiển ở mức độ chấp nhận được, không có tín hiệu điều khiển yêu cầu độ lớn quá lớn. Ngoài ra, tín hiệu điều khiển RISE có tính liên tục, đây là ưu điểm vượt trội so với các bộ điều khiển PD và H_∞ .

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu mô phỏng phương pháp điều khiển RISE bão hòa cho hệ thống lái (SBW). Các đánh giá chất lượng điều khiển góc quay bánh xe dẫn hướng bám theo góc quay tham chiếu trong các chu trình lái khác nhau, khi xét đến xe di chuyển ở nhiều dải tốc độ khác nhau, trên bề mặt đường dạng ướt hoặc khô. Chất lượng điều khiển được đánh giá thông qua thông số RMS và giá trị lớn nhất của sai số bám quỹ đạo và điều khiển tín hiệu. Chất lượng điều khiển của bộ điều khiển RISE bão hòa được chỉ ra là vượt trội so với hai bộ điều khiển PD và H_∞ cho dù chịu ảnh hưởng của nhiễu loạn bên ngoài, mô-men cản quay và các phân động học không xác định của hệ thống.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông Vận tải, trong đề tài mã số T2023-CK-009. ❖

Ngày nhận bài: **15/01/2024**

Ngày phản biện: **01/02/2024**

Tài liệu tham khảo:

[1]. B.H. Nguyen, and J. H. Ryu, "Direct current measurement-based steer-by-wire systems for realistic driving feeling". In 2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 1023–1028, 2009, <https://doi.org/10.1109/ISIE.2009.5221999>.

[2]. T. van der Sande, P. Zegelaar, I. Besselink, and H. Nijmeijer, "A robust control analysis for a steer-by-wire vehicle with uncertainty on the tyre forces". *Vehicle Syst. Dyn.*, vol. 54, pp. 1247–1268, 2016, <https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1197407>.

[3]. X.D. Wu, and W.Q. Li, "Variable steering ratio control of steer-by-wire vehicle to improve handling performance". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 234, pp. 774–782, 2020, <https://doi.org/10.1177/0954407019848174>.

[4]. D. T. T. Huyen, N. X. Tuan and N. Van Bang, "Design a robust controller for tracking control between steering wheel and road wheels in Steer-bywire system". *Science Journal of Transportation*, no. 12, 2022.

[5]. N. Fischer, Z. Kan, R. Kamalapurkar, and W. E. Dixon, "Saturated RISE Feedback Control for a Class of Second-Order Nonlinear Systems". *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 59, no. 4, pp. 1094–1099, 2014, <https://doi.org/10.1109/TAC.2013.2286913>.

[6]. Dinh, H. T., Trinh, T., and Tran, V., "Saturated RISE Feedback Control for Uncertain Nonlinear MacPherson Active Suspension System to Improve Ride Comfort". *ASME. J. Dyn. Sys., Meas., Control*, vol. 143, no. 1, Jan. 2021, pp. 011004. <https://doi.org/10.1115/1.4048188>.

[7]. H. Ohara and T. Murakami, "A stability control by active angle control of front-wheel in a vehicle system". *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 3, pp. 1277–1285, Mar. 2008, <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.909051>.

[8]. P. Yih, and J. C. Gerdes, "Modification of vehicle handling characteristics via steer-by-wire". *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 13, no. 6, pp. 965–976, 2005, <https://doi.org/10.1109/TCST.2005.854320>.

[9]. P. Setlur, J. R. Wagner, D. M. Dawson, and D. Braganza, "A trajectory tracking steer-by-wire control system for ground vehicles". *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, no. 1, pp. 76–85, Jan. 2006, <https://doi.org/10.1109/TVT.2005.861189>.

[10]. H. Wang, Z. Man, W. Shen, Z. Cao, J. Zheng, and J. Jin, "Robust control for steer-by-wire systems with partially known dynamics". *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 10, no. 4, pp. 2003–2015, 2014, <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2338273>.

[11]. T. Kaufmann, S. Millsap, B. Murray, and J. Petrowski, "Development experience with steer-by-wire". *SAE trans.*, pp. 583–590, 2001, <http://www.jstor.org/stable/44718375>.

[12]. N. Bajcinca, R. Cortesao, and M. Hauschild, "Robust control for steer-bywire vehicles". *Auton. Robots*, vol. 19, no. 2, pp. 193–214, 2005, <https://doi.org/10.1007/s10514-005-0608-2>.