ĐIỀU KHIỂN CHỦ ĐỘNG HỆ THỐNG TREO CỦA XE Ô TÔ SỬ DỤNG ĐẠI SỐ GIA TỬ

Bùi Hải Lê[1*], Bùi Thanh Lâm[2], Đỗ Huy Cảnh[3]

Tóm tắt: *Bài báo trình bày về bài toán điều khiển chủ động dao động của hệ thống treo trên xe ô tô dựa trên lý thuyết Đại số gia tử. Các đại lượng cần được quan tâm và cần được giảm giá trị trong bài toán này bao gồm: gia tốc của thân xe, biến dạng của hệ thống treo, biến dạng của lốp, độ bám đường của xe và lực điều khiển cực đại. Mô hình ¼ xe ô tô được sử dụng để thực hiện các mô phỏng số. Hiệu quả của bộ điều khiển được đề xuất cũng được so sánh với hiệu quả của một bộ điều khiển bền vững đã công bố.*

Từ khóa: Điều khiển chủ động; Đại số gia tử; Hệ thống treo chủ động; Mô hình ¼ xe ô tô.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống treo trên xe ô tô có vai trò quan trọng vận hành xe và tạo sự thoải mái cho hành khách. Hệ thống treo của xe có thể được phân thành ba loại: hệ thống treo bị động, bán chủ động và chủ động. Trong đó, hệ thống treo chủ động là lĩnh vực nghiên cứu được quan tâm trong nhiều năm gần đây [1].

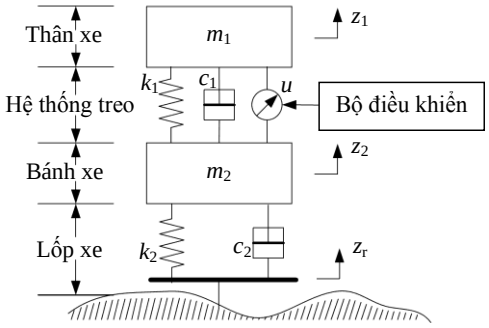
Điều khiển mờ đã được ứng dụng rộng rãi trong điều khiển chủ động các hệ thống treo của ô tô. Các nghiên cứu sử dụng bộ điều khiển mờ truyền thống hoặc kết hợp mờ với các thuật toán hiện đại và thông minh như điều khiển trượt, bền vững, tối ưu, dự báo, sử dụng mô hình mờ Takagi–Sugeno, kết hợp với mạng nơ ron,... Về đối tượng, các mô hình ¼, ½ và đầy đủ của xe được nghiên cứu, trong đó có kể đến các yếu tố phi tuyến, trễ,... của hệ [2-6].

Lý thuyết Đại số gia tử (Hedge algebras - HA) cho phép mô tả các giá trị ngôn ngữ của các biến bằng các độ đo tính mờ định lượng (các số thực) dựa trên các lập luật toán học chặt chẽ dựa trên thứ tự ngữ nghĩa vốn có của các giá trị ngôn ngữ [7, 8]. Vì vậy, lý thuyết HA đã được triển khai trong nhiều trong các lĩnh vực khác nhau và cho các kết quả đáng khích lệ. Trong lĩnh vực điều khiển dao động kết cấu, các bộ điều khiển dựa trên HA đã thể hiện nhiều ưu điểm so với các bộ điều khiển dựa trên lý thuyết tập mờ truyền thống như thiết lập đơn giản hơn, dễ tối ưu hơn, hiệu quả điều khiển cao hơn và đặc biệt là thời gian tính toán (CPU time) nhanh hơn rất nhiều [9-16].

Vì vậy, trong nghiên cứu này, bài toán điều khiển chủ động hệ thống treo của mô hình ¼ xe ô tô sử dụng HA được thực hiện, trong đó, hiệu quả của bộ điều khiển dựa trên Đại số gia tử (HA controller - HAC) cũng được so sánh với hiệu quả của bộ điều khiển bền vững trong [1].

2. NỘI DUNG CẦN GIẢI QUYẾT

2.1. Mô hình điều khiển



Hình 1. *Hệ thống treo chủ động.*

Xét mô hình ¼ xe ô tô với hệ thống treo chủ động như trên hình 1 [1]. Trong đó, m_1 và m_2 là khối lượng của thân xe và bánh xe; k_1, k_2, c_1, c_2 lần lượt là độ cứng và hệ số cản của hệ thống treo

và lốp xe; z_1, z_2, z_r lần lượt chuyển vị của thân xe, của lốp và biên dạng mặt đường; u là lực điều khiển. Đặt $x_1 = z_1 - z_2$; $x_2 = d(z_1 - z_2)/dt$, hệ phương trình trạng thái của hệ như sau:

$$m_1\ddot{z}_1 + c_1x_2 + k_1x_1 = u; m_2\ddot{z}_2 - c_1x_2 - k_1x_1 = u - c_2\left(\dot{z}_2 - \dot{z}_r\right) - k_2\left(z_2 - z_r\right) \quad (1)$$

Để tăng sự thoải mái khi lái xe và khả năng xử lý của xe, các vấn đề cần được quan tâm gồm: (1) Gia tốc thân xe $\ddot{z}_1$: giá trị tuyệt đối cần được giảm thiểu để đảm bảo độ thoải mái của con người; (2) Biến dạng của hệ thống treo $x_1 = z_1 - z_2$ và của lốp xe $z_2 - z_r$: giá trị tuyệt đối cần được giảm thiểu để đảm bảo độ an toàn của hệ thống; (3) Đại lượng $x_3 = k_2\left(z_2 - z_r\right)/g\left(m_1 - m_2\right)$ cần < 1 để đảm bảo độ bám đường của xe; (4) Lực điều khiển u: giá trị tuyệt đối phải ≤ giá trị cho phép u_{max}.

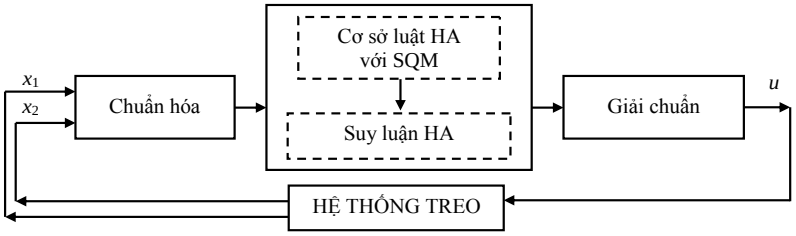
2.2. Thiết kế bộ điều khiển HAC

Các định nghĩa, định lý và các công thức cơ bản của lý thuyết Đại số gia tử được trình bày trong [8, 17] cho phép xác định tất cả ánh xạ ngữ nghĩa định lượng (Semantically Quantifying Mapping - SQM) có thể có của các giá trị ngôn ngữ của một biến ngôn ngữ X (bảng 1). Trong đó, các từ nguyên thủy gồm: Âm và Dương (được ký hiệu là A và D); các gia tử gồm: Rất và Hơi (được ký hiệu là R và H); $fm(c^-)$ và $\mu(h^-)$ lần lượt là độ đo tính mờ của các từ nguyên thủy âm và các gia tử âm; W là phần tử trung hòa; với các mô hình hóa các giá trị ngôn ngữ một cách đối xứng thì $fm(c^-) = \mu(h^-) = 0.5$.

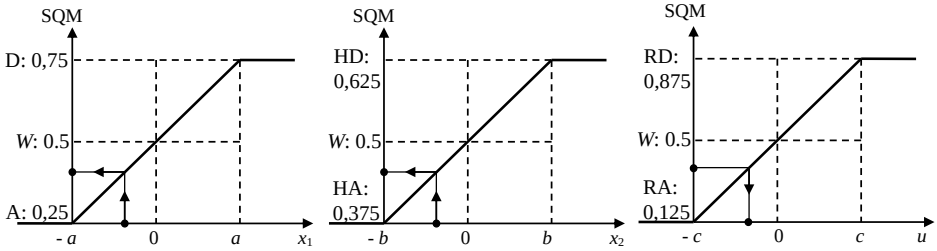
Bảng 1. *Giá trị SQM của một số giá trị ngôn ngữ.*

Giá trị ngôn ngữ	RA	A	HA	*W*	HD	D	RD
Giá trị SQM	0.125	0.250	0.375	0.500	0.625	0.750	0.875

Sơ đồ điều khiển của bộ điều khiển HAC tỉ lệ - vi phân, gồm 2 biến trạng thái (x_1 và x_2) và 1 biến điều khiển (u), được trình bày trên hình 2 [12]. Các bước chuẩn hóa của các biến trạng thái, để chuyển giá trị từ miền thực sang miền ngữ nghĩa, và ngược lại ở bước giải chuẩn của biến điều khiển được thể hiện trên hình 3, trong đó, *a, b, c* là các giá trị thể hiện khoảng xác định của của các biến x_1, x_2, u. Cơ sở luật HA với 15 luật điều khiển được thể hiện trên bảng 2. Hệ luật điều khiển với các giá trị SQM trên bảng 2 cho phép thể hiện hệ luật dưới dạng mặt như trên hình 4, đây cũng được coi là bước Suy luận HA. Bởi vì, dựa vào quan hệ hình học trên hình 4, giá trị SQM của biến điều khiển có thể được xác định thông qua các giá trị SQM của các biến trạng thái nhờ phép nội suy.



Hình 2. *Sơ đồ điều khiển của HAC.*



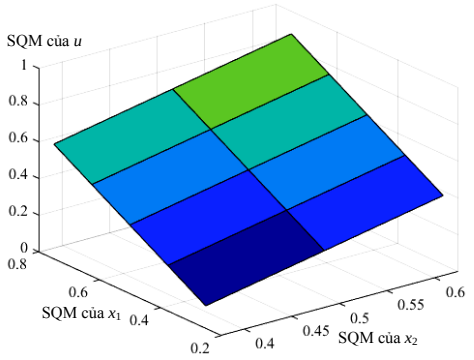
Hình 3. *Sơ đồ chuẩn hóa và giải chuẩn của HAC.*

Bảng 2. *Cơ sở luật HAC với SQM.*

x_1	x_2		
	HD: 0,625	*W*: 0,5	HA: 0,375
D: 0,75	RD: 0,875	D: 0,75	HD: 0,625
HD: 0,625	D: 0,75	HD: 0,625	*W*: 0,5
W: 0,5	HD: 0,625	*W*: 0,5	HA: 0,375
HA: 0,375	*W*: 0,5	HA: 0,375	A: 0,25
A: 0,25	HA: 0,375	A: 0,25	RA: 0,125

Với các mô hình hóa như trên, mặt luật là mặt phẳng và công thức tường minh giữa biến điều khiển và các biến trạng thái được thiết lập thông qua các bước nội suy tuyến tính gồm: (1) Chuẩn hóa để thu được giá trị SQM của các biến x_1 và x_2; (2) Suy luận HAC để thu được giá trị SQM của u; (3) Giải chuẩn để thu được giá trị thực của u. Cuối cùng, công thức tường minh thu được như sau [14]:

$$u = \frac{2cx_1}{3a} + \frac{cx_2}{3b} \qquad (2)$$



Hình 4. *Mặt luật và bước Suy luận HAC.*

3. MÔ PHỎNG SỐ

Số liệu của mô hình mô phỏng số như sau [1]: m_1 = 320 kg, m_2 = 40 kg, k_1 = 18000 N/m, k_2 = 200000 N/m, c_1 = 1000 Ns/m, c_2 = 10 Ns/m; biến dạng cho phép của hệ thống treo 0.1 m, biến dạng cho phép của lốp xe 0.1764 m, lực điều khiển cho phép u_{max} = 2500 N. Biên dạng mặt đường dạng xung đơn (bump) hình sin có chiều dài L = 5 m, chiều cao A = 0.08 m và vận tốc xe là V = 12.5 m/s (45 km/h) như sau:

$$z_r = \frac{1}{2}A\left(1-\cos\left(2\pi t\frac{V}{L}\right)\right) \text{ khi } 0 \le t \le \frac{L}{V}; = 0 \text{ khi } t > \frac{L}{V} \qquad (3)$$

Khoảng xác định của của các biến trạng thái và biến điều khiển trong HAC (a, b, c) được lựa chọn dựa trên giá trị tuyệt đối cực đại của x_1 và x_2 ở trạng thái không điều khiển (open loop - OL) và để giá trị tuyệt đối cực đại của lực điều khiển cho hệ danh định giữa HAC và bộ điều khiển bền vững (Hinf) trong [1] là bằng nhau (xem hình 5). Trong đó, lực điều khiển trong [1] được xác định như sau:

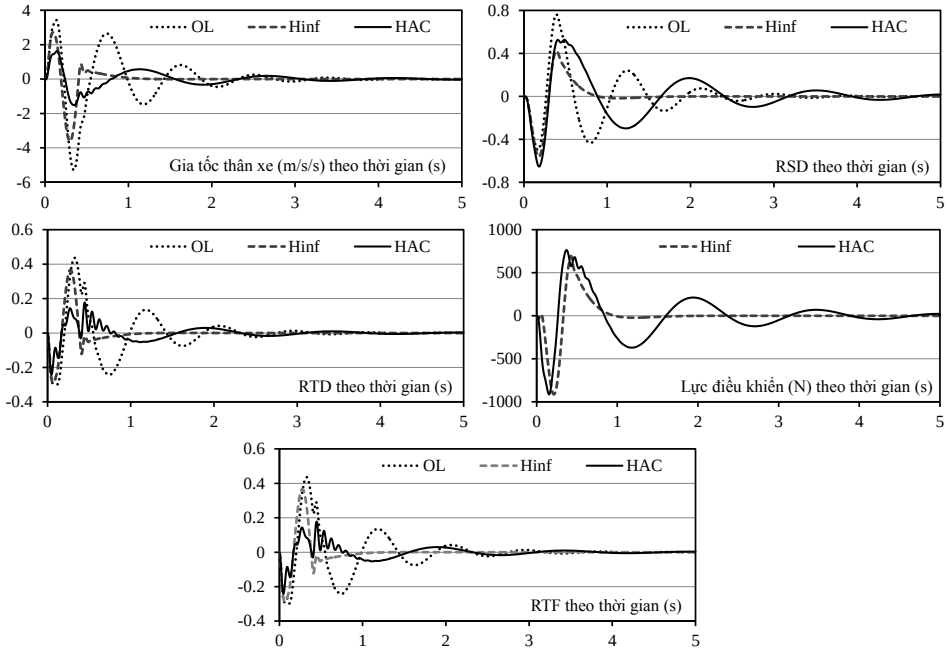
$$u = 10^4\left[1.0098\ \ 4.9655\ \ -0.1896\ \ 0.0909\right]\times\left[z_1 - z_2\ \ z_2 - z_r\ \ \dot{z}_1\ \ \dot{z}_2\right]^T \qquad (4)$$

Các đáp ứng theo thời gian với các trường hợp không điều khiển (OL), sử dụng các bộ điều khiển Hinf [1] và HAC của gia tốc thân xe, biến dạng hệ của thống treo so với giá trị cho phép (Relative Suspension Deflection - RSD), biến dạng của lốp xe so với giá trị cho phép (Relative Tyre Deflection - RTD), lực điều khiển và độ bám đường (Relative Tyre Force - RTF) được thể hiện trên hình 5.

Như vậy, với cùng lực điều khiển cực đại, HAC cho kết quả điều khiển tốt hơn nhiều so với Hinf ở các chỉ tiêu: gia tốc thân xe, RTD và RTF và kém hơn một chút ở chỉ tiêu RSD. Có một lưu ý rằng, HAC chỉ sử dụng 2 biến trạng thái (x_1 và x_2) để tính lực điều khiển u, trong khi Hinf dùng 4 biến trạng để tính u (xem phương trình 4). Đây là lợi thế của HAC trong thực tế điều khiển.

Các bộ điều khiển HAC và Hinf ở trên được khảo sát với số liệu danh định của m_1 và m_2.

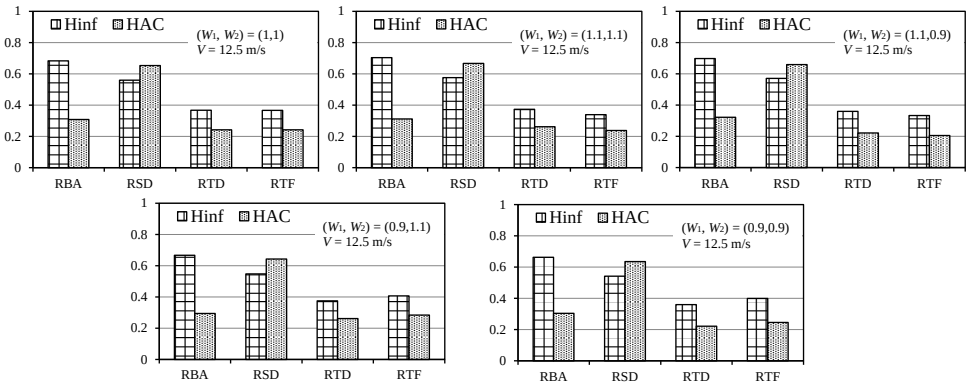
Trong trường hợp các khối lượng này bị thay đổi thành W_1m_1 và W_2m_2, kết quả mô phỏng được thể hiện trên hình 6, với RBA là giá trị gia tốc thân xe tương đối so với trường hợp không điều khiển (Relative Body Acceleration).



Hình 5. *Các đáp ứng theo thời gian của hệ thống.*

4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày các kết quả bước đầu khi áp dụng Đại số gia tử trong điều khiển chủ động hệ thống treo của xe ô tô. Các kết quả mô phỏng cho thấy tiềm năng ứng dụng của Đại số gia tử trong lĩnh vực này. Các nghiên cứu tiếp theo cần được hiện có thể là tối ưu bộ điều khiển HAC hoặc ứng dụng HAC cho các mô hình hệ thống treo phức tạp hơn.



Hình 6. *Kết quả mô phỏng khi các khối lượng bị thay đổi.*

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Sun, W., H. Gao, and P. Shi, "*Advanced control for vehicle active suspension systems*," Springer (2020).

[2]. Wen, S., et al., "*Fuzzy control for uncertain vehicle active suspension systems via dynamic sliding-mode approach*," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. Vol. 47, No. 1, (2016), pp. 24-32.

[3]. Zhao, J., et al., "*Chassis integrated control for active suspension, active front steering and direct yaw moment systems using hierarchical strategy*," Vehicle System Dynamics. Vol. 55, No. 1, (2017), pp. 72-103.
[4]. Li, H., et al., "*Adaptive event-triggered fuzzy control for uncertain active suspension systems*," IEEE transactions on cybernetics. Vol. 49, No. 12, (2018), pp. 4388-4397.
[5]. Lin, B., X. Su, and X. Li, "*Fuzzy sliding mode control for active suspension system with proportional differential sliding mode observer*," Asian Journal of Control. Vol. 21, No. 1, (2019), pp. 264-276.
[6]. Singh, D., "*Ride comfort analysis of passenger body biodynamics in active quarter car model using adaptive neuro-fuzzy inference system based super twisting sliding mode control*," Journal of Vibration and Control. Vol. 25, No. 12, (2019), pp. 1866-1882.
[7]. Ho, N. and H. Nam, "*Towards an algebraic foundation for a zadeh fuzzy logic*," Fuzzy Set and System. Vol. 129, No. (2002), pp. 229-254.
[8]. Ho, N.C. and N. Van Long, "*Fuzziness measure on complete hedge algebras and quantifying semantics of terms in linear hedge algebras*," Fuzzy sets and Systems. Vol. 158, No. 4, (2007), pp. 452-471.
[9]. Bui, H.-L., D.-T. Tran, and N.-L. Vu, "*Optimal fuzzy control of an inverted pendulum*," Journal of vibration and control. Vol. 18, No. 14, (2012), pp. 2097-2110.
[10]. Duc, N.D., et al., "*A study on the application of hedge algebras to active fuzzy control of a seism-excited structure*," Journal of Vibration and Control. Vol. 18, No. 14, (2012), pp. 2186-2200.
[11]. Anh, N.D., et al., "*Application of hedge algebra-based fuzzy controller to active control of a structure against earthquake*," Structural Control and Health Monitoring. Vol. 20, No. 4, (2013), pp. 483-495.
[12]. Bui, H.-L., et al., "*General design method of hedge-algebras-based fuzzy controllers and an application for structural active control*," Applied Intelligence. Vol. 43, No. 2, (2015), pp. 251-275.
[13]. Bui, H.-L., et al., "*Vibration control of uncertain structures with actuator saturation using hedge-algebras-based fuzzy controller*," Journal of Vibration and Control. Vol. 23, No. 12, (2017), pp. 1984-2002.
[14]. Bui, H.-L., T.-A. Le, and V.-B. Bui, "*Explicit formula of hedge-algebras-based fuzzy controller and applications in structural vibration control*," Applied Soft Computing. Vol. 60, No. (2017), pp. 150-166.
[15]. Bui, V.-B., Q.-C. Tran, and H.-L. Bui, "*Multi-objective optimal design of fuzzy controller for structural vibration control using Hedge-algebras approach*," Artificial Intelligence Review. Vol. 50, No. 4, (2018), pp. 569-595.
[16]. Tran, D.-T., et al., "*Vibration control of a structure using sliding-mode hedge-algebras-based controller*," Soft Computing. Vol. 23, No. 6, (2019), pp. 2047-2059.
[17]. Ho, N.C. and V.N. Lan, "*Optimal hedge-algebras-based controller: Design and application*," Fuzzy Sets and Systems. Vol. 159, No. 8, (2008), pp. 968-989.

ABSTRACT

CONTROL OF AN ACTIVE SUSPENSION USING HEDGE ALGEBRAS

The paper presents the control problem of an active suspension based on the Hedge algebras theory. The quantities that need to be decreased in this problem include: car body acceleration, suspension and tire deflection, road holding and maximum control force. A ¼ car model is used to perform numerical simulations. The efficiency of the proposed controller is also compared with that of a robustness controller.

Keywords: Active control, Hedge algebras, Active suspension, ¼ car model.

Nhận bài ngày 15 tháng 4 năm 2021
Hoàn thiện ngày 05 tháng 8 năm 2021
Chấp nhận đăng ngày 05 tháng 9 năm 2021

Địa chỉ: [1] Viện Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội;
[2] Khoa Cơ khí, Đại học Công nghiệp Hà Nội;
[3] Khoa Hệ thống thông tin quản lý, Đại học Tài chính quản trị kinh doanh.
[*] Email: le.buihai@hust.edu.vn.