

AIRCRAFT LANDING CONTROL USE FUZZY LOGIC CONTROLLER AND HEDGE ALGEBRA CONTROLLER

Pham Hong Viet¹, Bui Hai Le², Nguyen Tien Duy^{3*}

¹TNU - University of Information and Communication Technology

²School of Mechanical Engineering - Hanoi University of Science and Technology

³TNU - University of Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 15/5/2022	Controlling flying objects is a complex problem and has attracted much attention from scientists in recent decades. Controlling an aircraft to land is one of that classes of problems. In this study, the controlled object is a simplified aircraft model. The difficulty in control is ensuring the relationship between the control force, altitude, and speed of the aircraft. Landing control for this aircraft model is performed by designing controllers based on fuzzy theory and hedge algebras theory with the same control rule base and parameters. The computational simulation results show that the superior efficiency in altitude reduction, landing speed reduction, maximum control force and computation time (CPU time) of the hedge algebras-based controller compared with that of the fuzzy theory-based controller. Therefore, it can be seen that the hedge algebras-based controller has the potential to be applied in this field as well as in motion control of other mechanical models.
Revised: 31/5/2022	
Published: 31/5/2022	
KEYWORDS	
Fuzzy control	
Hedge algebras	
Aircraft landing	
Landing	
CPU time	

ĐIỀU KHIỂN MÁY BAY HẠ CÁNH SỬ DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN MỜ VÀ BỘ ĐIỀU KHIỂN ĐẠI SỐ GIA TỬ

Phạm Hồng Việt¹, Bùi Hải Lê², Nguyễn Tiến Duy^{3*}

¹Trường Đại học Công nghệ thông tin và Truyền thông - ĐH Thái Nguyên

²Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội

³Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 15/5/2022	Điều khiển các vật thể bay là bài toán khó và được nhiều nhà khoa học quan tâm trong những thập kỷ gần đây. Bài toán điều khiển máy bay hạ cánh là một trong lớp bài toán đó. Trong nghiên cứu này, đối tượng được điều khiển là một mô hình máy bay đã đơn giản hoá. Sự khó khăn trong điều khiển đó là đảm bảo mối quan hệ ràng buộc giữa lực điều khiển, độ cao và vận tốc của máy bay. Điều khiển hạ cánh cho mô hình được thực hiện bằng thiết kế các bộ điều khiển dựa trên lý thuyết mờ và đại số gia tử với hệ luật và các tham số điều khiển giống nhau. Các kết quả tính toán, mô phỏng cho thấy hiệu quả vượt trội về giảm độ cao, giảm vận tốc hạ cánh, lực điều khiển cực đại và thời gian tính toán (CPU time) của bộ điều khiển dựa trên đại số gia tử so với bộ điều khiển dựa trên lý thuyết mờ. Như vậy, có thể thấy rằng bộ điều khiển dựa trên đại số gia tử có nhiều tiềm năng để ứng dụng trong lớp bài toán này cũng như trong điều khiển chuyển động của các mô hình cơ học khác.
Ngày hoàn thiện: 31/5/2022	
Ngày đăng: 31/5/2022	
TỪ KHÓA	
Điều khiển mờ	
Đại số gia tử	
Máy bay hạ cánh	
Hạ độ cao	
Thời gian tính toán	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5985>

* Corresponding author. Email: duy.infor@tnut.edu.vn

1. Giới thiệu

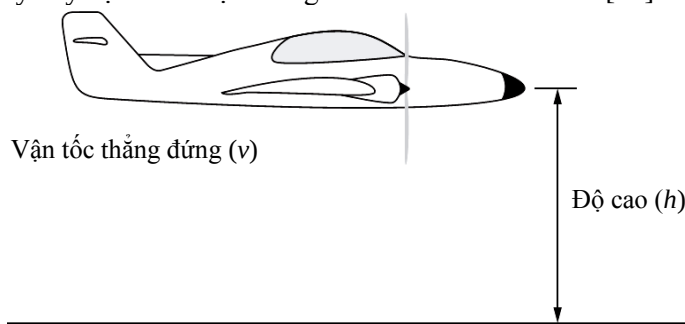
Gần đây, bài toán điều khiển vật bay thu hút được sự quan tâm đáng kể của các nhà khoa học. Trong đó, lý thuyết tập mờ đóng vai trò quan trọng trong lĩnh vực này. Trong [1], bộ điều khiển mờ đã được thiết kế để điều khiển máy bay hạ cánh ở giai đoạn tiếp đất. Bộ điều khiển dựa trên logic mờ được phát triển trong [2] để điều khiển hạ cánh tự động của các mô hình máy bay tuyến tính và phi tuyến. Mạng nơron mờ nhiều lớp được sử dụng để tạo tín hiệu điều khiển ở từng giai đoạn trong quá trình máy bay hạ cánh được nghiên cứu trong [3]. Hệ thống suy luận mờ nơron thích nghi được sử dụng để mô phỏng theo dõi quỹ đạo trong kiểm soát quá trình hạ cánh máy bay được trình bày trong [4]. Bài toán điều khiển thể bay của động cơ tên lửa sử dụng bộ điều khiển PID mờ lại được khảo sát trong [5].

Lý thuyết Đại số gia tử (Hedge algebras - HA) ra đời từ năm 1990, 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 luận toán học chặt chẽ, dựa trên thứ tự ngữ nghĩa vốn có của các giá trị ngôn ngữ [6], [7]. Vì vậy, HA đã được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau và cho các kết quả đáng khích lệ. Trong lĩnh vực điều khiển các mô hình cơ học, 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 như thiết lập đơn giản hơn, dễ tối ưu hơn, hiệu quả điều khiển cao hơn và đặc biệt là thời gian tính toán nhanh hơn rất nhiều [8]-[15].

Trong nghiên cứu này, việc điều khiển hạ cánh của một mô hình máy bay được đơn giản hoá trong [16] được thực hiện sử dụng các bộ điều khiển dựa trên lý thuyết mờ (Fuzzy controller, FC) và đại số gia tử (Hedge-algebras-based controller, HAC).

2. Mô hình điều khiển

Xét mô hình máy bay hạ cánh được đơn giản hoá như trên Hình 1 [16].



Hình 1. Mô hình máy bay hạ cánh

Bài toán điều khiển và hạ độ cao của mô hình máy bay trên sẽ được mô phỏng trong những phần tiếp theo của báo cáo. Vận tốc hạ cánh mong muốn sẽ tỉ lệ với bình phương chiều cao. Do đó, ở độ cao lớn hơn sẽ cần vận tốc hạ cánh lớn hơn. Khi chiều cao của máy bay giảm dần, vận tốc hạ cánh cũng cần giảm dần đến 0. Bằng cách này, máy bay sẽ hạ độ cao kịp thời nhưng sẽ chạm đất một cách nhẹ nhàng để tránh những sự cố.

Hai biến trạng thái cho mô phỏng là chiều cao của máy bay so với mặt đất (h (ft – feet)) và vận tốc theo phương thẳng đứng của máy bay (v (ft/s – feet per second)). Biến điều khiển đầu ra là một lực mà khi tác dụng vào máy bay, sẽ làm thay đổi độ cao h và vận tốc v của máy bay. Hệ phương trình điều khiển vi phân được thiết lập một cách đơn giản hoá như sau: Một khối lượng m chuyển động với một vận tốc v sẽ có động lượng mv . Nếu không có ngoại lực tác động, khối lượng sẽ tiếp tục di chuyển với cùng hướng và cùng vận tốc v . Nếu có ngoại lực f (lb – Pound) tác động trong một khoảng thời gian Δt sẽ gây ra thay đổi vận tốc và thay đổi độ cao:

$$\begin{cases} \Delta v = \frac{f}{m} \Delta t \\ \Delta h = v \Delta t \end{cases} \quad (1)$$

Như vậy, thay đổi vận tốc tỉ lệ với ngoại lực tác dụng. Sau mỗi khoảng thời gian Δt , ta có chu kỳ vận tốc mới v_{i+1} và độ cao mới h_{i+1} như sau:

$$\begin{cases} v_{i+1} = v_i + \Delta v \\ h_{i+1} = h_i + \Delta h \end{cases} \quad (2)$$

Từ (1) và (2), ta có:

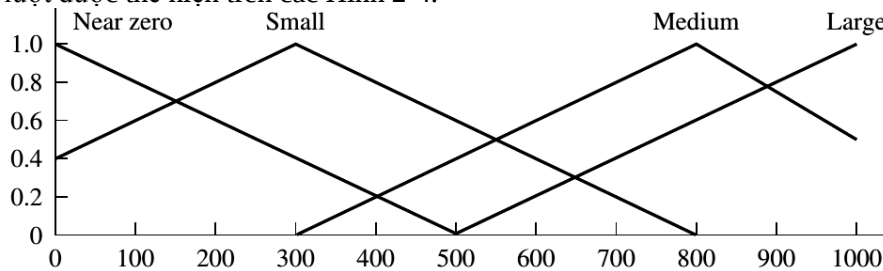
$$\begin{cases} v_{i+1} = v_i + \frac{f}{m} \Delta t \\ h_{i+1} = h_i + v \Delta t \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó, h_{i+1} và h_{i+1} là vận tốc và chiều cao mới ở vòng lặp thứ $i + 1$, v_i và h_i là vận tốc và chiều cao cũ ở vòng lặp thứ i . Như vậy, hệ phương trình (3) cho phép xác định các giá trị mới của các biến trạng thái v và h theo đầu vào điều khiển và các giá trị của biến trạng thái trước đó.

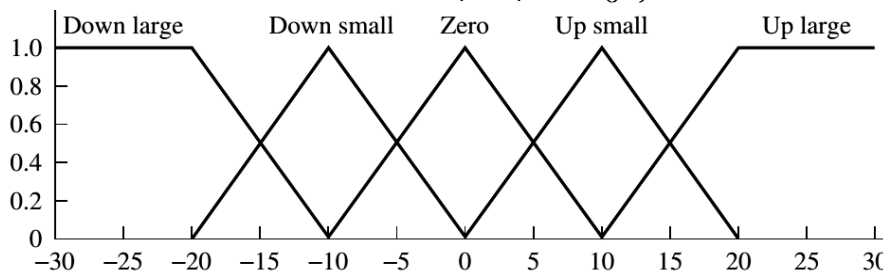
3. Thiết kế các bộ điều khiển

3.1. Bộ điều khiển dựa trên lý thuyết tập mờ

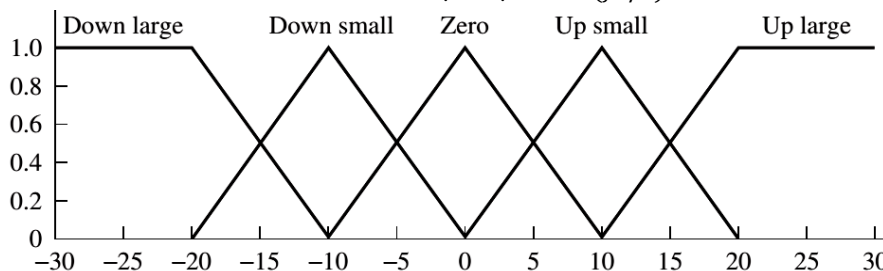
Trong mục này, bộ điều khiển dựa trên lý thuyết tập mờ (FC) trong [16] để điều khiển hạ cánh cho mô hình máy bay trên Hình 1 được trình bày. Phân hoạch của các biến trạng thái và biến điều khiển lần lượt được thể hiện trên các Hình 2-4.



Hình 2. Phân hoạch độ cao h (ft)



Hình 3. Phân hoạch vận tốc v (ft/s)



Hình 4. Phân hoạch lực điều khiển f (lb)

Hệ luật điều khiển mờ được thể hiện trên Bảng 1, trong đó các giá trị ngôn ngữ lần lượt được ký hiệu như sau: Near zero – NZ, Small – S, Medium – M, Large – L, Down large – DL, Down small – DS, Zero – Z, Up small – US, Up large – UL. Bộ điều khiển FC sử dụng suy luận Mamdani, phép AND = Min và phương pháp giải mờ trọng tâm [16].

Bảng 1. Hệ luật điều khiển của FC

Chiều cao h	Vận tốc v				
	DL	DS	Z	US	UL
L	Z	DS	DL	DL	DL
M	US	Z	DS	DL	DL
S	UL	US	Z	DS	DL
NZ	UL	UL	Z	DS	DS

3.2. Bộ điều khiển dựa trên đại số gia tử

Các định nghĩa, định lý và các công thức cơ bản của lý thuyết Đại số gia tử được trình bày trong [7], [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 2). Trong đó, các từ nguyên thủy gồm: Lớn và Nhỏ (được ký hiệu là L và N); 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 hoá các giá trị ngôn ngữ một cách đối xứng thì $fm(c^-) = \mu(h^-) = 0,5$.

Bảng 2. Giá trị SQM của một số giá trị ngôn ngữ

Giá trị ngôn ngữ	RN	N	HN	W	HL	L	RL
Giá trị SQM	0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875

Sử dụng hệ luật điều khiển định tính của FC như trên Bảng 1, các nhân/giá trị ngôn ngữ của các biến trạng thái và biến điều khiển cần được chuyển đổi sang các giá trị ngôn ngữ với các ánh xạ ngữ nghĩa định lượng như sau:

- Với chiều cao h :

$$\begin{aligned} NZ \rightarrow N(0,25); S \rightarrow HN(0,375); \\ M \rightarrow HL(0,625); L \rightarrow L(0,75) \end{aligned} \quad (4)$$

- Với vận tốc v và lực điều khiển f :

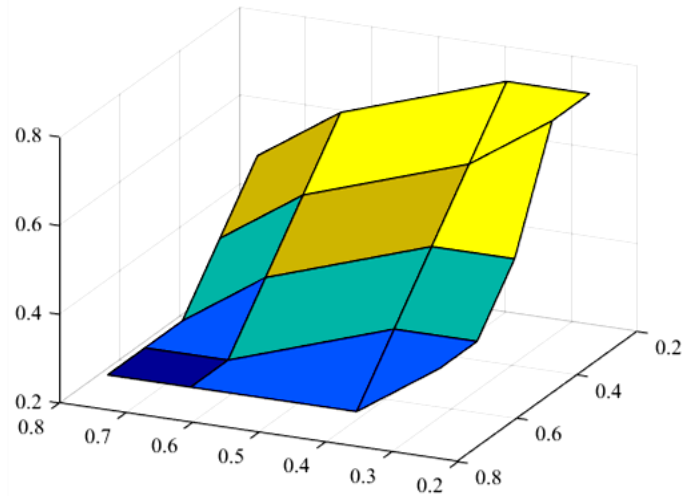
$$\begin{aligned} DL \rightarrow N(0,25); DS \rightarrow HN(0,375); \\ Z \rightarrow W(0,5); \\ US \rightarrow HL(0,625); UL \rightarrow L(0,75) \end{aligned} \quad (5)$$

Như vậy, hệ luật điều khiển của HAC sẽ được thể hiện trên Bảng 3.

Bảng 3. Hệ luật của HAC

Chiều cao h	Vận tốc v				
	N(0,25)	HN(0,375)	W(0,5)	HL(0,625)	L(0,75)
L(0,75)	W(0,5)	HN(0,375)	N(0,25)	N(0,25)	N(0,25)
HL(0,625)	HL(0,625)	W(0,5)	HN(0,375)	N(0,25)	N(0,25)
HN(0,375)	L(0,75)	HL(0,625)	W(0,5)	HN(0,375)	N(0,25)
N(0,25)	L(0,75)	L(0,75)	W(0,5)	HN(0,375)	HN(0,375)

Các giá trị SQM của các biến cho phép biểu diễn hệ luật điều khiển của HAC dưới dạng mặt như trên Hình 5. Đây có thể coi là bước suy luận của HAC với cơ chế hoạt động như sau: (1) Với mỗi giá trị thực của biến trạng thái đầu vào sẽ được chuyển sang giá trị SQM tương ứng thông qua phép nội suy tuyến tính. Bước này có vai trò tương đương với bước mờ hoá của FC như được thể hiện trên các Hình 2-3. (2) Thông qua mặt luật HAC trên Hình 5, có thể xác định giá trị SQM của biến điều khiển f thông qua cặp giá trị SQM của các biến trạng thái h và v nhờ phép nội suy tuyến tính. (3) Giá trị thực của biến điều khiển f thu được sẽ được nội suy để chuyển thành giá trị thực của f để đưa vào vòng lặp điều khiển tiếp theo. Bước này có vai trò tương đương với bước giải mờ của FC như được thể hiện trên Hình 5.



Hình 5. Mặt suy luận của HAC

4. Mô phỏng số

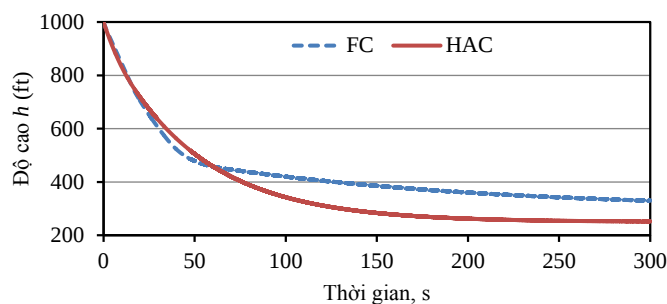
Trong mục này, các kết quả điều khiển hạ cánh cho mô hình máy bay được đơn giản hoá như trên Hình 1 và hệ phương trình (3) được thực hiện để so sánh các chỉ tiêu độ cao hạ cánh h , vận tốc hạ cánh v , lực điều khiển f và thời gian tính toán (CPU time) khi sử dụng các bộ điều khiển dựa trên lý thuyết tập mờ (FC) và đại số gia từ (HAC).

Điều kiện đầu của hệ gồm độ cao ban đầu h_0 và vận tốc ban đầu v_0 được cho như sau [16]: $h_0 = 1000$ (ft); $v_0 = -20$ (ft/s); khối lượng $m = 1$. Bước thời gian $\Delta t = 0,01$ (s) và thời gian mô phỏng $T = 300$ (s).

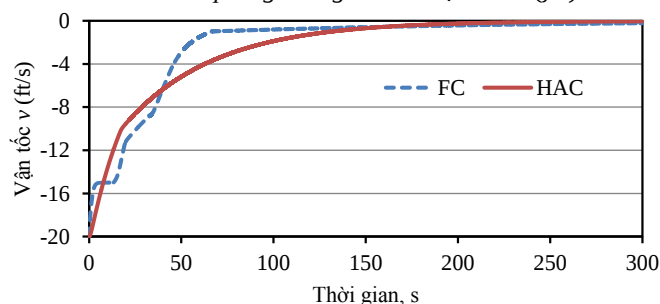
Các kết quả mô phỏng bao gồm: thời gian tính toán của các bộ điều khiển (CPU time) được trình bày trong Bảng 4, độ cao và vận tốc của máy bay theo thời gian được thể hiện trên các Hình 6-7 và lực điều khiển theo thời gian được thể hiện trên Hình 8. Như vậy, có thể thấy rằng, với cùng hệ luật điều khiển và khoảng xác định của các biến trạng thái, HAC có kết quả tốt hơn nhiều so với FC đối với đáp ứng theo thời gian của độ cao và vận tốc hạ cánh của máy bay cũng như lực điều khiển. Đặc biệt, thời gian tính toán của HAC nhanh hơn rất nhiều so với FC, giảm 99,31%. Việc giảm này là do các bước mờ hoá, suy luận và giải mờ của FC khá rắc rối và mất nhiều thao tác để xử lý, trong khi các bước thực hiện có vai trò tương đương của HAC chỉ sử dụng các phép nội suy tuyến tính đơn giản. Đây là một lợi thế đáng kể của HAC với yêu cầu cao về việc giảm thời gian xử lý ở tất cả thành phần/giai đoạn trong thực tế điều khiển. Tuy nhiên, kết quả mô phỏng cũng cho thấy độ cao của máy bay không tiến đến 0 khi vận tốc và lực điều khiển tiến đến 0. Điều này cho thấy hệ luật điều khiển chưa tốt và phù hợp với đối tượng điều khiển. Nguyên nhân có thể là do phân hoạch biến trạng thái độ cao h ở dạng không điển hình và hệ luật điều khiển của FC ở dạng không đối xứng.

Bảng 4. Thời gian tính toán của các bộ điều khiển

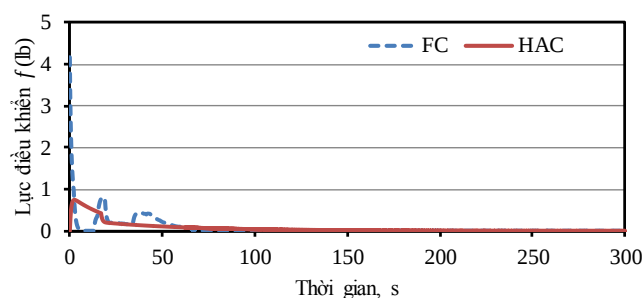
Bộ điều khiển	FC	HAC
Thời gian tính toán (s)	2077,35	14,25



Hình 6. Đáp ứng thời gian của độ cao h (ft)



Hình 7. Đáp ứng thời gian của vận tốc v (ft/s)



Hình 8. Đáp ứng thời gian của lực điều khiển f (lb)

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày về bài toán điều khiển hạ cánh cho một mô hình máy bay được đơn giản hoá dựa trên lý thuyết mờ và đại số gia tử. Kết quả mô phỏng tính toán số cho thấy hiệu quả điều khiển vượt trội của bộ điều khiển dựa trên lý thuyết đại số gia tử so với bộ điều khiển dựa trên lý thuyết tập mờ cả về đáp ứng điều khiển và thời gian tính toán. Qua đó, có thể thấy HAC có nhiều tiềm năng ứng dụng trong lĩnh vực điều khiển vật bay nói chung. Tuy nhiên, hệ luật điều khiển trong báo cáo chưa phù hợp với mô hình được điều khiển nên cần có những nghiên cứu tiếp theo để cải tiến hệ luật và hiệu quả của HAC.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] K. H. Kienitz, "Controller design using fuzzy logic—A case study," *Automatica*, vol. 29, no. 2, pp. 549-554, 1993.
- [2] K. Nho and R. K. Agarwal, "Automatic landing system design using fuzzy logic," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 23, no. 2, pp. 298-304, 2000.
- [3] J. -G. Juang and J. -Z. Chio, "Fuzzy modelling control for aircraft automatic landing system," *International Journal of Systems Science*, vol. 36, no. 2, pp. 77-87, 2005.
- [4] D. Liu, G. Naadimuthu, and E. Lee, "Trajectory tracking in aircraft landing operations management using the adaptive neural fuzzy inference system," *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 56, no. 5, pp. 1322-1327, 2008.

-
- [5] R. Sumathi and M. Usha, "Pitch and yaw attitude control of a rocket engine using hybrid fuzzy-PID controller," *The Open Automation and Control Systems Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 29-39, 2014.
 - [6] N. Ho and H. Nam, "Towards an algebraic foundation for a zadeh fuzzy logic," *Fuzzy Set and System*, vol. 129, no. 2, pp. 229-254, 2002.
 - [7] C. H. Nguyen and V. L. Nguyen, "Fuzziness measure on complete hedge algebras and quantifying semantics of terms in linear hedge algebras," *Fuzzy sets and Systems*, vol. 158, no. 4, pp. 452-471, 2007.
 - [8] H. L. Bui, D. T. Tran, and N. L. Vu, "Optimal fuzzy control of an inverted pendulum," *Journal of vibration and control*, vol. 18, no. 14, pp. 2097-2110, 2012.
 - [9] D. D. Nnguyen *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, pp. 2186-2200, 2012.
 - [10] D. A. Nguyen *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, pp. 483-495, 2013.
 - [11] H. L. Bui *et al.*, "General design method of hedge-algebras-based fuzzy controllers and an application for structural active control," *Applied Intelligence*, vol. 43, no. 2, pp. 251-275, 2015.
 - [12] H. L. Bui *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, pp. 1984-2002, 2017.
 - [13] H. L. Bui, 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, pp. 150-166, 2017.
 - [14] V. B. Bui, 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, pp. 569-595, 2018.
 - [15] D. T. Tran *et al.*, "Vibration control of a structure using sliding-mode hedge-algebras-based controller," *Soft Computing*, vol. 23, no. 6, pp. 2047-2059, 2019.
 - [16] T. J. Ross, *Fuzzy logic with engineering applications*. Wiley Online Library, 2004.
 - [17] C. H. Nguyen and N. L. Vu, "Optimal hedge-algebras-based controller: Design and application," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 159, no. 8, pp. 968-989, 2008.