

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN THÔNG MINH CHO MÁY BAY KHÔNG NGƯỜI LÁI VỚI TẢI TRỌNG BÊN NGOÀI

INTELLIGENT CONTROLLER DESIGN FOR UAV STABILIZATION WITH EXTERNAL PAYLOAD

ĐỖ KHẮC TIỆP

Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: dokhactiep@vamaru.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo trình bày mô hình toán học của máy bay không người lái (UAV) và đề xuất thiết kế của bộ điều khiển mờ lai tự chỉnh cho máy bay không người lái với tải trọng bên ngoài, bộ điều khiển đề xuất mang lại một số ưu điểm nổi trội so với một số bộ điều khiển thông thường, đặc biệt trong việc xử lý các hệ thống phi tuyến và độ không ổn định của các tham số được điều khiển. Các kết quả thu được qua thực nghiệm bằng cách áp dụng bộ điều khiển được đề xuất và thử nghiệm điều khiển thời gian thực trên Matlab với máy bay không người lái AR drone 2.0 với tải trọng bên ngoài. Kết quả thu được đã chứng minh được hiệu quả của bộ điều khiển thông minh được đề xuất, bộ điều khiển đề xuất có thể cải thiện độ ổn định và chính xác của toàn bộ hệ thống khi làm việc với tải trọng bên ngoài. Kết quả thực nghiệm của bộ điều khiển được đề xuất được so sánh với các kết quả của bộ điều khiển truyền thống PID.

Từ khóa: Điều khiển mờ, điều khiển PID, Matlab/Simulink; Điều khiển thời gian thực, AR.Drone 2.0.

Abstract

The paper presents the mathematical model of a quadrotor unmanned aerial vehicle (UAV) and the design of robust Self-Tuning PID controller based on fuzzy logic, which offers several advantages over certain types of conventional control methods, specifically in dealing with highly nonlinear systems and parameter uncertainty. The results of the numerical simulation using gazebo physics engine simulator and real-time experiment using AR drone 2.0 test bed demonstrate the effectiveness of this intelligent control strategy which can improve the robustness of the whole system and achieve accurate trajectory tracking control, comparing it with the conventional proportional integral derivative (PID).

Keywords: Fuzzy control, PID controller, Matlab/Simulink, Realtime control, AR. Drone.

1. Giới thiệu

Việc sử dụng UAV với sự thay đổi trọng tải đã và đang đóng một vai trò quan trọng trong việc vận chuyển của các thiết bị bay. Việc kiểm soát các thiết bị bay không người lái (UAV) trở nên khó khăn hơn khi nó liên quan đến sự thay đổi trọng tải theo thời gian. Với sự phổ biến ngày càng tăng của các UAV tự hành trong lĩnh vực quân sự và dân sự như giám sát, giám sát thảm họa, nhiệm vụ cứu hộ và giao hàng [1], trong đó việc mang và vận chuyển trọng tải bên ngoài là điều cần thiết để hoàn thành nhiệm vụ thành công, an toàn.

Để UAV có thể xử lý và thực hiện những nhiệm vụ như dỡ gói hàng hoặc giảm tải trọng mà không hạ cánh, cần một bộ điều khiển mạnh và phải đủ thông minh để giữ cho UAV ổn định trong các trường hợp khác nhau. Bộ điều khiển thông minh phải tự thích ứng trong một khoảng thời gian ngắn với những thay đổi đột ngột về tải trọng để có thể giúp cho UAV hoạt động ổn định. Để thực hiện đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển thông minh đề xuất tác giả tiến hành thử nghiệm trên thiết bị bay AR.Drone, đây là một thiết bị bay giá rẻ, giao diện lập trình ứng dụng mở và các tính năng được điều khiển thông qua Wi-Fi.

Bài báo cũng trình bày mô hình toán học của AR.Drone và bộ điều khiển được xây dựng trên Matlab/Simulink. Kết quả hoạt động của bộ điều khiển thông minh được đề xuất và hoạt động của bộ điều khiển PID truyền thống áp dụng cho trường hợp UAV hoạt động với sự thay đổi tải trọng được so sánh với nhau.

2. Giới thiệu thiết bị bay bốn cánh AR.Drone

2.1. Giới thiệu về AR.Drone

Thiết bị bay bốn cánh AR.Drone được sản xuất bởi nhà sản xuất Parrot, đây là một thiết bị bay có giá thành rẻ. Giao diện lập trình ứng dụng mở, các tính năng được điều khiển qua Wi-Fi và với phần mềm mã nguồn mở cho phép người dùng có thể áp dụng những thuật toán khác nhau vào thiết bị, chính những lý do trên mà tác giả đã lựa chọn thiết bị này để sử dụng trong nghiên cứu của mình.

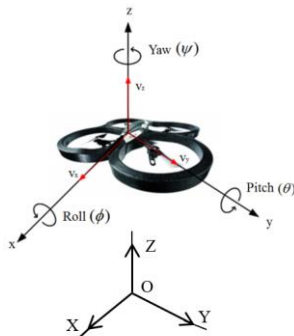


Hình 1. Hình ảnh thực tế AR.Drone 2.0: (a)- AR.Drone với bộ thân trong nhà; (b)- AR.Drone với bộ thân ngoài trời

AR.Drone là thiết bị bay bốn cánh có trọng lượng là 380g với bộ thân trong nhà (Hình 1(a)) và nặng 420g với bộ thân hoạt động ngoài trời (Hình 1(b)).

AR.Drone 2.0 được cấp nguồn bởi pin Li-Po 11.1V, 1500mAh. Được trang bị 4 động cơ BLDC tại bốn cánh của thiết bị với công suất của mỗi động cơ BLDC là 14,5W và tốc độ quay là 28.500 vòng/phút. Bộ điều khiển trung tâm của AR.Drone 2.0 chứa bộ xử lý ARM Cortex-A8 1GHz 32 bit và bộ xử lý tín hiệu kỹ thuật số TMS320DMC64X 800MHz với hỗ trợ video. Hệ thống cũng có bộ nhớ RAM DDR2 1 GB 200MHz. Bộ điều khiển trung tâm chứa các mô-đun để giao tiếp với các thiết bị ngoại vi. Các mô-đun này đặc biệt bao gồm giao thức truyền thông không dây IEEE 802.11 cho phép giao tiếp TCP/IP. Giao thức này sử dụng cùng tần số 2,4GHz với mạng không dây được sử dụng rộng rãi ngày nay. Giao tiếp giữa thiết bị bay và bộ điều khiển từ xa thông qua kết nối Wi-Fi trong phạm vi phủ sóng 100m.

2.2. Mô hình động lực học của AR.Drone



Hình 2. Các góc và hệ trục trên UAV

Để mô tả mô hình động lực học của thiết bị bay không người lái chúng ta sử dụng phương trình Newton-Euler [4, 5]. Và qui ước hệ tọa độ {oxyz} là hệ trục tọa độ được gắn trên thiết bị bay và hệ tọa độ {OXYZ} là hệ trục tọa độ trái đất. Để có thể mô tả được, ta có một số giả định cần được thỏa mãn như sau. Đầu tiên chúng ta giả định rằng thân và các cánh

của máy bay là cứng. Thứ hai, lực cản khí động học của thân máy bay là không đáng kể vì máy bay không người lái bị hạn chế bay ở tốc độ thấp. Tiếp theo, ảnh hưởng của mômen hồi chuyển của các rôto quay cũng không đáng kể theo giả thiết rằng thiết bị bay bay chậm. Chúng ta cũng giả định rằng không có hiệu ứng mặt đất đáng kể nào tác động lên thiết bị bay vì nó bay đủ cao so với mặt đất. Cuối cùng, giả sử rằng hệ thống đối xứng qua trục ngang và trục dọc của hệ trục tọa độ {oxyz} [2,3].

Theo đó, các phương trình vi phân mô tả mô hình động lực học của AR.Drone [2] có thể được mô tả trong công thức (1) và (2) như sau:

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum k_F \omega_i^2 (\cos \psi \cdot \sin \theta + \cos \theta \cdot \sin \phi \cdot \sin \psi) \\ \sum k_F \omega_i^2 (\sin \psi \cdot \sin \theta - \cos \psi \cdot \cos \theta \cdot \sin \phi) \\ \sum k_F \omega_i^2 (\cos \phi \cdot \cos \theta) - mg \end{bmatrix} \quad (1)$$

Trong đó m: Là trọng lượng của thiết bị bay [kg];

$\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ là vi phân của vị trí (x,y,z); $[\phi, \theta, \psi]^T$ là

biên độ của thiết bị bay [m], k_F là hằng số đặc trưng cho động cơ; ω_i là vận tốc góc [rad/s] và g là gia tốc trọng trường [m/s²].

Ngoài ra, mô hình động lực học của AR.Drone cũng có thể được mô tả:

$$\begin{bmatrix} I_{xx} \dot{p} \\ I_{yy} \dot{q} \\ I_{zz} \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l k_F (\omega_2^2 - \omega_4^2) \\ l k_F (\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ k_M (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Trong đó: I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} biểu thị momen quán tính trên hệ trục {oxyz}; $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ lần lượt là vận tốc góc của động cơ 1, 2, 3, 4; k_M biểu thị hằng số momen và l biểu thị khoảng cách từ động cơ đến tâm của AR.Drone.

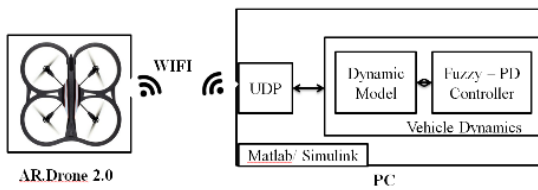
3. Thiết kế bộ điều khiển thực hiện điều khiển thời gian thực cho AR.Drone sử dụng bộ điều khiển mờ lai

3.1. Điều khiển AR.Drone theo thời gian thực thông qua kết nối Wifi

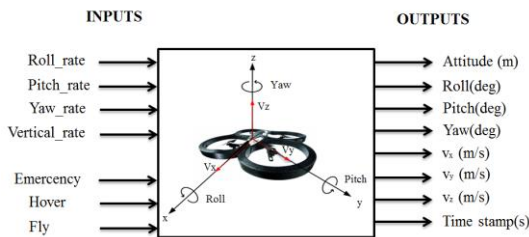
Mô hình AR.Drone được xây dựng trên Matlab/Simulink để thu thập các dữ liệu từ thiết bị bay về máy tính và truyền các lệnh điều khiển từ máy tính đến thiết bị bay này. Giao diện điều khiển AR.Drone được xây dựng trên Matlab/Simulink để điều khiển qua Wi-Fi được phát triển cho phép thực hiện nhanh các lệnh điều khiển từ máy tính, kiểm soát và giám sát các thông số của hệ thống.

Giao tiếp giữa máy tính với AR.Drone được thiết lập thông qua giao thức UDP, điều này được thực hiện

bằng cách sử dụng khối UDP trong Simulink. Khi quá trình truyền thông được thiết lập, các tín hiệu điều khiển từ máy tính sẽ được truyền đến máy bay và ngược lại. Việc trao đổi dữ liệu giữa máy bay và mô hình Matlab/Simulink trên máy tính được thực hiện ở tần số 16 Hz. Dữ liệu mà Matlab nhận được sẽ được đọc và ghi lại. Do đó, máy bay được điều khiển trực tiếp không dây thông qua mô hình trên máy tính được xây dựng trên Simulink sử dụng công cụ RealTime Windows Target. Kết nối không dây được thiết lập theo cách này cho phép việc điều khiển và kiểm soát máy bay được thực hiện nhanh chóng.



Hình 3. Sơ đồ cấu trúc hệ thống Điều khiển AR.Drone thông qua kết nối Wifi



Hình 4. Các dữ liệu vào - ra của AR.Drone

AR.Drone có thể được điều khiển bằng cách sử dụng 4 tín hiệu điều khiển (có giá trị từ -1 đến 1): Pitch (góc quay quanh trục Y) (giá trị dương cho chiều bay lên, giá trị âm cho chiều hạ thấp), Roll (góc quay quanh trục X) (giá trị dương quay sang phải, giá trị âm quay sang trái), Yaw (góc quay quanh trục Z) (giá trị

dương cho trục chuyển động theo chiều kim đồng hồ, giá trị âm cho trục chuyển động ngược chiều kim đồng hồ). Dữ liệu từ AR.Drone gửi về máy tính bao gồm độ cao thực tế, các góc Roll, Pitch, Yaw và thời gian đáp. Từ những dữ liệu này, ta có thể ước tính được vị trí x, y, z của máy bay. Hình 4 cho thấy các đầu vào và đầu ra của hệ thống AR.Drone.

Chương trình điều khiển thời gian thực cho AR.Drone được xây dựng trên Matlab/Simulink được miêu tả trên Hình 5.

Chương trình điều khiển thời gian thực cho AR.Drone bao gồm 4 khối chức năng:

Khối 1: Nhập dữ liệu, dữ liệu được nhập từ người điều khiển cho phép người điều khiển thực hiện thay đổi các trạng thái của máy bay như: cất cánh (take-off) và hạ cánh (landing) bằng cách thay đổi vị trí của công tắc lựa chọn trên máy tính.

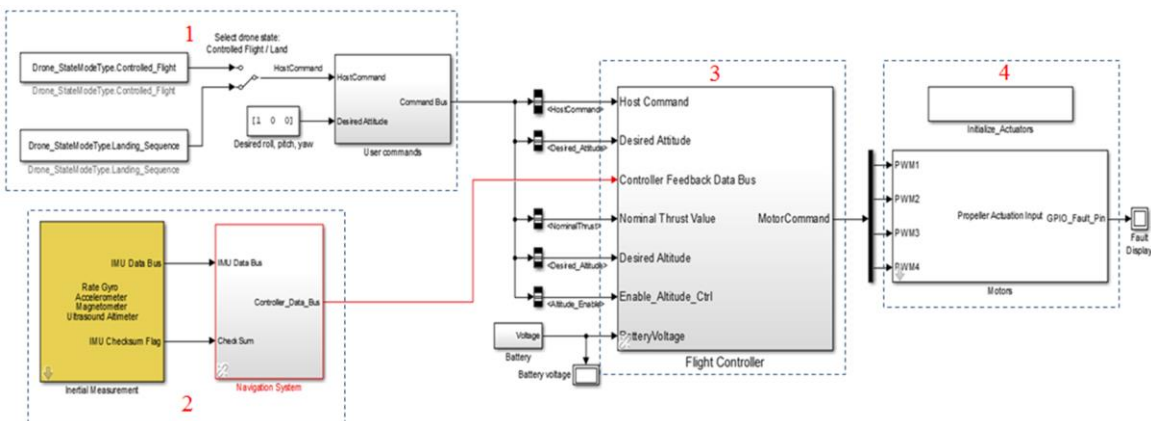
Khối 2: Ước lượng độ cao, thực hiện chức năng đọc các dữ liệu được gửi về từ các cảm biến của AR.Drone. Khối Navigation System thực hiện xử lý dữ liệu từ IMU (Inertial measurement unit) thô để truy xuất dữ liệu các góc quay (roll, pitch, yaw) và dữ liệu từ cảm biến siêu âm.

Khối 3: Khối điều khiển bay, thực hiện các chức năng điều khiển máy bay như cất và hạ cánh, điều khiển độ cao; thực hiện điều khiển động cơ.

Khối 4: Khối động cơ, thực hiện các lệnh được gửi tới từ khối điều khiển. Khối động cơ đưa ra các tín hiệu PWM (0% - 100%) để điều khiển từng động cơ trên từng cánh.

3.2. Thiết kế bộ điều khiển mờ lai tự chỉnh

Bộ điều khiển PID truyền thống được ứng dụng trong điều khiển UAV thường hoạt động với rất nhiều hạn chế, ba tham số của PID được điều chỉnh với các giá trị cố định cho một điều kiện hoạt động cụ thể như

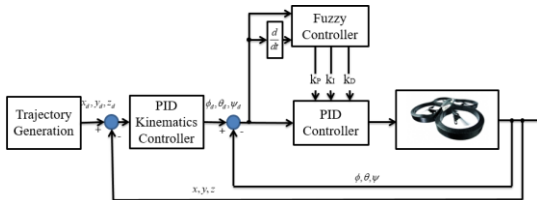


Hình 5. Chương trình điều khiển thời gian thực cho AR.Drone xây dựng trên Simulink

có tải trọng không đổi hoặc không có tải trọng. Do đó, khi UAV làm việc với tải trọng bên ngoài theo thời gian thì bộ điều khiển PID truyền thống không thể đáp ứng được. Để giải quyết vấn đề này, một cơ chế tự điều chỉnh dựa trên logic mờ được phát triển có khả năng điều chỉnh trực tuyến các tham số của bộ điều khiển PID.



Hình 6. Thử nghiệm điều khiển thời gian thực qua Wifi với AR.Drone từ chương trình Matlab/Simulink trên máy tính



Hình 7. Sơ đồ cấu trúc của bộ điều khiển mờ lai tự chỉnh cho AR.Drone

Bộ điều khiển PID có hàm truyền dạng:

$$G(s) = K_p + K_i/s + s.K_d \quad (3)$$

Với K_p, K_i, K_d là hệ số của bộ điều khiển PID; s là toán tử Laplace. Bộ điều khiển mờ (FLC) thực hiện điều chỉnh trực tuyến các hệ số của bộ điều khiển PID [6,7]. Bộ điều khiển mờ lai với đầu vào là các vi phân của sai số 'e' và sai số 'e' của các góc quay, quá trình này được sử dụng để xác định thông số của bộ điều khiển. Phép biến đổi tuyến tính được sử dụng cho phép xác định tham số K_p, K_i, K_d của bộ điều khiển PID theo công thức:

$$K_p = (K_{pmax} - K_{pmin})K'_p + K_{pmin} \quad (4)$$

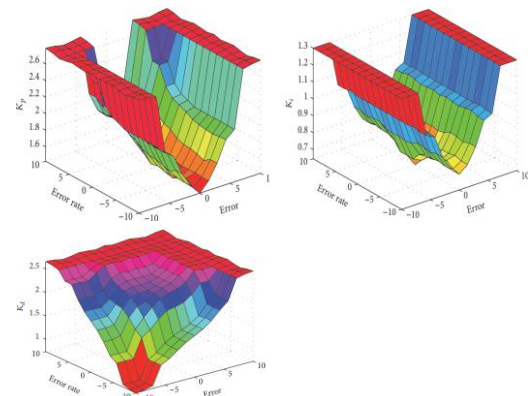
$$K_i = (K_{imax} - K_{imin})K'_i + K_{imin} \quad (5)$$

$$K_d = (K_{dmax} - K_{dmin})K'_d + K_{dmin} \quad (6)$$

Với các giá trị của $[K_{pmin}; K_{pmax}]$, $[K_{imin}; K_{imax}]$ và $[K_{dmin}; K_{dmax}]$ được xác định bằng thực nghiệm [8].

Bộ điều khiển mờ được sử dụng trong nghiên cứu dựa trên quy tắc mờ Tagaki- Sugeno. Quy tắc điển hình trong quy tắc mờ Sugeno có dạng: *If Input 1 = x and Input 2 = y, then Output is z = ax + by + c.*

Bộ điều khiển mờ lai được thiết kế gồm 5 biến đầu vào: NB(negative big), NS(negative small), Z(zero), PS(positive small), PB(positive big) và 7 biến đầu ra: VS(very small), S(small), MS(medium small), M(medium), MB(medium big), B(big), VB(very big). Dựa trên kinh nghiệm, 25 quy tắc mờ được xác định cho tất cả các kết hợp có thể có của các biến đầu vào. Bề mặt trong không gian ba chiều của các quy tắc mờ đã chọn cho thiết kế bộ điều khiển được thể hiện trong Hình 8. Bộ điều khiển mờ được tạo ra từ các quy tắc "nếu-thì". Các quy tắc được chọn cho luật điều khiển được trình bày trong Bảng 1.



Hình 8. Bề mặt của các đầu ra cho $K_p/ K_i / K_d$

4. Kết quả thực nghiệm

Thực nghiệm điều khiển AR.Drone với thời gian thực được thực hiện trong nhà để tránh tác động của các yếu tố môi trường. Trong quá trình thực nghiệm, AR.Drone sẽ được gắn 1 vật nặng có khối lượng 50g vào 1 cánh bắt ki của máy bay và máy bay được gắn cố định vào 1 khớp xoay đặt khung có chiều cao 0,5m.

Bảng 1. Bảng quy tắc mờ cho $K_p/ K_i / K_d$

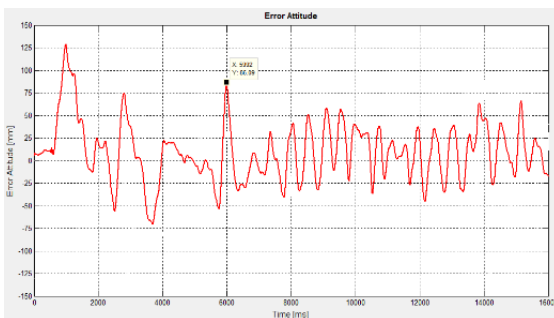
e/de	NB	NS	Z	PS	PB
NB	VB/M/VS	MB/M/MB	MB/M/M	MB/M/B	MB/M/MB
NS	MB/MS/MS	MB/MS/MB	MB/MS/B	B/MS/MB	MB/MS/MB
Z	VS/S/M	VS/S/B	S/VS/B	MS/S/MB	MS/S/MB
PS	MB/MS/MB	MB/MS/MB	MB/MS/MB	B/MS/MB	MB/MS/MB
PB	MB/M/MB	MB/M/MB	MB/M/MB	MB/M/MB	MB/M/MB



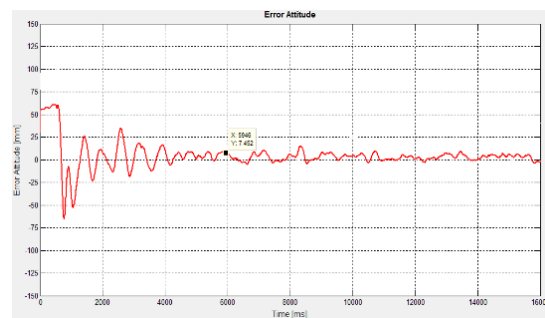
Hình 9. Hoạt động của AR.Drone với bộ điều khiển PID



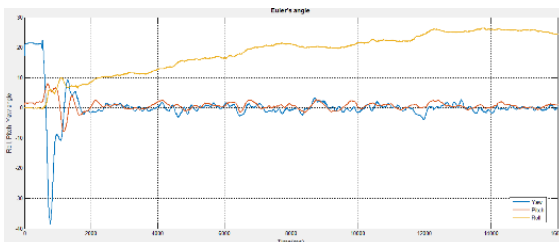
Hình 10. Hoạt động của AR.Drone với bộ điều khiển Fuzzy - PID



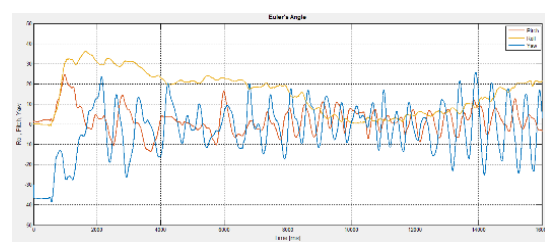
Hình 11. Sai lệch biên độ của máy bay với bộ điều khiển PID



Hình 12. Sai lệch biên độ của máy bay với bộ điều khiển Fuzzy - PID



Hình 13. Đáp ứng góc Euler của AR.Drone với bộ điều khiển Fuzzy - PID



Hình 14. Đáp ứng góc Euler của AR.Drone với bộ điều khiển PID

Để chứng minh được hiệu quả hoạt động của bộ điều khiển mờ lai được thiết kế, tác giả đã áp dụng 2 bộ điều khiển: PID và bộ điều khiển Fuzzy - PID lên AR.Drone nhằm mục đích kiểm tra tính ổn định của AR.Drone với tải trọng bên ngoài trong suốt quá trình bay. Các kết quả khi áp dụng cả 2 bộ điều khiển sẽ được so sánh với nhau.

Từ Hình 9 và Hình 10 cho thấy quá trình hoạt động AR.Drone với tải bên ngoài được thêm vào, chúng ta có thể thấy, với bộ điều khiển Fuzzy - PID có độ ổn định tốt hơn so với bộ điều khiển PID.

Từ Hình 11 và Hình 12 biểu diễn sai số về biên độ của máy bay không người lái sử dụng bộ điều khiển Fuzzy - PD và bộ điều khiển PID. Quá điều chỉnh của máy bay với bộ điều khiển Fuzzy - PID là nhỏ hơn so với bộ điều khiển PID. Xét tại thời điểm 6 giây, sai số biên độ của AR.Drone sử dụng bộ điều khiển Fuzzy -

PID là 7,452mm trong khi sai số biên độ của AR.Drone sử dụng bộ điều khiển PID là 86,09mm.

Hình 13 và Hình 14 biểu diễn đáp ứng góc của AR.Drone theo thời gian, từ 2 hình vẽ chúng ta có thể nhận thấy đáp ứng góc Euler của máy bay với bộ điều khiển Fuzzy - PID ổn định hơn nhiều so với đáp ứng góc Euler của máy bay với bộ điều khiển PID.

5. Kết luận

Bài báo đã giới thiệu mô hình động học của máy bay AR.Drone, cách thức thực hiện điều khiển thời gian thực bằng công cụ Real-time Target Window trong Simulink.

Bài báo cũng trình bày về thiết kế bộ điều khiển mờ lai tự chỉnh cho AR.Drone với tải trọng bên ngoài. Kết quả chứng minh hiệu quả hoạt động của bộ điều khiển được đề xuất, độ ổn định và thời gian đáp ứng

của bộ điều khiển Fuzzy - PID tốt hơn so với bộ điều khiển PID cổ điển.

Mô hình của AR.Drone được xây dựng trên Matlab/Simulink với ứng dụng điều khiển thời gian thực đã được thực hiện thành công và hoạt động tốt. Các kết quả thu được qua thực nghiệm bằng cách áp dụng bộ điều khiển được đề xuất và thử nghiệm điều khiển thời gian thực trên Matlab với máy bay không người lái AR drone 2.0 với tải trọng bên ngoài. Kết quả thu được đã chứng minh được hiệu quả của bộ điều khiển thông minh được đề xuất, bộ điều khiển đề xuất có thể cải thiện độ ổn định và chính xác của toàn bộ hệ thống khi làm việc với tải trọng bên ngoài

Việc áp dụng cả 2 bộ điều khiển PID cổ điển và bộ điều khiển Fuzzy-PD cho hoạt động của AR.Drone với tải trọng bên ngoài để thuận tiện cho quá trình so sánh hoạt động của 2 bộ điều khiển này.

Các kết quả thực nghiệm được thể hiện ở phần 4 đã chứng minh ưu điểm của bộ điều khiển mờ lai được thiết kế đáp ứng được các yêu cầu về độ chính xác và độ ổn định của AR.Drone với tải trọng bên ngoài. Do đó, bộ điều khiển mờ lai rất phù hợp với các hệ thống phi tuyến như máy bay không người lái.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT 21-22.48**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. M. Maddalon, K. J. Hayhurst, D. M. Koppen, J. M. Upchurch, and A. T. Morris, *Perspectives on unmanned aircraft classification for civil airworthiness standards*. National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center Hampton, Virginia, pp.2199-23681, 2013
- [2] G. Martin, *Modelling and Control of the Parrot AR.Drone*. ADFA Journal of Undergraduate Engineering Research, Vol.5(1), 2012.

- [3] Hernandez A, Copot C, De Keyser R, *Identification and path following control of an AR.Drone quadrotor*. 17th international conference system theory control computer (ICSTCC), pp.583-588, 2013.
- [4] Angela P. Schoellig, *Improving Tracking Performance by Learning from Past Data*, Institute for Dynamic Systems and Control ETH Zurich Switzerland, 2012.
- [5] Zhufeng Xie, Yuanqing Xia, Mengyin Fu, *Robust trajectory-tracking method for UAV using nonlinear dynamic inversion*. IEEE 5th International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, pp.93-98, 2011.
- [6] Zhao, Z., Tomizuka, M., and Isaka, *Fuzzy gain scheduling of PID controllers*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.23(5), pp.1392-1398, 1993.
- [7] T. Takagi and M. Sugeno, *Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control*, IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.15(1), pp.116-132, January-February, 1985.
- [8] Do Khắc Tiếp, Young-Jae Ryoo, *An Autonomous Control of Fuzzy-PD Controller for Quadcopter*, International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems, Vol.17, No.2, pp.107-113, 2017.

Ngày nhận bài:	18/01/2022
Ngày nhận bản sửa:	21/02/2022
Ngày duyệt đăng:	06/03/2022