مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی ۸۳، جلد ۴۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۶۵-۷۳

طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم کنترلی فازی خالص برای کنترل موقعیت زاویه‌ای کوادروتور با استفاده از فیلتر کالمن

وحید تیکنی کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

حامد شهبازی* استادیار، گروه مهندسی مکانیک دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

این مقاله یک الگوریتم کنترلی خالص مبتنی بر روش فازی برای کنترل زاویه‌ای کوادروتور ارائه می‌کند. پارامترهای خطا و نرخ تغییرات خطا به عنوان ورودی سیستم فازی محسوب می‌شوند و ورودی‌های کنترلی برای حرکت‌های پایه‌ای کوادروتور مبتنی بر قوانین فازی تعریف شده، تولید می‌شوند. با توجه به دینامیک غیرخطی کوادروتور، الگوریتم کنترلی فازی برای پایدارسازی و کنترل زاویه‌ای این نوع از ربات‌ها پاسخ مطلوبی ارائه می‌دهد. برای بررسی عملکرد الگوریتم کنترلی فازی در مدل آزمایشگاهی، یک مجموعه شامل کوادروتور، میکرو کنترل‌گر و حسگرهای مورد نیاز ساخته شده است. حسگرهای سه محوره‌ی ژیروسکوپ و شتاب‌سنج برای تخمین موقعیت زاویه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به علت وجود نویز و خطا در خروجی حسگرها، از فیلتر کالمن برای حذف نویز استفاده شده است. نتایج بدست آمده در آزمایش های عملی نشان دهنده طراحی موفقیت آمیز الگوریتم کنترلی فازی بر روی کوادروتور بوده است.

واژه‌های کلیدی : کنترل‌گر فازی، کوادروتور، فیلتر کالمن ،سیستم فازی، کنترل‌گر زاویه‌ای.

Design and Implementation of Pure Fuzzy Controller for Attitude Control of Quadrotor using Kalman Filter

V. Tikani Department of Mechanical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

H. Shahbazi Department of Mechanical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract

This paper presents a control algorithm based on pure fuzzy method for attitude control of the quadrotor. Error and error rate are the input parameters of the fuzzy system and control inputs will be generated based on predetermined fuzzy rules. Based on the nonlinear dynamics of quadrotor, fuzzy controller provides a satisfactory response for stabilization and attitude control of the robots. To study the performance of fuzzy control algorithm, a set of sensors and the quadrotor is used in the experimental model. The system consists of accelerometer and gyroscope sensors and a microcontroller which is used to design fuzzy attitude controller for the quadrotor. Three-axis gyroscope and accelerometer sensors are used to estimate the angular position of the quadrotor. Considering that the experimental data has lots of errors and noises, Kalman filter is used to reduce the noises. The experimental results indicates the successful design of fuzzy controller for the quadrotor

Keywords: Fuzzy controller, Quadrotor, Kalman filter, fuzzy systems, attitude controller.

۱- مقدمه

با پیشرفت و توسعه‌ی صنعت رباتیک در سال‌های اخیر، استفاده از ربات ها در صنایع گوناگون مانند اتومبیل‌سازی، داروسازی و خطوط تولید مورد توجه قرار گرفته‌اند. پرنده‌ی هدایت‌پذیر از دور یا پهپاد یکی از مهم‌ترین اختراعات چند قرن اخیر محسوب می‌شود، که کاربردهای علمی و عملی بسیار زیادی پیدا کرده است. کوادروتور از دسته‌ی پهپادهای بدون سرنشین است که با توجه به کاربردهای فراوانش بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. کوادروتور قابلیت‌های پروازی منحصر به فردی مانند قابلیت پرواز عمودی و حرکت شش درجه آزادی را داراست. این قابلیت به این نوع از پرنده توانایی فرود و فراز در هر شرایط محیطی را می‌دهد به همین دلیل کوادروتورها در صنایع نظامی و شهری بسیار مورد توجه هستند. کوادروتورها در عملیات‌های نجات، فیلم‌برداری هوایی، شناسایی و نقشه‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ساختار کوادروتورها نسبت به پهپادهای ملخ‌دار مشابه مزیت‌های قابل توجهی دارند. در این نوع از ربات‌ها به جای استفاده از یک پیشران از چهار پیشران مستقل استفاده شده که در چهار گوشه‌ی کوادروتور نصب شده‌اند. این ساختار موجب می‌شود که با کاهش گشتاور در سیستم، ملخ‌ها بتوانند با سرعت بیشتری حرکت کنند و علاوه بر افزایش بهره‌وری موتورها، قابلیت مانور در این ربات پرنده افزایش یابد. کوادروتورها به سبب قابلیت نشست و برخاست عمودی در دسته‌ی عمود پروازها قرار می‌گیرند. ظرفیت حمل بار، سادگی ساختاری، قابلیت مانورپذیری بالا، داشتن قیود حرکتی کم و هزینه پایین تعمیر و نگهداری از جمله ویژگی‌هایی است که موجب شده این وسیله مورد توجه قرار بگیرد.

از دسته مشکلاتی که برسر راه طراحی و توسعه‌ی چنین ربات‌هایی وجود دارد مسئله‌ی پایداری این نوع پهپادها می‌باشد. با توجه به کاربرد فراوان این نوع از ربات‌های پرنده، توسعه‌ی الگوریتم‌های کنترلی برای پایدارسازی آنها مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. بدین ترتیب ساختار کوادروتور و الگوریتم کنترلی بر پایه خطی سازی فیدبک برای کنترل زوایا و ارتفاع، توسط بوعبدلله و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت [۱]. الگوریتم‌های کنترلی کلاسیک و روش کنترلی تناسبی، مشتق‌گیر، تناسبی به دلیل سادگی در طراحی و پیاده‌سازی برای

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hamedshahbazi@gmail.com

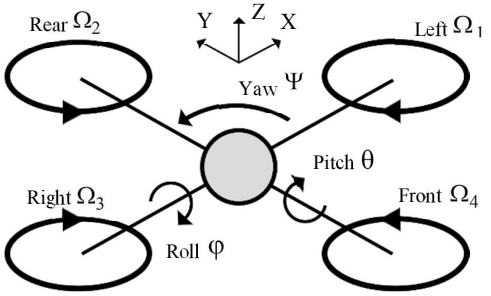
تاریخ دریافت: ۹۵/۰۶/۰۲
تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۰۱

کنترل زاویه‌ای و ارتفاع این سازه استفاده شده‌اند [۲و۳]. با پیشرفت نظریه‌های کنترل هوشمند، روش‌هایی مانند روش‌های عصبی، فازی و روش‌های ترکیبی با کنترل‌گر های کلاسیک ارائه شدند، که منجر به بهبود پاسخ کنترل‌گر های کلاسیک شدند [۷-۴]. روش کنترلی مود لغزشی برای عدم قطعیت‌های غیرخطی پاسخ مناسبی دارد، از جمله مزیت‌های این روش می‌توان به پاسخ سریع، مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات خارجی، سازگاری با سیستم‌های غیرخطی و ساده بودن در پیاده سازی اشاره کرد [۱۰-۸]. روش کنترلی گام به عقب نیز برای کنترل زاویه‌ای و موقعیت کوادروتور مورد استفاده قرار گرفته است، مزیت این روش آن است که این کنترل‌گر نرخ همگرایی سریعی دارد. از معایب این روش می‌توان به مقاوم نبودن آن اشاره کرد اما می‌توان با استفاده از روش‌های دیگر این عیب را جبران کرد [۱۳-۱۱]. تیراساک[1] نیز نوعی از الگوریتم کنترلی فازی توسعه داد که به صورت خودکار پیمایش مسیر می‌کرد و در عین حال اثر اغتشاشات خارجی و تغییر بار در کوادروتور را جبران می‌نمود [۱۴].

در این مقاله پس از بررسی ساختار و مدلسازی کوادروتور، الگوریتم کنترلی فازی برای کنترل زاویه‌ای این ربات طراحی و مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور بررسی تجربی پاسخ این نوع کنترل‌گر، یک مدل آزمایشگاهی برای پیاده‌سازی کنترل‌گر زاویه‌ای طراحی و توسعه داده شده است و با پیاده‌سازی کنترل‌گر ارائه شده در مدل آزمایشگاهی به بررسی عملکرد این نوع از کنترل‌گر در پاسخ به ورودی پله و مقاومت در برابر اغتشاشات خارجی ضربه‌ای پرداخته شده است. با توجه به چرخش سریع پیشران‌ها و لرزش شدید سازه، نویز داده‌های خروجی از حسگرها با استفاده از فیلتر کالمن حذف شدند.

۲- مدل دینامیکی کوادروتور

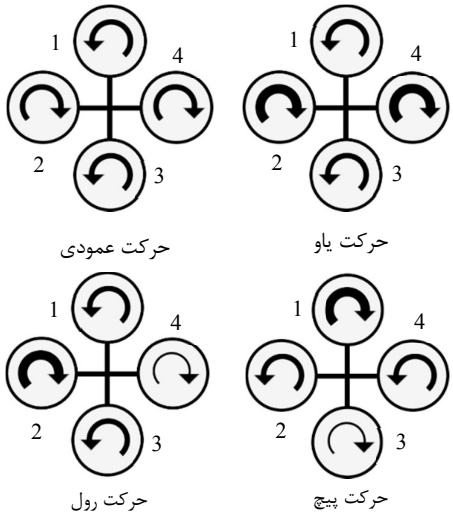
کوادروتور یک سیستم آیرودینامیکی چند ورودی و چند خروجی با شش درجه آزادی است، که متشکل از دو بال بوده و هر کدام از بال-ها دارای موتورهایی در انتهای خود هستند. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده، موتورهای شماره‌ی ۱ و ۳ در راستای ساعتگرد می‌چرخند و موتورهای شماره‌ی ۲ و ۴ در راستای پادساعتگرد گردش می کنند.



شکل۱- ساختار کوادروتور

[1] Theerasak

مطابق شکل ۲، تغییر سرعت چهار روتور کوادروتور موجب حرکت سازه در راستاهای مختلف می‌شود برای حرکت در راستای عمودی سرعت هر چهار روتور به یک میزان کاهش و یا افزایش پیدا می‌کند. تغییر سرعت روتورهای ۲ و ۴ منجر به حرکت در راستای رول[2] و چرخش حول محور x می‌شود. با تغییر سرعت روتورهای ۱ و ۳ سازه در راستای پیچ[3] و حول محور y می‌چرخد. حرکت در راستای یاو [4]و حول محور z نیز با افزایش یا کاهش همزمان سرعت روتورهای مقابل هم صورت می‌گیرد. کوادروتور در مجموع دارای چهار روتور است، دو روتور که مقابل هم قرار دارند به صورت ساعتگرد و دو روتور دیگر پادساعتگرد گردش می‌کنند. همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده، تغییر سرعت چهار روتور موجب حرکت سازه در راستاهای مختلف می‌شود، که منجر به حرکت کوادروتور در راستای مطلوب می‌شود.



شکل۲- حرکت‌های پایه‌ای کوادروتور

با استفاده از رابطه نیوتون-اویلر، معادلات حرکت کوادروتور به صورت زیر است [۱۵]:

$$\ddot{x} = (\cos\varphi\sin\theta\cos\psi + \sin\varphi\sin\psi)\frac{U_1}{m} \quad \text{(۱-الف)}$$

$$\ddot{y} = (\cos\varphi\sin\theta\sin\psi - \sin\varphi\cos\psi)\frac{U_1}{m} \quad \text{(۱-ب)}$$

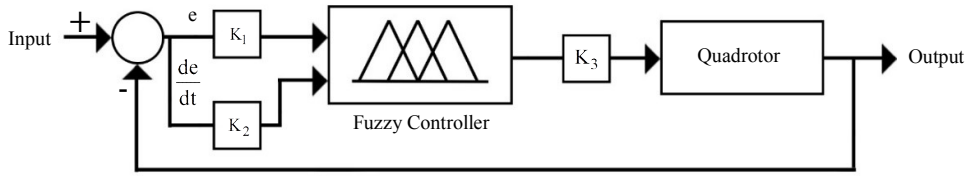
$$\ddot{z} = -g + (\cos\varphi\cos\theta)\frac{U_1}{m} \quad \text{(۱-ج)}$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\theta}\dot{\psi}\left[\frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}}\right] + \frac{J_r}{I_{xx}}\dot{\theta}\Omega_d + \frac{1}{I_{xx}}U_2 \quad \text{(۱-د)}$$

$$\ddot{\varphi} = \dot{\varphi}\dot{\psi}\left[\frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}}\right] + \frac{J_r}{I_{yy}}\dot{\varphi}\Omega_d + \frac{1}{I_{yy}}U_3 \quad \text{(۱-ه)}$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\theta}\dot{\varphi}\left[\frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}}\right] + \frac{1}{I_{yy}}U_4 \quad \text{(۱-و)}$$

[2] Roll
[3] Pitch
[4] Yaw



شکل۳- الگوریتم کنترلی فازی برای کنترل کوادروتور

φ ، θ و ψ زوایای اویلر و بیانگر موقعیت زاویه‌ای کوادروتور هستند، x و y و z موقعیت مرکز جرم سازه را نشان می‌دهند. m، I_{xx} ، I_{yy} و I_{zz} جرم و ممان‌های اینرسی کوادروتور هستند. J_r ممان اینرسی روتورها است، Ω_d مجموع سرعت‌های زاویه‌ای تیغه‌های پرواز می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Omega_d = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4 \qquad (۲)$$

ω_i نمایش سرعت زاویه‌ای هر روتور است، U_1 ، U_2 ، U_3 و U_4 ورودی‌های سیستم و به ترتیب نیروی مجموع بالابرنده و مومنتم‌های رول و پیچ و یاو تولیدی توسط تیغه‌های پروازی می‌باشند، که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$U_1 = b(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \qquad (۳\text{-الف})$$

$$U_2 = b(\omega_3^2 - \omega_4^2) \qquad (۳\text{-ب})$$

$$U_3 = b(\omega_1^2 - \omega_2^2) \qquad (۳\text{-ج})$$

$$U_4 = d(\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 - \omega_4^2) \qquad (۳\text{-د})$$

b نمایش ضریب بالابرندگی و d ضریب بازدارندگی است.

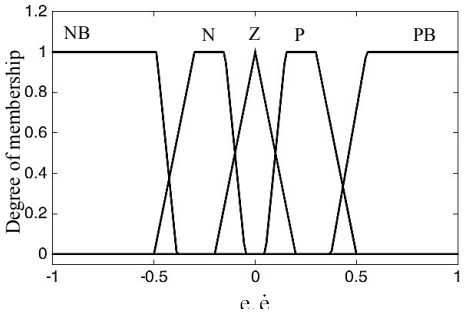
۳- کنترل‌گر موقعیت زاویه‌ای کوادروتور

۳-۱- الگوریتم کنترلی فازی

الگوریتم کنترلی فازی یک الگوریتم کنترلی بر اساس منطق فازی است که در کنترل هوشمند سازه‌های دینامیکی و ربات‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. الگوریتم کنترلی فازی، کنترلی مبتنی بر قوانین زبانی است که پیاده‌سازی ساده‌ای دارد. همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده، سیستم فازی با گرفتن پارامترهای خطا و مشتق خطا به عنوان ورودی، با استفاده از قوانین زبانی تعیین شده در هر لحظه اقدام به تعیین ورودی کنترلی می‌کند

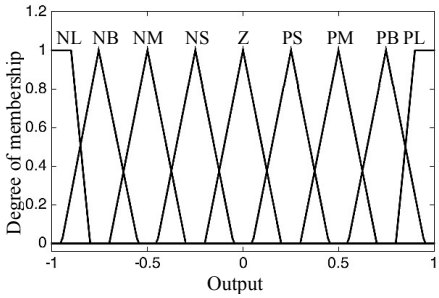
قوانین الگوریتم کنترلی فازی تعریف رابطه بین خطا و مشتق خطا با ورودی‌های کنترلی است. برای پیاده سازی یک الگوریتم کنترلی فازی حداقل نیاز به دو ورودی و یک خروجی است، همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده، سیستم فازی با گرفتن پارامترهای خطا و مشتق خطا به عنوان ورودی، با استفاده از قوانین زبانی تعیین شده در هر لحظه اقدام به تعیین ورودی کنترلی می‌کند. به منظور کنترل موقعیت زاویه‌ای سازه در راستاهای رول، پیچ و یاو سه ورودی کنترلی U_2 ، U_3 و U_4 توسط سیستم فازی به صورت مستقل تولید می‌شود.

برای تعریف شرایط خطا پنج پارامتر اختصاص داده شده است، این پنج پارامتر عبارتند از NB,NS,Z,PS,PB. لبه‌های زبانی برای پارامترهای خطا و مشتق خطا در شکل ۴ ترسیم شده‌اند.



شکل۴- توابع عضویت برای ورودی‌های خطا و مشتق خطا در الگوریتم کنترلی فازی

برای تعریف خروجی در سیستم فازی از نه لبه‌ی زبانی استفاده شده است. توابع زبانی برای متغیرهای خروجی در شکل ۵ ترسیم شده است.



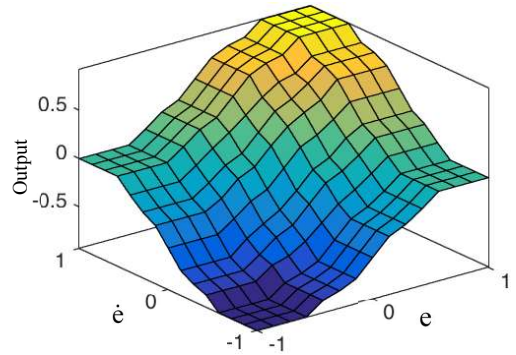
شکل۵- توابع عضویت برای خروجی در الگوریتم کنترلی فازی

برای تعیین مقدار خروجی سیستم فازی برای تعیین ورودی‌های کنترلی با استفاده از توابع عضویت تعریف شده، قوانین فازی برای تنظیم بهره‌های کنترلی مطابق جدول ۱ تعریف می‌شوند.

جدول ۱- قوانین زبانی الگوریتم کنترلی فازی برای کنترل زاویه‌ای

	خطا (e)					
نرخ تغییرات خطا ė	-	NB	N	Z	N	NB
	NB	NL	NB	NM	NS	Z
	N	NB	NM	NS	Z	PS
	Z	NM	NS	Z	PS	PM
	P	NS	Z	PS	PM	PB
	PB	Z	PS	PM	PB	PL

شکل ۶ خروجی سیستم فازی را به صورت نمایش سطحی بر حسب ورودی‌های خطا و مشتق خطا نشان می‌دهد.



شکل۶- خروجی سطحی سیستم فازی برحسب ورودی‌های خطا و مشتق خطا

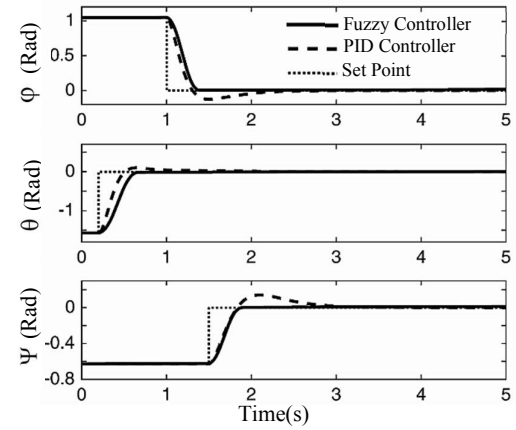
۳-۲- الگوریتم کنترلی تناسبی-انتگرال‌گیر-مشتق‌گیر

کنترل‌گر تناسبی- انتگرال‌گیر-مشتق‌گیر از دسته کنترل‌گر های مبتنی

بر بازخورد است که به صورت عمده‌ای در سیستم‌های کنترلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به ساختار ساده این نوع از کنترل‌گر، طراحی و پیاده‌سازی آن در صنایع بسیار رواج دارد. رابطه‌ی کلی کنترل‌گر تناسبی- انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر به صورت رابطه‌ی زیر است:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) + K_D \frac{d}{dt} e(t) \qquad (۴)$$

روند کنترلی فازی و PID برای کنترل جهت‌گیری کوادروتور در محیط متلب[5] پیاده‌سازی شد تا عملکرد الگوریتم‌های کنترلی ارزیابی شود. به این ترتیب شکل ۷ نتیجه‌ی شبیه‌سازی برای کنترل زاویه‌ی رول، پیچ و یاو در پاسخ به ورودی پله است.



شکل۷- پاسخ الگوریتم کنترلی فازی و الگوریتم کنترلی PID به ورودی پله

[5]MATLAB

جدول ۲ مشخصه‌های پاسخ الگوریتم کنترلی فازی و الگوریتم کنترلی PID به ورودی پله برای کنترل زوایا در راستاهای رول، پیچ و یاو است. مشخصات پاسخ به ورودی پله شامل زمان نشست (t_s)، میزان فراجهش (M_p)، پاسخ ماندگار (e_{ss}) و زمان رسیدن به پاسخ مطلوب (t_r) در این جدول ارائه شده است.

با توجه به شکل ۷ و نتایج به دست آمده در جدول ۲ الگوریتم کنترلی فازی نسبت به الگوریتم کنترلی PID در پاسخ به ورودی پله برای کنترل موقعیت زاویه‌ای پاسخ مطلوبی ارائه داده است، این نکته نیز حائز اهمیت است که عملکرد الگوریتم کنترلی فازی به صورت قابل توجهی به متغیرهای این الگوریتم کنترلی از جمله توابع عضویت، لبه-های زبانی و تعداد قوانین وابسته است.

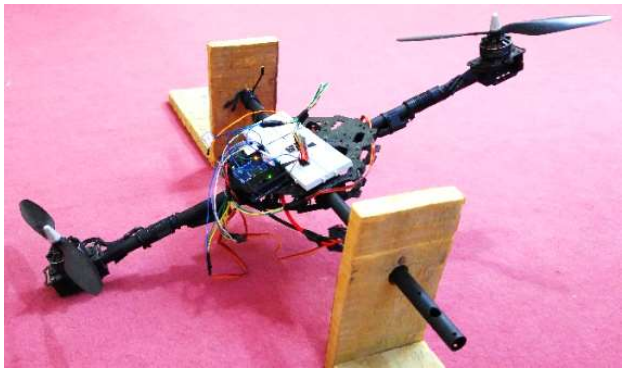
جدول ۲- مشخصه‌های پاسخ الگوریتم کنترلی فازی و الگوریتم کنترلی PID به ورودی پله

زاویه	الگوریتم کنترلی	t_s	$M_p(\%)$	e_{ss}	t_r
رول φ	فازی	۰/۳۳	۰	۰	۰/۳۴
	PID	۰/۹۵	۱۲	۰	۰/۳
پیچ θ	فازی	۰/۴۲	۰	۰	۰/۴۴
	PID	۰/۷۰	۶/۴	۰	۰/۳۰
یاو Ψ	فازی	۰/۳۱	۰	۰	۰/۳۲
	PID	۱/۱۳	۲۲	۰	۰/۳۱

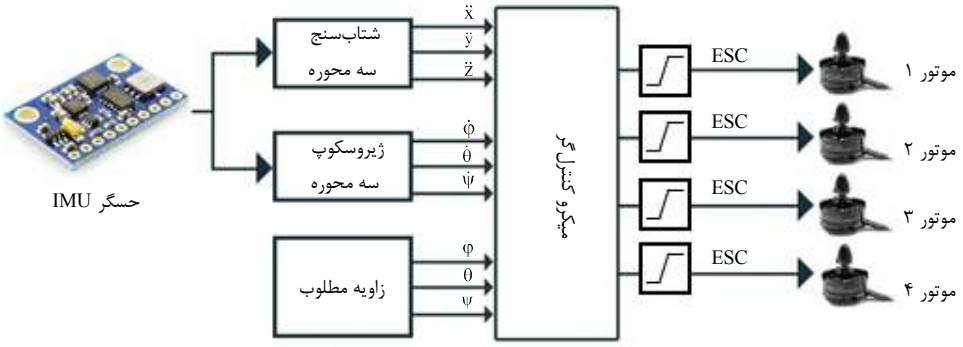
۴- ساخت و توسعه‌ی نمونه‌ی آزمایشگاهی

به منظور بررسی تجربی الگوریتم کنترلی فازی برای کنترل موقعیت زاویه‌ای کوادروتور، یک بستر آزمایشگاهی برای پیاده‌سازی و تست عملی کنترل‌گر مورد نیاز است. به منظور کم کردن پیچیدگی‌های کنترل و جلوگیری از آسیب دیدن سازه، بسترهای آزمایشگاهی برای محدود کردن درجات آزادی سیستم طراحی و ساخته شد. به همین منظور دو پایه برای بررسی‌های آزمایشگاهی، طراحی شده است، پایه‌ی نشان داده شده در شکل ۸ چرخش در راستاهای رول، پیچ و یاو را برای کوادروتور عملی می‌کند و پایه نشان داده شده در شکل ۹ حرکت در راستاهای رول یا پیچ را برای سازه امکان پذیر می‌کند. برای حرکت در راستاهای عمودی و رول، پیچ و یاو، کوادروتور از چهار روتور به عنوان پیشران استفاده می‌کند.

شکل ۸- نحوه قرارگیری کوادروتور روی پایه با سه درجه آزادی



شکل ۹- نحوه قرارگیری کوادروتور روی پایه با یک درجه آزادی



شکل ۱۰- ساختار بلوکی نمونه‌ی آزمایشگاهی

پیشران‌ها موتورهای DC هستند که جریان و ولتاژ مورد نیاز آنها توسط باتری تولید می‌شود. میکروکنترل‌گر نیز سیگنال PWM مطلوب را برای چرخش موتورها تامین می‌کند. علاوه بر این هر موتور نیاز به یک ملخ دارد که قدرت و توانایی در حمل بار به شکل و جنس این ملخ‌ها وابسته است. به عنوان بستر کنترلی کوادروتور از یک میکروکنترل‌گر آردوینو استفاده شده است.

همانگونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده، میکروکنترل‌گر سیگنال آنالوگ را از حسگرهای شتاب‌سنج و ژیروسکوپ می‌خواند. این سیگنال توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال به مقادیر دیجیتال تبدیل می‌شود تا بتواند در پردازش و محاسبات در میکروکنترل‌گر مورد استفاده قرار بگیرد. میکروکنترل‌گر با توجه به مقادیر خوانده شده و پاسخ مطلوب منظور شده برای کوادروتور، برای چهار موتور سیگنال PWM تولید می‌کند، و به این ترتیب سرعت چرخش هر پیشران را معین می‌کند. همانگونه که در شکل ۹ هم مشخص است سیگنال PWM تولید شده توسط میکروکنترل‌گر بین یک بازه‌ی مشخص محدود شده و وارد کنترل‌گر های سرعت (ESC) می‌شود.

مقادیر شتاب‌سنج و ژیروسکوپ از یک حسگر IMU مبتنی بر حسگرهای ممز به دست می‌آیند. برای بررسی عملکرد این حسگر می‌توان آن را به صورت یک جعبه‌ی حساس به فشار در نظر گرفت که یک کره در داخل آن قرار دارد. هنگامی که این جعبه تحت فشار قرار می‌گیرد، کره دیواره‌های جعبه را مورد اصابت قرار می‌دهد، این فشار به عنوان خروجی سنسور محسوب می‌شود. شتاب‌سنج آنالوگ در حسگر IMU اطلاعات مربوط به این تغییرات نیرو و فشار را در قالب ولتاژهایی در یک بازه مشخص به عنوان خروجی در اختیار قرار می‌دهد.

اطلاعات آنالوگ گرفته شده از حسگر توسط ADC آردوینو به اطلاعات قابل تحلیل تبدیل می‌شود. جدول ۳ مشخصات اجزای نمونه‌ی آزمایشگاهی را ارائه می‌دهد.

جدول ۳- مشخصات اجزای نمونه آزمایشگاهی

نام قطعه	مدل	شرکت سازنده	توضیحات
موتور	MT3510	Emax	بیشینه نیروی پیشران[1]: ۱/۷ kg
کنترل‌گر های سرعت (ESC)	سری Simonk	Emax	جریان ۳۰A
شتاب‌سنج	ADXL345	-	تراشه‌ی ماژول GY-80
ژیروسکوپ	L3G4200D	-	تراشه‌ی ماژول GY-80
ملخ	10×4.5L	-	-

۵- الگوریتم ترکیب خروجی حسگرها و نویز

حسگرهای IMU به دو دسته‌ی آنالوگ و دیجیتال تقسیم‌بندی می‌شوند. حسگر با خروجی آنالوگ، خروجی را به صورت ولتاژ به

[1] Thrust

میکروکنترل‌گر می‌دهد، این ولتاژ با استفاده از ADC به مقادیر دیجیتال تبدیل می‌شود. واحد مقدار خروجی شتاب سنج g و واحد خروجی ژیروسکوپ deg/s است. برای تخمین دقیق موقعیت زاویه‌ای کوادروتور خروجی حسگرهای شتاب‌سنج و ژیروسکوپ با ضرایب وزنی مشخصی ادغام می‌شوند. ضرایب وزنی فیلتر کالمن در طی زمان و با توجه تغییرات نویز داده‌های خروجی شتابسنج، تغییر می‌کند. شتابسنج آنالوگ در حسگر IMU انتخاب شده اطلاعات مربوط به این تغییرات نیرو و فشار را در قالب ولتاژهایی در یک بازه مشخص به عنوان خروجی در اختیار قرار می‌دهد. برای حسگر ADXL335، این مقدار در بازه‌ی ۲۷۰ الی ۳۳۰ میلی ولت (mv) در واحد شتاب g است. علاوه بر این، حسگرها دارای ولتاژ بایاس[1] صفر ($V_{zero\ bias}$) از پیش تعیین شده هستند که ولتاژ در حالت بدون شتاب است. اطلاعات آنالوگ گرفته شده از حسگر توسط ADC آردوینو به اطلاعات قابل تحلیل تبدیل می‌شود.ADC آردوینو دارای خروجی با دقت ۱۰ بیت می‌باشد، بدان معنی که خروجی آن از مقدار ۰ تا ۱۰۲۳ است. برای هر کانال شتاب‌سنج، معادله‌ی زیر برای تبدیل مقادیر خروجی ADC به ولتاژ خروجی (V_{out}) استفاده می‌شود [۱۶].

$$V_{out} = \frac{ADC_{out} \times ADC_{ref}}{1023} \qquad (۵)$$

ADC_{ref} در برد آردوینو برابر ۳٫۳ ولتاژ است مگر آنکه یک ولتاژ خارجی به آن اعمال شود. ADC_{out} خروجی مبدل آنالوگ به دیجیتال است. با اعمال حساسیت حسگر در اختلاف ولتاژ خروجی و ولتاژ بایاس، ولتاژ خروجی به اطلاعات قابل پردازش تبدیل می‌شود [۱۶].

$$\text{Acceleration} = \frac{V_{out} - V_{zero\ bias}}{\text{Sensitivity}} \qquad (۶)$$

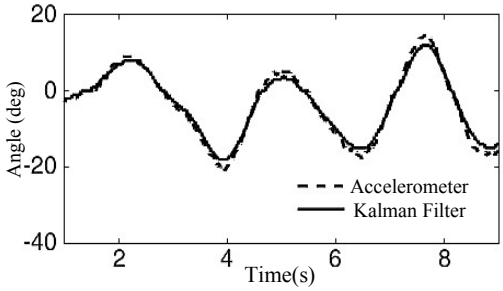
نرخ تغییرات زاویه‌ی کوادروتور از حسگر ژیروسکوپ به دست می‌آید. برای محاسبه موقعیت زاویه‌ای کوادروتور با استفاده از حسگر ژیروسکوپ می‌توان در واحد زمان از خروجی حسگر ژیروسکوپ انتگرال گرفت. با توجه به اینکه داده‌های حسگر به صورت گسسته انتگرال‌گیری می‌شوند و به علت وجود نویز در هر گام زمانی، در نهایت تخمین زاویه با استفاده از حسگر ژیروسکوپ با پدیده‌ی رانش[2] همراه است. حسگر شتاب‌سنج بر اساس شتاب گرانشی، موقعیت زاویه‌ای را محاسبه می‌کند. شتاب‌سنج نسبت به اغتشاشات و ارتعاشات به وجود آمده به واسطه حرکت روتورها حساس است و خروجی حسگر با نویز قابل توجهی همراه است. با توجه به اینکه خروجی حسگر شتاب‌سنج با گذر زمان رانش نخواهد داشت، از این رو برای محاسبه موقعیت زاویه‌ای سازه مناسب است. بدین منظور با ترکیب خروجی حسگرهای شتاب‌سنج و ژیروسکوپ با استفاده از فیلتر کالمن، نویز حسگرها به مقدار مطلوبی حذف شده و موقعیت زاویه‌ای سیستم با دقت قابل قبولی محاسبه می‌شود. ضرایب وزنی فیلتر کالمن در طی زمان و با تغییر نویز داده‌های خوانده شده از شتاب‌سنج تغییر می‌کند. R_{acc} بردار نویزی خروجی از حسگر شتاب‌سنج است، R_{gyro} نیز بردار خروجی حسگر ژیروسکوپ در سه راستای x و y و z در نظر گرفته شده است. بردارهای خروجی حسگرهای ژیروسکوپ و شتاب‌سنج به عنوان ورودی فیلتر کالمن به شمار می‌روند. فیلتر کالمن با ترکیب این دو بردار و با استفاده از معادلات (۷)، مقدار نهایی R_{est}، موقعیت زاویه‌ای سازه را در هر سه جهت تخمین می‌زند.

$$Rx_{est} = \frac{Rx_{acc} + Rx_{gyro} \times w_{gyro}}{1 + w_{gyro}} \qquad (۷\text{-الف})$$

$$Ry_{est} = \frac{Ry_{acc} + Ry_{gyro} \times w_{gyro}}{1 + w_{gyro}} \qquad (۷\text{-ب})$$

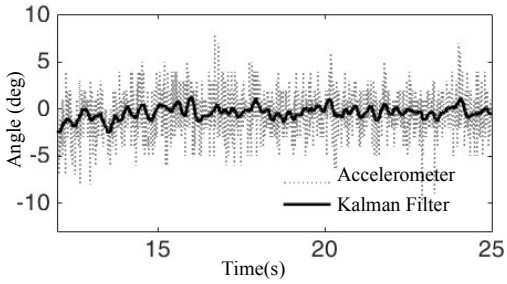
$$Rz_{est} = \frac{Rz_{acc} + Rz_{gyro} \times w_{gyro}}{1 + w_{gyro}} \qquad (۷\text{-ج})$$

w_{gyro} ضریب وزنی خروجی حسگر ژیروسکوپ است و با تغییرات نویز تغییر می‌کند. شکل ۱۱ نمایش خروجی حسگرها و فیلتر کالمن در حالتی که دستگاه خاموش است و با دست تغییر زاویه ایجاد می‌شود، را نشان می‌دهد، با توجه به اینکه در این حالت لرزش چندانی وجود ندارد خروجی حسگر شتاب‌سنج نزدیک به فیلتر کالمن نزدیک است.



شکل۱۱- خروجی حسگر شتاب‌سنج و فیلتر کالمن در حالت موتور خاموش

حرکت سریع روتورها در کوادروتور منجر به ایجاد ارتعاشات قابل توجهی در سیستم می‌شود. ارتعاشات، خروجی حسگر شتاب‌سنج را با نویز همراه می‌کند. همانگونه که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، خروجی حسگر شتاب‌سنج در حالتی که موتورها روشن هستند، با نویز زیادی همراه است و تخمین‌گر کالمن با ادغام خروجی حسگر شتاب‌سنج و ژیروسکوپ مقدار نویز را به میزان مطلوب حذف کرده است.



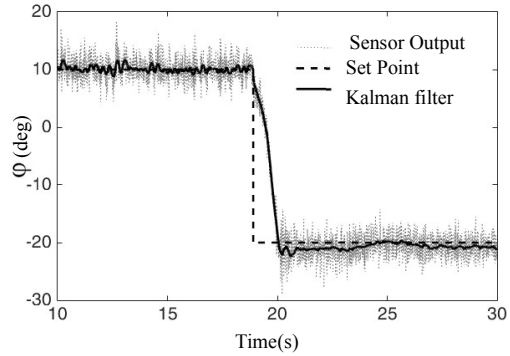
شکل۱۲- خروجی حسگر شتاب‌سنج و فیلتر کالمن در حالت موتور روشن

[1] Bias
[2] Drift

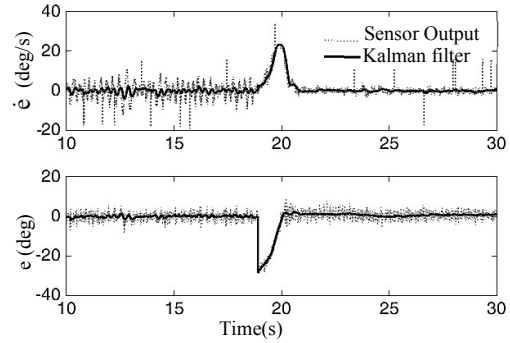
۶- نتایج آزمایشگاهی

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم کنترلی فازی برای کنترل موقعیت زاویه‌ای کوادروتور، این کنترل‌گر در مدل آزمایشگاهی با یک درجه آزادی اعمال شد. بدین ترتیب کنترل‌گر فازی مطابق با قوانین فازی و لبه‌های زبانی مدل نظری، در مدل آزمایشگاهی پیاده‌سازی شد. برای بررسی عملکرد و کارایی این نوع از کنترل‌گر آزمایش‌های متعددی صورت گرفت. در آزمایش اول کنترل‌گر کوادروتور را در کنترل رول از زاویه‌ی ۱۰ درجه به ۲۰- درجه کنترل می‌کند. همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، الگوریتم کنترل فازی پاسخ مطلوبی در پاسخ به ورودی پله ارائه داده است. برای نمایش عملکرد فیلتر کالمن خروجی بدون اعمال فیلتر نیز ترسیم شده است.

خطا و مشتق خطا به عنوان ورودی سیستم فازی محسوب می‌شوند، روند تغییرات این دو متغیر در آزمایش اول در شکل ۱۴ ترسیم شده است.

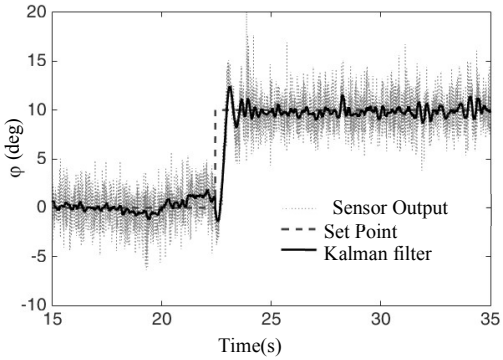


شکل۱۳- نتایج تجربی کنترل زاویه با استفاده از کنترل‌گر فازی- آزمایش اول



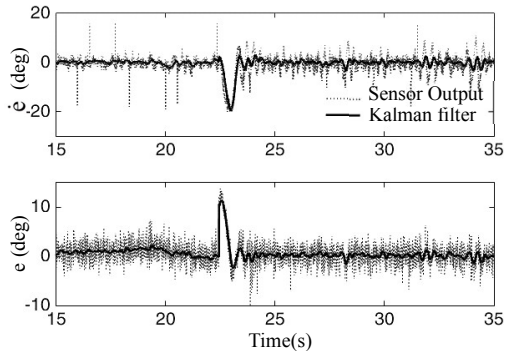
شکل۱۴- نتایج تجربی کنترل زاویه با استفاده از کنترل‌گر فازی- آزمایش اول

برای ارزیابی پاسخ الگوریتم کنترلی فازی به ورودی پله، زاویه‌ی ۱۰ درجه به عنوان زاویه‌ی مطلوب در آزمایش دوم منظور شده‌است. همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، کنترل‌گر فازی با سرعت و دقت قابل قبولی کوادروتور را در تغییر زاویه‌ی اولیه به زاویه‌ی مطلوب می‌رساند.



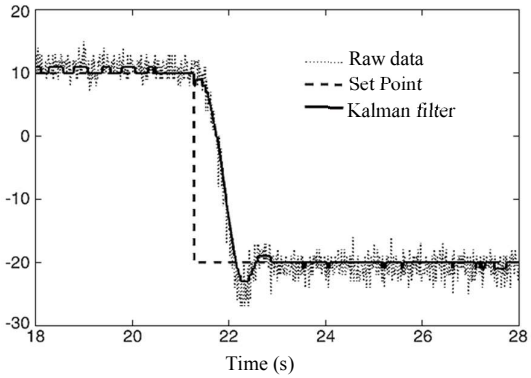
شکل۱۵- نتایج تجربی کنترل زاویه با استفاده از کنترل‌گر فازی- آزمایش دوم

ورودی سیستم فازی و تغییرات خطا و مشتق خطا در آزمایش دوم در شکل ۱۶ ترسیم شده است.



شکل۱۶- تغییرات خطا و مشتق خطا در کنترل زاویه با کنترل‌گر فازی-آزمایش دوم

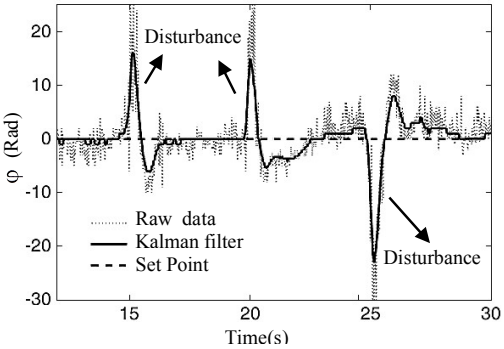
به منظور مقایسه‌ی پاسخ کنترل‌گر PID و فازی ، آزمایش اول با کنترل‌گر PID تکرار شد، نمودار پاسخ در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



شکل۱۷- نتایج تجربی کنترل زاویه با استفاده از کنترل‌گر PID

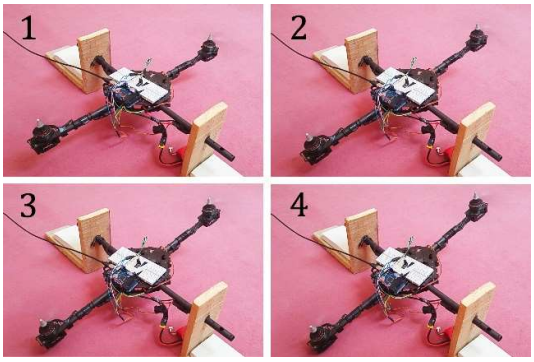
همان‌گونه که در شکل ۱۷ نشان داده شده، خروجی کنترل‌گر PID نسبت به کنترل‌گر فازی دارای فراجهش و زمان نشست بیشتری است.

برای بررسی مقاومت الگوریتم کنترلی فازی پیاده سازی شده در برابر اغتشاشات خارجی، چندین اغتشاش تصادفی به صورت مکرر به سیستم وارد شده است. شکل شماره ۱۸ پاسخ کنترل‌گر فازی را نسبت به اغتشاشات ضربه‌ای اعمال شده نشان می‌دهد. کنترل‌گر با سرعت مطلوبی پایداری سیستم را برقرار کرده است.

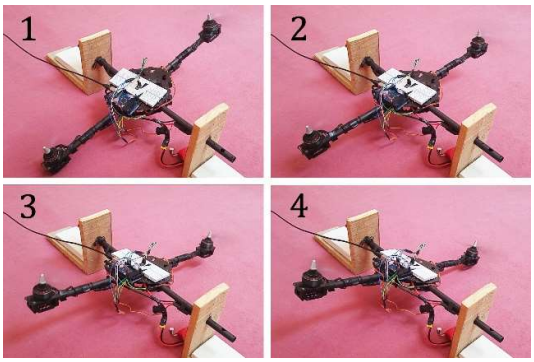


شکل۱۸- کنترل زاویه در شرایط اعمال اغتشاشات خارجی

دنباله تصاویر عملکرد کنترل‌گر در آزمایش اول در کنترل از زاویه ۰ درجه به ۱۰ درجه در شکل ۱۹ نشان داده شده است. شکل ۲۰ نیز دنبال تصاویر آزمایش دوم در کنترل از زاویه ۱۰ درجه به ۲۰- درجه را نشان می‌دهد.

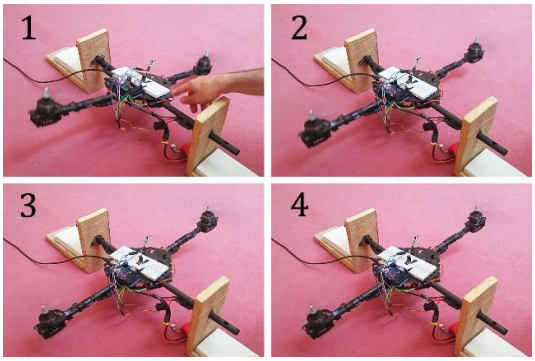


شکل ۱۹- دنباله تصاویر عملکرد کنترل‌گر فازی در آزمایش اول



شکل ۲۰- دنباله تصاویر عملکرد کنترل‌گر فازی در آزمایش دوم

دنباله تصاویر شکل ۲۱ عملکرد کنترل‌گر در برابر اغتشاشات خارجی ضربه‌ای را از زمان اعمال اغتشاش نشان می دهد.



شکل ۲۰- دنباله تصاویر عملکرد کنترل‌گر فازی در پاسخ به اغتشاشات خارجی

فیلم عملکرد الگوریتم کنترلی فازی در پاسخ به ورودی پله و اغتشاشات خارجی در لینک زیر قابل مشاهده است.
https://goo.gl/8GpmxT

۷- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله به طراحی و شبیه‌سازی الگوریتم کنترلی فازی برای کنترل موقعیت زاویه‌ای کوادروتور پرداخته شد. شبیه‌سازی مدل کوادروتور در نرم افزار متلب انجام شد و عملکرد الگوریتم کنترلی فازی در پاسخ به ورودی پله ارزیابی و با پاسخ الگوریتم کنترلی PID مقایسه شد. عملکرد الگوریتم کنترلی فازی به صورت قابل توجهی به متغیرهای این الگوریتم کنترلی از جمله توابع عضویت، لبه‌های زبانی و تعداد قوانین وابسته است. با تنظیم این پارامترها، الگوریتم کنترلی فازی در کنترل موقعیت زاویه‌ای پاسخ مطلوبی ارائه می‌دهد. در ادامه به منظور بررسی تجربی عملکرد کنترل‌گر فازی برای کوادروتور، یک مدل آزمایشگاهی طراحی و توسعه داده شد و کنترل‌گر برای کنترل موقعیت زاویه‌ای پیاده‌سازی شد. حرکت روتورها موجب ایجاد ارتعاشات قابل توجهی در مدل آزمایشگاهی می‌شود، ارتعاشات به وجود آمده، خروجی حسگرها را با نویز قابل توجهی همراه می‌کند. با ادغام خروجی حسگرهای ژیروسکوپ و شتاب‌سنج با استفاده از فیلتر کالمن، نویز حسگرها به میزان مطلوبی حذف شده و موقعیت زاویه‌ای کوادروتور به دست می‌آید. در نهایت با انجام آزمایش‌های متعدد با اعمال ورودی پله، کنترل‌گر نتایج قابل قبولی در رسیدن به زاویه‌ی مطلوب و در مقاومت در برابر اغتشاشات ضربه‌ای خارجی ارائه می‌کند.

۸- مراجع

[1] Bouabdallah Samir, Pierpaolo Murrieri, and Roland Siegwart., Design and control of an indoor micro quadrotor. Robotics and Automation, Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on. Vol. 5, 2004.

[2] Salih, A.L., Moghavvemi, M., Mohamed, H.A. and Gaeid, K.S., Flight PID controller design for a UAV quadrotor. Scientific Research and Essays,5(23), pp.3660-3667, 2010.

[3] Gonzalez-Vazquez S. and Moreno-Valenzuela J., 2010, September. A new nonlinear PI/PID controller for quadrotor

posture regulation. In Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA), pp. 642-647, 2010.

[4] Rezazadeh S., Alinaghizadeh Ardestani M. and Shahidi Sadeghi P., Optimal attitude control of a quadrotor UAV using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)." Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA): pp. 219-223, 2013.

[5] GAO Y.J., CHEN D.X. and LI R.M., Research on Control Algorithm of Microquadrotor Aircraft [J]. Computer and Modernization, 10, pp.003, 2011.

[6] Zerikat M. and Chekroun S., Design and implementation of a hybrid fuzzy controller for a high performance induction motor. World Academy of Science, Engineering and Technology, 26, pp.263-269, 2007.

[7] Mahfouz M., Ashry M. and Elnashar G., Design and control of quad-rotor helicopters based on adaptive neuro-fuzzy inference system, International Journal of Engineering Research and Technology. Vol. 2. No. 12 (December-2013). ESRSA Publications, 2013.

[8] Bouabdallah Samir, and Roland Siegwart., Backstepping and sliding-mode techniques applied to an indoor micro quadrotor." Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation. IEEE, 2005.

[9] Xu, Rong, and Umit Ozguner. "Sliding mode control of a quadrotor helicopter." Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 2006.

[10] Besnard, Lénaïck, Yuri B. Shtessel, and Brian Landrum., Quadrotor vehicle control via sliding mode controller driven by sliding mode disturbance observer., Journal of the Franklin Institute 349.2: pp. 658-684, 2012.

[11] Madani, Tarek, and Abdelaziz Benallegue. "Backstepping control for a quadrotor helicopter." 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.

[12] Bouabdallah Samir. and Roland Siegwart., Full control of a quadrotor, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007.

[13] Madani, Tarek, and Abdelaziz Benallegue. Backstepping sliding mode control applied to a miniature quadrotor flying robot, IECON -32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, 2006.

[14] Sangyam, T., Laohapiengsak, P., Chongcharoen, W. and Nilkhamhang, I., 2010, August. Path tracking of UAV using self-tuning PID controller based on fuzzy logic. In SICE Annual Conference, Proceedings of , pp. 1265-1269, 2010.

[15] Bouabdallah, Samir. Design and control of quadrotors with application to autonomous flying. Diss. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2007.

[16] Schmidt, Michael David., Simulation and control of a quadrotor unmanned aerial vehicle, 2011.