



پیاده‌سازی کنترل وضعیت یک ربات پرنده هشت ملخه در یک ردیابی مسیر خودمختار

سید جمال الدین حدادی¹، پیام زرافشان^{2*}

1- دانشجوی دکتری، دانشکده برق و سیستم‌های خودکار، دانشگاه دی سانتا کاترینا، فلوریانوپولیس

2- استادیار، گروه فنی-کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی 3391653755، p.zarafshan@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 16 اسفند 1394
پذیرش: 10 خرداد 1395
ارائه در سایت: 23 تیر 1395

کلید واژگان:

ربات پرنده هشت ملخه
کنترل کننده
کنترل وضعیت
ردیابی مسیر
حسگر

چکیده

ربات پرنده یک وسیله پرنده می‌باشد که به کمک نیروهای ایرویدینامیکی شرایط پروازی را مهیا می‌سازد. همچنین این وسیله می‌تواند به عنوان یک ربات خودکار نیز نامیده شود. این ربات یک سیستم زیرفعال می‌باشد و ذاتا ناپایدار می‌باشد. پس کنترل این سیستم غیرخطی یک مسئله مورد علاقه تئوری و عملی می‌باشد. بنابراین، هدف از این تحقیق مقابله با سیستم دینامیک به شدت غیرخطی ربات پرنده هشت ملخه است که در بسیاری موارد کنترل آن دشوار بوده و باعث وجود ناپایداری در این پرنده بدون سرنشین می‌شود. در این مقاله، ابتدا به بررسی ساختار ربات پرنده هشت ملخه به منظور افزایش توان، حمل بار بیشتر و افزایش مقاومت نسبت به تغییرات و اغتشاش پرداخته می‌شود. همچنین قسمت‌هایی اعم از ساخت الکترونیک و مکانیک این ربات مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. سپس در ادامه، به منظور کنترل وضعیت ربات، با معرفی مدل دینامیکی سیستم، یکی از عمومی‌ترین کنترل کننده‌های پیاده‌سازی شده بر روی این ربات‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. این روند ابتدا شبیه‌سازی در محیط متلب/سیمولینک بر روی مدل دینامیکی ربات انجام می‌پذیرد و در نهایت پیاده‌سازی این کنترل کننده بر روی یک ربات پرنده هشت ملخه ساخته شده، طی یک پرواز واقعی در محیط بیرون اتاق و در یک ردیابی مسیر خودکار انجام خواهد گرفت. در پایان، نمایش نتایج حسگرها در ردیابی مسیر خودکار نشان داده خواهد شد.

Implementation of Attitude Control for an Octorotor Flying Robot in an Autonomous Trajectory Tracking

Seyed Jamal Hadadi¹, Payam Zarafshan^{2*}

1-Department of Electrical and Automation Systems, University of Federal de Santa Catarina, Florianopolis, Brazil

2- Department of Agro-Technology, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 3391653755, Tehran, Iran, p.zarafshan@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 March 2016
Accepted 30 May 2016
Available Online 13 July 2016

Keywords:

Octorotor
Controller
Attitude Controller
Trajectory Tracking
Sensor

ABSTRACT

An Aerial Robot or Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is an aerial vehicle that provides its flight condition using aerodynamic forces. This vehicle can be named as an autonomous robot. This robot is an under-actuated system and is inherently unstable. Thus, the control of this nonlinear system is a problem for both practical and theoretical interest. So, the goal of this research is to compare it with highly nonlinear dynamic system of Octorotor which is difficult to control in many cases and causes instability in this Unmanned Aerial Vehicle (UAV). At first, the structure of Octorotor is studied in this paper in order to increase power, better ability to carry a load and to increase resistance into the distribution. Also, the electronics and mechanics of this robot are studied in some sections. Then, in the following, in order to control attitude of robot with introduction of dynamic system, one of the most common implemented controllers is applied on this robot. Initially, this process is done on the dynamic model of robot by Matlab/Simulink software and finally, implementation of this controller is applied on a fabricated Octorotor during a real flight in autonomous trajectory tracking in outdoor environment. Finally, the study of sensors results is also shown.

1- مقدمه

دها تولید کننده انبوه نیز این پرنده را به معرض فروش عمومی گذاشته‌اند. این امر به علت چند منظوره بودن و پایداری بسیار بالاتر این پرنده نسبت به هر وسیله پرنده دیگری است [1,2]. از مزیت‌های این پرنده‌های عمود پرواز، پیچیدگی مکانیکی کمتر و هزینه نگهداری پایین‌تر نسبت به دیگر سیستم‌های عمود پرواز می‌باشد. همچنین این ربات‌های پرنده دارای کاربردهای بسیار وسیعی در زمینه‌های نظامی، امداد و نجات، کشاورزی، فیلمبرداری و نقشه برداری‌های هوایی، مشاهده فجایع طبیعی و

اخیرا تحقیق و پژوهش بر روی پرنده‌های بدون سرنشین همانند ربات‌های عمود پرواز به موضوعی جذاب برای محققان در زمینه‌های هوافضا و کنترل تبدیل شده است. ربات‌های پرنده ملخ‌دار به نوع جدیدی از پرنده‌های بدون سرنشین عمود پرواز گفته می‌شود که هرچند اولین نمونه موفق آن در سال 1921 ساخته شد اما از ابتدای قرن 21 بسیار مورد توجه قرار گرفته است به طوری که سدها تیم تحقیقاتی روی این سیستم فعالیت می‌کنند و

Please cite this article using:

S. J. Hadadi, P. Zarafshan, Implementation of Attitude Control for an Octorotor Flying Robot in an Autonomous Trajectory Tracking, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 387-395, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. J. Hadadi, P. Zarafshan, Implementation of Attitude Control for an Octorotor Flying Robot in an Autonomous Trajectory Tracking, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 387-395, 2016 (in Persian)

بنابراین در این مقاله بهبود کیفیت مکانیکی ربات‌های پرنده، از نظر توان با اضافه شدن تعداد موتورها به آن و همچنین از نظر ساختار مکانیکی با استحکام بدنه و آئرویدینامیک مناسب موقع پرواز مورد نظر می‌باشد. همچنین در این پژوهش کنترل وضعیت ربات پرنده هشت‌ملخه در شرایط مختلف پروازی بررسی می‌شود. در این راستا، در بخش 2 ساخت سخت‌افزارهای مکانیکی و الکترونیکی ربات پرنده معرفی می‌شود. سپس در بخش 3 این تحقیق به بررسی مدل دینامیکی این ربات پرداخته می‌شود. طراحی کنترل کننده وضعیت به منظور ایجاد پایداری در این ربات پرنده هشت‌ملخه در بخش 4 گنجانده شده است. در بخش 5 نتایج شبیه‌سازی این کنترل کننده بر روی مدل دینامیکی ربات ارائه شده است. نتایج پایاده‌سازی این کنترل کننده به صورت ردیابی مسیر خودکار در محیط بیرون اتاق در بخش 6 و نتیجه‌گیری در بخش 7 مورد مطالعه قرار گرفته است.

2- طراحی سخت افزار ربات پرنده هشت‌ملخه

در این قسمت به طراحی و ساخت سخت‌افزارهای مورد نیاز اعم از سازه مکانیکی و مدار الکترونیکی ربات که شامل واحد اندازه‌گیری اینرسی می‌باشد پرداخته می‌شود.

2-1- سازه مکانیکی ربات

ساختار مکانیکی ربات پرنده هشت‌ملخه تقریباً همان ساختاری است که در مرجع [29] بررسی شده است. با این تفاوت که به جای چهارموتور از هشت‌موتور استفاده شده است و به صورت یک ساختار "+" شکل بوده که کاملاً سبک و در عین حال مقاوم ساخته شده است. همچنین در انتهای هر گوشه آن 2 موتور الکترونیکی که به صورت هم محور و بالعکس قرار گرفته‌اند، به همراه ملخ متصل می‌شوند. موتورها به گونه‌ای متصل می‌شوند که محور هر هشت موتور دو به دو و در چهار محور با یکدیگر موازی باشد [5]. برای ایجاد نیروی بالابر برای پرواز در آمدن پرنده، موتورها در جهتی می‌چرخند که هوا به سمت پایین هدایت شود. نکته‌ی مهم در ساختار این ربات، صلب بودن تمام قطعات است به این معنی که فقط سرعت موتورها قابل تغییر می‌باشد [30]. شکل 1 ساختار ساده‌سازی شده پرنده هشت‌ملخه را نشان می‌دهد.

2-2- مدار الکترونیک ربات

در این قسمت به معرفی سخت‌افزار الکترونیکی موجود بر روی ربات و رابطه آن‌ها برای کنترل ربات پرداخته می‌شود. بدون شک مهمترین قسمت الکترونیکی هر رباتی، خصوصاً در ربات‌های پرنده، قسمت واحد اندازه‌گیری اینرسی می‌باشد. با توجه به اینکه کنترل کننده طراحی شده یک ربات تمامی اطلاعات واقعی مورد نیاز خود اعم از سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای را از واحد اندازه‌گیری اینرسی دریافت و مورد پردازش قرار می‌دهد، دانستن اطلاعات کافی به همراه جزئیات و نوع کارکرد این قسمت از ربات لازم و ضروری است.

سنسورهای موجود در واحد اندازه‌گیری اینرسی که در برد الکترونیکی طراحی شده قرار داده شده است، شامل شتاب سنسور-ژیرو² می‌باشد که یک پردازنده حرکتی دیجیتال دارد که توانایی فیوژن 9

ورود به مناطق صعب العبور و... می‌باشد [3-5]. از طرفی، از ربات‌های پرنده ملخ‌دار می‌توان برای توسعه و گسترش قوانین کنترلی استفاده نمود. به منظور دسترسی به حالت پایدار پروازی در شرایط معلق در هوا، این نوع ربات‌ها از چهار دسته موتور استفاده می‌کنند [6]. همچنین ربات چهارملخه را می‌توان به عنوان یک چارچوب استاندارد برای صنایع رباتیک هوایی، از جمله پایاده‌سازی کنترل کننده‌های پیچیده و غیرخطی، [7-10]. مطالعه بر روی سخت‌افزار و معماری سخت‌افزار در نظر گرفت [11,12]. بطور کلی یکی از مشکلات اساسی ربات‌های پرنده ملخ‌دار و پرنده‌های بدون سرنشین بحث کنترل آن‌ها می‌باشد. اگرچه روش‌های خطی با موفقیت بر روی پرنده‌های بدون سرنشین پایاده‌سازی شده‌اند [13,14]. اما این روش‌ها در مناطقی که نیاز به گسترش مانورهای پروازی دارد، کاربرد خود را از دست می‌دهد [15]. روش‌های کنترلی مختلفی تاکنون برای این کار به اجرا در آمده که از کنترل کلاسیک مبتنی بر تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر¹ گرفته تا انواع روش‌های مدرن و غیرخطی برای این ربات تاکنون معرفی شده است. اگرچه قوانین روش‌های کنترل غیرخطی در شبیه‌سازی‌ها، نتایج بسیار خوبی را به دست می‌دهند، ولی این نتایج هنگامی که مدل ریاضی از ربات پرنده ملخ‌دار در دست نیست و یا نمی‌تواند ساخته شود به خوبی نتایج کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر نیست [16]. از دیگر روش‌هایی که در کنترل ربات پرنده ملخ‌دار مورد پایاده‌سازی انجام گرفته است، روش خطی‌سازی بازخورد به همراه روش مد لغزشی تطبیقی می‌باشد که توسط لیدر در سال 2009 انجام شده است [17]. همچنین یک روش کنترلی فازی تطبیقی به منظور پایدارسازی ربات پرنده توسط کوزامورد مورد پیشنهاد قرار گرفت [18]. مطالعه روش‌های کنترل غیرخطی وضعیت ربات چهارملخه بدون سرنشین توسط وایتیسواران و همکارش در سال 2015 انجام شد [19]. مدل‌سازی ربات پرنده چهارملخه با استفاده از روش نیوتن اوپلر و پایدارسازی ربات بر اساس ماشین بینایی و کنترل مسیر خروجی از کارهایی بود که آلتگ در سال 2002 انجام داد [20]. همچنین پایاده‌سازی روش‌های کاربردی تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر به همراه کنترلر بهینه در مایکرو پرنده چهارملخه داخل اتاق از دیگر پژوهش‌هایی است که در حوزه کنترل ربات‌های پرنده انجام شده است [21]. همچنین در مراجع [22,23] با استفاده از مدل به دست آمده روش لاگرانژ و همچنین استفاده از کنترل کننده طراحی شده بر اساس تحلیل لیاپانوف از الگوریتم اشباع تو در تو، عملکرد یک ربات خودمختار در وضعیت معلق درهوا را بررسی کردند. کنترل منطق فازی یکی دیگر از شاخه‌های فعال در زمینه کنترل ربات پرنده می‌باشد که در دو دهه اخیر روی سیستم‌های دینامیکی مختلف مورد پایاده‌سازی قرار گرفته است [24-27]. در پژوهشی که در سال 2012 توسط آلتگ و همکاران انجام گرفت، یک کنترل کننده هیبریدی فازی تناسبی بر روی یک ربات پرنده چهارملخه مورد آزمایش قرار گرفته است [28]. در مرجع [5] برای کنترل ربات پرنده هشت‌ملخه از یک سیستم کنترلی عصبی فازی استفاده شده است. در این مقاله برای نخستین بار مدل دینامیکی ربات پرنده هشت‌ملخه ارائه شده است. لازم به ذکر است که ربات‌های پرنده هشت‌ملخه تنها جهت افزایش توان ربات‌های پرنده در حمل وزن و پایداری بهتر در مقابل باد استفاده می‌شوند.

¹ PID

² MPU6050

3- مدل‌سازی دینامیکی ربات پرنده

برای مدل‌سازی دینامیکی ربات پرنده هشت‌ملخه ابتدا ساختار شش درجه آزادی آن را با استفاده از روابط نیوتن-اویلر بیان کرده و سپس موتورهای استفاده شده در ربات مدل‌سازی می‌گردند. سپس با ترکیب این دو قسمت، مدل یکپارچه ربات بدست می‌آید که می‌توان از آن برای شبیه‌سازی ربات استفاده نمود. بنابراین ابتدا روابط سینماتیکی جسم صلب با شش درجه آزادی را مطالعه کرده و سپس از این روابط برای حل معادلات اویلر استفاده می‌کنیم. با حل معادلات اویلر مدل دینامیکی ساختار صلب به دست می‌آید. گام اول برای مدل‌سازی دینامیکی پرنده چهارملخه استخراج روابط سینماتیکی آن می‌باشد [31]. با توجه به اینکه از روابط سینماتیکی جسم صلب با شش درجه آزادی استفاده می‌شود، می‌توان روابط (1) و (2) را به صورت زیر تعریف کرد:

$$\Phi_E = R\Phi_B \quad (1)$$

$$\vartheta_E = T\vartheta_B \quad (2)$$

که در آن Φ_E و ϑ_E به ترتیب بردارهای موقعیت و بردار تعمیم‌یافته‌ی سرعت زاویه‌ای نسبت به چارچوب‌های مرجع و بدنه را نشان می‌دهند. همچنین در رابطه‌ی قبل، R و T به ترتیب معرف ماتریس‌های دوران و انتقال بوده و با استفاده از روابط (3) تا (8) به صورت زیر تشریح می‌شوند:

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\varphi & -S\varphi \\ 0 & S\varphi & C\varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} C\theta & 0 & S\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\theta & 0 & C\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} C\beta & -S\beta & 0 \\ S\beta & C\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R = R_x R_y R_z \quad (6)$$

$$R = \begin{bmatrix} C\theta C\beta & S\varphi S\theta C\beta - C\varphi C\beta & S\varphi S\theta S\beta + C\varphi S\theta C\beta \\ C\theta S\beta & S\varphi S\theta S\beta - C\varphi C\beta & C\varphi S\theta S\beta - S\varphi C\beta \\ -S\theta & S\varphi C\theta & C\varphi C\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & \sin\varphi \tan\theta & \cos\varphi \tan\theta \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi \cos\theta & \cos\varphi \cos\theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

که در روابط فوق φ و θ و β به ترتیب زوایای رول، پیچ و یاو می‌باشند. همچنین S و C به ترتیب جایگزین \sin و \cos می‌باشند. بر اساس معادلات نیوتن-اویلر، معادلات دینامیکی حرکت ربات پرنده هشت‌ملخه به صورت رابطه (9) به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$\begin{aligned} m(\dot{v}_B + \omega_B \times v_B) &= F_B \\ I\dot{\omega}_B + \omega_B \times (I\omega_B) &= \tau_B \end{aligned} \quad (9)$$

با توجه به توزیع متقارن جرم ربات پرنده هشت‌ملخه، مورب بودن ماتریس اینرسی مشخص می‌شود. این تقارن باعث می‌شود مدل دینامیکی ربات نیز ساده‌تر شود. بنابراین در این مورد می‌توان ω_E را جایگزین ω_B کنیم. در ادامه با حل معادلات نیوتن-اویلر بر اساس روابط سینماتیکی موجود و ساختار پرنده هشت‌ملخه و همچنین با توجه به اینکه اغتشاش باد روی محور عمودی قرار دارد، می‌توان روابط دینامیکی آن را به صورت رابطه (10) نوشت:

الگوریتم حرکتی را دارا می‌باشد. این سنسور فقط از سه محور برای اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای و سه محور برای اندازه‌گیری شتاب زاویه‌ای استفاده می‌کند. جهت اندازه‌گیری زاویه حول محور عمودی از سنسور مغناطیسی¹ استفاده می‌کند که محصولی با ابعاد کوچک، توان مصرفی پایین بوده و دارای خروجی دیجیتال با دقت 12 بیت می‌باشد. از اطلاعات دریافت شده واحد اندازه‌گیری اینرسی پس از فیلتر شدن، برای تخمین موقعیت ربات استفاده می‌شود. در نهایت اطلاعات به دست آمده به همراه اطلاعات خام سنسورها به برد اصلی فرستاده می‌شوند. همچنین این برد الکترونیکی طراحی شده شامل یک پردازنده 8 بیتی² و خروجی سریال است. همچنین برای بدست آوردن ارتفاع ربات از سنسور فشار استفاده می‌شود. علاوه‌براین، گیرنده³ که با توجه به دستورات صادره از ریموت، یک سیگنال الکتریکی⁴ تولید می‌کند، در کنار اطلاعات ورودی سنسور⁵ که به صورت دیجیتال می‌باشد همگی وارد میکروکنترلر شده و پس از پردازش کنترلی و اعمال سیگنال‌های الکتریکی به موتورها، پرنده‌ی هشت‌ملخه را کنترل می‌کنند. همچنین به منظور اندازه‌گیری فاصله بین ربات و زمین از سنسور فشار هوا یا بارومتر⁶ استفاده می‌شود (شکل 2).



Fig. 1 Design of Mechanical Structure of Octorotor Flying Robot

شکل 1 طراحی سازه مکانیکی ربات هشت‌ملخه

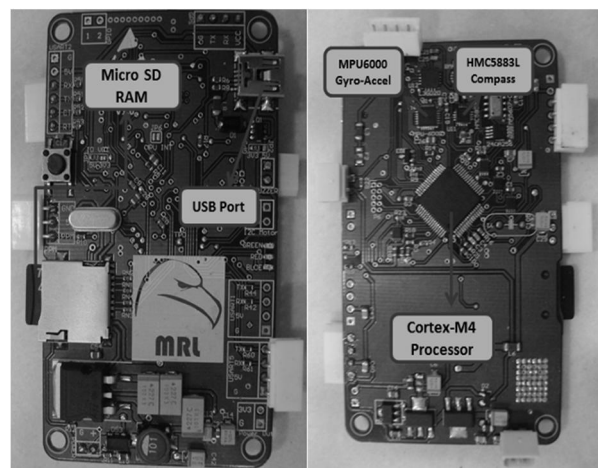


Fig. 2 The Designed Electronic Board

شکل 2 برد الکترونیکی طراحی شده

¹ HMC5843
² Atmeg2560
³ R6208 SB K-8X RC
⁴ PWM
⁵ MPU6050
⁶ MS5611-01BA03

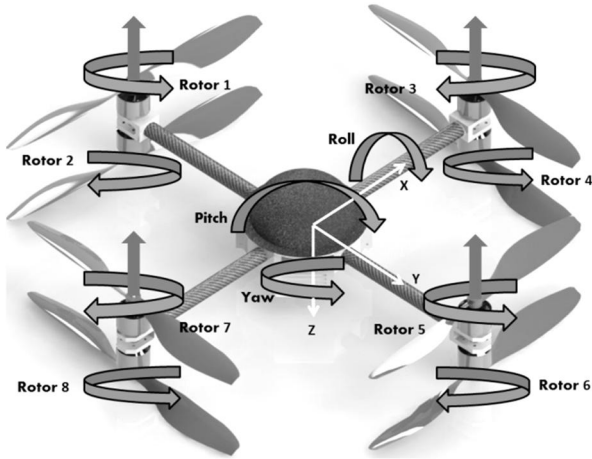


Fig. 3 Dynamic Concept of Octorotor Flying Robot

شکل 3 مفهوم دینامیکی ربات پرنده هشت‌ملخه

2-4- ساختار کنترلی

در این قسمت به بررسی ساختار کنترلی ربات پرنده هشت‌ملخه و نحوه ارتباط آن به ایستگاه زمینی پرداخته می‌شود. همان‌طور که در معرفی اجزای الکترونیک این ربات نیز بیان شد، سنسورهای موجود در برد الکترونیکی طراحی شده، شامل شتاب‌سنج سه محوره،ژیروسکوپ سه محوره و سنسور مغناطیسی سه محوره می‌باشند. اطلاعات خروجی این سنسورها سریال بوده که توسط میکروکنترلر به پالس الکتریکی تبدیل می‌شود. همچنین فرمان‌های کنترلی که به شکل عرض پالس الکتریکی به موتورها اعمال شده و باعث کنترل ربات پرنده هشت‌ملخه می‌گردد. سرعت موتورها توسط کنترل‌کننده سرعت موتور به موتورهای براسلس ارسال می‌شود. این کنترل‌کننده‌های سرعت موتور تا حداکثر 30 آمپر جریان را از خود عبور می‌دهند. اطلاعات دریافت شده از سنسورها پس از فیلتر شدن، برای تخمین وضعیت ربات استفاده شده و در نهایت اطلاعات به دست آمده به همراه اطلاعات خام سنسورها به برد اصلی فرستاده می‌شوند که شامل یک پردازنده 8 بیتی و دارای خروجی سریال است. لازم به ذکر است در تمامی مراحل پیاده‌سازی، موقعیت‌یابی ربات توسط حسگر موقعیت‌یاب¹ انجام می‌شود. بلوک دیاگرام الکترونیکی ربات پرنده هشت‌ملخه مورد نظر در شکل 5 نشان داده شده است.

5- شبیه‌سازی ربات پرنده

با شبیه‌سازی مدل استخراج شده برای رفتار دینامیکی پرنده هشت‌ملخه با مشخصات پارامترهای هندسی و دینامیکی ارائه شده در جدول 1، در

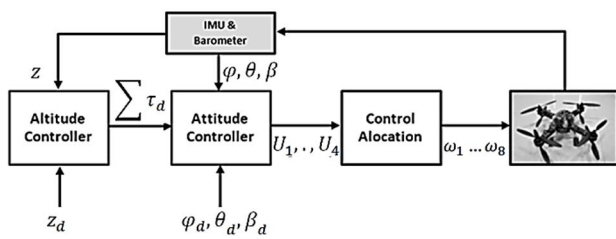


Fig. 4 Control Block Diagram of Octorotor Flying Robot

شکل 4 بلوک دیاگرام کنترلی ربات پرنده هشت‌ملخه

¹ GPS

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} = \left(\frac{I_y - I_z}{I_x}\right)\dot{\theta}\dot{\beta} + \frac{J_{TP}}{I_x}\dot{\theta}\omega_r + \frac{U_2}{I_x} \\ \ddot{\theta} = \left(\frac{I_z - I_x}{I_y}\right)\dot{\beta}\dot{\varphi} - \frac{J_{TP}}{I_y}\dot{\varphi}\omega_r + \frac{U_3}{I_y} \\ \ddot{\beta} = \left(\frac{I_x - I_y}{I_z}\right)\dot{\theta}\dot{\varphi} + \frac{U_4}{I_z} \\ \ddot{x} = \frac{1}{m}(C\varphi S\theta C\beta + S\beta S\varphi)U_1 \\ \ddot{y} = \frac{1}{m}(C\varphi S\theta S\beta - C\beta S\varphi)U_1 \\ \ddot{z} = \frac{1}{m}(C\varphi C\theta)U_1 - g + D_z \end{cases} \quad (10)$$

که در آن J_{TP} مجموع اینرسی حول محور ملخها (که مقادیر آن توسط نرم‌افزار استخراج گردیده است) و ω_r برابر با مجموع سرعت‌های زاویه‌ای موتورهای الکتریکی و یا سرعت باقی‌مانده ملخ‌ها هنگام پرواز بوده که برابر است با:

$$\omega_r = -\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 + \omega_4 - \omega_5 - \omega_6 + \omega_7 - \omega_8 \quad (11)$$

همچنین U_1, U_2, U_3, U_4 فرمان‌های کنترلی ربات پرنده بوده و به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{cases} U_1 = b(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2 + \omega_5^2 + \omega_6^2 + \omega_7^2 + \omega_8^2) \\ U_2 = lb(-\omega_3^2 - \omega_4^2 + \omega_7^2 + \omega_8^2) \\ U_3 = lb(-\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_5^2 + \omega_6^2) \\ U_4 = d(-\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2 - \omega_5^2 + \omega_6^2 - \omega_7^2 + \omega_8^2) \end{cases} \quad (12)$$

مفهوم دینامیکی ربات پرنده هشت‌ملخه در شکل 3 به تصویر کشیده شده است.

4- طراحی کنترل‌کننده

در این بخش، به تشریح کنترل‌کننده طراحی شده پرداخته می‌شود. همان‌طور که ذکر شد، ربات پرنده هشت‌ملخه، یک سیستم زیرفعال با شش درجه آزادی می‌باشد. بنابراین به منظور ثبات در پایداری وضعیت، از کنترل‌کننده حلقه داخلی استفاده می‌شود (شکل 4).

1-4- کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر

بیش از 90 درصد کنترل‌کننده‌های کاربردی و عملی کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر هستند [8]. یکی از علت‌های آن ساده بودن پیاده‌سازی آن بصورت گسسته است. در عمل این کنترل‌کننده‌ها می‌توانند با امکاناتی ساده مانند میکروکنترلرهای 8 بیت پیاده‌سازی و بهره‌برداری شوند. رابطه تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر پیوسته شامل حاصل جمع سه بخش تناسبی، انتگرالی و مشتقی می‌باشد که به ترتیب دارای ضرایب K_p و K_i و K_d می‌باشند. در کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر گسسته از جمع در طول زمان به جای پارامتر انتگرال و تفریق خطای یک مرحله از مرحله قبل به جای ضریب مشتق استفاده می‌گردد. رابطه (13) مربوط به کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر در حوزه زمان، فرکانس و نوع گسسته آن می‌باشد:

$$\begin{aligned} u(t) &= K_p e(t) + K_d \frac{de}{dt} + K_i \int e(\tau) d\tau \\ U(s) &= K_p E(s) + \frac{K_d}{s} E(s) + K_i s E(s) \\ u(n) &= K_p e(n) + K_d (e(n) - e(n-1)) \\ &\quad + K_i \sum_{k=0}^n e(k) \end{aligned} \quad (13)$$

نیم دایره تعیین شده است که ربات در محیط شبیه‌سازی آن را دنبال می‌کند. همینطور که در شکل 11 قابل مشاهده است، ربات پس از بلند شدن از روی زمین به ارتفاع 1.5 متری رفته و مسیر قرمز رنگ که مسیر مطلوب می‌باشد را دنبال می‌کند.

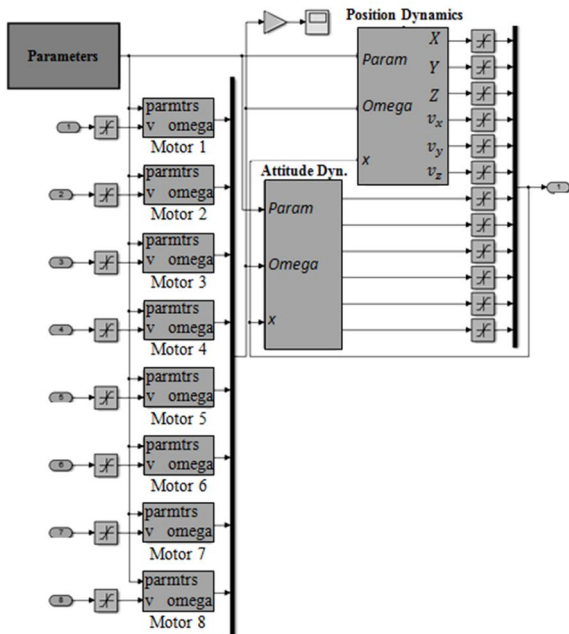


Fig. 7 Simulation Block of Dynamic Model of Octorotor Flying Robot
شکل 7 بلوک شبیه‌سازی مدل دینامیکی ربات پرنده هشت‌ملخه

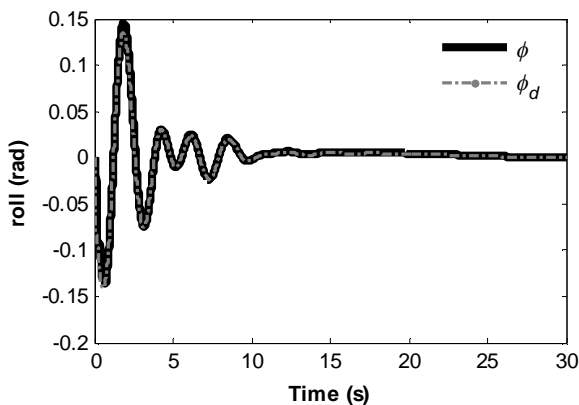


Fig. 8 Roll Angle in Simulation using PID Controller
شکل 8 زاویه رول با کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر در شبیه‌سازی

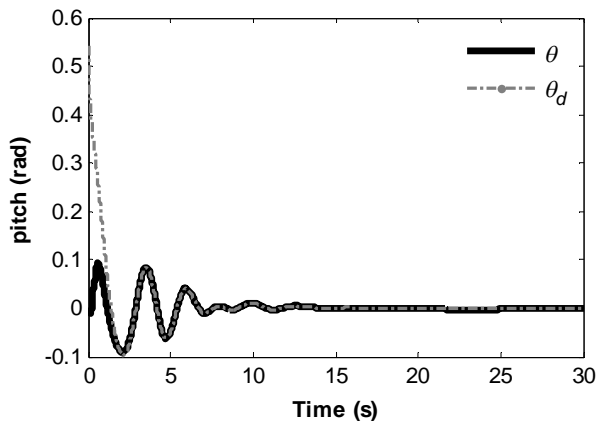


Fig. 9 Pitch Angle in Simulation using PID Controller
شکل 9 زاویه پیچ با کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر در شبیه‌سازی

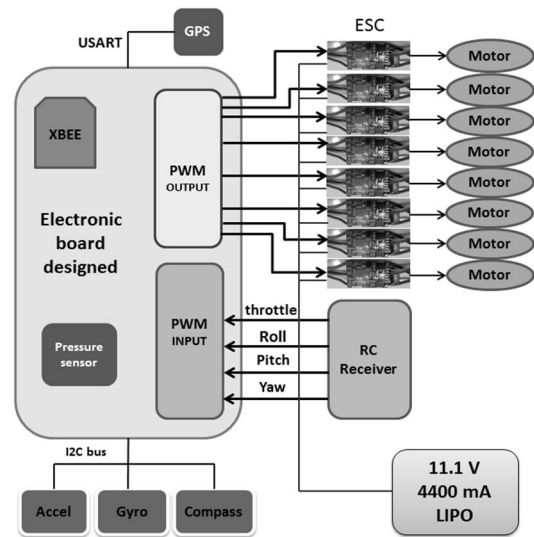


Fig. 5 Control Structure of Octorotor Flying Robot
شکل 5 ساختار کنترلی ربات پرنده هشت‌ملخه

نرم‌افزار متلب/سیمولینک می‌توان رفتار پرنده را بررسی نمود. در این راستا، مدل پرنده هشت‌ملخه در محیط سیمولینک شبیه‌سازی شده و یک مجموعه کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر برای کنترل آن طراحی شده است. شکل 6، نمایش بلوک دیاگرام سیستم شبیه‌سازی شده شامل مدل پرنده هشت‌ملخه، کنترل کننده و حلقه کنترلی می‌باشد.

5-1- کنترل وضعیت ربات پرنده

در این قسمت به تشریح نتایج شبیه‌سازی بدون حضور اغتشاش پرداخته می‌شود. همان‌طور که در شکل‌های رول¹ و پیچ² و یاو³ مشخص است، ربات در نقطه صفر کاملاً پایدار شده است که این نشان از اعمال ضرایب تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر مناسب در کنترل کننده ربات می‌باشد. همچنین بلوک دیاگرام طراحی شده جهت کنترل وضعیت ربات پرنده هشت‌ملخه در محیط شبیه‌سازی در شکل 7 به تصویر کشیده شده است. ذکر این نکته در این بخش ضروری به نظر می‌رسد که تنظیم ضرایب این کنترلر به صورت دستی و به روش سعی و خطا و با بهره‌گیری از نرم‌افزار مولتیوی صورت پذیرفته است که مقادیر آن در جدول 1 آورده شده است. تمامی شکل‌های 8 و 9 و 10 که نتایج حاصل از این شبیه‌سازی می‌باشد، مستقیماً در نرم‌افزار سیمولینک بدست آمده است.

5-2- ردیابی مسیر توسط ربات پرنده

برای پی بردن به عملکرد کنترل کننده طراحی شده، یک مسیر به شکل

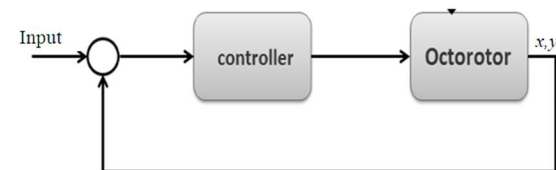


Fig. 6 Controller Diagram of Octorotor Flying Robot
شکل 6 دیاگرام کنترلی ربات پرنده

¹ Roll
² Pitch
³ Yaw

جدول 1 مقادیر پارامترهای هندسی، دینامیکی و کنترلی سیستم

Table. 1 Dynamic and Control Parameters of the System

$l = 0.232$ (m)	$b = 3.13e - 5$
$d = 9e - 5$	$m = 1.2$ (kg)
$I_x = 0.006228$ (kgm ²)	$I_y = 0.006228$ (kgm ²)
$I_z = 0.001125$ (kgm ²)	$J_{TP} = 154e - 7$ (kgm ²)
Roll	$K_p, K_i, K_d = 1.2, 0, 10$
Pitch	$K_p, K_i, K_d = 2, 0, 10$
Yaw	$K_p, K_i, K_d = 5, 0, 0.045, 0$

همچنین برای نگه داشتن این ربات ساخته شده (شکل 13) در یک ارتفاع ثابت از دکمه‌ای که بر روی ریموت قرار دارد و از قبل در کد ربات ارتفاع را در 15 متری تعریف شده، استفاده می‌گردد. نمودارهای بدست آمده کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر از زوایای وضعیت ربات در حین حرکت در مسیر از پیش تعیین شده بررسی می‌گردد. شکل 14 نمای بالایی از مسیر تعیین شده برای حرکت خودمختار ربات می‌باشد که قرار است ربات یک مسیر مستطیل شکل و یک مسیر مربعی را حول یک ساختمانی طی نماید.

همان‌طور که در شکل 15 مشاهده می‌شود، ربات پرنده که مسیر پرواز واقعی آن با رنگ قرمز مشخص شده است، توانسته به صورت قابل قبولی مسیر آبی رنگ را که بیانگر مسیر مطلوب است دنبال کند.



Fig. 13 Constructed Octorotor Flying Robot

شکل 13 ربات پرنده هشت‌ملخه ساخته شده



Fig. 14 Defined Trajectory for Octorotor Flying Robot

شکل 14 نمایی از مسیر تعیین شده برای حرکت ربات پرنده

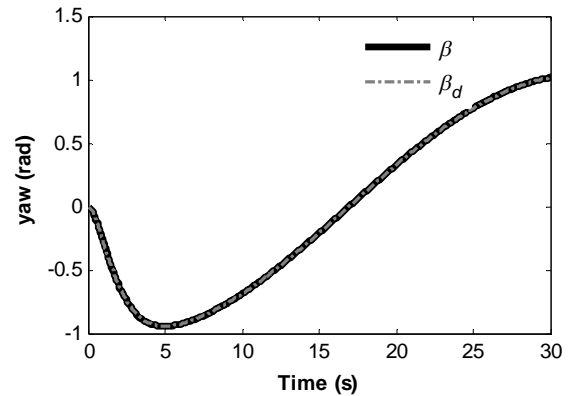


Fig. 10 Yaw Angle in Simulation using PID Controller

شکل 10 زاویه یاوو با کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر در شبیه‌سازی

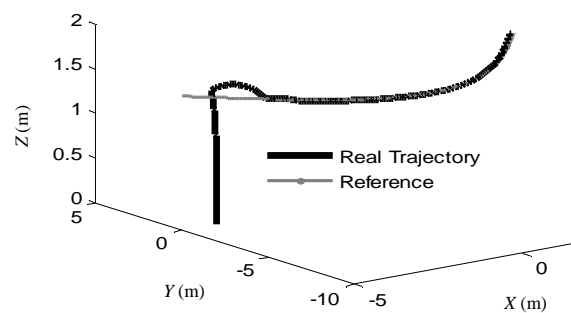


Fig. 11 Robot Trajectory using PID Controller

شکل 11 مسیر حرکت ربات با در نظر گرفتن کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر

همچنین نمودارهای شکل 12 هزینه‌های کنترلی یا سیگنال‌های کنترلی بدست آمده از شبیه‌سازی وضعیت ربات را نشان می‌دهد.

6- پیاده‌سازی کنترلر طراحی شده ربات پرنده

با توجه به این که تمامی اعمال کنترلی در داخل یک میکروکنترلر انجام می‌شود، اطلاعات پروازی اعم از زوایای رول، پیچ و یاوو ورودی و خروجی، ارتفاع ورودی و خروجی، هزینه‌های کنترلی، دور موتورها در هر لحظه از زمان، مقدار نویز اعمال شده به سیستم و ... به صورت برخط بر روی نرم‌افزار مولتی‌وی قابل مشاهده است. به منظور نمایش نمودارهای ورودی و خروجی رول، پیچ و یاوو در کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر از نرم‌افزار متلب/سیمولینک استفاده شده است.

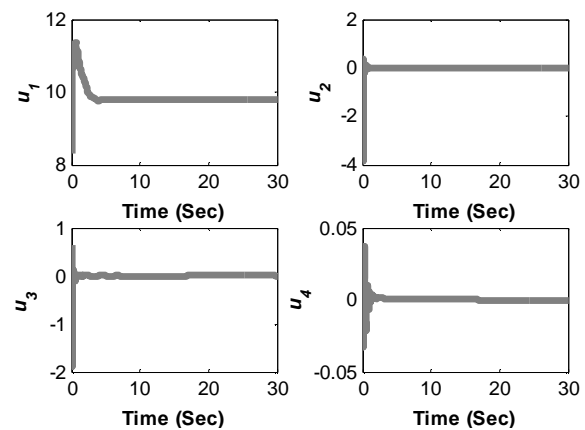


Fig. 12 Simulation Results of Controller Input Signals

شکل 12 نتایج شبیه‌سازی سیگنال‌های ورودی کنترلی

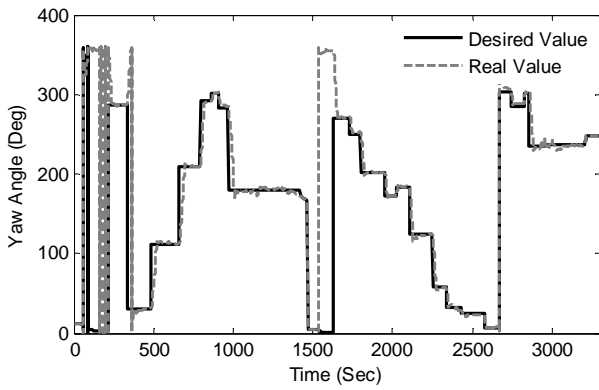


Fig. 18 Output Results for Yaw Angle

شکل 18 نتایج مقدار خروجی و بدست آمده زاویه یابوو

مقدار این خطاها می‌توان از کالیبراسیون استفاده کرد. برای مثال ضریب خطای شتاب‌سنج تقریباً وابسته به حرارت بوده و این حرارت در طول پرواز تغییر می‌کند. اما این وابستگی از نوع خطی بوده و می‌توان آن را به صورت آفلاین محاسبه نمود. در مرحله بعدی که فقط برای قبل از پرواز انجام می‌شود، کالیبراسیون چند ثانیه‌ای بیشتر طول نخواهد کشید و معمولاً

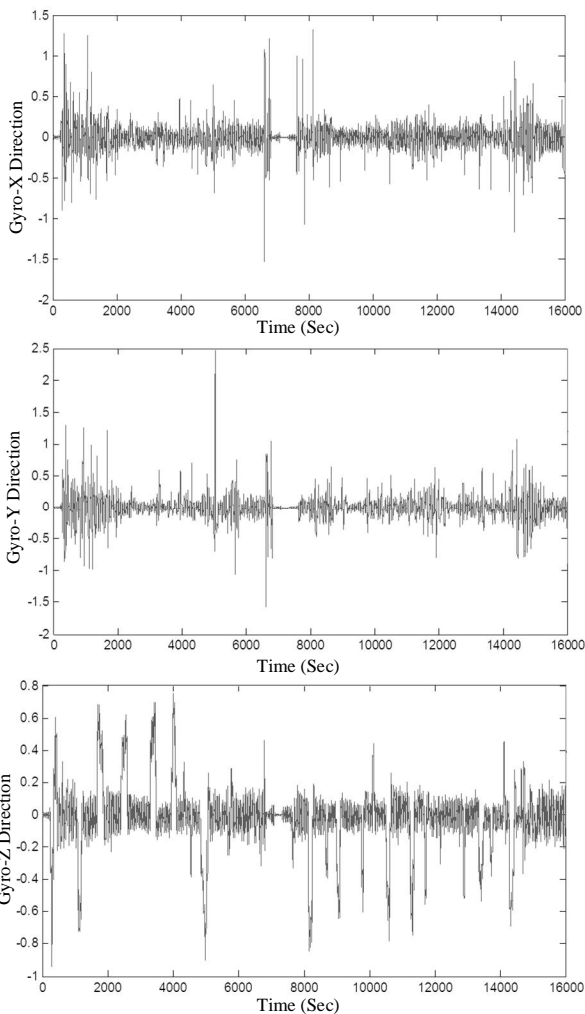


Fig. 19 Results of Gyroscope Sensor

شکل 19 نتایج حسگر ژایروسکوپ بسته

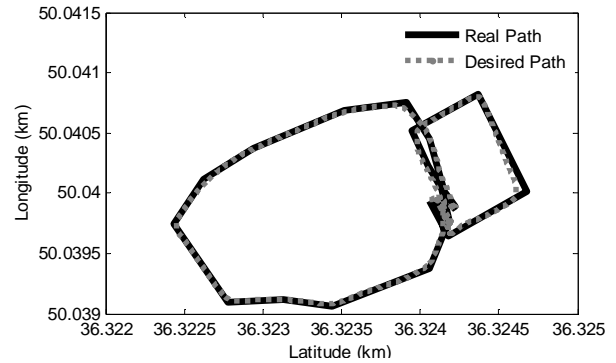


Fig. 15 Trajectory in Real Flying Task of Octorotor Flying Robot

شکل 15 ردیابی مسیر در پرواز واقعی توسط ربات پرنده هشت‌ملخه

همان‌طور که در نمودارهای حاصل از پایه‌سازی وضعیت در شکل‌های 16، 17 و 18 بدست آمده است، تفاوت میان نتایج زوایای ورودی و خروجی با تیرانس 3 درجه می‌باشد که این نشان از عملکرد نسبتاً قابل قبول کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر در برابر اغتشاش می‌باشد.

6-1- نتایج حسگرها

در این قسمت به تشریح نتایج واحد اندازه‌گیری اینرسی که شامل حسگرهای ژایروسکوپ، شتاب‌سنج و قطب‌نما می‌باشد پرداخته می‌شود. تمامی سنسورهای فوق در قسمت الکترونیک ربات معرفی شده‌اند. به منظور دستیابی به نتایج اندازه‌گیری قابل قبول در حسگرها تعدادی از انواع خطاها باید در نظر گرفته شود. برای این منظور می‌توان از اطلاعات اولیه که در برگه مشخصه سنسور درج شده است، استفاده کرد. برای تخمین

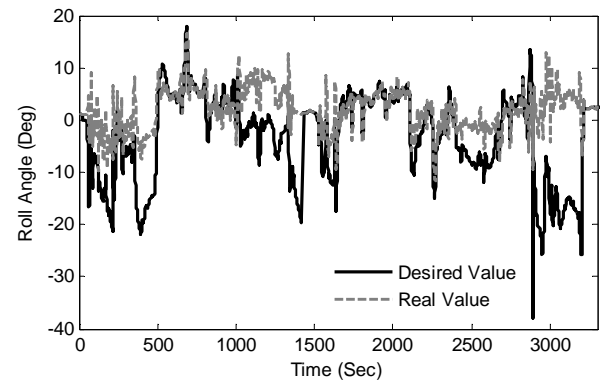


Fig. 16 Output Results for Roll Angle

شکل 16 نتایج مقدار خروجی و بدست آمده زاویه رول

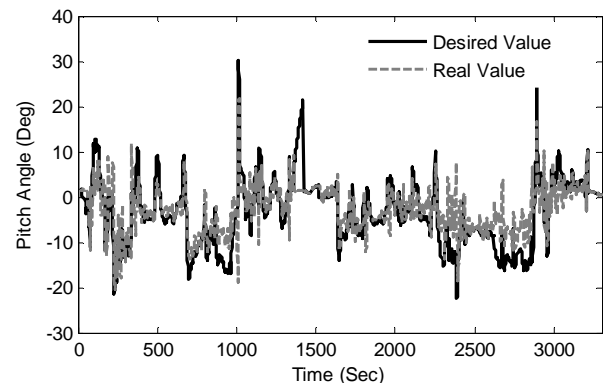


Fig. 17 Output Results for Pitch Angle

شکل 17 نتایج مقدار خروجی و بدست آمده زاویه پیچ

اندازه‌گیری، کالمن فیلتر می‌تواند آغازکننده تخمین بایاس شتابسنج یا سرعت زاویه‌ای باشد. شکل 19 بسته نتایج حسگر ژایروسکوپ در همان مسیر تعیین شده را که ربات آن را به صورت خودمختار طی کرده است نشان می‌دهد.

همچنین بسته نتایج حسگرهای شتابسنج و قطب‌نما به ترتیب در شکل‌های 20 و 21 نشان داده شده‌اند.

7- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به منظور افزایش توان ربات پرنده در محیط بیرون اتاق و همچنین مقابله با اغتشاشاتی مانند باد، تعداد موتورهای یک ربات پرنده چهارملخه به هشت موتور افزایش پیدا کرده است که این کار باعث تغییر کمی در ساختار ربات و مدل دینامیک آن گردید. در شبیه‌سازی‌های انجام شده که در نرم‌افزار متلب/سیمولینک بر روی مدل ربات پرنده هشت‌ملخه انجام شد، مشخص شد که کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر دارای عملکرد مناسبی در کنترل وضعیت و ردیابی مسیر می‌باشد. بعلاوه نتایج پیاده‌سازی این تحقیق نشان داد که کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر در ربات‌های پرنده و در محیط‌های بیرون اتاق دارای عملکرد مناسبی بود. همچنین ایجاد ارتباط مناسب بین حسگرهای موجود در برد الکترونیکی ساخته شده، خصوصاً شتابسنج، ژایروسکوپ و قطب‌نما و نحوه کار سخت‌افزارهای بکار رفته در آن باعث عملکرد خوب حسگرها شد. در نتیجه این امر منجر به کنترل وضعیت مناسب و ردیابی مسیر مورد قبول گردید.

8- فرست‌علایم

ضریب تراست	b
ضریب درگ	d
شتاب گرانش (ms^{-2})	g
ممان اینرسی حول محور x (kgm^2)	I_x
ممان اینرسی حول محور y (kgm^2)	I_y
ممان اینرسی حول محور z (kgm^2)	I_z
ممان اینرسی دورانی (kgm^2)	J_{TP}
ضریب ثابت مکانیکی موتور (NMmA^{-1})	K_M
ضریب ثابت الکترونیکی موتور (Vsrad^{-1})	K_E
طول بازوی ربات (m)	l
جرم ربات (kg)	m
مقاومت موتور (Ω)	R
سرعت موتور (rpm)	ω

9- مراجع

- [1] S. Bouabdallah, *Design and control of quadrotors with application to autonomous flying robot*, PHD Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne EPFL, 2007.
- [2] M. Poropat, S. Bogdan, M. Orsag, Hybrid fly-by-wire quadrotor controller, *Automatika*, Vol. 51, No. 1, pp. 19-32, 2010.
- [3] S. Sadr, P. Zarfshan, S. A. A. Moosavian, Dynamics modeling and control of a quadrotor with swing load, *Journal of Robotics*, Vol. 14, No. 1, pp. 1-12, 2014.
- [4] B. Lawrence, The birth of flight control – an engineering analysis of the wright brothers 1902 glider, *The Aeronautical Journal*, Vol. 10, No. 7, pp. 697-705, 2003.

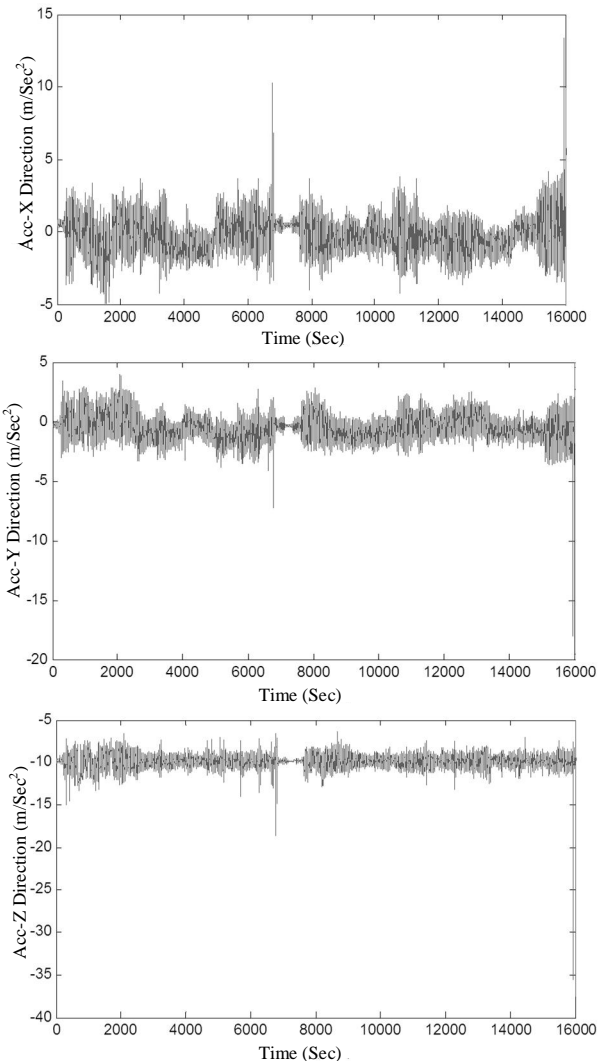


Fig. 20 Results of Accelerometer Sensor

شکل 20 بسته نتایج حسگر شتابسنج

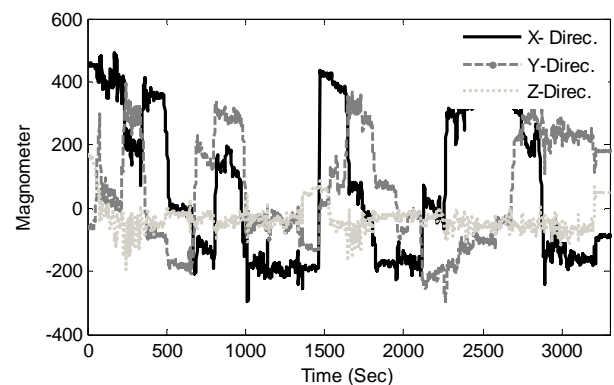


Fig. 21 Results of Magnetometer Sensor

شکل 21 بسته نتایج حسگر قطب‌نما

اندازه‌گیری می‌تواند در یک جهت انجام شود. در طول انجام این روش خطاهایی می‌توانند محاسبه شوند که در تمامی طول پرواز ثابت فرض شده و مقادیر اندازه‌گیری می‌تواند برای شروع مرحله سوم استفاده شود. مقادیر اندازه‌گیری شده دما و بایاس اولیه هستند. مرحله سوم فراتر از کالیبراسیون بوده و مرحله تخمین می‌باشد. بر این اساس قبل از شروع

- Annual meeting of the North American Fuzzy Information Society*, Vol. 3, pp. 454-458, 2006.
- [19] S. M. Vaitheeswaran, R. Mekala, Non-linear attitude control methods for quadrotor MAVs- a study, *International Conference of, Cognitive Computing and Information Processing (CCIP)*, Noida, India, pp. 1-6, 2015.
- [20] E. Altug, J. P. Ostrowski, C. J. Taylor, Control of a octorotor helicopter using dual camera visual feedback, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 24, No. 5, pp. 329-341, 2005.
- [21] S. Sadr, S. Ali, A. Moosavian, P. Zarafshan, Damping control of a quadrotor with swinging load using input shaping method, *Proceeding of the RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM 2014)*, Tehran, Iran, 2014.
- [22] S. Slazar-Cruz, A. Palomino, R. Lozano, Trajectory tracking for a four rotor mini-aircraft, *Proceeding of the 44th IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference*, Chicago, USA, pp. 2505- 2510, 2005.
- [23] J. Escareno, S. Salazar-Cruz, R. Lozano, Embedded control of a four-rotor UAV, *Proceeding of the American Control Conference*, Minneapolis, USA, pp. 189-204, 2006.
- [24] P. Bhatkhande, T. C. Havens, Real time fuzzy controller for quadrotor stability control, *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, Beijing, China, pp. 913-919, 2014.
- [25] M. Ariffanan, M. Basri, A. R. Husain, A. Kumeresan, Fuzzy supervisory back-stepping controller for stabilization of quadrotor unmanned aerial vehicle, *5th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS)*, Kuala Lumpur, pp. 1-5, 2014.
- [26] C. Wu, Robust output feedback position control for quadrotor based on disturbance observer, *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Zhuhai, China, pp. 446-451, 2015.
- [27] E. H. Fung, Y. Wong, Y. Ma, C. M. Yuen, W. Wong, Smart hanger dynamic modeling and fuzzy controller design, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 9, No. 4, pp. 691-700, 2011.
- [28] B. Erginer, E. Altuğ, Design and implementation of a hybrid fuzzy logic controller for a quadrotor VTOL vehicle, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 61-70, 2012.
- [29] J. Devaud1, S. Najko, P. Nahédic, C. Maussire, Full design of a low-cost octorotor UAV by student team, *International Conference on System Engineering and Technology*, Bandung, Indonesia, 2012.
- [30] C. Dikmen, A. Arisoy, H. Temeltas, Attitude control of a quadrotor, *4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies*, Istanbul, Turkey, pp. 722-727, 2009.
- [31] G. J. Goldin, W. Ren, Autonomous indoor aerial gripping using a quadrotor, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, San Francisco, California, USA, pp. 4645-4651, 2011.
- [5] X. Chen, D. Li, Y. Bai, Z. Xu, Modeling and neuro-fuzzy adaptive attitude control for eight-Rotor MAV, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 9, No. 6, pp. 1154-1163, 2011.
- [6] H. Bolandi, M. Rezaei, R. Mohsenipour, H. Nemati, S. M. Smailzadeh, Attitude control of a quadrotor with optimized PID controller, *Intelligent Control and Automation*, Vol. 4, No. 3, pp. 335-342, 2013.
- [7] G. Ivan, Attitude stabilization of a quad-rotor based on rotor speed sensing with accelerometer data estimation via Kalman filtering, *Proceedings of the Chinese Control Conference*, Hefei, China, 2012.
- [8] C. Diao, B. Xian, Q. Yin, W. Zeng, H. Li, Y. Yang, A nonlinear adaptive control approach for quadrotor UAVs, *Asian Control Conference (ASCC)*, Splendor Kaohsiung, Taiwan, pp. 223-228, 2011.
- [9] J. Colorado, A. Barrientos, A. Martinez, B. Lafaverge, J. Valente, Mini-Quadrotor attitude control based on hybrid backstepping and frenet-serret theory, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Anchorage, Alaska, pp. 1617-1622, 2010.
- [10] C. Coza, C. Macnab, A new robust adaptive-fuzzy control method applied to quadrotor helicopter stabilization, *NAFIPS. Annual meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society*, Montreal, Canada, pp. 454-458, 2006.
- [11] T. Madani, A. Benallegue, Sliding mode observer and back-stepping control for a quadrotor unmanned aerial vehicles, *American Control Conference, Concordia University Montreal*, Canada, pp. 5887-5892, 2007.
- [12] A. Bhawe, B. Krogh, D. Garlan, B. Schmerl, View consistency in architectures for cyber-physical systems, *IEEE/ACM International Conference on Cybernetic*, Chicago, USA, 2011.
- [13] M. Nguyen Duc, T. Nguyen Trong, Y. Sheng Xuan, The quadrotor MAV system using PID control, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Beijing, China, pp. 506-510, 2015.
- [14] G. M. Hoffmann, H. Huang, S. L. Waslander, C. J. Tomlin, Precision flight control for a multi-vehicle octorotor helicopter test bed, *Control Engineering Practice*, Vol. 19, No. 9, pp. 1023-1036, 2011.
- [15] D. Cabecinhas, R. Cunha, C. Silvestre, A Nonlinear quadrotor trajectory tracking controller with disturbance rejection, *American Control Conference (ACC)*, Portland, Oregon, USA, pp. 978-983, 2014.
- [16] S. Wang, Y. Yang, Quadrotor aircraft attitude estimation and control based on kalman filter, *Proceeding of the 31st Chinese Conference*, Hefei, China, pp. 5634-5639, 2012.
- [17] D. Lee, H. J. Kim, S. Sastry, Feedback linearization vs adaptive sliding mode control for an octorotor helicopter, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 419-428, 2009.
- [18] C. Coza, C. J. B. Macnab, A new robust adaptive- fuzzy control method applied to Octorotor helicopter stabilization, *NAFIPS*