



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

سید جمال الدین حدادی^۱، پیام زرافشان^{۲*}

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

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

* تهران، صندوق پستی ۳۳۹۱۶۵۳۷۵۵

چکیده

ربات پرنده یک وسیله پرنده می‌باشد که به کمک نیروهای ایرودینامیکی شرایط پروازی را مهیا می‌سازد. همچنین این وسیله می‌تواند به عنوان یک ربات خودکار نیز نامیده شود. این ربات یک سیستم زیرفعال می‌باشد و ذاتاً 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 ملحه است که در بسیاری موارد کنترل آن دشوار بوده و باعث وجود ناپایداری در این پرنده بدون سرنوشتی می‌شود. در این مقاله، ابتدا به بررسی ساختار ربات پرنده هشت ملحه به منظور افزایش توان، حمل بار بیشتر و افزایش مقاومت نسبت به تعییرات و اغتشاش پرداخته می‌شود. همچنین قسمت‌های 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 کنترل‌کننده‌های پیاده‌سازی شده بر روی این ربات‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. این روند ابتدا شبیه‌سازی در محیط مطلب/Simulink بر روی مدل دینامیکی ربات انجام می‌پذیرد و در نهایت پیاده‌سازی این کنترل‌کننده بر روی یک ربات پرنده هشت ملحه ساخته شده، طی یک پرواز واقعی در محیط بیرون اتفاق و در یک ردیابی مسیر خودکار انجام خواهد گرفت. در پایان، نمایش نتایج حسگرهای در ردیابی مسیر خودکار نشان داده خواهد شد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۱۶ اسفند ۱۳۹۴
پذیرش: ۱۰ خرداد ۱۳۹۵
ارائه در سایت: ۲۳ تیر ۱۳۹۵

کلید واژگان:

ربات پرنده هشت ملحه

کنترل کننده

کنترل وضعیت

ردیابی مسیر

حسگر

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.

دها تولید کننده انبوی 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 [۱]. 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

-۱ مقدمه

اخیراً تحقیق و پژوهش بر روی پرنده‌های بدون سرنوشنی 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 سرنوشنی عمود پرواز گفته می‌شود که هرچند اولین نمونه موفق آن در سال ۱۹۲۱ ساخته شد اما از ابتدای قرن ۲۱ بسیار مورد توجه قرار گرفته است به طوری که صدها 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:

بنابراین در این مقاله بهبود کیفیت مکانیکی ربات‌های پرنده، از نظر توان با اضافه شدن تعداد متورها به آن و همچنین از نظر ساختار مکانیکی با استحکام بدن و آژودینامیک مناسب موقع پرواز مورد نظر می‌باشد. همچنین در این پژوهش کنترل وضعیت ربات پرنده هشت ملخه 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 هشت ملخه در بخش 4 گنجانده شده است. در بخش 5 نتایج شبیه‌سازی این کنترل کننده بر روی مدل دینامیکی ربات ارایه شده است. نتایج پیاده‌سازی این کنترل کننده به صورت ردیابی مسیر خودکار در محیط بیرون اتفاق در بخش 6 و نتیجه‌گیری در بخش 7 مورد مطالعه قرار گرفته است.

2- طراحی سخت افزار ربات پرنده هشت ملخه

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

2-1- سازه مکانیکی ربات

ساختار مکانیکی ربات پرنده هشت ملخه تقریباً همان ساختاری است که در مرجع [29] بررسی شده است. با این تفاوت که به جای چهار موتور از هشت موتور استفاده شده است و به صورت یک ساختار "4" شکل بوده که کاملاً سبک و در عین حال مقاوم ساخته شده است. همچنین در انتهای هر گوشه آن 2 موتور الکتریکی که به صورت هم محور و بالعکس قرار گرفته‌اند، به همراه ملح متصل می‌شوند. متورها 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 به پرواز در آمدن پرنده، متورها 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 متورها قابل تغییر می‌باشد [30]. شکل 1 ساختار ساده‌سازی شده پرنده هشت ملخه 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 اندازه گیری 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 اندازه گیری 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 اندازه گیری اینرسی که در بورد الکترونیکی طراحی شده قرار داده شده است، شامل شتاب سنج-زاپروی² می‌باشد که یک پردازنده حرکتی دیجیتال دارد که توانایی فیوژن 9

وروود به مناطق صعب العبور... می‌باشد [5-3]. از طرفی، از ربات‌های پرنده ملخ‌دار می‌توان برای توسعه و گسترش قوانین کنترلی استفاده نمود. به منظور دسترسی به حالت پایدار پروازی در شرایط معلم در هوای، این نوع ربات‌ها از چهار دسته متور استفاده می‌کنند [6]. همچنین ربات چهارملخه را می‌توان به عنوان یک چارچوب استاندارد برای صنایع رباتیک هوایی، از جمله پیاده‌سازی 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 سرنوشنی بحث کنترل آن‌ها می‌باشد. اگرچه روش‌های خطی با موفقیت بر روی پرنده‌های بدون سرنوشنی پیاده‌سازی 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 پیاده‌سازی انجام گرفته است، روش خطی سازی 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 سرنوشنی توسعه واپتیسواران و همکارش در سال 2015 انجام شد [19]. مدل سازی ربات پرنده چهارملخه با استفاده از روش نیوتن اویلر و پایدارسازی ربات بر اساس ماشین بینایی و کنترل مسیر خروجی از کارهایی بود که آلتگ در سال 2002 انجام داد [20]. همچنین پیاده‌سازی 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 [23,22] با استفاده از مدل به دست آمده روش لاغرانژ و همچنین استفاده از کنترل کننده طراحی شده بر اساس تحلیل لیپانوف از الگوریتم اشباع تو در تو، عملکرد یک ربات خودمختار در وضعیت معلم 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 پیاده‌سازی 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 هشت ملخه از یک سیستم کنترلی عصبی فازی استفاده شده است. در این مقاله برای نخستین بار مدل دینامیکی ربات پرنده هشت ملخه ارائه شده است. لازم به ذکر است که ربات‌های پرنده هشت ملخه تنها جهت افزایش توان ربات‌های پرنده در حمل وزن و پایداری بهتر در مقابل باد استفاده می‌شوند.

² MPU6050

3- مدل سازی دینامیکی ربات پرنده

برای مدل سازی دینامیکی ربات پرنده هشت مخلخه ابتدا ساختار شش درجه آزادی آن را با استفاده از روابط نیوتن- اویلر بیان کرده و سپس موتورهای استفاده شده در ربات مدل سازی 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 مدل سازی دینامیکی پرنده چهار مخلخه 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:

$$\dot{\theta}_E = R\dot{\theta}_B \quad (1)$$

$$\dot{\varphi}_E = T\dot{\varphi}_B \quad (2)$$

که در آن $\dot{\theta}_E$ و $\dot{\varphi}_E$ به ترتیب بردارهای موقعیت و بردار تعیین‌یافته‌ی سرعت زاویه‌ای نسبت به چارچوب‌های مرجع و بدن 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:

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

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

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

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

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

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

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

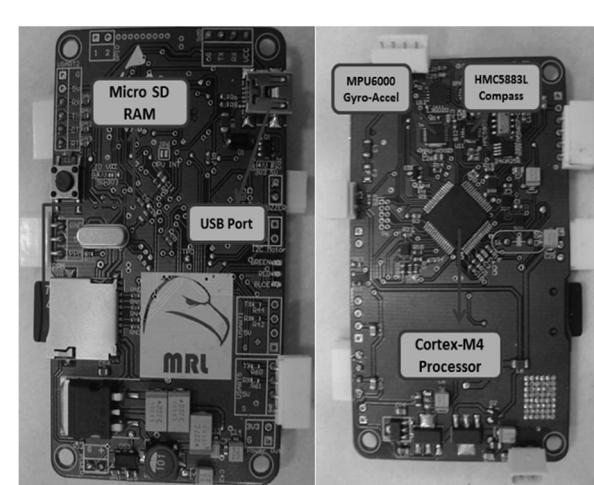
$$\begin{aligned} m(\dot{v}_B + \omega_B \times v_B) &= F_B \\ I\dot{\omega}_B + \omega_B \times (I\dot{\omega}_B) &= \tau_B \end{aligned} \quad (9)$$

با توجه به توزیع متقاضی جرم ربات پرنده هشت مخلخه، 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 هشت مخلخه 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 بورد اصلی فرستاده می‌شوند. همچنین این بورد الکترونیکی طراحی شده شامل یک پردازنده 8 بیتی² و خروجی سریال است. همچنین برای بدست آوردن ارتفاع ربات از سنسور فشار استفاده می‌شود. علاوه براین، گیرنده³ که با توجه به دستورات صادره از ریموت، یک سینگال 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، پرنده هشت مخلخه را کنترل می‌کنند. همچنین به منظور اندازه‌گیری فاصله بین ربات و زمین از سنسور فشار هوا یا بارومتر⁶ استفاده می‌شود (شکل 2).



شکل ۱ طراحی سازه مکانیکی ربات پرنده هشت مخلخه



شکل ۲ بورد الکترونیکی طراحی شده

شکل ۲ بورد الکترونیکی طراحی شده

¹ HMC5843

² Atmel2560

³ R6208 SB K-X8 RC

⁴ PWM

⁵ MPU6050

⁶ MS5611-01BA03

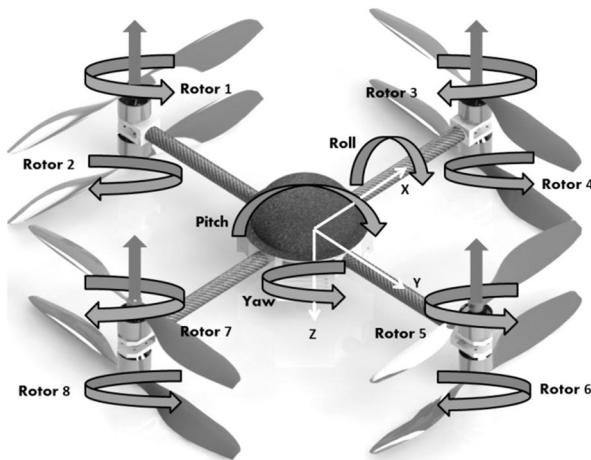


Fig. 3 Dynamic Concept of Octorotor Flying Robot

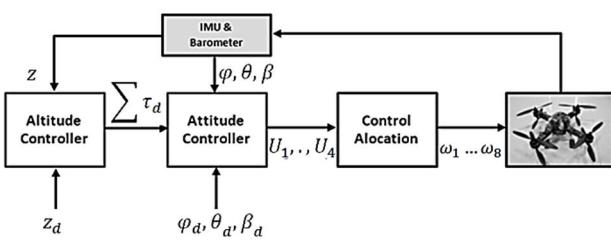
شکل ۳ مفهوم دینامیکی ربات پرنده هشت ملخه

2-4- ساختار کنترلی

در این قسمت به بررسی ساختار کنترلی ربات پرنده هشت ملخه و نحوه ارتباط آن به ایستگاه زمینی پرداخته می‌شود. همان‌طور که در معرفی اجزای الکترونیک این ربات نیز بیان شد، سنسورهای موجود در بورد الکترونیک 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 الکترونیکی تبدیل می‌شود. همچنین فرمان‌های کنترلی که به شکل عرض پالس الکترونیکی به موتورها اعمال شده و باعث کنترل ربات پرنده هشت ملخه می‌گردند. سرعت موتورها توسط کنترل کننده سرعت موتور به موتورهای برآشلس ارسال می‌شود. این کنترل کننده‌های سرعت موتور تا حدکش 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 بورد اصلی فرستاده می‌شوند که شامل یک پردازنده 8 بیتی و دارای خروجی سریال است. لازم به ذکر است در تمامی مراحل پیاده‌سازی، موقعیت‌یابی ربات توط حسگر موقعیت‌یاب^۱ انجام می‌شود. بلوک دیاگرام الکترونیکی ربات پرنده هشت ملخه مورد نظر در شکل ۵ نشان داده شده است.

5- شبیه‌سازی ربات پرنده

با شبیه‌سازی مدل استخراج شده برای رفتار دینامیکی پرنده هشت ملخه با مشخصات پارامترهای هندسی و دینامیکی ارایه شده در جدول ۱، در

Fig. 4 Control Block Diagram of Octorotor Flying Robot
شکل ۴ بلوك دیاگرام کنترلی ربات پرنده هشت ملخه^۱ GPS

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

که در آن J_{TP} مجموع ایترسی حول محور ملخه (که مقادیر آن توسط نرم‌افزار استخراج گردیده است) و ω_r برابر با مجموع سرعت‌های زاویه‌ای موتورهای الکتریکی و با سرعت باقی مانده ملخه 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:

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

مفهوم دینامیکی ربات پرنده هشت ملخه در شکل ۳ به تصویر کشیده شده است.

4- طراحی کنترل کننده

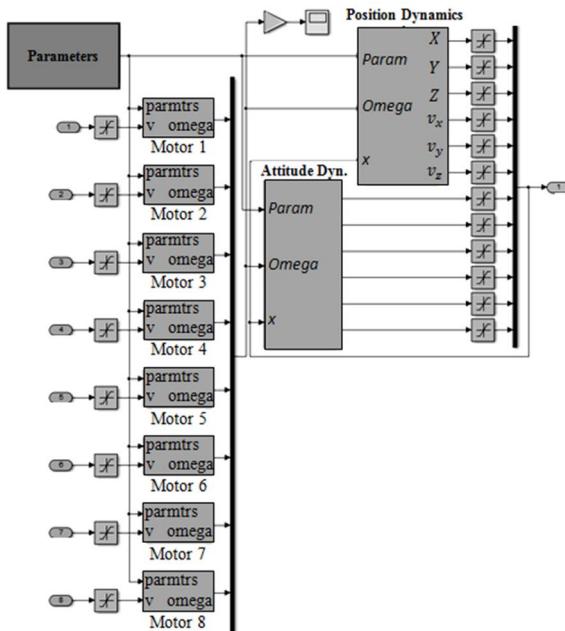
در این بخش، به تشریح کنترل کننده طراحی شده پرداخته می‌شود. همان‌طور که ذکر شد، ربات پرنده هشت ملخه، یک سیستم زیرفعال با شش درجه آزادی می‌باشد. بنابراین به منظور ثبات در پایداری وضعیت، از کنترل کننده حلقه داخلی استفاده می‌شود (شکل ۴).

4-1- کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق پذیر

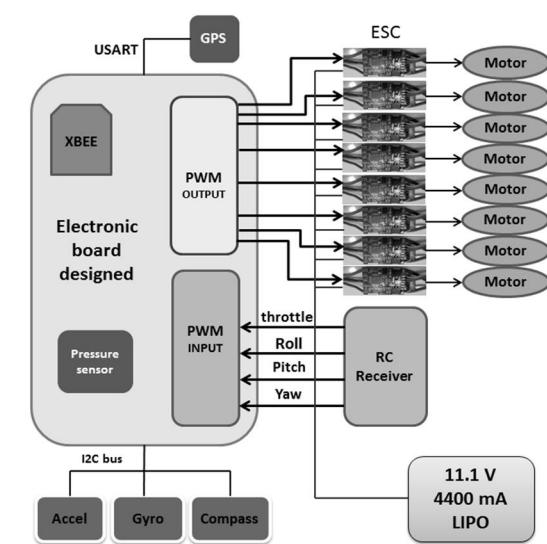
بیش از 90 درصد کنترل کننده‌های کاربردی و عملی کنترل کننده‌های تناسبی-انتگرالی-مشتق پذیر هستند [8]. یکی از علت‌های آن ساده بودن پیاده‌سازی آن بصورت گسسته است. در عمل این کنترل کننده‌ها می‌توانند با امکاناتی ساده مانند میکرو کنترل کننده‌های 8 بیت پیاده‌سازی و بهره‌برداری شوند. رابطه تناسبی-انتگرالی-مشتق پذیر پیوسته شامل حاصل جمع سه بخش تناسبی، انتگرالی و مشتقی می‌باشد که به ترتیب دارای ضرایب K_p و K_d و K_i می‌باشند. در کنترل کننده‌ای-انتگرالی-مشتق پذیر 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 کنترل کننده‌ای-انتگرالی-مشتق پذیر در حوزه زمان، فرکанс و نوع گسسته آن می‌باشد:

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

نمی‌دایره 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 ۱.۵ متری رفته و مسیر قرمز رنگ که مسیر مطلوب می‌باشد را دنبال می‌کند.



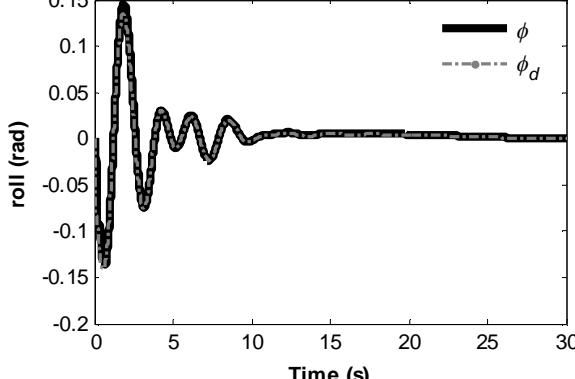
شکل 7 بلوک شبیه‌سازی مدل دینامیکی ربات پرنده هشت‌ملخه



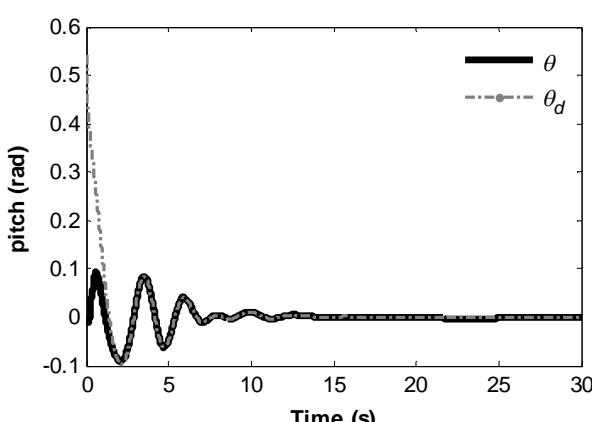
شکل 5 ساختار کنترلی ربات پرنده هشت‌ملخه

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.



شکل 8 زاویه رول با کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر در شبیه‌سازی



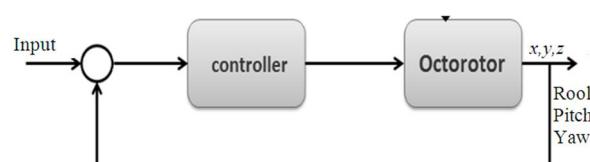
شکل 9 زاویه پیچ با کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر در شبیه‌سازی

1-5- کنترل وضعیت ربات پرنده

در این قسمت به تشریح نتایج شبیه‌سازی بدون حضور اغتشاش پرداخته می‌شود. همان‌طور که در شکل‌های Roll¹ و Pitch² و Yaw³ و یا وو³ 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 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 خطأ 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.

2-5- ریدیابی مسیر توسط ربات پرنده

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



شکل 6 دیاگرام کنترلی ربات پرنده

شکل 6 دیاگرام کنترلی ربات پرنده

¹ Roll

² Pitch

³ Yaw

جدول ۱ مقادیر پارامترهای هندسی، دینامیکی و کنترلی سیستم

Table. 1 Dynamic and Control Parameters of the System	
$l = 0.232 \text{ (m)}$	$b = 3.13e - 5$
$d = 9e - 5$	$m = 1.2 \text{ (kg)}$
$I_x = 0.006228 \text{ (kgm}^2)$	$I_y = 0.006228 \text{ (kgm}^2)$
$I_z = 0.001125 \text{ (kgm}^2)$	$J_{TP} = 154e - 7 \text{ (kgm}^2)$
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 ۱۳) در یک ارتفاع ثابت از دکمه‌ای که بر روی ریموت قرار دارد و از قبل در کد ربات ارتفاع را در ۱۵ متری تعیین شده، استفاده می‌گردد. نمودارهای بدست آمده کنترل کننده تناوبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر از زوایای وضعیت ربات در حین حرکت در مسیر از پیش تعیین شده برای حرکت خودمختار ربات می‌گردد. شکل ۱۴ نمای بالایی از مسیر تعیین شده برای حرکت خودمختار ربات را باشد که قرار است ربات یک مسیر مستطیل شکل و یک مسیر مربعی را حول یک ساختمانی طی نماید.

همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، ربات پرنده که مسیر پرواز واقعی آن را 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 ۱۳ ربات پرنده هشت ملخه ساخته شده



Fig. 14 Defined Trajectory for Octorotor Flying Robot

شکل ۱۴ نمایی از مسیر تعیین شده برای حرکت ربات پرنده

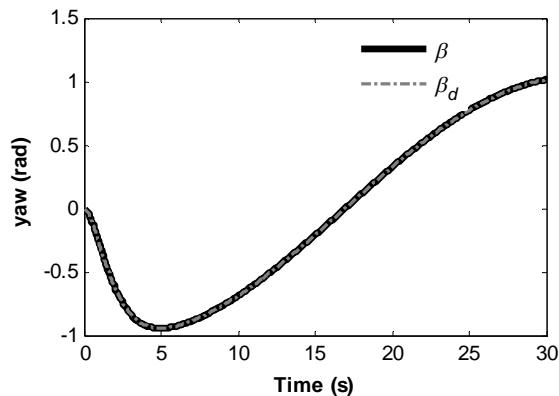


Fig. 10 Yaw Angle in Simulation using PID Controller

شکل ۱۰ زاویه یاوه با کنترل کننده تناوبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر در شبیه‌سازی

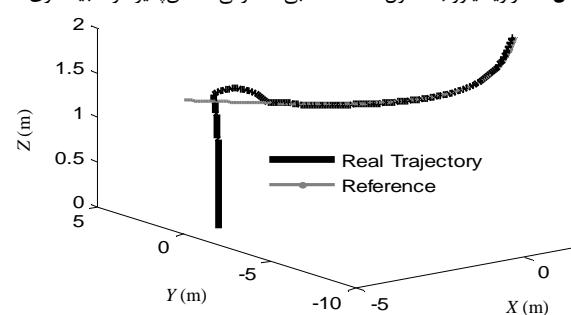


Fig. 11 Robot Trajectory using PID Controller

شکل ۱۱ مسیر حرکت ربات با درنظر گرفتن کنترل کننده تناوبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر

همچنین نمودارهای شکل ۱۲ هزینه‌های کنترلی یا سیگنال‌های کنترلی بدست آمده از شبیه‌سازی وضعیت ربات را نشان می‌دهد.

۶- 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 یاوه 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 یاوه در کنترل کننده تناوبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر از نرم‌افزار متلب/سیمولینک استفاده شده است.

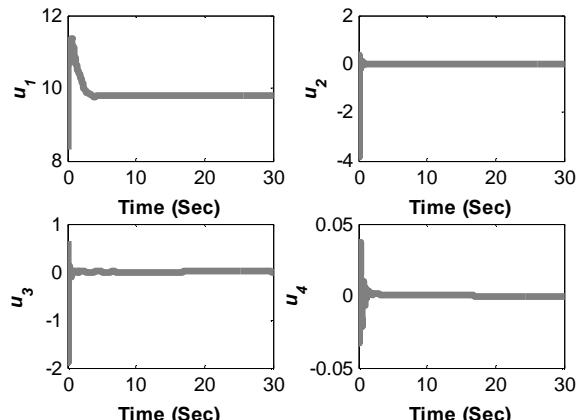


Fig. 12 Simulation Results of Controller Input Signals

شکل ۱۲ نتایج شبیه‌سازی سیگنال‌های ورودی کنترلی

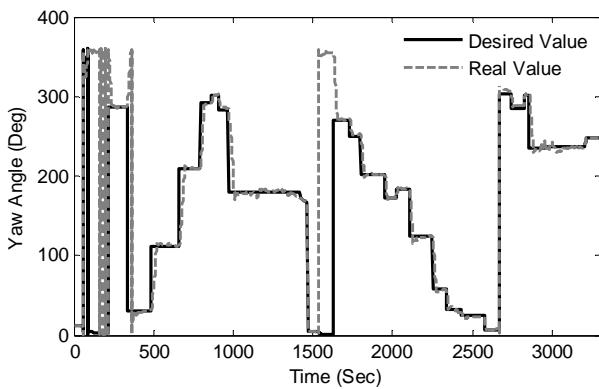


Fig. 18 Output Results for Yaw Angle

شکل 18 نتایج مقدار خروجی و بدست آمده زاویه یاوه

مقدار این خطاهای 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

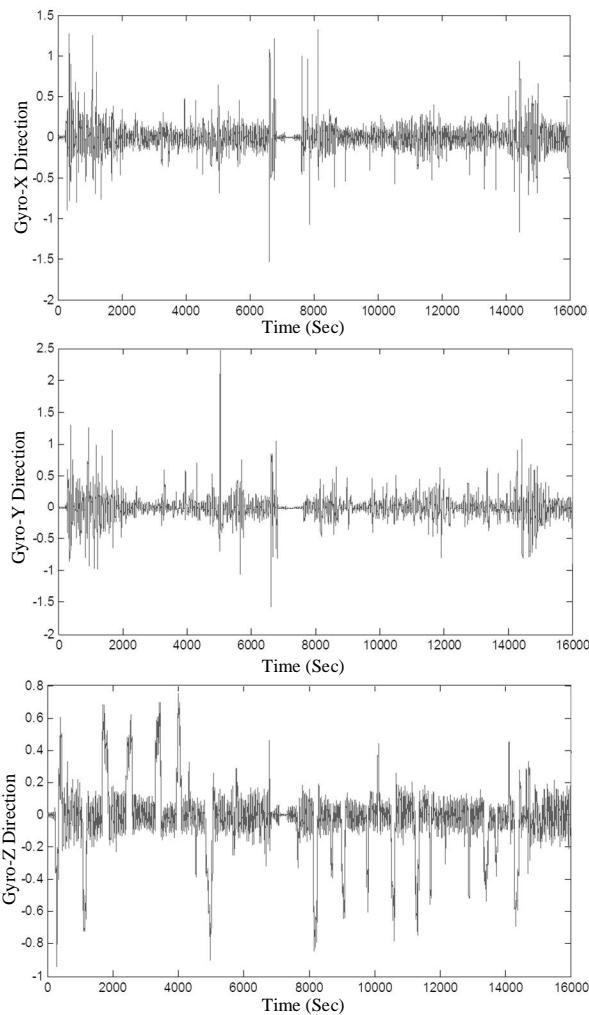
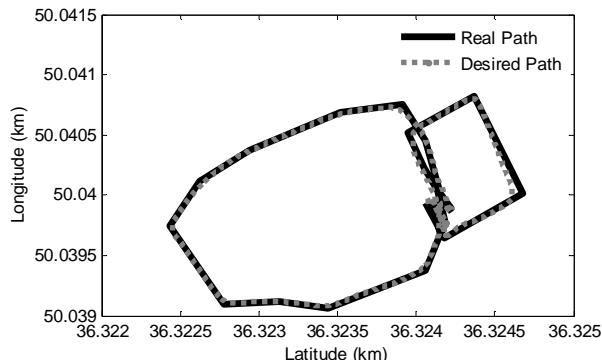


Fig. 19 Results of Gyroscope Sensor

شکل 19 نتایج حسگر ژیروسکوپ بسته



شکل 15 ردیابی مسیر در پرواز واقعی توسط ربات پرنده هشت‌ملخه

همان‌طور که در نمودارهای حاصل از پیاده‌سازی وضعیت در شکل‌های 16، 17 و 18 بدست آمده است، تفاوت میان نتایج زوایای ورودی و خروجی با تلفانس 3 درجه می‌باشد که این نشان از عملکرد نسبتی قابل قبول کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌پذیر در برابر اختشاش می‌باشد.

6-1- نتایج حسگرهای

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

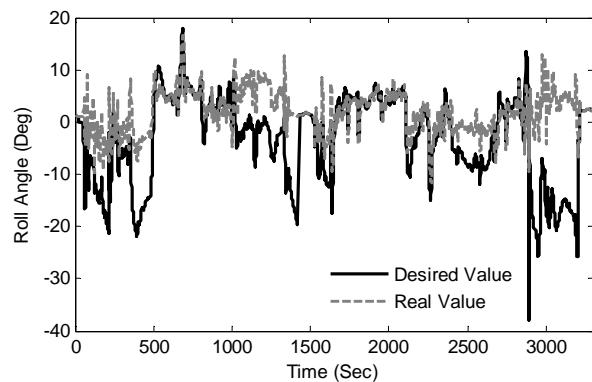


Fig. 16 Output Results for Roll Angle

شکل 16 نتایج مقدار خروجی و بدست آمده زاویه رول

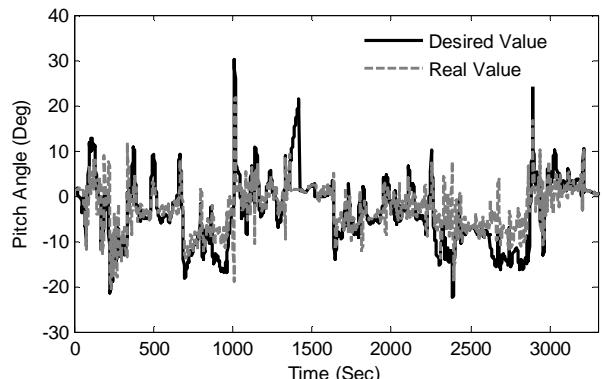


Fig. 17 Output Results for Pitch Angle

شکل 17 نتایج مقدار خروجی و بدست آمده زاویه پیچ

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

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

7- نتیجه‌گیری

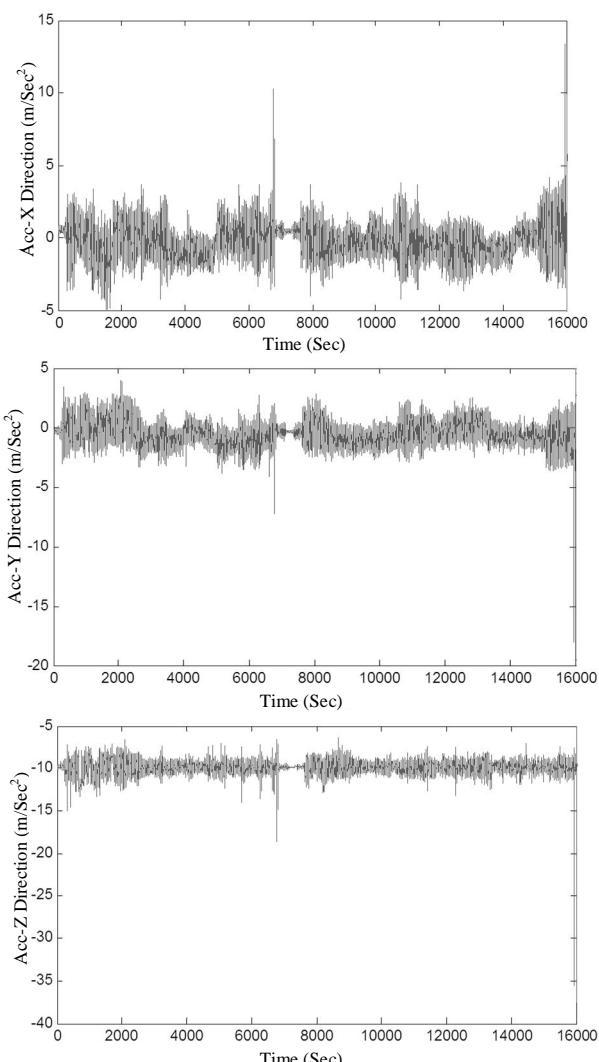
در این مقاله، به منظور افزایش توان ربات پرنده در محیط بیرون اتفاق و همچنین مقابله با اختشاشاتی مانند باد، تعداد موتورهای یک ربات پرنده چهارملخه به هشت موتور افزایش پیدا کرده است که این کار باعث تغییر کمی در ساختار ربات و مدل دینامیک آن گردید. در شبیه‌سازی‌های انجام شده که در نرم‌افزار متلب/سیمولینک بر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

8- فرست علایم

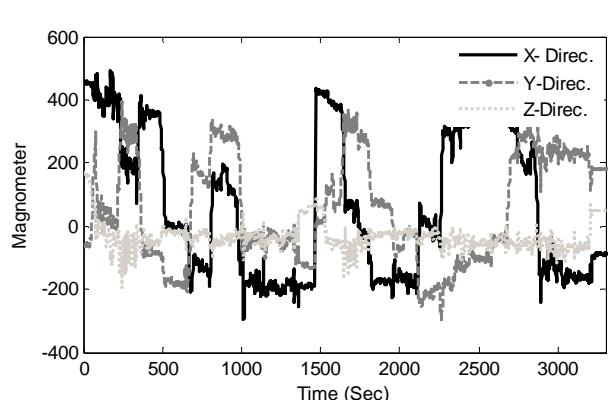
ضریب تراست	b
ضریب درگ	d
شتات گرانش	g
ممان اینرسی حول محور x (kgm^2)	I_x
ممان اینرسی حول محور y (kgm^2)	I_y
ممان اینرسی حول محور z (kgm^2)	I_z
ممان اینرسی دورانی (kgm^2)	J_{TP}
ضریب ثابت مکانیکی موتور (NMmA^{-1})	K_M
ضریب ثابت الکترونیکی موتور (Vsrad^{-1})	K_E
طول بازوی ربات (m)	l
جرم ربات (kg)	m
مقاومت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



شکل 20 بسته نتایج حسگر شتاب‌سنجد



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 کالibrاسیون 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. Vaitheswaran, 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. Ariffan, 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. Lafaverges, 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 backstepping control for a quadrotor unmanned aerial vehicles, *American Control Conference*, Concordia University Montreal, Canada, pp. 5887-5892, 2007.
- [12] A. Bhate, 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 Chines Control 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*