

## (یادداشت فنی)

## طراحی ربات پرنده بر پایه پلتفرم تلفن هوشمند

رشد و استفاده از تلفن‌های همراه هوشمند به موضوعی فراگیر در کشورهای مختلف تبدیل شده است. از سوی دیگر، یکی از فناوری‌های جدید و کاربردی که توانسته علاقمندان زیادی را به خود جلب کند، پهپادهای عمود پرواز غیرنظامی یا همان مولتی‌روتورها می‌باشد. قابلیت‌های متنوع و بعضاً منحصر بفرد ربات‌های پرنده (هواگردهای بدون سرنشین) در مقایسه با هواگردهای سرنشین‌دار، در کنار هزینه‌های عملیاتی به مراتب پایین‌تر این وسایل موجب افزایش بهره‌برداری و توسعه کاربردهای جدید ربات‌های پرنده طی سالیان اخیر شده است. یکی از راه‌های توسعه و کاربردی نمودن ربات‌های پرنده برای عموم مردم، کاهش هزینه تمام‌شده ربات‌های پرنده، در دسترس بودن و استفاده آسان و بدون آموزش‌های خاص برای این وسایل است. راه حل پیشنهادی این مجموعه برای این موضوع، توسعه «ربات‌های پرنده موبایل‌پایه» است.

**واژه‌های کلیدی:** پهپاد، کوادکوپتر، تلفن همراه هوشمند، تخمین و کنترل وضعیت

قاسم کاهه<sup>۱\*</sup>، نیما کریمی<sup>۱\*\*</sup>، مجید حمزه‌پور<sup>۱\*\*</sup> و علیرضا قادری<sup>۱\*\*</sup>

۱- پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران، کدپستی: ۱۴۶۶۵-۸۳۴

\* استادیار (نویسنده پاسخگو)، ایمیل:

kahe@ari.ac.ir

\*\* کارشناس پژوهشی

## Design of a Mobile-based Flying Robots

The growth and use of smartphones have become a pervasive issue in many countries. On the other hand, one of the new and applied technologies that have been able to attract many enthusiasts is the civilian vertical drones or multi-rotors. The diverse and sometimes unique capabilities of flying robots (unmanned aerial vehicles) compared to manned aircraft, along with the much lower operating costs of these devices, have increased the exploitation and development of new applications of flying robots in recent years. One way to develop and implement flying robots for the general public is to reduce the cost of flying robots, making them accessible and easy to use without special training for these devices; The proposed solution for this issue is the development of mobile-based flying robots.

**Keywords:** UAV, Quadcopter, Smart Phone, Attitude Estimation and Control

G. Kahe<sup>1\*</sup>, N. Karimi<sup>1\*\*</sup>, M. Hamzhepour<sup>1\*\*</sup>, and A. Ghaderi<sup>1\*\*\*</sup>

1- Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Postal Code: 14665-834, Tehran, IRAN

\* Assistant Professor (Corresponding Author); Email:

kahe@ari.ac.ir

\*\* Research Expert

## (یادداشت فنی)

قاسم کاهه، نیما کریمی، مجید حمزه پور و علیرضا قادری

در ادامه و در بخش ۲ مطالعه تطبیقی ربات پرنده بر پایه پلتفرم تلفن همراه هوشمند ارائه شده است. در بخش ۳ طراحی مفهومی و اولیه با تمرکز بر تعیین وضعیت و پایداری ارائه شده است. در بخش ۴ طراحی اتاقک تست شامل جایابی، ابعاد و تجهیزات ارائه شده است. در نهایت ۶ نتیجه‌گیری، ادامه کار و پیشنهادات ارائه شده است.

### ۲- کارهای مرتبط

یکی از موفق‌ترین نمونه‌های پهپادهای توسعه داده شده براساس پلتفرم تلفن همراه هوشمند، پرندهٔ ایکس-کرفت<sup>۳</sup> یا همان فون درون<sup>۴</sup> می‌باشد [۱]. این طرح شامل یک قاب نگهدارنده برای سازه اصلی و موتورهای می‌باشد. در این پروژه تلفن همراه در قسمت بالایی محاط به موتورها و پره‌ها قرار گرفته و یک درب بالای آن قرار می‌گیرد. این پلتفرم براساس دو سیستم عامل اندروید و آی-اُس بوده و به صورت تجاری نیز در بازار موجود است. در این پروژه ارتباط بین پهپاد و زمین از طریق اینترنت بیسیم برقرار می‌شود. همچنین، از نکات مثبت این طرح می‌توان به حجم کوچک پلتفرم توسعه داده شده با نصب موتورها و ملخ بر روی بازوهای جمع شونده می‌باشد. تصویر این طرح در ادامه شکل ۱ آورده شده است.

یکی دیگر از تلاش‌های صورت گرفته جهت تبدیل تلفن همراه هوشمند به پرنده توسط شرکت ال‌جی<sup>۵</sup> کره جنوبی انجام شده است [۲]. این شرکت چندی پیش با انتشار یک کلیپ اعلام کرد قصد دارد نخستین موبایل پرنده جهان را به تولید انبوه برساند. این طرح که یوپلاس<sup>۶</sup> نام دارد هنوز در دست توسعه است و تا این لحظه هنوز به صورت تجاری در بازار عرضه نشده است. یوپلاس تلفن همراهی است که در قسمت درب پشت خود دو موتور الکتریکی دارد که نیروی پیشران این دو موتور قادر است تلفن همراه را به پرواز در بیاورد. قطعاً مشکلات فناوری از جمله کنترل وسیله و تامین توان، همچنین الگوریتم‌های هوش مصنوعی مرتبط با نحوه پرواز وسیله از جمله مواردی است که در زمره چالش‌های این طرح قرار دارند. یکی دیگر از طرح‌های موجود در پلتفرم تلفن‌های همراه پرنده، پروژه مشترک دانشگاه پنسیلوانیا و شرکت سازنده پردازنده تلفن‌های همراه کوالکام<sup>۷</sup> می‌باشد [۳]. در این طرح دانشگاه پنسیلوانیا با استفاده از یک گوشی

### ۱- مقدمه

رشد و استفاده از تلفن‌های همراه هوشمند به موضوعی فراگیر در کشورهای مختلف تبدیل شده است. از سوی دیگر، یکی از فناوری‌های جدید و کاربردی که توانسته علاقمندان زیادی را به خود جلب کند، پهپادهای عمود پرواز غیرنظامی یا همان مولتی‌روتورها می‌باشد. قابلیت‌های متنوع و بعضاً منحصر بفرد ربات‌های پرنده (هواگردهای بدون سرنشین) در مقایسه با هواگردهای سرنشین‌دار، در کنار هزینه‌های عملیاتی به مراتب پایین‌تر این وسایل، موجب افزایش بهره‌برداری و توسعه کاربردهای جدید ربات‌های پرنده طی سالیان اخیر شده است. هرچند امروزه بهره‌برداری از ربات‌های پرنده در کاربردهای نظامی و صنعتی امری اجتناب‌ناپذیر می‌نماید ولی کماکان ظرفیت استفاده از این ربات‌های پرنده کاربردی در فعالیتهای روزمره مردم مغفول مانده است. یکی از راه‌های توسعه و کاربردی نمودن ربات‌های پرنده برای عموم مردم، کاهش هزینه تمام‌شده ربات‌های پرنده، در دسترس بودن و استفاده آسان و بدون آموزش‌های خاص برای این وسایل است. راه حل پیشنهادی این مجموعه برای این موضوع، توسعه «ربات‌های پرندهٔ موبایل‌پایه» است.

با توجه به گسترش استفاده از تلفن‌های همراه هوشمند توسط مردم - اشاره به دسترس بودن و راحتی کار با موبایل‌های هوشمند- و همچنین بهره‌مند شدن از تجهیزات و فناوری‌های بکاررفته در تلفن‌های هوشمند، این مجموعه به دنبال طراحی و ساخت ربات پرنده‌ای است که اساس آن را تلفن‌های موبایل هوشمند تشکیل داده‌اند. ربات پرنده موبایل پایه مورد نظر که پیکره‌بندی یک کوادکوپتر<sup>۱</sup> را خواهد داشت، به گونه‌ای ساخته می‌شود که یک تلفن همراه در مرکز ربات پرنده نصب شده تا بتوان از پردازشگر، حافظه، دوربین، موقعیت‌یاب، قطب‌نما، شتاب‌سنج‌ها و سنسورهای مختلف یک موبایل هوشمند برای انجام مأموریت تصویربرداری توسط ربات پرنده بهره‌برد. شایان ذکر است، استفاده از ظرفیت بالقوه تلفن‌های هوشمند سبب می‌شود هزینه‌های ساخت پرنده کاهش یافته و پیچیدگی توسعه و هزینه نهایی ربات پرنده کاهش یابد. از مواردی که این تیم درصدد است در محصول ربات پرنده موبایل‌پایه پیاده‌سازی نماید، کاربر پسند بودن<sup>۲</sup> و راحتی کار با نرم‌افزار هدایت و کنترل این ربات‌ها است و پیش‌بینی می‌شود. همین امر سبب محبوبیت بیشتر و گسترش بازار بهره‌برداران این محصول به عموم مردم شود.

3. Xcraft

4. Phone Drone

5. LG

6. U-Pluse

7. Qualcomm

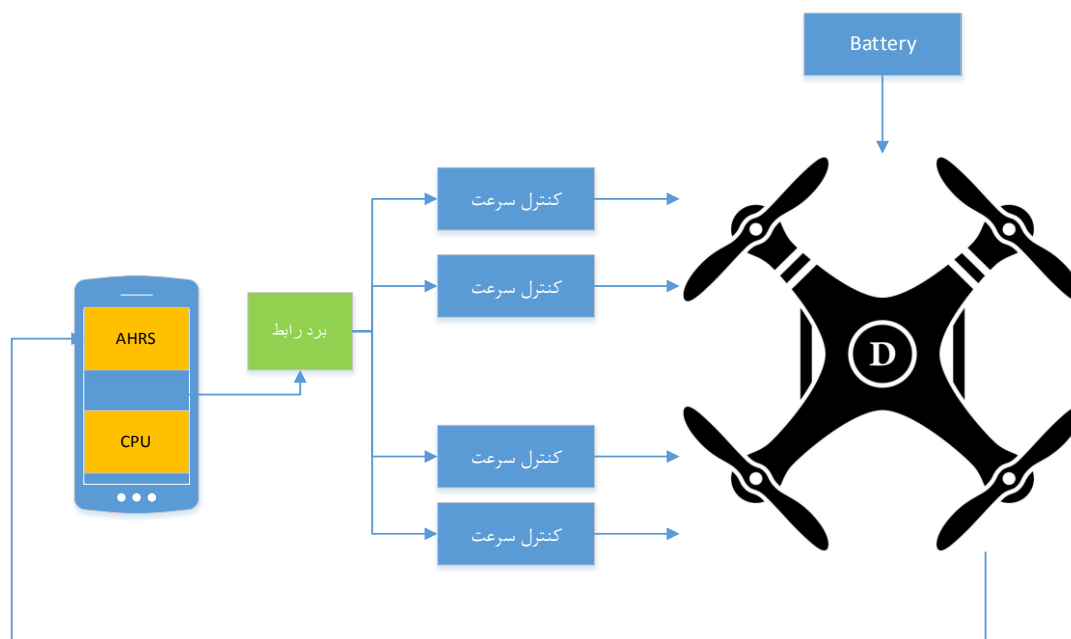
1. Quadcopter

2. User Friendly

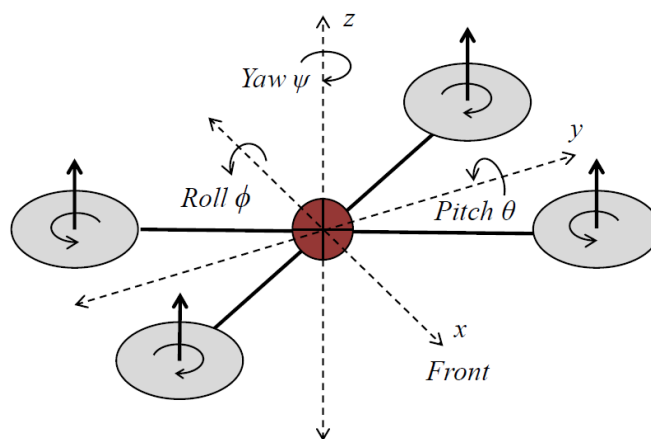


## (یادداشت فنی)

قاسم کاهه، نیما کریمی، مجید حمزه پور و علیرضا قادری



شکل (۲): معماری ربات پرنده بر پایه تلفن همراه هوشمند.



شکل (۳): چارچوب بدنی تعیین شده برای پهپاد.

$$\hat{a} = a + a_b + a_\eta \quad (1)$$

که  $\hat{a}$  خروجی شتابسنج یا مقدار شتاب اندازه‌گیری شده،  $a$  مقدار شتاب واقعی،  $a_b$  مقدار بایاس یا اریبی شتابسنج و  $a_\eta$  نویز گاوسی با میانگین صفر جمع شونده است. در واقع، در اینجا برای سادگی مدل همه خطاهای دیگر شتابسنج در قالب یک نویز گاوسی مدل شده‌اند. برای تعیین وضعیت با استفاده از شتابسنج باید شتاب ناشی از حرکت زاویه‌ای که توسط حسگر اندازه‌گیری می‌شود، را مد نظر قرار داد. برای این منظور می‌توان از تبدیل بردار شتاب خطی به زوایای اولر بهره برد که عبارت است:

$$\theta = \text{atan} \left( \frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \right) \quad (2)$$

## ۳-۱- تعیین وضعیت پهپاد

تلفن‌های همراه هوشمند دارای حسگرهای متنوعی هستند که از جمله آنها حسگرهای اینرسی شامل شتابسنج، جایرو، مغناطیس‌سنج و حسگر تراز می‌توان اشاره نمود. علاوه بر این، غالب تلفن‌های هوشمند دارای موقعیت‌یاب نیز هستند. بنابراین، به کمک این حسگرها می‌توان وضعیت ربات پرنده که برای کنترل و پایداری کاربرد دارد، را تخمین زده و موقعیت‌یاب نیز برای هدایت و کنترل مسیر ربات پرنده استفاده می‌شود. شتابسنج یکی از مهم‌ترین حسگرها در بحث ناوبری اینرسی است که شتاب خطی در راستای محور حساسیت را اندازه‌گیری می‌نماید. یک مدل ساده از اندازه‌گیری شتاب توسط شتابسنج در معادله (۱) نشان داده شده است [۲]:

زاوایای وضعیت را به صورت مطلق و با دقتی مشخص تخمین زد. یکی از فناوری‌های رایج برای ساخت مغناطیس‌سنج فناوری ممز است که در آن براساس نیروی لورنتز میدان مغناطیسی در جهات مختلف اندازه‌گیری می‌شود. نیروی لورنتز ناشی از میدان مغناطیسی زمین باعث تغییر در فترها و سپس تغییر در مقدار ظرفیت خازن‌ها می‌شود که براساس آن مقدار نیرو و سپس میدان مغناطیسی محاسبه می‌شود. به کمک مغناطیس‌سنج می‌توان وضعیت را به صورت مطلق و نه نسبی تخمین زد ولی دقت آن کم است و به تنهایی برای تخمین وضعیت استفاده نمی‌شود. یک مدل ساده برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی توسط مغناطیس‌سنج در معادله زیر نشان داده شده است [۳]:

$$\hat{y} = y + y_b + y_\eta \quad (5)$$

که  $\hat{y}$  خروجی مغناطیس‌سنج،  $y$  مقدار واقعی کمیت اندازه گیری،  $y_b$  بایاس مغناطیس‌سنج و  $y_\eta$  نویز گاوسی که یک کمیت جمعیتی برای بقیه خطاهای حسگر در نظر گرفته شده است. بنابراین، بعد از نصب مغناطیس‌سنج باید به طور دقیق کالیبره شود تا اثرات تداخل‌های اطراف آن به حداقل برسد. یک روش کاربردی برای کالیبراسیون ضریب مقیاس و انحراف مغناطیس‌سنج، کالیبراسیون پنجره‌ای مغناطیس‌سنج است که در یک بازه زمانی مشخص که پرنده حول همه محورها در چرخش است، مقادیر کمینه و بیشینه مغناطیس‌سنج ( $M$ ) تعیین و سپس براساس آن مقادیر مغناطیس‌سنج طبق معادلات زیر کالیبره می‌شود [۴]:

$$\begin{aligned} \hat{M}_x &= 2 \cdot \frac{M_x - \min(M_x)}{\max(M_x) - \min(M_x)} - 1 \\ \hat{M}_y &= 2 \cdot \frac{M_y - \min(M_y)}{\max(M_y) - \min(M_y)} - 1 \\ \hat{M}_z &= 2 \cdot \frac{M_z - \min(M_z)}{\max(M_z) - \min(M_z)} - 1 \end{aligned} \quad (6)$$

مقدار زاویه یاو، هنگامی که پرنده در وضعیت پایدار افقی قرار دارد ( $\theta = 0$ )، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\psi = \text{atan2}\left(\frac{\hat{M}_y}{\hat{M}_x}\right) \quad (7)$$

این معادله هنگامی که مغناطیس‌سنج در حالت افقی قرار ندارد دچار خطا می‌شود. بنابراین، اگر پرنده دچار شیب شود مقدار زاویه یاو براساس مقادیر  $\theta$  و  $\phi$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\psi_z = \tan^{-1} \left( \frac{\hat{M}_z \cdot \sin(\phi) - \hat{M}_y \cdot \cos(\phi)}{(\hat{M}_z \cdot \cos(\theta) + \hat{M}_y \cdot \sin(\theta) \sin(\phi) + \hat{M}_x \cdot \sin(\theta) \cos(\phi))} \right) \quad (8)$$

همان گونه که در این معادله مشخص است، در صورت انحراف پرنده از حالت افقی، مقادیر خروجی مغناطیس‌سنج براساس

با توجه به تعریف چارچوب مرجع در بخش‌های قبلی، برای بدست آوردن نرخ زاویه‌ای حول محور  $Y$  باید مقدار نیروی وارد شده بر دو محور  $Z$  و  $Y$  محاسبه شود. برای به دست آوردن سرعت زاویه‌ای حول محور  $X$ ، مقدار نیروی وارد شده بر دو محور عمود بر آن یعنی  $Z$  و  $Y$  باید محاسبه شود. شتاب‌سنج به تنهایی امکان تخمین وضعیت را فراهم نمی‌کند و نمی‌توان براساس آن وضعیت کامل و سه بعدی را تخمین زد. علاوه بر این، به لحاظ اینکه محور حساسیت در راستای محورهای چارچوب مرجع نصب شده و باید نسبت به شتاب‌های خطی بیشترین حساسیت را داشته باشند، ارتعاشات و نواسانات باعث می‌شوند که تخمین‌های وضعیت براساس آنها به شدت تحت تاثیر قرار گرفته و نویزی شوند.

جایرو یکی دیگر از حسگرهای بسیار مهم در بحث ناوبری اینرسی است که سرعت زاویه‌ای یا نرخ زاویه‌ای را در راستای محور حساسیت اندازه‌گیری می‌نماید. یک مدل ساده از اندازه‌گیری شتاب توسط شتاب‌سنج در معادله زیر نشان داده شده است [۲]:

$$\hat{w} = w + w_b + w_\eta \quad (3)$$

که  $\hat{w}$  خروجی شتاب‌سنج یا مقدار شتاب اندازه‌گیری شده،  $w$  مقدار شتاب واقعی،  $w_b$  مقدار بایاس یا اریبی شتاب‌سنج و  $w_\eta$  نویز گاوسی با میانگین صفر جمع شونده است. در واقع، در اینجا برای سادگی مدل همه خطاهای دیگر شتاب‌سنج در قالب یک نویز گاوسی مدل شده‌اند. با توجه به اینکه جایروهای نرخی سرعت زاویه‌ای را اندازه‌گیری می‌کنند، بنابراین برای به دست آوردن تغییرات زاویه‌ای یا وضعیت ربات پرنده، خروجی جایرو نسبت به زمان انتگرال‌گیری شود:

$$\begin{aligned} \theta &= \int_0^t \dot{\theta} \cdot dt \\ \phi &= \int_0^t \dot{\phi} \cdot dt \\ \psi &= \int_0^t \dot{\psi} \cdot dt \end{aligned} \quad (4)$$

همان گونه که در این معادله نشان داده شده است، زاوایای اولر شامل رول، پیچ و یاو از انتگرال زمانی کمیت‌های  $\phi$ ،  $q$  و  $r$  به دست می‌آید. شتاب‌سنج و جایرو امکان تخمین وضعیت نسبت به وضعیت اولیه را فراهم می‌کنند. بنابراین، با توجه به وجود انتگرال‌گیر در محاسبات، انحراف زمانی آن زیاد بوده و به یک مرجع برای تصحیح خطا نیاز است.

حسگر مغناطیس‌سنج میدان مغناطیسی را بر حسب گاوس یا تسلا در راستای محور حساسیت اندازه‌گیری کرده و براساس مدل مغناطیسی زمین و مقدار اندازه‌گیری شده آن، می‌توان

## (یادداشت فنی)

قاسم کاهه، نیما کریمی، مجید حمزه پور و علیرضا قادری

شکل ۵ معماری فیلتر EKF شامل دو مرحله اصلی پیش‌بینی و بروزرسانی را نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل مشخص است در مدل دینامیکی سیستم، نرخ زاویه‌ای که توسط جایرو اندازه‌گیری می‌شود به عنوان ورودی سیستم بوده و براساس آن متغیرهای حالت محاسبه و پیش‌بینی می‌شوند. سپس، در مرحله بعد یعنی مرحله بروزرسانی فیلتر EKF براساس وضعیت و دینامیک سیستم زوایا را با استفاده از شتابسنج و مغناطیس‌سنج اندازه‌گیری نموده و براساس آن بروزرسانی متغیرهای حالت که در مرحله پیش‌بینی محاسبه شده بودند، انجام می‌شود. در واقع، این فیلتر مشکل دریافت زمانی جایرو را با استفاده از حسگرهای مغناطیس‌سنج و شتابسنج جبران نموده و در زمان‌هایی که اطلاعات زاویه‌ای شتابسنج و مغناطیس‌سنج معتبر است، تخمین زاویه را اصلاح می‌نماید.

برای نوشتن معادلات، متغیر حالت سیستم را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$\hat{x} = [q^{nb} \omega^b x_g] \quad (9)$$

که در آن،  $q^{nb} = [q_1 q_2 q_3 q_4]$  بیان وضعیت با استفاده از کمیت‌های کواترنیون در چارچوب بدنه،  $\omega^b = [\omega_x \omega_y \omega_z]$  نرخ زوایه‌ای بدون بایاس در چارچوب بدنه و  $x_g = [\omega_{bx} \omega_{by} \omega_{bz}]$  بایاس جایرو در راستای سه محور هستند. با مشخص شدن متغیرهای حالت، دینامیک سیستم را براساس متغیرهای حالت باید استخراج نموده و براساس آن معادلات فیلتر کالمن توسعه یافته استخراج شود. دینامیک وضعیت سیستم بر حسب دینامیک کواترنیون و ورودی نرخ زاویه‌ای که توسط جایرو فراهم می‌شود، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$q_{(k+1)}^{nb} = \left( \cos(\|w\|) I_{4 \times 4} + \frac{\sin(\|w\|)}{\|w\|} W \right) q_{(k)}^{nb} \quad (10)$$

که در واقع حل بسته معادله  $\dot{q} = \frac{1}{2} \omega q$  است و  $w$  عبارت است از:

$$W = \begin{bmatrix} 0 & -w_1 & -w_2 & -w_3 \\ w_1 & 0 & -w_3 & w_2 \\ w_2 & w_3 & 0 & -w_1 \\ w_3 & -w_2 & w_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

طبق مدل اندازه‌گیری جایرو تغییرات نرخ زاویه‌ای برابر است با اختلاف خروجی جایرو و مقدار بایاس و داریم:

$$\omega_{(k+1)}^b = - \left( y_{g(k)} - x_{g(k)} \right) \quad (12)$$

تغییرات مقدار بایاس جایرو وابسته به تغییرات زمانی یا سرعت تغییرات آن است و به صورت زیر مدل می‌شود:

$$x_{g(k+1)} = (1 - \lambda_{xg} \Delta t) x_{g(k)} \quad (13)$$

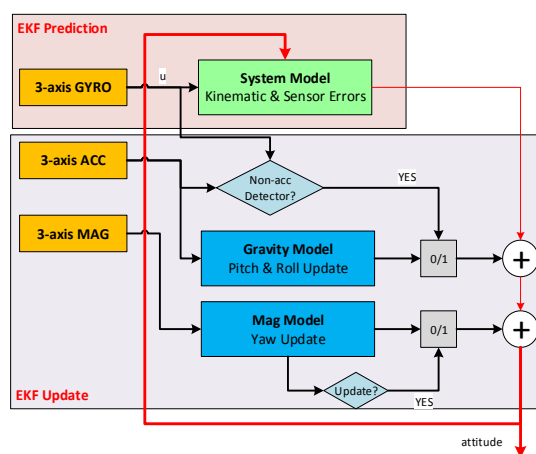
که در آن،  $\lambda_{xg}$  فاکتور همبستگی زمانی بایاس است که سرعت تغییرات زمانی بایاس جایرو را مشخص می‌کند. با این توضیحات مدل دینامیکی سیستم به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$\dot{X} = F_x X + F_u U \quad (14)$$

زوایای  $\theta$  و  $\phi$  و با استفاده از ماتریس دوران تبدیل شده و سپس مقدار زاویه یاو محاسبه می‌شود. یکی دیگر از مشکلات مغناطیس‌سنج، همراستا نبودن شمال مغناطیسی با شمال جغرافیایی زمین و نیز تغییرات میدان مغناطیسی زمین نسبت به موقعیت جغرافیایی است که باعث می‌شود محاسبه وضعیت براساس اندازه‌گیری میدان مغناطیسی مستلزم ملاحظات مختلف باشد.

### ۳-۲- تلفیق جایرو، شتابسنج و مغناطیس‌سنج برای تخمین وضعیت

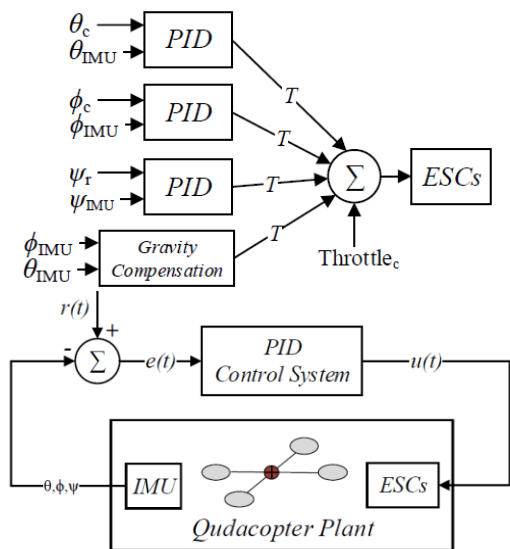
برای تلفیق حسگرهای جایرو، شتابسنج و مغناطیس‌سنج به منظور تخمین وضعیت از فیلتر کالمن توسعه یافته EKF در چارچوب کواترنیون بهره می‌بریم [۱۵-۱۱]. برای این منظور ابتدا نرخ زاویه‌ای را به منظور تخمین اولیه وضعیت در فضای کواترنیون استفاده می‌کنیم. با توجه به انحراف زمانی تخمین وضعیت از طریق جایروسنج و مغناطیس‌سنج حس می‌شود صحیح از طریق شتابسنج و مغناطیس‌سنج اصلاح شود. شتابسنج دریف وضعیت ناشی از بایاس جایرو اصلاح شود. شتابسنج هنگامی که در راستای افقی قرار می‌گیرد و یکی از محورهای آن کاملاً منطبق بر محور جاذبه زمین قرار می‌گیرد، می‌توان وضعیت نسبی را از طریق دو زاویه در راستای محور جاذبه و محور افقی به دست آورد. همچنین، مغناطیس‌سنج هنگامی که یکی از محورهای آن در راستای میدان مغناطیسی شمال قرار می‌گیرد، می‌تواند زاویه دیگری را تخمین زده و بنابراین به کمک شتابسنج و مغناطیس‌سنج دریافت زمانی جایرو اصلاح می‌شود.



شکل (۴): ساختار فیلترینگ استفاده شده برای تخمین وضعیت.

#### 1. Quaternion

ساختار کنترلی در شکل ۵ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل مشخص است،  $r(t)$  خروجی هدف یا مطلوب سیستم کنترلی است که براساس وضعیت جاری، خطا محاسبه شده و سپس با استفاده از کنترلر PID سعی می‌شود وضعیت جاری به وضعیت مطلوب تغییر یابد. در واقع، ورودی کنترلی به کوادکوپتر یک بردار تراسست برای چهار موتور به صورت  $T=[T_1, T_2, T_3, T_4]$  است و  $r(t)$  خروجی هدف یا مطلوب نیز به صورت یک بردار چهار عضوی  $r=[\theta_c, \phi_c, \psi_c, T_c]$  تعریف می‌شود که در واقع بیانگر وضعیت و نیروی پیشران مطلوب را نشان می‌دهد.



شکل (۵): ساختار کنترلی (پایین) و کنترلر (بالا) ربات پرنده مبتنی بر تلفن هوشمند [۴].

#### ۴- تجهیزات آزمون

یکی از مشکلات عملیاتی در بهره برداری از پهپادهای مولتی روتور احتمال ایجاد سانحه در پروازهای نخست توسط کاربر می‌باشد که این امر ناشی از ناکافی بودن تجربه پروازی کاربران می‌باشد. این موارد سبب بروز سانحه و خسارت مالی زیاد و بعضاً صدمات جانی به کاربران می‌شود. برای این منظور اتاقک آزمون ربات پرنده طراحی شده است تا بتوان با آن تست‌های پروازی پهپاد مولتی روتور را در محیطی ایمن و بدون احتمال سانحه برای پرنده و کاربران برگزار نمود. این اتاق دارای محفظه از جنس تور ابریشمی بوده و پهپاد در صورت برخورد در این تور گیر نموده و دچار خسارت نمی‌شود، ضمن اینکه محیط تست برای کاربران نیز ایمن خواهد بود. از جمله کاربردهای این اتاق می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- آموزش خلبانی به کاربران تازه کار،

که شکل ماتریسی آن عبارت است از:

$$x = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \\ \omega_{bx} \\ \omega_{by} \\ \omega_{bz} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{q}^{nb} \\ \dot{\omega}^b \\ \dot{x}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{qq} & F_{q\omega} & 0 \\ 0 & 0 & F_{\omega x} \\ x_g & 0 & F_{xx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q^{nb} \\ \omega^b \\ x_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ F_{\omega y_g} & 0 \\ 0 & F_{x_g v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_g \\ v_g \end{bmatrix} \quad (16)$$

که این در واقع مدل فرایند برای یک کالمن فیلتر در نظر گرفته می‌شود. مدل اندازه‌گیری باید براساس مدل اندازه‌گیری شتابسنج و مغناطیس‌سنج استخراج شود که در معادله‌های Error! Reference source not found. و ۷ و ۸ نشان داده شده است. برای شتابسنج موقعی که اطلاعات زاویه‌ای آن معتبر باشد یعنی در وضعیت افقی بدون شتاب قرار گرفته باشد، به صورت زیر است:

$$y_a \cong -g^b + v_a \quad (17)$$

در این وضعیت شتابسنج یک مقدار نویزی از شتاب جاذبه زمین را در چارچوب بدنه فراهم می‌نماید که در واقع بردار جاذبه به عنوان یک مرجع خارجی برای تصحیح تخمین زوایای رول و پیچ استفاده می‌شود. برای تشخیص وضعیت بدون شتاب وسیله از روش SHOE می‌توان بهره برد. در وضعیت بدون شتاب، شتاب جاذبه به صورت زیر توسط شتابسنج اندازه‌گیری می‌شود:

$$h_g = R^{nb} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g_c \end{bmatrix} \quad (18)$$

که در آن،  $g_c$  ثابت جاذبه زمین و  $R^{nb}$  ماتریس دوران از چارچوب ناوبری به چارچوب بدنه است که با استفاده از کمیت‌های کوانترنیون که از طریق دینامیک سیستم و با استفاده از فیلتر کالمن تخمین زده می‌شود، به دست می‌آید.

#### ۳-۳- کنترلر ربات پرنده

بعد از تخمین وضعیت، پایداری ربات پرنده یکی از اهداف اصلی کنترل است که باید بتواند ربات پرنده را در یک وضعیت ثابت به صورت پایدار نگه دارد. هدف بعدی کنترلر، تغییر وضعیت ربات پرنده به وضعیت مطلوب و سپس هدایت آن در مسیر مطلوب است. برای کنترل ربات پرنده در این فاز از روش PID استفاده شده است که در آن پارامترهای کنترلی با استفاده از تحلیل، آزمون و سعی و خطا تنظیم می‌شوند.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (13)$$

## (یادداشت فنی)

قاسم کاهه، نیما کریمی، مجید حمزه پور و علیرضا قادری

استفاده شود. تعیین وضعیت بر مبنای حسگرهای تلفن همراه هوشمند شامل شتاب‌سنج، جایرو و مغناطیس‌سنج طراحی و گزینه‌های مختلف تلفیق نیز بررسی شده است. الگوریتم مناسب براساس آزمون‌های پروازی انتخاب خواهد شد. هر چند به دلیل تنوع حسگرها در تلفن‌های همراه هوشمند ممکن است مجبور شویم برای تلفن‌های مختلف الگوریتم‌های مختلفی را پیاده‌سازی کنیم. اتاقک آزمون نیز طراحی شده است تا بتوان با آن تست‌های پروازی پهپاد مولتی روتور را در محیطی ایمن و بدون احتمال سانحه برای پرنده و کاربران برگزار نمود. این اتاقک دارای محفظه از جنس تور ابریشمی بوده و پهپاد در صورت برخورد در این تور گیر نموده و دچار خسارت نمی‌شود، ضمن اینکه محیط تست برای کاربران نیز ایمن خواهد بود. در ادامه نیز باید الگوریتم اتوپایلوت طراحی و پیاده‌سازی شده و آزمون‌های پروازی شروع شود. برای رسیدن به یک قابلیت اطمینان قابل قبول، آزمون‌های پروازی مختلف و متنوعی باید برنامه‌ریزی شود.

## ۶- تشکر و قدردانی

این پروژه با حمایت معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری تحت موافقت‌نامه تخصیص و اعطاء وجوه حمایتی به شماره ۱۱/۳۴۲۶۲ انجام شده است.

- انجام تست‌های پروازی پرنده‌های جدید،
  - ناوبری دقیق برای سنجش سنسورهای مختلف و
  - انجام تست‌های سخت افزار و نرم افزار در حلقه.
- اتاق طراحی شده برای این پیشنهاد دارای ابعاد ۶ متر در ۶ متر و ارتفاع ۵ متر شبیه شکل ۶ می‌باشد. این ابعاد برای پرواز ربات‌های پرنده کوچک مناسب می‌باشد. همچنین، چهار عدد حسگر ناوبری دقیق در اتاق تعبیه می‌شود که می‌تواند برای تست‌های پرواز دقیق مورد استفاده قرار گیرد. اتاقک آزمون قابلیت جابجایی و انتقال داشته و در فازهای بعدی قرار است به تجهیزات لازم برای انجام تست‌های سخت افزار در حلقه و میز تست نیز مجهز شود.



شکل (۶): تصویر شماتیک اتاقک تست پهپاد.

## ۵- نتیجه‌گیری

طراحی مفهومی و اولیه پهپاد مولتی روتور بر پایه پلتفرم تلفن همراه هوشمند در این مقاله ارائه شده است. به منظور طراحی دقیق و بهینه سعی شده است تجارب ملی و بین‌المللی مرتبط

### ۷- مراجع

- [1] PANADRONE, "XCRAFT," 2020. [Online]. Available: <https://xcraft.io/>. [Accessed 2020].
- [2] LG, "LG U Plus Drone Smartphone," 2020. [Online]. Available: <http://www.uplus.co.kr>. [Accessed 2020].
- [3] V. Kumar, "A Smartphone Is the Brain for This Autonomous Quadcopter," 2015. [Online]. Available: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/drone/s/a-smartphone-is-the-brain-for-this-autonomous-quadcopter>. [Accessed 2020].
- [4] P. Wong, D. Nguyen, A. Abukmail, R. Brown, R. Ryan and M. Pagnutti, "Low Cost Unmanned Aerial Vehicle Monitoring Using Smart Phone Technology," in *12th International Conference on Information Technology - New Generations*, 2015.
- [5] R. Baud, "Androcopter," 2013. [Online]. Available: <https://code.google.com/p/androcopter/>.
- [6] I. Mariano, I. D. and J. D. G. Elkaim, "Aerial Photography using a Nokia N95," in *World Congress on Engineering and Computer Science*, 2008.
- [7] S. Barman, R. R. Rouf, S. Islam and M. M. Hasan, "Proposed Design for Automated Agro-Quadcopter " Agro-ropter "," in *1st International Conference on Mechanical Engineering and Applied Science*, Dhaka, Bangladesh, 2017.
- [8] S. Microchip, "Accelerometer and Gyroscopes Sensors: Operation, Sensing, and Applications," 2015. [Online]. Available: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5830>.
- [9] R. Dahai, W. Lingqi, Y. Meizhi, C. Mingyang, Y. Zheng and H. Muzhi, "Design and analyses of a mems based resonant magnetometer," *Sensors*, vol. 9, no. 9, p. 6951, 2009.
- [10] N. M. Zimmerman, "FLIGHT CONTROL AND HARDWARE DESIGN OF MULTI-ROTOR SYSTEMS," Marquette University, Milwaukee, Wisconsin, 2016.
- [11] M. Leccadito, "An Attitude Heading Reference System using a Low Cost Inertial," Virginia Commonwealth University, Richmond, Virginia, 2013.
- [12] R. Munguía and A. Grau, "A Practical Method for Implementing an Attitude and Heading Reference System," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 11, no. 62, 2014.
- [13] M. Pettersson, "Extended Kalman Filter for Robust UAV Attitude Estimation," Linköpings universitet, Linköping, 2015.
- [14] K. P. HOPKINS, "LOW COST AHRS AND GPS/IMU INTEGRATION USING KALMAN FILTERING FOR AUTONOMOUS VEHICLE NAVIGATION," UNIVERSITY OF RHODE ISLAND, Ann Arbor, 2012.
- [15] W. Li and J. Wang, "Effective Adaptive Kalman Filter for MEMS-IMU/Magnetometers Integrated Attitude and Heading Reference Systems," *THE JOURNAL OF NAVIGATION*, vol. 66, p. 99–113, 2013.