هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی

تجزیه و تحلیل، طراحی وقابلیت اطمینان پهپادهای خودران برای عملیات ایمن و کارآمد هوانوردی

دکتر محمدحسن پاچناری[1]، حانیه یحیی زاده گنجی[2]

۱-استادیار،گروه مهندسی مکانیک،دانشکده فنی و مهندسی،واحد تهران مرکزی،دانشگاه آزاد اسلامی،تهران،ایران،moh.pachenari@iauctb.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی هوا فضا، گروه مهندسی مکانیک،دانشکده فنی و مهندسی،واحد تهران مرکزی،دانشگاه آزاد اسلامی،تهران،ایران ،yahyazadehanie@gmail.com

چکیده

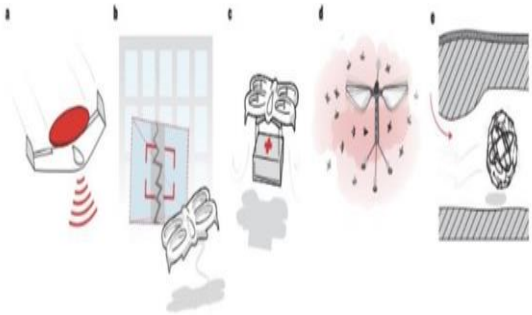
پهپادهای خودران انقلابی در حوزه هوانوردی ایجاد کرده اند و طیف وسیعی از مزایای را برای کاربردهای مختلف مانند نقشه برداری، بازرسی و نظارت ارائه می کنند. با این حال، توسعه و استقرار پهپادهای بدون سرنشین نیازمند فرآیند تحلیل و طراحی دقیق برای اطمینان از قابلیت اطمینان و ایمنی آنها می باشد.فرآیند تجزیه و تحلیل و طراحی پهپادها شامل چندین مرحله از جمله تجزیه و تحلیل نیازمندی ها، طراحی معماری سیستم و توسعه الگوریتم کنترل است. در مرحله تحلیل نیازمندی ها، الزامات ماموریت و محدودیت های عملیاتی شناسایی و تحلیل می شوند. این مرحله شامل تعیین قابلیت ها و ویژگی های مورد نیاز پهپاد برای انجام وظایف خود به نحو احسن و موثر است. مرحله طراحی معماری سیستم شامل طراحی قطعات سخت افزاری و نرم افزاری پهپاد از جمله حسگرها، سیستم های ارتباطی و پلت فرم های محاسباتی است. در نهایت، مرحله توسعه الگوریتم کنترل شامل طراحی الگوریتم هایی است که پهپاد را قادر می سازد تا وظایف خود را به طور مستقل انجام دهد.قابلیت اطمینان در حمل و نقل هوایی و پهپاد ها برای اطمینان از ایمنی مسافران، خدمه و محموله بسیار مهم است. قابلیت اطمینان پهپادها با توانایی آن در عمل مستمر بدون خرابی و با توانایی سیستمهای آن در شناسایی و کاهش خرابیهای احتمالی اندازه گیری می شود. در هوانوردی، قابلیت اطمینان یک سیستم معمولاً با میانگین زمان بین خرابی (MTBF) و میانگین زمان تعمیر (MTTR) اندازه‌گیری می‌شود.یکی از مزیت‌های پهپادهای خودران این است که می‌توان آن‌ها را به گونه‌ای طراحی کرد که قابل اعتمادتر از روش های سنتی مانند هواپیماهای می باشند. این به این دلیل است که پهپادهای خودران را می توان برای شناسایی و پاسخ به خرابی ها در زمان واقعی طراحی کرد تا احتمال تصادفات را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: پهپادهای خودران، قابلیت اطمینان، صنایع هوایی، تحلیل و طراحی

مقدمه

هواپیماهای بدون سرنشین، نام مستعار محبوب برای وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین و وسایل نقلیه هوایی میکرو ، اغلب تصاویری از هواپیماهای بدون سرنشین را تداعی می کنند که هزاران مایل برای جا سو سی و ا ستقرار پرواز می کنند. با این حال، در چند سال گذ شته، تعداد فزاینده ای از آزمایشگاه های تحقیقاتی دولتی و خصو صی روی پهپادهای کوچک کار میکنند که ممکن است روزی به طور مستقل در ف ضا های محدود پرواز کنند. طراحی و تحلیل این پهپادها ی کوچک، که تمرکز اصلی این پژوهش است، با کوچک سازی و طراحی قطعات الکترونیکی (ریز پردازنده ها، حسگر ها، باتری ها و واحدهای ارتباط بی سیم)، که عمدتاً توسط صنعت دستگاه های الکترونیکی قابل حمل هدایت میشود، سبب کاهش هزینه ها و افزایش پشتیبانی شده است. ای طراحی سبب نمونه سازی و تجاری سازی پهپاد های کوچک (معمولا کمتر از ۱ کیلوگرم) را با قیمت گوشی های هوشمند امکان پذیر کرده ا ست. پهپادهای کوچک اثرات اجتماعی و اقت صادی مهمی خواهند داشت. تصاویر پهپاد هایی که قادر به پرواز در ارتفاع چند متری از سطح زمین هستند، شکاف بین تصاویر گران قیمت، وابسته به آب و هوا و ت صاویر با و ضوح پایین ارائه شده تو سط ماهواره ها و تصاویر مبتنی بر خودرو محدود به چشم انداز سطح انسان و در

دسترس بودن جاده های قابل دسترس را پر می کند. دوربین های پرنده ویژه و تجزیه و تحلیل داده های مبتنی برابر به کشاورزان این امکان را میدهد که به طور مداوم بر کیفیت رشد محصول نظارت کنند.



شکل ۱: پهپاد های خودران در موقعیت های مختلف.

در شکل (۱) انواع پهپاد های خود ران را در موقعیت های زیر بیان می کند

الف: پهپادهای بال ثابت با زمان پرواز طولانی می توانند تصاویر دوربین را از طریق شبکه ارتباطی برای امدادگران در زمین فراهم کنند

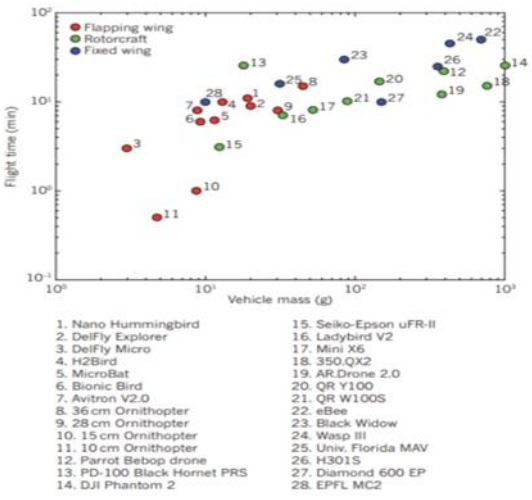
ب :روتورگرافت ها با قابلیت شناور می توانند سازه ها را از نظر ترک و نشتی بازرسی کنند

ج :حمل و نقل تجهیزات پزشکی از بیمارستان های مجاور

د:استفاده از پهپاد ها برای جستجوی خطرات شیمیایی در محیط های دربسته

ه :روبات های چند وجهی می توانند در محیط های بسته و محبوس پرواز کرده و در ساختارهای پیچیده غلت بزنند تا با خیال راحت نشانه های حیات را جستجو کنند

هواپیماهای بدون سرنشین به شرکت های مختلف اجازه میدهند تا داده های حجمی دقیق حفاری ها را به دست آورند. شرکت های انرژی و زیرساخت قادر خواهند بود خطوط لوله، جاده ها و کابل ها را به طور کامل برر سی کنند. سازمان های بشر دو ستانه می توانند فوراً موارد کمک ر سانی را در کمپ های پناه جویان که دائماً در حال تغییر هستند، ارزیابی و تطبیق دهند. پهپاد های ترابری که قادر به بلند شدن و فرود ایمن در مجاورت ساختمان ها و انسان ها هستند، به کشورهای در حال تو سعه بدون شبکه جاده ای منا سب این امکان را میدهند که به سرعت کالا ها را تحویل داده و در نهایت پتانسیل کامل زیر ساخت های مخابراتی تجارت الکترونیک خود را آزاد کنند. پهپاد های حمل و نقل همچنین به کشورهای توسعه یافته کمک می کنند تا کیفیت خدمات را در مناطق شلوغ یا دور افتاده بهبود بخ شند و سازمان های امدادی را قادر می سازند تا به سرعت تجهیزات پز شکی را در محل و بر اساس تقاضا تحویل دهند پهپاد های بازرسی که قادر به پرواز در فضاهای محدود هستند به واحد های آتش نشانی و اورژانس کمک می کنند تا خطرات را سریعتر و ایمن تر ارزیابی کنند، شرکت های لجستیکی برای تشخیص ترک در پو سته داخلی و خارجی کشتی ها، شرکت های تعمیر و نگهداری جاده برای اندازه گیری علائم سایش و پاره کردن پل ها و تونل ها، شرکت های امنیتی برای بهبود ایمنی ساختمان با نظارت بر مناطق خارج از محدوده دوربین های نظارتی، و آژانس های کاهش بال یا برای بازرسی ساختمان های نیمه فرو ریخته که در آن بهم ریختگی زمین مانعی برای روبات های زمینی است. تیم های هماهنگ از پهپاد های خودران، مأموریت هایی را امکان پذیر میکنند که بیشتر از زمان پرواز یک پهپاد منفرد طول بکشد، زیرا به برخی از پهپاد ها اجازه می دهند به ندرت تیم را برای تعویض باتری ترک کنند. تیم های هواپیماهای بدون سرنشین به سازمان های امداد و نجات اجازه خواهند داد تا به سرعت شبکه های ارتباطی اختصاصی را برای اپراتورهای زمینی مستقر کنند. شرکت های مخابراتی همچنین می توانند از شبکه های پهپاد ها برای تکمیل یا جایگزینی موقت نقاط خدمات استفاده کنند تحقق این چشم انداز به راه حل های مکاترونیک جدید و سطوح جدیدی از خودمختاری کنترل برای تکمیل ایمن ماموریت ها در فضاهای محدود و نزدیک به زمین نیاز دارد، جایی که سیگنال های موقعیت یابی مطلق و کنترل از راه دور در دسترس نیستند یا به اندازه کافی دقیق نیستند. هیچ یک از پهپاد های تجاری امروزی استقلال کنترل کافی برای انجام هر یک از ماموریت های توصیف شده را بدون نظارت انسان ماهر ندارند، که باعث می شود آن عملیات کند، خطرناک و مقیاس پذیر نباشد. طراحی و تحلیل پهپاد های خودران می تواند به نسل جدیدی از پهپاد های کوچک مستقل منجر شود و یک نقشه راه آزمایشی از استقرار قابلیت ها را شامل می شود.[۱]



شکل۲: زمان پرواز در برابر جرم پهپاد های کوچک(کمتر از ۱ کیلوگرم)

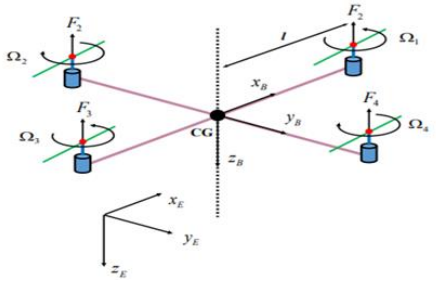
اخیرا وسیله ی نقلیه بدون سرنشین توجه بسیاری از محققانی را که در حوزه های کاربردی مختلف از جمله جستجو و نجات، تحویل و جمع سپاری کار می کنند، به خود جلب کرده ا ست. پهپاد ها در بسیاری از زمینه ها از جمله تحقیقات رباتیک، کنترل، برنامه ریزی مسیر،

ارتباطات و غیره توسعه یافته اند. توجه به افزایش قابلیت استفاده پهپاد ها در بسیاری از کاربرد های تجاری/مدنی، محققان را تشویق می کند تا این سیستم پویا را بهتر کنترل کنند. به طور خاص، کوادکوپترها به دلیل عملکردشان از نظر برخاست و فرود عمودی، ساختار ساده و پایدار، پهپاد های محبوبی هستند. با این حال، ناپایداری، دینامیک ناپایدار، غیر خطی بودن و جفت شدن متقاطع آنها، این سیستم را به یک سیستم جالب تحت عمل تبدیل می کند. به طور کلی، یک کوادکوپتر دارای شش درجه آزادی است، اگر چه چهار روتور باید تمام جهات را کنترل کنند. این باعث ایجاد جفت متقاطع بین حرکات چرخشی و انتقالی می شود. بنابراین دینامیک غیر خطی باید توسط کنترلر مدیریت شود. [۲]

در دهه گذشته، پیشرفت های قابل توجهی در توسعه سیستم های خودران صورت گرفته است. پیشرفت های متعدد در پهپاد ها که توسط کوادکوپترها رایج شده است تا حدودی به دلیل کاربردهای بی شماری است که توسط این سیستم ها مورد توجه قرار می گیرد، مانند نقشه برداری هوایی، اکتشاف، نظامی، بازیابی بلایای طبیعی، جستجو و نجات، محیط زیست و سرگرمی. طراحی کوادکوپتر از نظر سادگی و کارایی دارای مزایای بسیاری نسبت به سایر طرح های و سایل نقلیه هوایی است. بنابراین، کوادکوپترها در حال رایج شدن هستند و بسیاری از روش های کنترل، برنامه ریزی و ادراک برای آنها جذب شده است. اول، وزن و قدرت پارامتر های محدود کننده در پهپاد ها هستند. دوم، پهپاد ها باید بین منابع محدود محاسباتی، انرژی و الکترومکانیکی خود نه تنها بر اساس وظایف فعلی و شرایط محلی (مانند باد، دمای هوا)، بلکه بر اساس برنامه پرواز نیز داوری کنند. علی رغم پیشرفت های تکنولوژیکی عظیم در پهپادها، این مشکلات به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته اند و مبادلات طراحی فضایی سرتاسر تا حد زیادی ناشناخته است. [۵]

مدلسازی پهپاد

مدل دینامیک: مدل ریاضی یک سیستم را می توان به عنوان اولین گام برای بررسی عملکرد آن استفاده کرد. در این پهپاد خودران مورد مطالعه در این تحقیق در شکل ۳ مدل سازی شده است:



شکل۳: سیستم مختصات زمین ثابت و بدن ثابت

طراحی کوادکوپتر بر اساس زاویه های اویلر رول و گام انحراف فرموله شده است:

$$\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -Sin(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & \cos(\theta)\sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\theta)\cos(\phi) \end{bmatrix} . \dot{\Theta} \qquad (1)$$

$$\tau_{\phi} = l(F_2 - F_4) \qquad (2)$$

$$\phi\tau = l(F_3 - F_1) \qquad (3)$$

$$_{\psi}\tau = c(F_2 - F_1 + F_4 - F_3) \qquad (4)$$

$$\tau = I\dot{\omega} + \boldsymbol{\Omega}(I\omega) \qquad (5)$$

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \qquad (6)$$

$$\begin{bmatrix} u_{\phi} \\ u_{\theta} \\ u_{\psi} \\ u_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{\phi} \\ \tau_{\theta} \\ \tau_{\psi} \\ \tau_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & l & 0 & -l \\ -l & 0 & l & 0 \\ -c & c & -c & c \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} \qquad (7)$$

$$U = \boldsymbol{rv} - \boldsymbol{q}w - \boldsymbol{g}\sin(\theta) \qquad (8)$$

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{P}w - \boldsymbol{ru} + \boldsymbol{g}\sin(\phi)\cos(\theta) \qquad (9)$$

$$\dot{w} = \boldsymbol{qu} - \boldsymbol{Pv} + \boldsymbol{g}\cos(\theta)\cos(\phi) - \frac{1}{m}u_T \qquad (10)$$

$$\dot{p} = \frac{1}{I_{XX}}\left[\left(I_{yy} - I_{zz}\right)qr + u_{\phi} + d_{\phi}\right] \qquad (11)$$

$$\boldsymbol{q} = \frac{1}{I_{yy}}\left[\left(I_{zz} - I_{xx}\right)pr + u_{\theta} + d_{\theta}\right] \qquad (12)$$

$$\dot{r} = \frac{1}{I_{zz}}\left[\left(I_{xx} - I_{yy}\right)pq + u_{\psi} + d_{\psi}\right] \qquad (13)$$

کنترلر PIDA پیشنهادی

کنترل PID به دلیل سادگی در بسیاری از کاربردهای مهندسی مورد استفاده قرار می گیرد. توجه داشته باشید که PID در پهپاد های خودران به علت کندی و پاسخ طولانی نمی تواند به خوبی عمل کنند این مشکل را می توان با تغییر کنترل کننده PID با افزودن یک صفر اضافی به نام PIDA برطرف کرد. این کنترلر برای دستیابی به پاسخ سریعتر و روانتر برای سیستمهای مرتبه بالاتر استفاده می شود و زمان

بیش از حد و ته نشـــینی را در حد قابل قبولی حفظ می کند. علاوه بر این، کنترل خطی پیشنهادی قادر به کنترل سیستم غیرخطی است. در این رویکرد خطی سازی مدل با معادله زیر صورت می پذیرد.[۲]

$$\Delta\dot{x} = J\boldsymbol{x}\ \Delta\boldsymbol{x} + JU\ \Delta U \tag{14}$$

در این راســـتا، طراحی ســـیســـتم کنترل چند ورودی چند خروجی MIMO نه تنها می تواند سیستم را تثبیت کند، بلکه از یک ورودی مرجع پیروی کند. بنابراین، سیستم را بصورت زیر خطی می نماید:

$$\dot{x} = A\boldsymbol{x} + BU + D_d \tag{15}$$
$$Y = C\boldsymbol{x}$$

با توجه به معادله فوق ، فضای حالت جدید سیستم در معادله فرموله شده است. بدیهی است که در صورتی که کنترلر طراحی شده پایداری سیستم را ثابت کند، سیستم می تواند ورودی های مرجع را دنبال کند.

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{x}n\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}A & 0\\ -C & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X\\ Xn\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}B\\ \Phi\end{bmatrix}U + \begin{bmatrix}\Phi\\ I\end{bmatrix}\boldsymbol{R} + \begin{bmatrix}I\\ \Phi\end{bmatrix}D_d$$

$$Y=\begin{bmatrix}C & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X\\ Xn\end{bmatrix} \tag{16}$$

با توجه به اختلال شتاب در سیستم، شکل کلی کنترل کننده پیشنهادی در سری زمانی در معادله زیرآورده شده است.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i\int e(t)dt + k_d\,\dot{e}(t) + k_d\,\ddot{e} \tag{17}$$

همانطور که در معادله فوق شـاهده می شـود، عبارت مشـتق در حوزه فرکانس بالا کارآمد نیست. این عبارت می تواند بر عملکرد کل سیستم در یک محیط پر سر و صدا تأثیر بگذارد. افزودن فیلتر مشتق برای رفع این مشکل پیشنهاد شده است و بنابراین، کنترل پیشنهادی به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$U(s) = \left[\ k_p + \frac{k_i}{s} + \ k_d\, s + k_a s^2\right]E(s) \tag{18}$$

$$U(s) = \left[\ k_p + \frac{k_i}{s} + \ k_d \times sL(s) + k_a \times sL(s)\times sL(s)\right]E(s)$$

$$L(s) = \frac{N/T}{(N/T)^{\frac{1}{s}} + 1} \tag{19}$$

$$f_{obj} = (M_{os} - M_s) - (t_s - t_s)^2$$

قانون هدایت

قانون هدایت فرآیندی ا ست برای ایجاد د ستوراتی برای تعقیب کننده تا هدف خود را رد یابی کند. یک قانون هدا یت کاربردی، ناوبری متناسـب (PN) اسـت که نرخ چرخش خط دید (LOS) را در نظر می گیرد. مفهوم کلی PN این ا ست که شتاب جانبی تعقیب کننده را متناســـب با نرخ چرخش LOS تغییر دهد. در این مطالعه، قانون هدایت ناوبری متناســـب خالص (PPN) بر روی کوادکوپتر برای ردیابی و رسـیدن به هدف اعمال می شـود. درPPN ، فرمان شـتاب مورد نظر متناســب با ســرعت چرخش LOS به طور عادی بر بردار سرعت تعقیب کننده اعمال می شود. بنابراین، PPNبه صورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$\Omega_{LOS} = \frac{(V_M - V_T)\times R}{|R|^2} \tag{20}$$

که در آن R فاصـــله نســـبی بین تعقیب کننده و هدف اســـت. R با تشخیص عمق تصویر تخمین زده می شود. در این مطالعه، پهپاد برای پرواز در داخل محیط داخلی ساختمانی شبیه سازی شده ا ست، جایی که سیستم های موقعیت یابی مانند GPS قادر به کار نیستند. در این را ستا، ردیابی شی و ت شخیص عمق برای تخمین فا صله ن سبی بین پهپاد و هدف مورد استفاده قرار می گیرد. هدف با در نظر گرفتن فاصله ایمن از هدف به عنوان یک موکت ساختمانی تنظیم می شود.

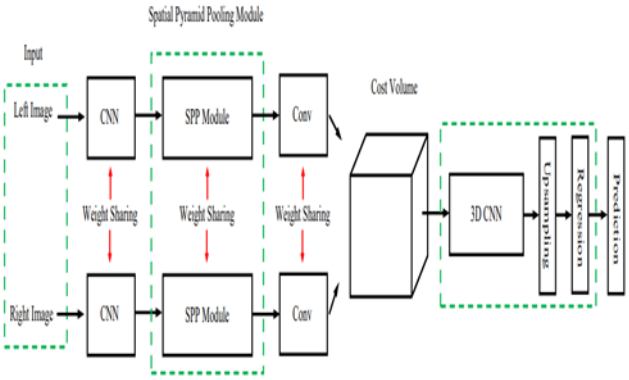
تکنیک های درک تصویر مبتنی بر یادگیری عمیق

این بخش چارچوبی را برای تطبیق تکنیک‌های درک ت صویر مبتنی بر یادگیری عمیق با استفاده از تشخیص شی و عمق برای تولید و ترجمه هدف به پهپاد می باشـــد.تشـــخیص اشـــیا و عمق نقش مهمی در پهپادهای خودران بدون سیستم موقعیت یابی دارد. تشخیص شی یک جنبه ضـــروری از موقعیت یابی در پرواز هواپیمای بدون ســـرنشـــین خودمختار ا ست زیرا نقطه هدف برای به د ست آوردن تخمین فا صله ن سبی (R) ا ست. در حالی که فا صله ن سبی از طریق ت شخیص عمق تخمین زده می شود، قانون هدایت (PPN) برای صدور چنین فرمانی به کنترل کننده برای ردیابی هدف اسـتفاده می شـود. در این تحقیق، ت شخیص کلونی مورچه Retina Net در ماژول ت شخیص سیستم خودمختار طراحی شده است.

$$L_{STC}(p_i q_i) = \frac{1}{N_{s_1}}\sum_{i\in\Upsilon} L_{FL}(p_i \iota_i^*) + \frac{1}{N_{s_2}}\sum_{i\in\Gamma} L_{FL}(q_i \iota_i^*) \tag{21}$$

$$L_{STR}(r_i t_i) = \frac{1}{N_{s_1}}\sum_{i\in\Psi}\left[\iota_i^* = 1\right]L_{IoU}(r_i g_i^*) + \frac{1}{N_{s_2}}\sum_{i\in\Gamma}\left[\iota_i^* = 1\right]L_{IoU}(t_i g_i^*) \tag{22}$$

علاوه بر تابع رگرسیون، طبقه بندی دو مرحله ای (STC) و رگرسیون دو مرحله ای انتخابی در شبکه پالایش انتخابی به کار گرفته شده است. در این رابطه، STC و STR به ترتیب یک طبقه‌بندی دو مرحله‌ای را بر روی سه لایه تشخیص سطح پایین و رگرسیون دو مرحله‌ای بر روی سه لایه تشخیص سطح بالا انجام می‌دهند. این توابع از دست دادن در معادله بالا فرموله شده است.



شکل ۴: معماری شبکه تطبیق استریو هرمی (PSMNet)

برای انجام تشخیص عمق، اطلاعات مربوط به شی مورد نیاز است. شنا سایی کلونی مورچه Retina Net شنا سایی هدف را انجام می دهد. برای تشخیص عمق، از تصاویر استریو برای تعیین فاصله از دوربین استفاده می شود که می تواند در مرکز ثقل پهپادها نصب شود. در این راستا، PSMNet برای ارائه تخمین عمق از یک جفت استریو از تصاویر استفاده می شود. PSMNet از اطلاعات جهانی در تطبیق استریو با استفاده از ادغام هرم فضایی و پیچیدگی گشاد شده استفاده می کند.

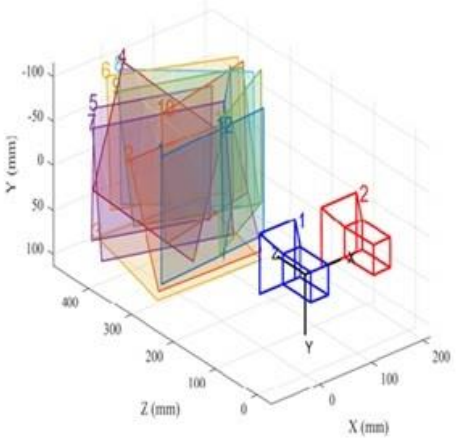
$$D(u;v) = \frac{f_u \times b}{Y(u;v)}$$

$$Z = D(u;v)$$

$$X = \frac{(u - c_u) \times z}{f_u}$$

$$y = \frac{(v - c_v) \times z}{f_v} \qquad (23)$$

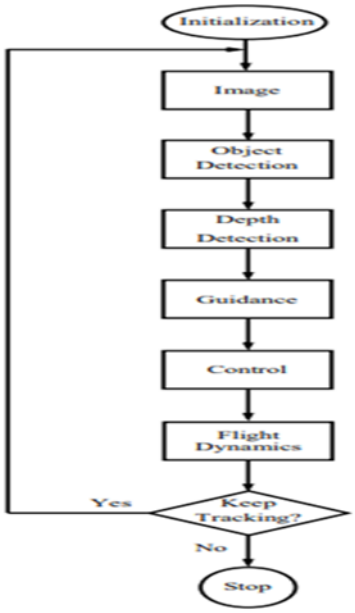
ماژول هدایت برای استفاده از تشخیص اشیا و عمق مورد نیاز است. پهپاد مستقل پیشنهادی از تصویر به عنوان ورودی برای پرواز خودگردان استفاده می کند. در این راستا، تصویر به عنوان ورودی از تشخیص شی عبور می کند تا اطلاعات شی را برای ماژول های تشخیص عمق ارائه کند. تشخیص عمق فاصله نسبی از هدف را تخمین می زند. علاوه بر این، قانون هدایت (PPN) با اعمال کنترلر PIDA پیشنهادی، دستوراتی را برای پهپاد برای رسیدن به هدف ایجاد می کند. در نهایت، کنترلر در مورد دینامیک پرواز اقدام می کند.



شکل۵: تجسم پارامتر های بیرونی

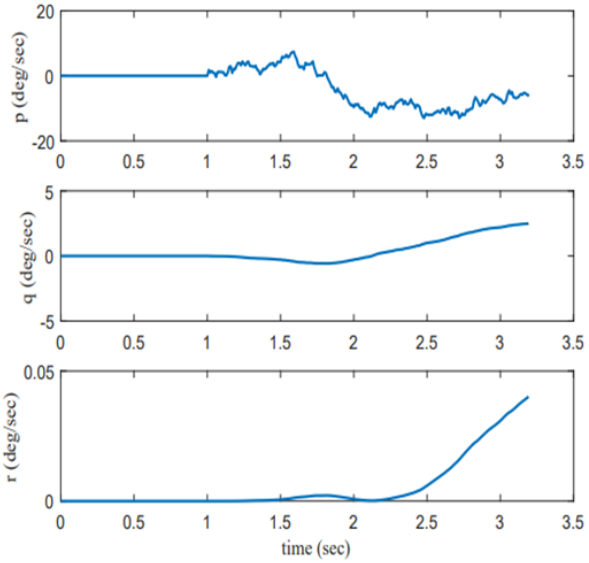
جدول ۱: پارامتر های مدل کوادکوپتر

Parameter	Description	value	Unit
m	Mass	0.8	kg
l	Arm length	0.2	m
g	Gravity acceleration	9.81	m/s^2
c	Force to torque coefficient	$3e-5$	kg m^2
I_{xx}	Body moment of inertia along x-axis	$2.28e-2$	kg m^2
I_{yy}	Body moment of inertia along y-axis	$3.10e-2$	kg m^2
I_{zz}	Body moment of inertia along z-axis	$4.40e-2$	kg m^2
I_m	Motor moment of inertia	$8.3e-5$	kg m^2

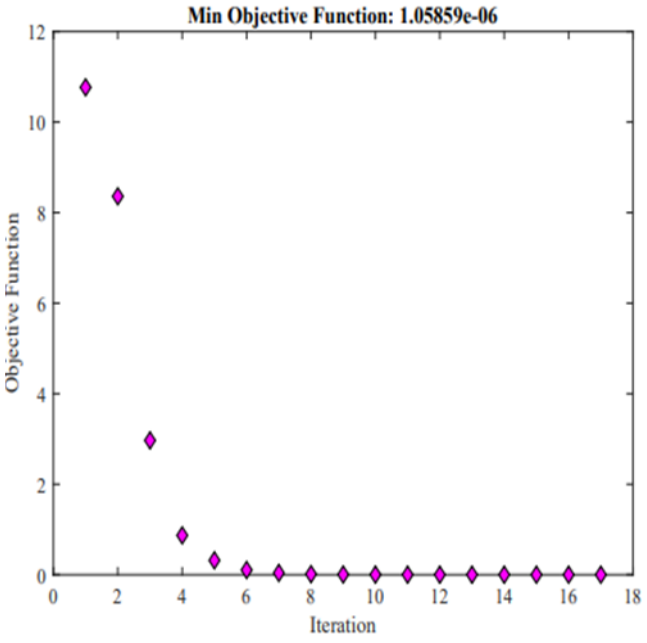


شکل۶: نمودار جریان کلی سیستم پیشنهادی

علاوه بر این، کوادروتور به دلیل ناپایداری و کوپلینگ متقاطع به محیط پر سر و صدا بسیار حساس است. در این راستا، **PIDA** با فیلتر مشتق که نویز ورودی های اندازه گیری را حذف می کند، برای پاسخ به این موضوع و پایدار نگه داشتن پرواز طراحی شده است. توجه داشته باشید که پارامترهای هایپر سیستم پیشنهادی بر اساس مدل تنظیم شده است. با توجه به **PIDA** پیشنهادی با فیلتر مشتق، ردیابی ورودی های تمایل، که می‌توانند به عنوان دستورات به کوادکوپتر تعریف شوند، مسئله دیگری است که می‌تواند توسط یک کنترل‌کننده **MIMO** (یعنی چهار ورودی و چهار خروجی) مورد بررسی قرار گیرد. کنترل کننده پیشنهادی را می توان با چهار بهره و ثابت زمانی برای هر مد/کانال تنظیم کرد.



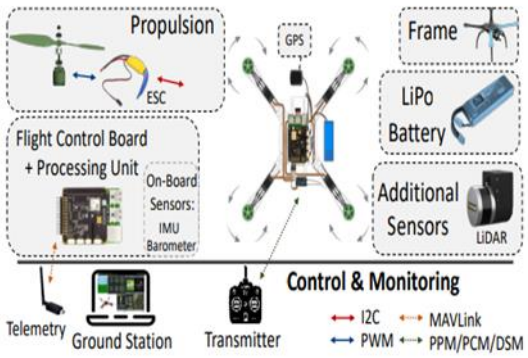
شکل۷: سرعت زاویه ای پهپاد مدل سازی شده در محیط پر سر و صدا بدون کنترلر



شکل۸: عملکرد **SDSA** در مقابل تکرار

آنالیزپهپاد های خودران

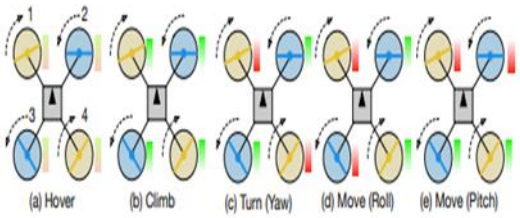
زیرسیستم‌های پهپاد مستقل چندین ویژگی حیاتی یک پهپاد را تعیین می‌کنند و انتخاب‌های طراحی مرتبط تأثیری اساسی بر اثربخشی سیستم انتها به انتها دارند. با این حال، هر زیر سیستم به صورت مجزا مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل ۹ زیر سیستم های اصلی یک پهپاد کوادکوپتر را نشان می دهد. ما زیرسیستم های اساسی را به صورت زیر تقسیم می کنیم: سیستم محرکه ای که نیروی لازم را برای حرکت و بلند کردن ایجاد می کند. سیستم تحویل توان، که توان را به اجزای الکترومکانیکی می رساند. و سیستم کنترل، محاسبه و اکتساب که پهپاد را با کمک سنسورها کنترل و تثبیت می کند. پهپادهای کوادکوپتر از چهار موتور روتور یکسان که دو جفت آن در جهت مخالف می چرخند، برای تولید نیروی رانش (یعنی نیروی بالابرنده) استفاده می کنند. برای مانورها، پهپادها باید دقیقاً سرعت چرخش هر روتور را تغییر دهند که در کنار اندازه کوچک آنها، نیاز به پیشرانه الکتریکی با باتری دارد. بنابراین، فقط از موتورهای جریان مستقیم (DC)، به ویژه موتورهای DC بدون جاروبک (BLDC) استفاده می شود. موتورهای BLDC با کنترل بهبود یافته به سرعت چرخش بالاتری دست می یابند، در حالی که بازخورد دقیقی برای اندازه گیری سرعت چرخش ارائه می دهند. با این وجود، موتورهای BLDC به کنترل کننده های سرعت الکترونیکی پیچیده و گران قیمت (ESC) نیاز دارند.[۵]



شکل۹: نمای کلی یک پهپاد خودران

فیزیک حرکات ضروری کوادکوپترها نسبتاً ساده است، که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با نادیده گرفتن چندین پیچیدگی، تمام حرکات ناشی از کنترل دقیق بر رانش هر روتور است در حالی که چندین عامل محیطی مانند باد و چگالی هوا را در نظر می گیرند. . پهپادها از همان رانش بالابرنده برای حرکات افقی با کج کردن استفاده می کنند. حداکثر سرعت افق به حداکثر زاویه حمله پایدار (یعنی زاویه شیب) بستگی دارد که به نسبت رانش به وزن بستگی دارد. سیستم تحویل برق باتری های لیتیوم پلیمری (LiPo) (لیتیوم-یون پلیمر)، که دارای بالاترین چگالی انرژی (Wh/Kg) و سرعت تخلیه (اندازه گیری سرعت تخلیه ایمن باتری) در فناوری لیتیوم یون قابل شارژ هستند، منبع اصلی قدرت در هواپیماهای بدون سرنشین از آنجایی که موتورهای BLDC به جریان

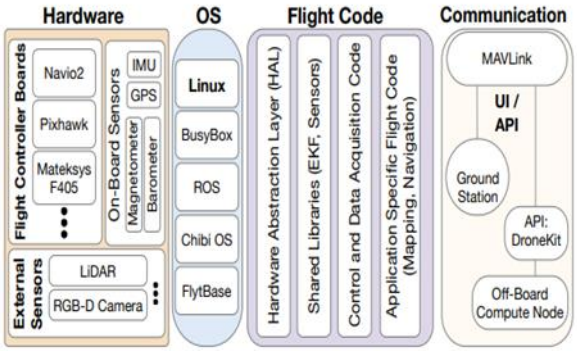
بالایی نیاز دارند، جریان بالای باتری‌های LiPo یک عامل حیاتی است. با این حال، نقطه ضعف این است که باتری های LiPo نسبتا شکننده هستند. تنها ۸۵ درصد (LiPoDrainLimit) از ظرفیت آنها باید در طول پرواز استفاده شود. باتری‌های LiPo دارای پیکربندی‌های مختلفی هستند که چندین سلول با ولتاژ نامی ۳,۷ ولت بر سلول هستند. هر موتور BLDC نیاز به جریان های سه فاز دارد که توسط یک ESC جداگانه با استفاده از جریان DC تولید می شود. پیچیدگی مدارهای ESC مشهود است، زیرا آنها به فرکانس سوئیچینگ ۶۰ × ۶۰۰ کیلوهرتز نیاز دارند در حالی که صدها وات را تحویل می دهند. ESCها همچنین لوازم الکترونیکی لازم را برای اجرای بازخورد برای دستیابی به کنترل دقیق سرعت چرخش میکروکنترلر خود فراهم می کنند. توکل‌های پرو ESC معمولاً به دلیل دقت بالا در کنترل، فراتر از سیگنال‌های PWM (مدولاسیون عرض پالس) برای پهپادهای مدرن هستند (به عنوان مثال، پروتکل DSShot1200 فرکانس ارتباطی ۷۴,۶ کیلوهرتز دارد). معیارهای فوق ESC ها را به یکی از اجزای سنگین تر تبدیل می کند.[۵]



شکل ۱۰: حرکات ضروری هواپیماهای بدون سرنشین مستطیل‌های رنگی نزدیک هر روتور نشان می‌دهند که سرعت چرخش چگونه تغییر می‌کند که قرمز نشان دهنده کاهش و سبز نشان دهنده افزایش است.

پیشرفت‌های اخیر در سیستم‌های پهپاد مستقل عمدتاً با توسعه الگوریتم‌های سطح بالا در تخمین حالت، ردیابی مسیر، محلی‌سازی و یادگیری عمیق انجام شده است. با این وجود، چنین الگوریتم‌های سطح بالا (مثلاً محاسبات حلقه بیرونی) به کنترل حلقه داخلی متکی هستند و مستقیماً تحت تأثیر آن قرار می‌گیرند. الگوریتم‌های سطح بالا فقط اهداف حالت را که در موقعیت، سرعت و نگرش دسته‌بندی شده‌اند، برای کنترل حلقه داخلی ارائه می‌کنند. حلقه داخلی در طول زمان با دستکاری مستقیم محرک‌های پهپاد به آن نقاط تعیین‌شده هدف می‌رسد و در عین حال یک پرواز پایدار را نیز حفظ می‌کند. علاوه بر این، دستورات کنترل از راه دور (RC) و دستورات لغو ایمنی از حلقه داخلی عبور می کنند تا تأخیر پاسخ را به حداقل برسانند.[۵]

شکل۱۱ انتزاع پشته نرم افزار سخت افزاری یک پهپاد را نشان می دهد. تابلوهای کنترل پرواز با سنسورهای اضافی روی برد مستقیماً ESC ها و سنسورها را دستکاری می کنند. کنترل‌کننده‌های پرواز دارای اجزای اصلی زیر هستند (جدول ۴ نمونه‌هایی را ارائه می‌کند: (۱) یک میکروکنترلر (MCU) معمولاً سری ۳۲ بیتی Arm Cortex-M (STM32F. 2) یک یا دو واحد اندازه گیری اینرسی ۶ محوره. (۳) یک فشارسنج برای اندازه گیری ارتفاع. (۴) و احتمالاً چندین تراشه برای حسگرها، کدک فید ویدیویی و ارتباطات. در صورت لزوم، سنسورهای خارجی با سیستم پشتیبانی اختصاصی فول استک اضافه می شوند. سیستم عامل (OS) به جز برنامه های مسابقه ای، تحت سلطه لینوکس است. لایه انتزاعی سخت افزار (HAL) API های لازم را فراهم می کند. لایه کتابخانه‌های مشترک، ریتم‌های الگوی ترکیبی حسگر را ارائه می‌کند (به عنوان مثال، Extended Kalman Filter). لایه کد پرواز نهایی برنامه خاص تا حد زیادی به برنامه بستگی دارد. در نهایت، لایه ارتباطی آمار را به ایستگاه زمینی تحویل می دهد و در صورت لزوم، یک پروتکل MAVLink محاسبات را به گره دیگری تخلیه می کند.

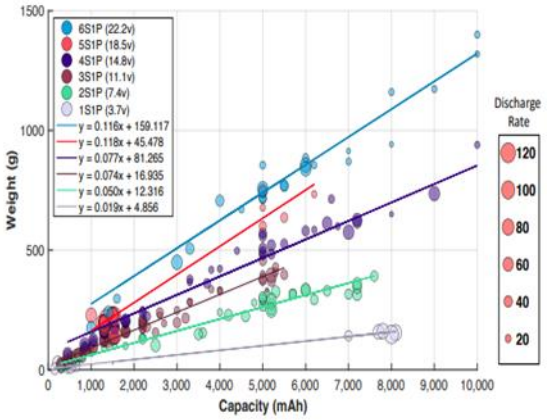


شکل ۱۱: انتزاع پشته سخت افزاری–نرم افزاری پهپاد.

کمی سازی طراحی پهپاد

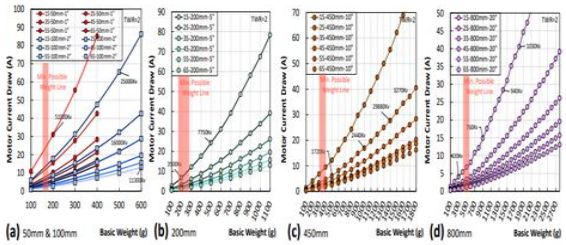
برای درک مشخصات محاسباتی در هواپیماهای بدون سرنشین خودران، باید مبادلات طراحی–فضای را که چندین ویژگی مهم مانند زمان پرواز را تعریف می‌کنند، کمی کنیم. این بخش هر رابطه مبادله ای را با وزن تعیین می کند که ترتیب مصرف انرژی را در یک پهپاد مشخص می کند. سپس، چگونگی تأثیر محاسبات بر فضای طراحی را استخراج می کنیم. انرژی و وزن ذخیره شده باتری پهپادها عمدتاً از باتری‌های LiPo استفاده می‌کنند که بخش بزرگی از وزن پهپاد را تشکیل می‌دهند. اگرچه باتری با ظرفیت بالاتر شارژ بیشتری دارد، وزن اضافی ممکن است منجر به زمان پرواز کوتاه‌تر شود (به وزن اضافی سنسورها و واحدهای محاسباتی اشاره نکنیم). از این رو، درک رابطه بین ظرفیت (mAh) و وزن باتری ها بسیار مهم است. اگرچه محدوده چگالی انرژی باتری های LiPo شناخته شده است، اما این مقادیر به دو دلیل برای تخمین دقیق کافی نیستند. اول، ما به محصول نهایی علاقه مند هستیم که شامل پوشش، سیم و مدارهای حفاظتی نیز می شود. دوم، از آنجایی که فرآیند تولید با نرخ های تخلیه مختلف ایده آل نیست، تخمین بر اساس چگالی انرژی دقیق نیست. برای رفع این شکاف دانش، ۲۵۰ باتری تجاری را مطالعه می کنیم. با گروه بندی باتری ها بر اساس پیکربندی آنها در تعداد سلول، ما یک رابطه خطی بین ظرفیت و وزن باتری ها بدست آوردیم که در شکل ۱۳ نشان داده

شده است. به طور کلی، برای باتری های با ولتاژ بالاتر (برای موتورهایی با گشتاور بالاتر) مشاهده می کنیم سربار بالاتر با این حال، این باتری ها برای بلند کردن پهپاد ضروری هستند. این شکل همچنین شامل نرخ تخلیه است که منجر به باتری‌های سنگین‌تر می‌شود، اما وزن حاصل از فرمول‌های استخراج‌شده در هر پیکربندی باتری منحرف نمی‌شود.[۵]



شکل۱۲: ظرفیت باتری LiPo و وزن در هر پیکربندی، استخراج شده از ۲۵۰ باتری تجاری.

موتورها و پروانه های هواپیماهای بدون سرنشین دارای پیکربندی های بسیار متنوعی هستند. بنابراین، مبادلات سیستم پیشرانه چند وجهی و پیچیده است. عامل اصلی تصمیم گیری در فرآیند TWR هدف است. از آنجایی که ما علاقه مند به درک نمایه محاسباتی در کارآمدترین طرح ها هستیم، TWR هدف را روی ۲، حداقل مقدار مورد نیاز برای پرواز، تنظیم کردیم. بنابراین، مقادیر مشتق شده بیشترین درصد سهم ممکن از توان محاسباتی را مشخص می کند. برای هر فریم، ابتدا حداکثر قطر پروانه را بر حسب اینچ تعیین می کنیم که توسط فاصله بین دو محور (که در افسانه نوشته شده است) تعیین می شود. سپس، رانش و رتبه بندی موتورها را از داده های منتشر شده توسط ۱۵۰ سازنده استخراج می کنیم. سپس با تغییر وزن و ولتاژ تغذیه، حداقل حداکثر جریان مورد نیاز برای هر موتور را محاسبه می کنیم.[۵]



شکل ۱۳: رابطه بین حداکثر مصرف جریان در هر موتور و وزن پایه، گروه‌بندی شده بر اساس ولتاژ تغذیه و اندازه فاصله بین دو محور

بهینه سازی طراحی

بهینه سازی پهپاد ها بر اساس قابلیت اطمینان، یکی از چالش های بزرگ در زمینه پهپاد های خودران است. به منظور بهبود قابلیت اطمینان پهپاد ها، می توان از روش ها و فناوری های مختلفی بهره گرفت. در ادامه به برخی از این روش ها و فناوری ها اشاره می شود:

۱- طراحی سیستم های قابل تعویض: طراحی سیستم های قابل تعویض برای پهپاد ها، می تواند بهبود قابلیت اطمینان و reliability آنها را به همراه داشته باشد. با این روش، در صورت خرابی یک قطعه، می توان آن را با قطعه جایگزینی جایگزین کرد و عملکرد پهپاد را ادامه داد.

۲- استفاده از سیستم های کنترل ورودی-خروجی: استفاده از سیستم های کنترل ورودی-خروجی به منظور پیشگیری از خرابی و تخریب پهپاد ها، بسیار مهم است. با استفاده از این سیستم ها، ورودی ها و خروجی های پهپاد کنترل می شوند و در صورت بروز خطا، می توان تلاش کرد تا این خطا را رفع کرد.

۳- استفاده از سنسورها: سنسورها برای اندازه گیری و مانیتورینگ پارامترهای مختلفی مانند دما، فشار، سرعت و غیره، استفاده می شوند. با استفاده از سنسورهای مناسب، می توان بهبود قابلیت اطمینان پهپاد ها را به همراه داشت.

۴- استفاده از فناوری های خودران: استفاده از فناوری های خودران در پهپاد ها، می تواند بهبود قابلیت اطمینان و reliability آنها را به همراه داشته باشد. با بهره گیری از الگوریتم های هوش مصنوعی، می توان پهپاد ها را به صورت خودکار و با کارایی بالا کنترل کرد. این فناوری ها، به پهپاد ها امکاناتی از قبیل پردازش داده ها، تشخیص و جستجوی اشیا، ردیابی، تشخیص خطا و رفع آن را می دهند.

۵- طراحی سیستم های ارتباطی ایمن: طراحی سیستم های ارتباطی ایمن، می تواند بهبود قابلیت اطمینان پهپاد ها را به همراه داشته باشد. با استفاده از سیستم های ارتباطی ایمن و قابل اعتماد، پهپاد ها می توانند با کنترل کننده ها به طور مطمئن و امن ارتباط برقرار کنند و دستورات مورد نیاز را دریافت کنند.

به طور کلی، بهینه سازی پهپاد ها بر اساس قابلیت اطمینان، یک چالش بزرگ برای صنعت پهپاد ها است. با استفاده از روش ها و فناوری های مناسب، می توان بهبود قابلیت اطمینان و reliability پهپاد ها را به همراه داشته و از آنها برای عملیات ایمن و کارآمد هوانوردی بهره برد.

اعتبارسنجی

با افزودن داده‌های تجاری هواپیماهای بدون سرنشین به داده‌های ما، ما توانستیم داده‌هایمان را برای اعتبار سنجی بهبود بخشیم. با این کار، ما تنها به تعداد نقاط داده‌ی خودمان محدود نشدیم و داده‌های دیگری را هم برای تأیید نتایج خود به دست آوردیم. علاوه بر این، با محاسبه کل زمان پرواز برای مطابقت با پهپادهای تجاری پیشرفته فعلی، میانگین مصرف انرژی را به صورت دقیق‌تر محاسبه کردیم. به دست آوردن این مقادیر برای فواصل ۱۰۰، ۴۵۰ و ۸۰۰ میلی‌متری، به ما امکان می‌دهد تا دقیق‌ترین اطلاعات را درباره‌ی قابلیت اطمینان پهپادهای خودران در فواصل مختلف بدست آوریم. با این اعتبار سنجی دقیق‌تر، ما می‌توانیم بهترین تصمیمات را برای بهینه‌سازی پهپادهای خودران بر اساس قابلیت اطمینان آن‌ها بگیریم.

علاوه بر این، برای بررسی قابلیت اطمینان پهپادهای خودران، ما از تحلیل و بررسی داده‌های مربوط به خرابی و خطاهای پهپادها استفاده می‌کنیم. این تحلیل شامل شناسایی خطاهای شایع در پهپادهای خودران و تحلیل عوامل موثر بر این خطاها می‌شود. سپس، با استفاده از این داده‌ها و تحلیل‌های بدست آمده، می‌توانیم بهبود قابلیت اطمینان پهپادهای خودران را ارائه دهیم.

با توجه به اینکه پهپادهای خودران در حال حاضر در بسیاری از حوزه‌ها از جمله نظامی، صنعتی، کشاورزی و حتی تحویل خرید برخط استفاده می‌شوند، بهینه‌سازی قابلیت اطمینان پهپادها به عنوان یکی از عوامل مهم در بهبود عملکرد و کارآیی پهپادهای خودران بسیار حائز اهمیت است.

در نتیجه، اعتبار سنجی داده‌ها و بهینه‌سازی قابلیت اطمینان پهپادهای خودران با استفاده از تحلیل داده‌ها و روش‌های مهندسی، بهبود و بهبود عملکرد پهپادها را تضمین می‌کند و از راه‌اندازی ایمن و کارآمد در حوزه‌های مختلف بهره‌مند می‌شود.

نتیجه گیری

تجزیه و تحلیل و طراحی پهپادهای بدون سرنشین خودران و قابلیت اطمینان هوانوردی، زمینه‌های حیاتی برای اطمینان از ایمنی و اثربخشی عملیات پهپادها هستند. از مزایای پهپادهای خودران می توان به توانایی آنها برای کار موثرتر و موثرتر از انسان اشاره کرد، در حالی که معایب آن شامل برد محدود و ظرفیت بارگیری آنها ا ست. از مزا یای قابلیت اطمینان در هوانوردی می توان به افزایش ایمنی و کاهش خطر تصادفات اشاره کرد، در حالی که معایب آن شامل عدم آگاهی موقعیتی و توانایی تصمیم گیری یک خلبان انسانی است. بنابراین، یک رویکرد متعادل که هم پهپادهای خودران و هم هواپیماهای خلبانی سنتی را در خود جای دهد برای اطمینان از عملیات ایمن و مؤثر هوانوردی مورد نیاز است.

برای کارهای آینده، سیستم های موقعیت یابی مبتنی بر دید و مبتنی بر GNSS در سیستم پهپاد پیشنهادی ادغام خواهند شد. جزء محلی سازی/موقعیت یابی مستقل فوق الذکر به سیستم پیشنهادی اجازه می دهد تا ماموریت های ما را در محیط های داخلی و خارجی انجام دهد. علاوه بر این، همچنین در نظر گرفته شده است که کار بیشتری بر روی ماژول برنامه ریزی مسیر می تواند گسترش یابد، که در آن مسیر باید بر اساس موارد زیر بهینه شود: پیش بینی حرکت هدف، محدودیت های پویا و استاتیک موانع، و همچنین محدودیت های فیزیکی ربات پهپاد . چنین کاری شی هدف را در دوربین FoV پهپاد با احتمال بالاتر (کاهش انسداد یا از دست دادن هدف) ایمن می کند، در حالی که یک ماموریت بدون برخورد را انجام می دهد و کاربرد سیستم ردیابی پهپاد را افزایش می دهد.

بررسی آمار و اطلاعات نشان میدهد پهپادها می¬توانند در حوزه های مختلف کاربردی مورد بهره برداری قرار گیرند. در بسیاری از حوزه ها این توسعه موجب کاهش هزینه های عملیاتی، نیروی انسانی و زمانی در مقایسه با سایر رو شهای مر سوم برای انجام کارها شده است قرار دادن فرصت ها و مزایا پهپادها در اختیار سازمانها و شرکتها قرار میدهند موجب شده انواع مختلفی از پهپادها با قابلیت ها توانایی های مختلف توسعه یافته و تقاضا برای بهره برداری از آنها افزایش یابد. البته این رشد به دلیل چالش های موجود بر سر راه توسعه پهپادها تاکنون با شتاب کندی روبه رو بوده است. اما پیش بینی های ارائه شده نشان داد که به مرور با تلاش دولت ها برای رفع مشکلات این رشد با شیب بیشتری همراه خواهد بود.

منابع

[1] 1 .Floreano, Dario, and Robert J. Wood. "Science, technology and the future of small autonomous drones." nature 521.7553 (2015): 460-466

[2] 2. Zandavi, Seid Miad, Vera Chung, and Ali Anaissi. "Control Design of Autonomous Drone Using Deep Learning Based Image Understanding Techniques." arXiv preprint arXiv:2004.12886 (2020).

[3] 3. Vásárhelyi, Gábor, et al. "Optimized flocking of autonomous drones in confined environments." Science Robotics 3.20 (2018): eaat3536

[4] 4. Jones, E., et al. "Applications for the Hovermap autonomous drone system in underground mining operations." Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 120.1 (2020): 49-56

[5] Hadidi, Ramyad, et al. "Quantifying the design-space tradeoffs in autonomous drones." Proceedings of the 26th ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. 2021

Analysis, Design, and Reliability of Autonomous Drones for Safe and Efficient Aviation Operations

Mohammad Hassan Pachenari[1], Hanie yahyazade ganji[2]
1- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, moh.pachenari@iauctb.ac.ir
2- Bachelor's student in aerospace engineering, Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Autonomous drones have revolutionized the field of aviation, providing a range of benefits for various applications such as surveying, inspection, and monitoring. However, the development and deployment of autonomous drones require a rigorous analysis and design process to ensure their reliability and safety.

The analysis and design process of autonomous drones involve several stages, including requirements analysis, system architecture design, and control algorithm development. In the requirements analysis stage, the mission requirements and operational constraints are identified and analyzed. This stage includes determining the capabilities and features needed for the drone to perform its tasks efficiently and effectively. The system architecture design stage involves designing the hardware and software components of the drone, including sensors, communication systems, and computing platforms. Finally, the control algorithm development stage involves designing the algorithms that enable the drone to perform its tasks autonomously.

Reliability in aviation is crucial to ensure the safety of passengers, crew, and cargo. The reliability of an aircraft is measured by its ability to operate continuously without failure, and by the ability of its systems to detect and mitigate potential failures. In aviation, the reliability of a system is typically measured by its Mean Time Between Failure (MTBF) and Mean Time To Repair (MTTR). One advantage of autonomous drones is that they can be designed to be more reliable than traditional piloted aircraft. This is because autonomous drones can be designed to detect and respond to failures in real-time, reducing the likelihood of accidents

KEYWORDS: Autonomous drones, Reliability, Aviation, analysis and design