

طراحی، ساخت و کنترل ربات پرنده چهار ملخه کوچک برای طی مسیر خاص با استفاده از روش پرواز کور

سید محمد سیدمهدی^{۱*}، مجید محمدی مقدم^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکترونیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

6smsm9@gmail.com

چکیده

کاهش اندازه و جرم ربات پرنده چهار ملخه باعث افزایش چابکی و توانایی حرکت در مکان های تنگ می گردد. در این مقاله به ایجاد یک ربات پرنده چهار ملخه با جرم ۵۳/۵۸ گرم و ابعاد موتور تا موتور ۹/۱۹ سانتی متر یا به عبارت دیگر به اندازه کف دست، پرداخته شده است. که در نوع خودش جدید بوده و اولین بار می باشد که در ایران مورد تحقیق قرار می گیرد. در مسیر طراحی و ساخت این ربات، از نرم افزارهای متلب، سالیدورکس، آلتیوم دیزاینر و کیل کمک گرفته شده است. و برای بهبود داده های سنسور ها، از فیلتر کالمن استفاده شده است. بازوهای این ربات به وسیله دستگاه پرینتر سه بعدی تولید گردیده شده است. جهت کنترل این ربات، جوی استیک مخصوص طراحی و ساخته شده است. برای کنترل نمودن ربات پرنده چهار ملخه کوچک، از کنترل آبخاری که کنترل کننده اول و دوم آن کنترل کننده PID است، استفاده شده است. ما در این مقاله ساختار های مختلف ربات پرنده چهار ملخه کوچک را بیان می نماییم. در ادامه به طراحی، ساخت و کنترل ربات پرنده چهار ملخه کوچک را برای طی مسیر خاص با استفاده از روش پرواز کور می پردازیم. از این ربات ارزان قیمت می توان در طیف وسیعی از برنامه های کاربردی رباتیک استفاده نمود.

واژگان کلیدی: طراحی و ساخت ربات پرنده چهار ملخه کوچک (کوادرور کورک)، فیلتر کالمن، کنترل کننده آبخاری، طراحی و ساخت جوی استیک.

مقدمه

در جهان، در دهه ی گذشته، علاقه به ربات های پرنده کوچک، افزایش یافته است (Mulgaonkar, Cross and Kumar, 2015). ربات های پرنده کوچک، از جمله کوادرور ها می توانند در فضاهای محدود پرواز سریعی به سمت هدف مورد نظر داشته باشند. و به راحتی بر روی سطوح مناسب فرود بیایند. و همچنین از روی سطوح مختلف از جمله دست انسان، پرواز خود را شروع نمایند. این باعث شده است که کوادرورهای کوچک به یک پلت فرم هوایی بسیار جذاب، با پتانسیل بسیار بالایی برای برنامه های تحقیقاتی و تجاری تبدیل گردند.

ربات های پرنده تجاری زیادی در محدوده ی ۵۰۰ گرم تا ۵ کیلوگرم، در بازار جهان موجود می باشند (مراجع ۲ و ۵). در حال حاضر پیشرفت های در زمینه های باتری های با توان بالا و وزن پایین (Mulgaonkar, Whitzer, et al., 2014)، موتور های کوچک و سنسور های MEMS صورت گرفته است. کوادرور های کوچک دارای پتانسیل بالایی در زمینه عملیات جستجو و نجات در محیط های محدود می باشند. معمولاً در این محیط های محدود، ربات های پرنده بزرگ تر قابل

استفاده نمی باشند. از کوادروتور های کوچک نیز می توان در مکان های خطرناک یا غیر قابل دسترس، استفاده نمود. علاوه بر اینها، کاهش اندازه ربات های پرنده چهار ملخه (کوادروتور ها)، باعث افزایش قابل توجهی در چابکی آنها می شود. به عبارت دیگر شتاب زاویه ای ربات پرنده چهار ملخه با معکوس طول یا معکوس مربع طول رابطه مستقیم دارد (Kumar and Michael, 2012:1279-1291). هدف اصلی این مقاله طراحی مکانیکی و الکتریکی و کنترل ربات پرنده چهار ملخه (کوادروتور) کوچک کم هزینه می باشد.

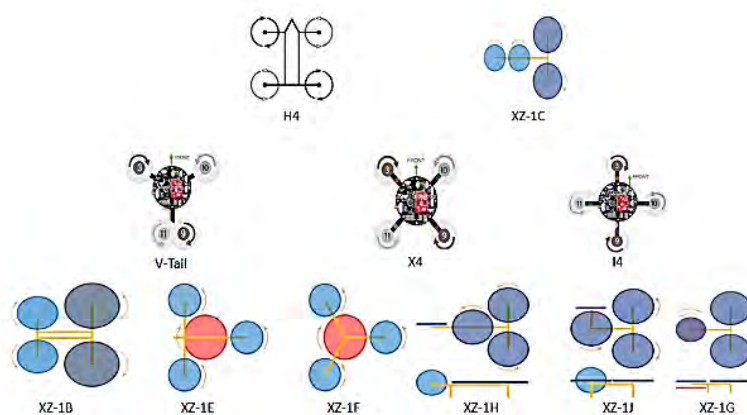
بر روی ربات های پرنده کوچک، کار های در خارج از کشور عزیزمان جمهوری اسلامی ایران انجام شده است. که می توان نمونه های از آنها را در مراجع (Mulgaonkar, Cross and Kumar, 2015)، (Lehnert and Corke, 2013)، (مرجع ۱۱)، (Ma, et al., 2013)، (مرجع ۳)، (مرجع ۱۳) و (مرجع ۴) مشاهده نمود. لازم به ذکر است متأسفانه هنوز در کشور عزیزمان جمهوری اسلامی ایران فعالیتی در زمینه ربات های پرنده چهار ملخه کوچک به ثبت نرسیده است. و از آنجایی که حتی غفلت یک ساله از زمینه ای و یا دانشمندی جامعه ای را برای همیشه در آن زمینه جیره خور علوم کشورهای ثروتمندتر می گرداند. و همچنین نبود منابع فارسی در زمینه ربات های پرنده چهار ملخه کوچک، تصمیم به چاپ این مقاله به زبان فارسی گرفته شد. امید است در حد توان خود توانسته باشیم در این مقاله کمکی به دوستداران این تکنولوژی نماییم. ربات پرنده چهار ملخه کوچک (کوادروتور کوچک) طراحی و ساخته شده در شکل ۱ نشان داده شده است، که نشان دهنده اندازه آن، به اندازه کف دست، می باشد.



شکل ۱ - ربات پرنده چهار ملخه طراحی و ساخته شده

معرفی ساختار های ربات پرنده چهار ملخه کوچک

معمولا ساختار ربات پرنده چهار ملخه کوچک، به صورت یک ساختار چهار گوش می باشد. که رایج ترین شکل آنها به صورت "+" یا "x" می باشد. که در هر گوشه آن یک موتور و ملخ قرار می گیرند. در شکل ۲ چند نمونه از ساختار های موجود، برای ربات پرنده چهار ملخه نشان داده شده است. ما از ساختار "+" برای طراحی و ساخت رباتمان استفاده می نماییم.



شکل ۲ - ساختار های ربات پرنده چهار ملخه

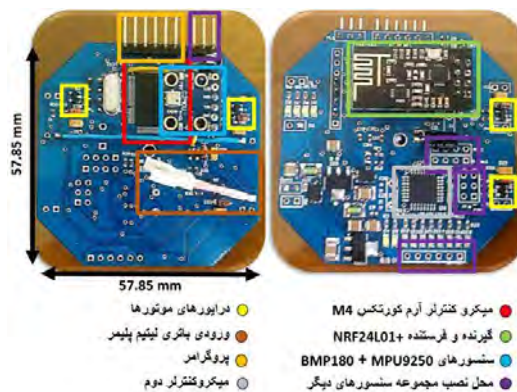
طراحی ربات پرنده چهار ملخه کوچک

تا به امروز، طراحی و توسعه ربات، یک زمینه بسیار تخصصی محسوب می گردد. که نیاز به مجموعه ای از مهارت های خاص دارد. ما طراحی خود را به صورت ماژولار انجام داده ایم تا افراد استفاده کننده از این ربات، این امکان برایش فراهم گردد تا هر سنسور را با سنسور مورد نظر خود جایگزین نمایند. همچنین این قابلیت وجود دارد که دو مجموعه سنسور، در کنار هم مورد استفاده قرار گیرند. این قابلیت برای آن است که بتوان دقت مجموعه را افزایش داد. و همچنین بتوان از سنسور های ارزان قیمت در این ربات استفاده نمود.

طراحی و ساخت اتوپیلوت^۱

از آنجایی که محدودیت های زیادی در مورد اندازه و وزن کوادروتور کوچک وجود دارد، امکان استفاده از اتوپیلوت های آماده موجود در بازار نمی باشد. در نتیجه تصمیم به طراحی اتوپیلوت گرفته شد. این اتوپیلوت در شکل ۳ نشان داده شده است. که شامل هفت قسمت اصلی می باشد. قسمت اول آن، ریز پردازنده آرم STM32F407، قسمت دوم، فرستنده و گیرنده بدون سیم NRF24L01+، قسمت سوم، فشارسنج BMP180، قسمت چهارم، سنسور MPU9250 (که این سنسور شامل شتاب سنج سه محور، ژيروسکوپ سه محور و قطب نما دیجیتال سه محور می باشد)، قسمت پنجم، چهار عدد درایور موتور های بدون هسته، قسمت ششم، پروگرامر برای برنامه نویسی ریز پردازنده آرم STM32F407 و قسمت هفتم آن مدار مدیریت انرژی برای اجزای مختلف، می باشد.

^۱ Autopilot



شکل ۳ - اجزای تشکیل دهنده اتوپایلوت ربات پرنده چهار ملخه کوچک

لازم به ذکر است علت طراحی ماژولار اتوپایلوت، آن است که امکان استفاده از سنسورهای دیگر (یا سنسورهای مد نظر فرد استفاده کننده)، که به وسیله رابط I2C و یا رابط SPI بتوان با آنها ارتباط برقرار نمود، نیز فراهم گردد. PCB اتوپایلوت طراحی و ساخته شده دو لایه می باشد. و ضخامت آن ۲/۷ میلی متر است. این PCB به عنوان جز اصلی ساختار ربات پرنده چهار ملخه کوچک می باشد. وزن این اتوپایلوت ۱۸/۶ گرم و ابعاد برد نهایی ۵۷/۸۵ میلی متر مربع می باشد. منبع تامین انرژی ربات پرنده چهار ملخه کوچک، باتری لیتیوم پلیمر، با ولتاژ ۳/۷ ولت می باشد. باتری لیتیوم پلیمر نیز به صورت مستقیم به PCB وصل می گردد. موتورها به وسیله ی بازوهای طراحی شده به وسیله نرم افزار سالیدورکس^۱ (مرجع ۷) و ساخته شده به وسیله ی پرینتر سه بعدی (مرجع ۹)، به اتوپایلوت وصل می گردند (شکل ۴).



شکل ۴ - بازوهای طراحی شده در نرم افزار سالیدورک (تصویر چپ) و ساخته شده به وسیله پرینتر سه بعدی (تصویر راست)

موتورها و ملخها

موتورهای قابل استفاده در ربات های پرنده چهار ملخه کوچک در اکثر موارد شامل موتورهای DC بدون جاروبک^۲ و بدون هسته^۳ می باشند. ما در ساخت ربات پرنده چهار ملخه کوچک، از موتورهای بدون هسته استفاده می نماییم. چند نمونه از آنها در شکل ۵ آورده شده است.

^۱ solidworks

^۲ Brushless Motors

^۳ Coreless



شکل ۵ - چند نمونه از موتور های بدون هسته

مهمترین عنصر موثر در تولید نیروی بالا برنده در یک وسیله پرنده (کوادروتور)، ملخ می باشد. از آنجایی که بدلیل ماهیت ربات پرنده چهار ملخه کوچک، دو موتور همواره در خلاف جهت دو موتور دیگر حرکت می نمایند، نیاز به دو نوع ملخ که یکی در حالت ساعتگرد و دیگری در حالت پاد ساعتگرد نیروی بالا برنده ایجاد می نمایند، می باشد. در زمان طراحی و ساخت ربات پرنده چهار ملخه کوچک با محدودیت، در انتخاب ملخ ها روبرو هستیم. ما در ربات پرنده چهار ملخه کوچک، از ملخ های vitality H36 استفاده می نماییم. از مزایای این ملخ آن است که تراست مناسبی تولید می نماید. و کیفیت ساخت آن بالا می باشد.

راه اندازه های موتور های بدون هسته

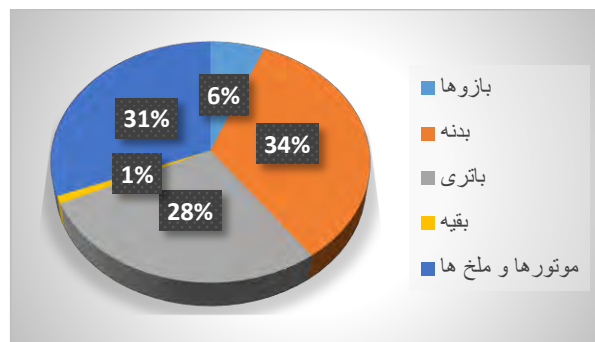
برای راه اندازی موتور های بدون هسته می توان از ترانزیستور ها استفاده نمود. در نظر داشته باشید که بسته به نوع موتور باید از ترانزیستور مناسب استفاده کرد تا بتواند جریان عبوری از موتور را تحمل نماید. مورد دیگری که در شکل ۶ به چشم می خورد، استفاده از یک دیود به صورت موازی با موتور است. معمولا هنگام قطع جریان الکتریکی به علت خاصیت خودالقایی موتور، ولتاژ زیادی در دو سر آن ایجاد می شود که به ولتاژ بازگشتی معروف است. این ولتاژ که در جهت عکس جریان اولیه ایجاد می شود، به راحتی به ترانزیستور آسیب می رساند. به همین علت از یک دیود به صورت موازی با موتور استفاده می شود.



شکل ۶ - نحوه راه اندازی موتور بدون هسته

توزیع جرمی ربات پرنده چهار ملخه کوچک

جرم کلی ربات پرنده چهار ملخه به پنج دسته کلی جرم باتری، جرم بازوها، جرم بدنه، جرم موتورها و ملخ ها و جرم بقیه تقسیم می شوند. همان گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است، ۲۸٪ جرم کلی ربات پرنده چهار ملخه کوچک را باتری به خود اختصاص داده است. و همچنین ۳۱٪ جرم کلی مربوط به موتورها و ملخ ها، ۶٪ جرم کلی مربوط به بازوها و ۳۴٪ جرم کلی مربوط به بدنه ربات پرنده چهار ملخه کوچک می باشد. و ۱٪ باقیمانده جرم کلی مربوط به بقیه چیز ها می باشد.



شکل ۷ - توزیع جرمی ربات پرنده چهار ملخه کوچک طراحی و ساخته شده (جرم کلی آن ۰/۰۵۴ کیلوگرم)

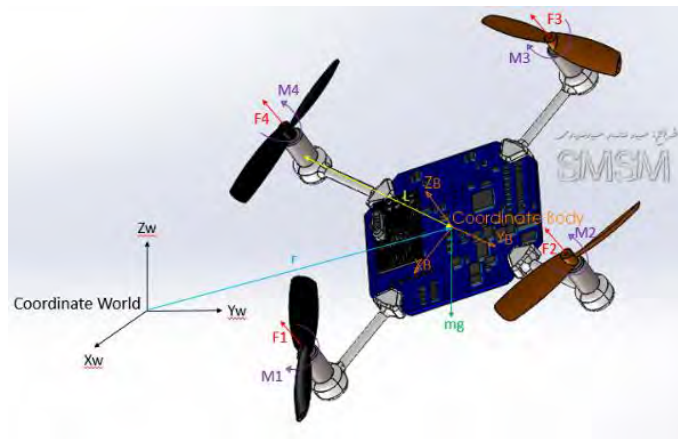
همان گونه که انتظار می رود، جرم ربات پرنده چهار ملخه با اندازه آن کاهش می یابد. همچنین از آنجایی که ربات های پرنده چهار ملخه کوچک تر، موتورها و ملخ های کوچک تری دارند، ممان اینرسی آنها نیز به میزان قابل توجهی کاهش می یابد. ممان اینرسی های ربات پرنده چهار ملخه کوچک طراحی و ساخته شده در جدول شماره ۱ گردآوری شده است.

جدول شماره ۱. مقادیر ممان اینرسی ربات پرنده چهار ملخه کوچک طراحی و ساخته شده

مقادیر بر حسب $[kg \cdot m^2]$	همان اینرسی
$\times \quad - \quad /$	I_{xx}
$\times \quad - \quad - \quad /$	I_{xy}
$\times \quad - \quad /$	I_{xz}
$\times \quad - \quad - \quad /$	I_{yx}
$\times \quad - \quad /$	I_{yy}
$\times \quad - \quad - \quad /$	I_{yz}
$\times \quad - \quad /$	I_{zx}
$\times \quad - \quad - \quad /$	I_{zy}
$\times \quad - \quad /$	I_{zz}

مدل سازی ربات پرنده چهار ملخه کوچک

مدل استفاده شده در اینجا شبیه مدل موجود در مرجع (Michael, et al., 2010:56-65) می باشد. ربات پرنده چهار ملخه کوچک به عنوان یک جسم صلب آزاد دارای تمام شش درجه آزادی ممکن برای جسم صلب می باشد. در شکل ۸ دستگاه مختصات بدنه با B و دستگاه مختصات زمین با W نشان داده شده است.



شکل ۸ - نیرو و گشتاورهای وارد بر سیستم

مدل سازی ربات پرنده چهار ملخه کوچک، با استفاده از مدل خطی شده ی حرکت خطی ربات پرنده چهار ملخه کوچک (فرمول (۱)) و مدل حرکت زاویه‌ای ربات پرنده چهار ملخه کوچک (فرمول (۲)) انجام می گردد.

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= [\theta \cos(\psi_0) + \varphi \sin(\psi_0)] [F_1 + F_2 + F_3 + F_4] & (1) \\ m\ddot{y} &= [\theta \sin(\psi_0) - \varphi \cos(\psi_0)] [F_1 + F_2 + F_3 + F_4] \\ m\ddot{z} &= -mg + F_1 + F_2 + F_3 + F_4 & (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{xx}\dot{p} &= L(F_2 - F_4) - mg(dy - dz \varphi) \\ I_{yy}\dot{q} &= L(F_3 - F_1) + mg(dx + dz \theta) \\ I_{zz}\dot{r} &= M_1 - M_2 + M_3 - M_4 \end{aligned}$$

که در آن M_i گشتاور ناشی از مقاومت هوا، F_i نیروی ایجاد شده توسط ملخ ها، \dot{p} ، \dot{q} و \dot{r} نمایشی استاندارد از مشتق سرعت زاویه ای در دستگاه مختصات بدنه ربات، L فاصله موتور از دستگاه مختصات بدنه ربات، I_{xx} ، I_{yy} و I_{zz} المان های اینرسی (لختی دورانی) ربات، m جرم کلی ربات پرنده چهار ملخه کوچک، dx ، dy و dz انحراف مرکز جرم از دستگاه مختصات بدنه ربات پرنده، θ ، φ و ψ شتاب در راستاهای X ، Y و Z در دستگاه مختصات زمین، و زاویه های رول، پیچ، یاو (به ترتیب) و g شتاب گرانش زمین می باشند. در ادامه راه تغییر متغیر های فرمول (۳)، که اولین بار توسط پروفیسور ویجی کومار^۱، استفاده شده است را اعمال می نمایم.

$$\begin{aligned} U_1 &= F_1 + F_2 + F_3 + F_4 & (3) \\ U_2 &= F_2 - F_4 \\ U_3 &= F_3 - F_1 \\ U_4 &= M_1 - M_2 + M_3 - M_4 \end{aligned}$$

در عمل ورودی های ربات پرنده چهار ملخه کوچک، PWM های مربوط به چهار موتور می باشند. در نتیجه باید رابطه

ی بین U ها (همان تغییر متغیرها) و PWM ها محاسبه گردد. می دانیم

$$\begin{aligned} F_i &= G_{zF_i} \cdot PWM_i & (4) \\ M_i &= G_{zM_i} \cdot PWM_i \end{aligned}$$

¹ Vijay Kumar

که در آن G_{ZF_i} و G_{ZM_i} ($i = 1,2,3,4$) مدل های موتورهای ما می باشند. این مدل ها به کمک دستگاه جمع آوری اطلاعات طراحی و ساخته شده^۱، بدست می آیند. با جایگذاری فرمول (۴) در فرمول های (۳) خواهیم داشت.

$$U_1 = G_{ZF_1} \cdot PWM_1 + G_{ZF_2} \cdot PWM_2 + G_{ZF_3} \cdot PWM_3 + G_{ZF_4} \cdot PWM_4 \quad (5)$$

$$U_2 = G_{ZF_2} \cdot PWM_2 - G_{ZF_4} \cdot PWM_4$$

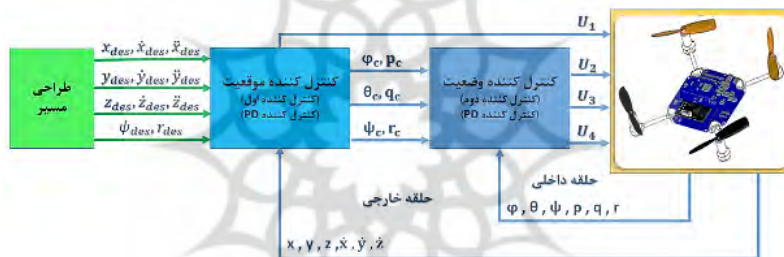
$$U_3 = G_{ZF_3} \cdot PWM_3 - G_{ZF_1} \cdot PWM_1$$

$$U_4 = G_{ZM_1} \cdot PWM_1 - G_{ZM_2} \cdot PWM_2 + G_{ZM_3} \cdot PWM_3 - G_{ZM_4} \cdot PWM_4$$

در نهایت می توان با حل چهار معادله و چهار مجهول (همان فرمول (۵))، PWM ها را بر حسب U ها بدست آوریم.

کنترل کننده ربات پرنده چهار ملخه کوچک

برای کنترل ربات پرنده چهار ملخه کوچک از کنترل آبخاری (شکل ۹) استفاده شده است. که کنترل کننده اول و دوم آن کنترل کننده PID می باشد. و برای آنکه ربات پرنده چهار ملخه کوچک از محدوده خطی سازی شده خارج نگردد، از کنترل محدود نیز استفاده می نماییم.



شکل ۹ - بلوک دیاگرام نمای کلی کنترل کننده طراحی شده برای ربات پرنده چهار ملخه کوچک

در حلقه داخلی کنترل آبخاری، زاویه های رول، پیچ، یاو و مشتق های آنها، به وسیله کنترل کننده PID، با فرکانس یک کیلوهرتز کنترل می شوند. مقدار این زاویه ها و مشتق های آنها از سنسور های موجود در MPU9250 بدست می آیند. در حلقه خارجی کنترل آبخاری، موقعیت، سرعت و شتاب در راستای سه بعد، به وسیله کنترل کننده PID، کنترل می گردد. فرکانس کاری حلقه خارجی ۱۰۰ هرتز می باشد. و می توان از سنسور های GPS و یا ضبط حرکت (مرجع ۸) برای کنترل موقعیت خودکار ربات پرنده چهار ملخه کوچک بهره برد. در صورت که هدف کنترل دستی ربات پرنده چهار ملخه کوچک باشد، همان سنسور های IMU برای کنترل دستی کافی می باشند و نیاز به اضافه کردن سنسور دیگر نیست. کنترل کننده ها بر روی میکروکنترلر اجرا می شوند و موقعیت هدف (نهایی) را به مقادیر مجاز PWM، برای موتور ها تبدیل می نمایند.

قوانین کنترل کننده PID مورد استفاده در ربات پرنده چهار ملخه کوچک به صورت فرمول (۶) و (۷) می باشند.

$$U_1 = m [g + \ddot{z}_{des} + K_{d,z}(\dot{z}_{des} - \dot{z}) + K_{p,z}(z_{des} - z)] \quad (6)$$

$$U_2 = K_{p,\varphi}(\varphi_c - \varphi) + K_{d,\varphi}(p_c - p)$$

$$U_3 = K_{p,\theta}(\theta_c - \theta) + K_{d,\theta}(q_c - q)$$

$$U_4 = K_{p,\psi}(\psi_c - \psi) + K_{d,\psi}(r_c - r)$$

^۱ دستگاه جمع آوری اطلاعات با همکاری دوست خوب ام جناب آقای مهندس عادل مسلمی بیرامی طراحی و تولید گردیده شده است. به دلیل موجود نبودن دستگاه جمع آوری اطلاعات در بازار ایران، تصمیم به تولید آن در کشور عزیزمان جمهوری اسلامی ایران گرفته شد.

در فرمول (۶) ضرایب $K_{p,\psi}$ و $K_{p,\theta}$ ، $K_{p,\varphi}$ مربوط به ضرایب تناسبی کنترل کننده های مربوط به خطای زاویه های رول، پیچ و یاو و ضرایب $K_{d,\varphi}$ ، $K_{d,\theta}$ و $K_{d,\psi}$ مربوط به ضرایب مشتق گیر کنترل کننده های مربوط به خطای سرعت زاویه های رول، پیچ و یاو ربات پرنده چهار ملخه کوچک می باشند (به ترتیب). ضریب $K_{p,z}$ مربوط به ضریب تناسبی کنترل کننده ی مربوط به خطای ارتفاع و ضریب $K_{d,z}$ مربوط به ضریب مشتق گیر کنترل کننده ی مربوط به خطای تغییر ارتفاع (سرعت) ربات پرنده چهار ملخه کوچک می باشند. و مقادیر موجود زاویه های رول، پیچ و یاو (به ترتیب)، φ_c ، θ_c و ψ_c مقادیر مورد نظر زاویه های رول، پیچ و یاو (به ترتیب)، p ، q و r مقادیر موجود سرعت زاویه ای رول، پیچ و یاو (به ترتیب)، φ_c و q_c و r_c مقادیر مورد نظر سرعت زاویه ای رول، پیچ و یاو (به ترتیب)، Z و \dot{Z} مقادیر موجود موقعیت و سرعت در راستای محور Z دستگاه مختصات زمین، z_{des} ، \dot{z}_{des} و \ddot{z}_{des} مقادیر مورد نظر موقعیت و سرعت و شتاب مورد نظر در راستای محور Z دستگاه مختصات زمین، m جرم کلی ربات، g شتاب گرانش زمین و U ها همان تغییر متغیرها می باشند.

$$\begin{aligned} \varphi_c &= -\frac{1}{g} [\ddot{y}_{des} + K_{d,y}(\dot{y}_{des} - \dot{y}) + K_{p,y}(y_{des} - y)] \cos(\psi_{des}) + \frac{1}{g} [\ddot{x}_{des} + K_{d,x}(\dot{x}_{des} - \dot{x}_{des}) + K_{p,x}(x_{des} - x)] \sin(\psi_{des}) \\ \theta_c &= \frac{1}{g} [\ddot{x}_{des} + K_{d,x}(\dot{x}_{des} - \dot{x}_{des}) + K_{p,x}(x_{des} - x)] \cos(\psi_{des}) + \frac{1}{g} [\ddot{y}_{des} + K_{d,y}(\dot{y}_{des} - \dot{y}) + K_{p,y}(y_{des} - y)] \sin(\psi_{des}) \end{aligned} \quad (7)$$

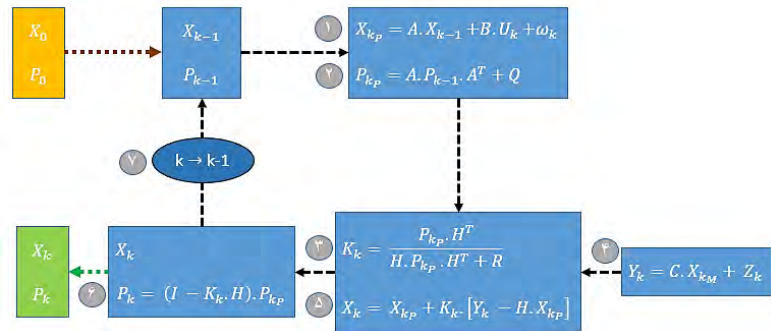
در فرمول (۷) ضرایب $K_{p,y}$ و $K_{p,x}$ مربوط به ضرایب تناسبی کنترل کننده ی مربوط به خطای موقعیت در راستای X و Y و ضرایب $K_{d,y}$ و $K_{d,x}$ مربوط به ضرایب مشتق گیر کنترل کننده ی مربوط به خطای تغییر موقعیت (سرعت) در راستای X و Y ربات پرنده چهار ملخه کوچک می باشند (به ترتیب). x و \dot{x} مقادیر موجود موقعیت و سرعت در راستای محور X دستگاه مختصات زمین، x_{des} و \dot{x}_{des} و \ddot{x}_{des} مقادیر مورد نظر موقعیت و سرعت و شتاب مورد نظر در راستای محور X دستگاه مختصات زمین، y و \dot{y} مقادیر موجود موقعیت و سرعت در راستای محور Y دستگاه مختصات زمین، y_{des} و \dot{y}_{des} و \ddot{y}_{des} مقادیر مورد نظر موقعیت و سرعت و شتاب مورد نظر در راستای محور Y دستگاه مختصات زمین و ψ_{des} مقدار زاویه یاو مورد نظر، φ_c و θ_c مقادیر مورد نظر برای زاویه های رول و پیچ می باشند (به ترتیب). در نهایت ضرایب بدست آمده برای کنترل ربات پرنده چهار ملخه کوچک در جدول شماره ۲ گردآوری شده است.

جدول شماره ۲. مقادیر ضرایب PID بدست آمده برای ربات پرنده چهار ملخه کوچک

ضریب کنترل کننده	مقدار آن
$K_{p,\varphi}$	۹/۶
$K_{d,\varphi}$	۰/۰۱۷
$K_{p,\theta}$	۹/۶
$K_{d,\theta}$	۰/۰۱۷
$K_{p,\psi}$	۰/۰۰۱۲
$K_{d,\psi}$	۰/۰۰۰۰۶۶
$K_{p,z}$	۶/۷
$K_{d,z}$	۳/۶
$K_{p,y}$	۵۸/۸
$K_{d,y}$	۸۱/۶
$K_{p,x}$	۵۸/۸
$K_{d,x}$	۸۱/۶

تلفیق داده ها

برای افزایش دقت سنسور ها و کاهش نویز آنها از فیلتر کالمن برای تلفیق داده ها استفاده شده است. فلوجارت فیلتر کالمن در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.

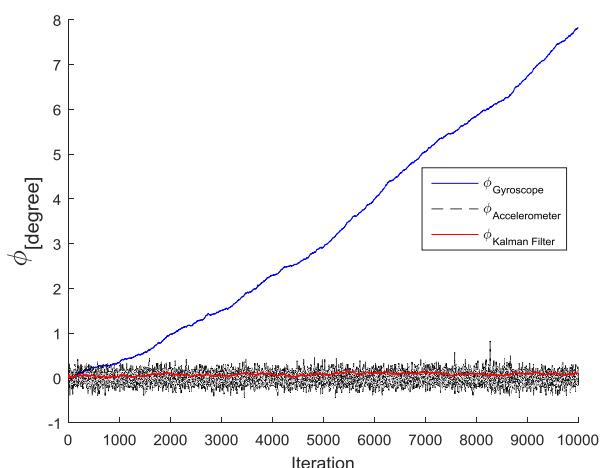


شکل ۱۰ - ساختار کلی فیلتر کالمن

که در آن U ماتریس متغیر کنترل، ω پیش بینی ماتریس نویز حالت، Q ماتریس کوواریانس نویز پروسه، Z نویز اندازه گیری (عدم قطعیت)، Y اندازه گیری از حالت، I ماتریس واحد، K بهره کالمن (کالمن گین)، R ماتریس کوواریانس نویز سنسور (خطای اندازه گیری)، X ماتریس حالت، P ماتریس کوواریانس پروسه (نشان دهنده خطا در تخمین یا پروسه)، A ماتریس انتقال حالت از زمان $k-1$ به زمان k ، B ماتریس گین متغیر کنترل، C ماتریس گین از حالت به اندازه گیری و H ماتریس هم بعد ساز می باشند. ورودی های ما، همان مشاهده های ما هستند و حالت های ما همان وضعیت ربات پرنده کوچک، می باشند. الگوریتم فیلتر کالمن را می توان با توجه به مرجع (Thrun, Burgard and Fox, 2002) به صورت زیر بیان نمود.

1. Algorithm Kalman_filter ($X_{k-1}, P_{k-1}, U_k, Y_k$)
2. $X_{kP} = A \cdot X_{k-1} + B \cdot U_k$
3. $P_{kP} = A \cdot P_{k-1} \cdot A^T + Q$
4. $K_k = \frac{P_{kP} \cdot H^T}{H \cdot P_{kP} \cdot H^T + R}$
5. $X_k = X_{kP} + K_k \cdot [Y_k - H \cdot X_{kP}]$
6. $P_k = (I - K_k \cdot H) \cdot P_{kP}$
7. return X_k, P_k

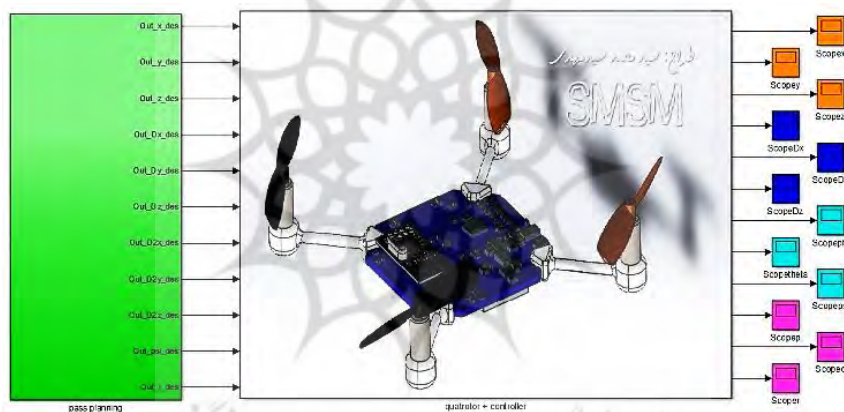
پارامتر های آن در قسمت های قبلی توضیح داده شده اند. و برای جلوگیری از تکرار، از بیان تکراری آنها صرف نظر می نمایم. به عنوان نمونه خروجی فیلتر کالمن بر روی زاویه رول ربات پرنده چهار ملخه کوچک، در حالتی که ربات پرنده چهار ملخه کوچک هیچ گونه حرکتی ندارد، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان گونه که مشخص می باشد، انحراف و نویز کاهش یافته است. و در نهایت به هدفمان، همان کاهش انحراف ژيروسکوپ و کاهش نویز شتاب سنج، برای بدست آوردن زاویه ی رول، دست یافته ایم.



شکل ۱۱ - نتیجه ی نهایی زاویه رول به کمک فیلتر کالمن

شبیه سازی ربات پرنده چهار ملخه کوچک

شبیه سازی به معنی راه انداختن و زنده کردن مدل ریاضی با استفاده از کامپیوتر برای بازسازی واقعیت می باشد. در ادامه راه، شبیه سازی مدل ربات پرنده چهار ملخه کوچک، در نرم افزار سیمولینک متلب (مرجع ۶) انجام گردید (شکل ۱۲).



شکل ۱۲ - شبیه سازی ربات پرنده چهار ملخه کوچک

در جدول شماره ۳ سایر مقادیر لازم برای شبیه سازی مدل ربات پرنده چهار ملخه کوچک، در نرم افزار سیمولینک متلب، نشان داده شده است.

جدول شماره ۳. سایر مقادیر لازم برای شبیه سازی مدل ربات پرنده در سیمولینک متلب

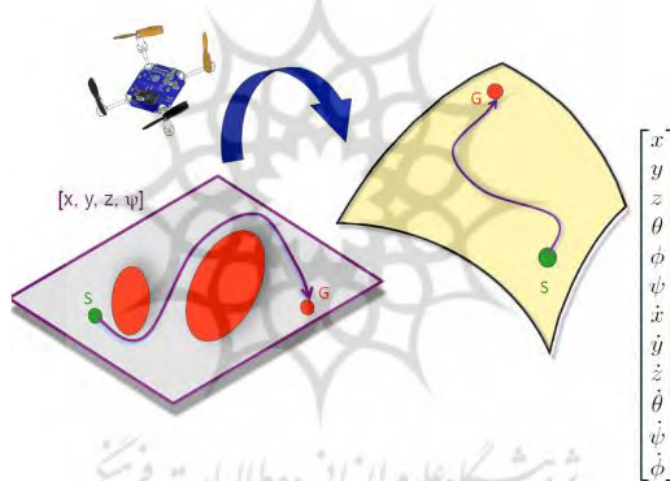
مقدار آن	پارامتر
۰/۰۵۳۵۸	$m [kg]$
۹/۸۰۶۶۵	$g [\frac{m}{s^2}]$
۰/۰۶۴۲۹	$L [m]$
-۰/۰۰۲۰۷	$dx [m]$
۰/۰۰۲۳۷	$dy [m]$
-۰/۰۰۰۷۰	$dz [m]$

نرم افزار استفاده شده برای پیاده سازی آلوگوریتیم ها

برای پیاده سازی آلوگوریتیم ها، از نرم افزار کیل (مرجع ۱۲) کمک گرفته شده است. به دلیل آنکه حجم پروژه بالا می باشد و مدیریت، امنیت و قابلیت اطمینان بالایی را طلب می نماید، برای پیاده سازی آلوگوریتیم ها از سیستم عامل بلادرنگ کیل، کمک گرفته شد. به عبارت دیگر سیستم عامل RTX برای این پروژه، طراحی و پیاده سازی گردید. صفر تا ۱۰۰ طراحی سیستم عامل RTX، در نرم افزار کیل، در مرجع (K. Software, 2009) بیان شده است.

طی مسیر خاص با استفاده از روش پرواز کور^۱

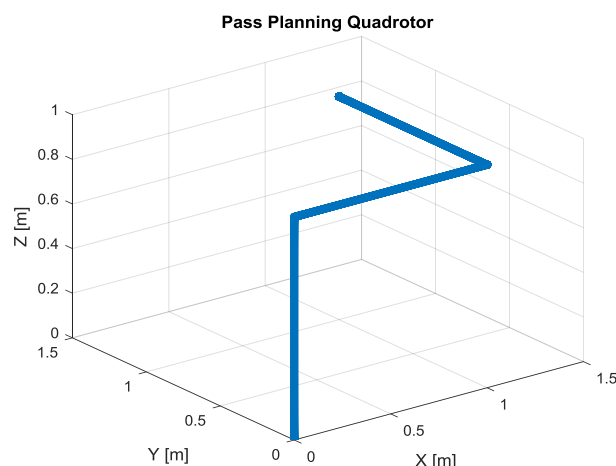
روش پرواز کور و یا ناوبری کور یکی از انواع روش های ناوبری در سیستم های رباتیک می باشد. در روش پرواز کور، موقعیت جدید ربات نسبت به موقعیت قبلی آن بدست می آید. در ربات پرنده چهار ملخه کوچک از روش سامانه ناوبری اینرسی مربوط به ناوبری کور استفاده می نماییم. در زمینه ی پرواز کور در ربات های پرنده چهار ملخه، تنها یک مقاله به چاپ رسیده است. که آن هم برای ربات های پرنده چهار ملخه غیر کوچک می باشد (Zhou, et al., 2010). در طراحی مسیر، به جای طراحی مسیر برای هر ۱۲ درجه ی آزادی ربات پرنده چهار ملخه کوچک، فقط برای درجات آزادی x, y, z و طراحی مسیر انجام می گردد (شکل ۱۳). این نکته توسط جناب آقای پروفسور ویجی کومار ارائه گشته است (مرجع ۱۰).



شکل ۱۳ - نکته ی در مورد تولید مسیر ربات پرنده چهار ملخه کوچک

همان گونه که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، ربات پرنده چهار ملخه کوچک در سیمولینک متلب در راستای محور z به اندازه ی یک متر پرواز می نماید. و سپس به اندازه ی یک متر در راستای محور x و بعد از آن به اندازه ی یک متر در راستای محور y پرواز می نماید.

¹Dead-reckoning method



شکل ۱۴ - مسیر طی شده به وسیله ی مدل خطی ربات پرنده چهار ملخه کوچک

طراحی و ساخت جوی استیک

برای کنترل دستی ربات پرنده چهار ملخه کوچک، از جوی استیک نشان داده شده در شکل ۱۵ استفاده می نماییم. قسمت بیرونی آن از دسته کنترل های آماده موجود در بازار تهیه شده است. و قسمت داخل آن، با ماژول NRF24L01+ و میکروکنترلر آردینو نانو، تعویض گردیده شده است. از قابلیت های این جوی استیک طراحی و ساخته شده برای ربات پرنده چهار ملخه کوچک، می توان به قابلیت اتصال آن به لپ تاپ (به وسیله پورت USB) اشاره نمود. به کمک این قابلیت می توان داده ها مورد نظر از ربات پرنده چهار ملخه کوچک را، در لپ تاپ به صورت بی سیم مشاهده نمود.



شکل ۱۵ - دسته کنترل طراحی و ساخته شده

جمع بندی

ما طراحی، ساخت و کنترل ربات پرنده چهار ملخه کوچک ارزان قیمت با جرم ۵۳/۵۸ گرم و ابعاد موتور تا موتور ۹/۱۹ سانتی متر، برای طی مسیر خاص با استفاده از پرواز کور را ارائه دادیم. دینامیک ربات پرنده چهار ملخه کوچک نیز توضیح داده شد. برای این ربات جوی استیک نیز طراحی و ساخته شد. ما بر این باوریم که از این فناوری می توان برای کارهای تحقیقاتی رباتیک بهره برد. و برای آنکه توسعه این ربات برای فرد استفاده کنند راحت تر گردد، آن را به صورت ماژولار طراحی و سیستم عامل RTX، بر روی آن پیاده سازی گردیده شد.

کارهای آینده

در این ربات می توان به جای موتور های بدون هسته از موتور های براشلس نیز استفاده نمود. البته هزینه های (هم از نظر وزن و هم از نظر مالی) آنها نسبت به موتور های بدون هسته بیشتر می باشد. می توان برای کنترل اتوماتیک موقعیت از سنسور های ضبط حرکت (در محیط های سرپوشیده) و GPS (در محیط های خارج از خانه) استفاده نمود. می توان به این ربات دوربین اضافه نمود. می توان گیرنده و فرستنده بلوتوث را به این ربات اضافه نمود تا بتوان از طریق گوشی موبایل نیز آن را کنترل نمود (Hayajneh, Melega and Marconi, 2018:119-133). می توان برای افزایش قابلیت های آنها، بر روی کار های گروهی این ربات ها کار نمود. می توان ساختار های دیگر ربات پرنده چهار ملخه را تولید نمود. این ربات در آینده ی نزدیک به صورت تجاری، در اختیار دوستداران این تکنولوژی قرار داده خواهد شد.

منابع

1. C. Lehnert and P. Corke. (2013) *Design and Implementation of an Open Source Micro Quadrotor*, in Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation, Australia.
2. <https://3dr.com/>.
3. https://www.avinc.com/uas/adc/black_widow/.
4. <https://www.bitcraze.io/crazyflie/>.
5. <https://www.dji.com/>.
6. <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>.
7. <https://www.solidworks.com/>.
8. <https://www.vicon.com/>.
9. <http://www.3dprintstore.ir/>.
10. [http://www.amnh.org/explore/amnh.tv/\(watch\)/scicafe/scicafe-swarms-of-aerial-robots/\(category\)/131052](http://www.amnh.org/explore/amnh.tv/(watch)/scicafe/scicafe-swarms-of-aerial-robots/(category)/131052).
11. <http://www.delfly.nl/home.html>.
12. <http://www.keil.com/>.
13. <http://www.proxdynamics.com/products/pd-100-black-hornet-prs>.
14. K. Ma, P. Chirarattanon, S. Fuller and R. Wood. (2013). Controlled flight of a biologically inspired, insect-scale robot, in Science.
15. K. Software. (2009). Getting Started Building Applications with RL-ARM, Germany: Keil.
16. M. Hayajneh, M. Melega and L. Marconi.(2018). Design of autonomous smartphone based quadrotor and implementation of navigation and guidance systems, Elsevier, pp. 119-133.
17. N. Michael, D. Mellinger, Q. Lindsey and V. Kumar. (2010). The GRASP Multiple Micro UAV Testbed, IEEE, pp. 56-65.
18. Q.-L. Zhou, Y. Zhang, Y.-H. Qu and C.-A. Rabbath. (2010). Dead Reckoning and Kalman Filter Design for Trajectory Tracking of a Quadrotor UAV, in IEEE.
19. S. Thrun, W. Burgard and D. Fox. (2002). Probabilistic Robotics, Communications of the ACM.
20. V. Kumar and N. Michael. (2012). Opportunities and challenges with autonomous micro aerial vehicles, The International Journal of Robotics Research, pp. 1279-1291.
21. Y. Mulgaonkar, G. Cross and V. Kumar. (2015). Design of Small, Safe and Robust Quadrotor Swarms, in International Conference on Robotics and Automation, Washington.
22. Y. Mulgaonkar, M. Whitzer, B. Morgan, C. M.Kroninger, A. M.Harrington and V. Kumar. (2014) Power and Weight Considerations in Small, Agile, Quadrotors, SPIE.