

طراحی مسیر کوادروتورهای همکار به وسیله آرایش رهبر-پیرو بر مبنای کمترین انرژی مصرفی به منظور حمل بار

حسین کیائی، حمیدرضا حیدری*

مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت:

بازنگری:

پذیرش:

ارائه آنلاین:

کلمات کلیدی:

طراحی مسیر

ربات‌های همکار

کوادروتور

کنترل بهینه

انتقال بار

خلاصه: امروزه وسایل هوایی بدون سرنشین به دلیل هزینه پایین، قدرت مانور بالا، بقای خوب در هر دو زمینه نظامی و تجاری مورد توجه بسیار قرار گرفته‌اند. هنگام تعیین یک مأموریت برای چنین سیستم‌هایی، طراحی مسیر، عنصر حیاتی کل سیستم است. در میان وسایل هوایی بدون سرنشین، کوادروتورها از اهمیت بیشتری برخوردارند. توانایی‌های این وسیله در حمل و نقل بار هوایی توجه بسیاری از گروه‌های تحقیقاتی در سراسر جهان را به خود جلب کرده است. در این پژوهش طراحی مسیر بر مبنای کمترین انرژی مصرفی به منظور حمل بار مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر تابع هدف پیشنهادی به منظور طراحی مسیر بهینه برای حمل بار بر مبنای کاهش انرژی مصرف شده کوادروتورها می‌باشد. نتایج بیانگر کاهش ۳۵/۲۹٪ میانگین انرژی مصرفی یک کوادروتور در حالت همکار نسبت به یک کوادروتور در حالت انفرادی بود. همچنین این موضوع نشانگر افزایش ظرفیت حمل بار در حالت گروهی می‌باشد. از سوی دیگر آرایش رهبر پیرو مورد نظر نیز با توجه به روابط تعریف شده ایجاد و تا انتهای مسیر حفظ شده است. نتایج شبیه‌سازی قدرت روش و توانایی آن برای حل مسائل پیچیده نظیر طراحی مسیر حرکت کوادروتورهای همکار به منظور حمل بار را نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

اطمینان‌های مختلف است، به دست آید [۲].
امروزه وسایل پرنده بدون سرنشین به دلیل هزینه پایین، قدرت مانور بالا، بقای خوب در هر دو زمینه نظامی و تجاری مورد توجه بسیار قرار گرفته‌اند. استفاده از این وسایل هنگام انجام مأموریت‌های خطرناک می‌تواند باعث حذف حضور عامل انسانی شده و از به خطر افتادن جان انسان‌ها جلوگیری کند. از کاربردهای این ربات‌ها می‌توان به مواردی همچون حمل و نقل، بازرسی، تشخیص ناهنجاری و پیشگیری، تشخیص آتش‌سوزی و حفاظت از جنگل، نظارت بر مخبرات، ترافیک و محیط‌زیست، عملیات جستجو و نجات، گشت‌های مرزی، تصویربرداری و نقشه‌برداری، شناسایی، جستجو و تخریب، جاسوسی، کشاورزی و سرگرمی نام برد.

وسایل هوایی بدون سرنشین بر اساس نوع بال خود به سه دسته اصلی بال‌زن، بال ثابت و عمودپرواز تقسیم می‌شوند. مکانیزم پروازی وسایل بال‌زن شبیه پرنده‌گان بوده و استفاده از آن‌ها نسبت به دودسته دیگر محدودتر است. از وسایل هوایی بال ثابت بیشتر برای پرواز مستقیم روبه‌جلو با سرعت بالا استفاده می‌شود. عمودپروازها به دلیل قابلیت مانوردهی بالا و خاصیت معلق

وسایل نقلیه بدون سرنشین که قابلیت مانور بالا دارند به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان سیستم‌های کاری در محیط‌های مختلف استفاده می‌شوند. هنگام تعیین یک مأموریت، طراحی مسیر، عنصر حیاتی کل سیستم است. به‌طور کلی، طراحی مسیر پیدا کردن مسیری بدون برخورد و بهینه از نقطه شروع به هدف در فضای کاری با توجه به معیارهای مطلوب (مانند حداقل هزینه، کوتاه‌ترین زمان، کوتاه‌ترین مسیر و غیره) تحت محدودیت‌های حرکتی می‌باشد [۱].

طراحی مسیر به‌عنوان یک مشکل بزرگ در رباتیک به شمار می‌رود، از آنجاکه پیچیدگی آن با ابعاد فضای پیکربندی افزایش می‌یابد. فضای پیکربندی به‌عنوان فضایی است که یک سیستم فیزیکی ممکن است با توجه به محدودیت‌های خارجی و محیطی به دست آورد. در محیط‌های پیچیده، هدف الگوریتم‌های طراحی مسیر نه‌تنها برای پیدا کردن یک مسیر بدون برخورد، بلکه به‌منظور کاهش طول سفر یا مصرف انرژی است. بنابراین باید همه این عوامل در نظر گرفته شوند تا مسیر واقع‌بینانه‌ای که سازگار با عدم

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hr.heidari@malayeru.ac.ir

کنترل آرایش به یک مسئله ردیابی اهداف گروه توسط رهبر تبدیل می‌شود. درحالی‌که ربات‌های پیرو مختصات رهبر را دنبال می‌کنند. از معایب آن می‌توان به این نکته اشاره کرد که حرکت اعضا مستقل از رهبر بوده و هیچ بازخورد روشنی از پیروان به رهبر وجود ندارد [۱۱].

درروش ساختار مجازی، کل آرایش به‌عنوان یک جسم صلب در نظر گرفته می‌شود و قانون کنترل برای یک ربات تنها با تعریف دینامیک ساختار مجازی به دست می‌آید و سپس حرکت ساختار مجازی را به حرکت مطلوب ربات تبدیل می‌کند.

آرایش رفتاری با طراحی ساده رفتارهای دلخواه یا حرکت اولیه برای هر ربات آغاز می‌شود که هر کدام می‌توانند کار خاصی مانند اجتناب از مانع، جستجوی هدف و نگهداری آرایش انجام دهند و الگوهای حرکت پیچیده هر ربات با استفاده از یک مجموع وزنی اهمیت نسبی این حرکات اولیه و تعامل چندین ربات ایجاد می‌شود [۱۱].

مزیت این روش این است که موازی توزیع شده و در زمان واقعی است و اطلاعات کمتری در میان ربات‌ها باید در ارتباط باشد. بنابراین به‌ویژه در هدایت سیستم‌های چند رباتی در یک محیط ناشناخته یا محیط با دینامیک متغیر مفید است. با این حال، اشکال اصلی این است که تجزیه و تحلیل ریاضی دشوار است و در نتیجه همگرایی آرایش به پیکربندی موردنظر نمی‌تواند تضمین شود [۱۲].

پیزتا^۲ و همکاران [۱۳] با استفاده از یک کنترل کننده مبتنی بر خطی‌سازی بازخورد، کوادروتور را به دنبال یک سری از ایستگاه‌ها یا یک مسیر از پیش تعیین شده هدایت کردند. در این کار سیستم کوادروتور به همراه بار معلق به صفحه XZ محدود بود. به‌عنوان مثال، برنامه‌ریزی دینامیکی و یک مدل خطی گسسته از سیستم کوادروتور با بار برای محاسبه یک مسیر بهینه که توسط ربات هوایی اجرا می‌شود توسط پالونکو^۳ و همکاران [۱۴] استفاده شد. روشی مشابه توسط فاست^۴ و همکاران [۱۵] ارائه شده است که از یک روش یادگیری تقویتی برای ایجاد یک مسیر بهینه بدون چرخش در یک محیط پر از مانع شناخته‌شده استفاده شده است. تعریف و تجزیه و تحلیل مدل ترکیبی برای سیستم کوادروتور با بار معلق برای مقابله با مواردی که تنش در کابل به صفر می‌رسد توسط اسریناس^۵ و همکاران [۱۶] معرفی شده است. در این کار یک کنترل کننده هندسی طراحی شده است تا خواص ثبات محلی به

ماندن در هوا و همچنین فراز و فرود عمودی دارای محبوبیت بیشتری هستند. عمودپروازها نیز دارای انواع گوناگونی از جمله هلیکوپترهای معمولی، هلیکوپترهای هم‌محور و نیز انواع چند روتورها با پیکربندی‌های مختلف می‌باشند که در این میان کوادروتورها به دلیل ساختار ساده‌ای که دارند از اهمیت بیشتری برخوردارند. زیرا بدون نیاز به اتصالات مکانیکی پیچیده تنها از طریق تغییر دور روتور، می‌توان هرگونه حرکت دلخواهی را در آن ایجاد کرد [۳].

از طرفی دیگر طراحی مسیر بهینه ربات پرنده مابین دو نقطه مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته شده است. هن و همکاران [۴] یک الگوریتم مناسب برای طراحی مسیر یک ربات کوادروتور ارائه دادند. کتین و ایلماز [۵] یک الگوریتم موازی پیشنهاد دادند که همزمان علاوه بر طراحی مسیر از برخورد ربات با موانع نیز جلوگیری می‌کند. در این راستا الگوریتم‌های مختلفی [۶-۸] از جمله A*، ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱ و روش‌های جستجو برای پیدا نمودن مسیر بهینه برای شرایط محیطی متفاوت ارائه شده است ولی روش پیشنهادی در این مقاله بصورت تحلیلی و دقیق می‌باشد [۹].

یکی دیگر از مهم‌ترین موضوعات در کنترل سیستم‌های همکار چند رباتی مسئله کنترل آرایش است که به‌عنوان هماهنگی گروه ربات‌ها برای دست‌یابی و حفظ و نگهداری آرایش در شکلی معین می‌باشد. توسعه آرایش پروازی در مأموریت‌های نظامی و غیرنظامی ربات‌های بدون سرنشین به‌وضوح در دهه‌های اخیر دیده شده است. امروزه آرایش پروازی یک موضوعی حیاتی برای برنامه‌های ناسا، وزارت دفاع و آژانس‌های بین‌المللی فضایی است.

بر اساس مطالعات انجام شده کنترل آرایش پروازی متداول را می‌توان به سه بخش عمده تقسیم‌بندی کرد که عبارت‌اند از: ۱- آرایش رهبر پیرو ۲- آرایش ساختار مجازی ۳- آرایش رفتاری.

در روش رهبر پیرو، کنترل مسیر پرواز گروه بر عهده یک عضو می‌باشد که به‌عنوان رهبر انتخاب می‌شود و دیگر اعضا رهبر را دنبال می‌کنند. یک عضو در عین پیرو بودن می‌تواند رهبر اعضای دیگر نیز باشد. حرکت آرایش توسط رهبر تعیین می‌شود و کنترل آن ساده می‌باشد و به‌طور گسترده در آرایش‌های پروازی متشکل از پهپادها پیاده‌سازی شده است. این روش اولین بار توسط داس و همکاران [۱۰] ابداع شد.

مزیت اصلی این استراتژی این است که حرکت آرایش به‌طور کامل توسط مسیر رهبر تعیین می‌شود. بنابراین کنترل آن ساده است، زیرا مسئله

2 Pizetta
3 Palonko
4 Faust
5 Sreenath

مدل آرایش رهبر- پیرو سادگی روابط حاکم بر آن می‌باشد.

ادامه مقاله نیز به شرح ذیل می‌باشد: در بخش ۲ به ارائه مدل کوادروتور با بار معلق، آرایش همکاری و مدل انرژی موتورهای کوادروتور پرداخته می‌شود. در بخش ۳ طراحی مسیر کوادروتور با حداقل انرژی مصرفی فرمول‌سازی می‌شود. بخش ۴ به نتایج حل عددی روش پیشنهادی با کوادروتور دی‌جی فانتوم ۲ اختصاص دارد و سرانجام در بخش ۵ به نتیجه‌گیری پرداخته می‌شود.

۲- مدل‌سازی کوادروتور

۲-۱- مدل دینامیکی کوادروتورهای همکار با بار معلق

سیستم کوادروتورهای همکار و بار به‌عنوان یک مدل دینامیکی انتقالی-چرخشی ارائه شده است. مدل دینامیکی هر دو سیستم تحت فرضیات خاصی قرار می‌گیرد که در ذیل آمده است:

- سازه کوادروتورها به‌صورت صلب با چهار پروانه در نظر گرفته می‌شود که قادر به ایجاد گشتاور و تراست برای هر یک می‌باشد.
- نیروی مقاومت هوا ناچیز است.
- کابل بدون جرم است و کشیده نمی‌شود (بدون تنش).
- جرم نقطه‌ای توسط کابل در مرکز جرم کوادروتورها آویزان شده است. در ابتدا همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، باری به‌صورت جرم نقطه‌ای که توسط $n \geq 1$ کوادروتور معلق است مورد بررسی قرار می‌گیرد. درجات آزادی مستقل این سیستم، موقعیت بار $x_L \in R^3$ ، حالت کابل‌های معلق، $q_i \in S^2$ و حالت کوادروتورها $R_i \in SO(3)$ هستند. با تعریف طول کابل λ_m به‌عنوان L_i با توجه به هندسه چگونگی اتصال بار به کوادروتور، موقعیت کوادروتور $x_L \in R^3$ به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شود.

$$x_i = x_L - L_i q_i \quad (1)$$

با استفاده از تنش در کابل، $T_i \in R$ ، دینامیک اولیه n کوادروتور و بار را می‌توان به‌راحتی به‌صورت زیر نوشت [۲۲]:

$$\begin{aligned} m_i \ddot{x}_i &= F_i R_i e_3 - m_i g e_3 + T_i q_i \\ J_i \ddot{\Omega}_i + \Omega_i \times J_i \Omega_i &= M_i \\ m_L \ddot{x}_L &= -\sum T_i q_i - m_L g e_3 \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن m_i جرم، J_i ممان اینرسی و F_i نیروی تراست کوادروتور i ام،

m_L جرم بار و e_p بردار واحد در امتداد محور z کلی است.

دست آید. یک سناریوی مشابه توسط تنگ^۱ و کومار^۲ [۱۷] در نظر گرفته شده است که در آن، یک مدل هیبریدی برای کوادروتور با بار معلق توسط کابل در نظر گرفته شده است و مسئله ایجاد مسیر به‌عنوان برنامه‌نویسی درجه دوم مختلط فرموله شده است. فرض کلی کابل بدون جرم توسط گودرزلی و لی^۳ [۱۸] عنوان شده است، که کابل اتصال بار به ربات به‌عنوان چند لینک متصل به هم مدل شده است. در این کار نویسندگان از کنترل هندسی برای تثبیت وسیله استفاده می‌کنند، به‌طوری‌که پیوندها به‌صورت هم‌راستا به‌صورت عمودی در زیر کوادروتور قرار دارند.

درحالی‌که تحقیقات قابل‌توجهی برای مطالعه دینامیک و کنترل کوادروتور با بار معلق انجام شده است، تاریخچه نسبتاً کمی در ارتباط با حمل بار معلق با استفاده از کوادروتورهای همکار موجود است. لی و همکاران [۱۹] کنترل و ردیابی چندین کوادروتور همکار را با بار معلق شبیه‌سازی کرده و آن را به یک جرم نقطه‌ای به‌وسیله یک لینک صلب بدون جرم متصل کردند. در این تحقیق کوادروتورهای چندگانه با بارهای معلق نقطه‌ای و بارهای صلب نشان داده شده که به‌طور متقارن مسطح هستند و این ویژگی برای یافتن مسیرهای پویای قابل‌قبول برای بار و کوادروتورها مورد بهره‌برداری قرار گرفت. استراتژی کنترل و اجتناب از برخورد بین دو کوادروتور در هنگام حمل بار معلق با نتایج شبیه‌سازی در مرجع [۲۰] توسط اسریناس و کومار [۲۱] ارائه شده است. بنابراین می‌توان اشاره کرد که بیشتر تحقیقات در مورد کنترل همکار بار معلق به‌طور عمده با استفاده از شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفته و چالش‌های مرتبط با پیاده‌سازی دنیای واقعی به‌طور کامل درک نشده است [۲۲].

ایده اصلی این پژوهش تعریف تابع هزینه بر مبنای معادلات ولتاژ و جریان موتور کوادروتورها و همچنین به حداقل رساندن سرعت نسبی اعضا و تثبیت و حفظ فاصله اعضا از یکدیگر به همراه ردیابی رهبر می‌باشد. در این پژوهش با در دست داشتن معادلات دینامیکی کوادروتور، معادلات دینامیکی بار نقطه‌ای معلق توسط کابل به‌منظور انتقال بار، معادلات دینامیکی آرایش همکاری کوادروتورها و در نظر گرفتن مسئله کنترل بهینه به طراحی مسیر سیستم پرداخته شده است. بدین‌صورت که در ابتدا به‌منظور بهینه‌سازی انرژی سیستم مسیری برای یک کوادروتور با وجود بار معلق طراحی شده است. در گام بعدی همین شرایط برای سه کوادروتور در نظر گرفته شده که با آرایش رهبر پیرو به‌صورت گروهی باری را حمل کرده‌اند. دلیل استفاده از

1 Tang
2 Kumar
3 Lee

$$\begin{aligned} \kappa_b &= C_T \rho A r^2, \\ \kappa_l &= C_Q \rho A r^3, \\ C_Q &= C_T \sqrt{C_T/2} \\ J_L &= \frac{1}{4} n_B m_B (r-\epsilon)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

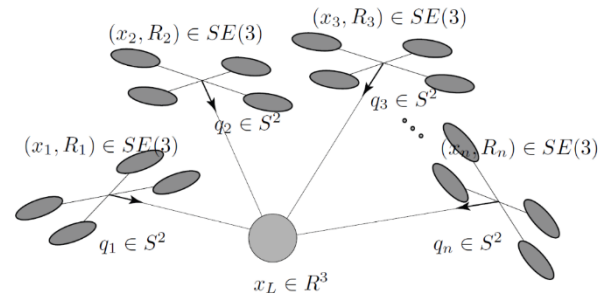


Fig. 1. Cooperative quadrotors system with suspended load

شکل ۱: سیستم n کوادروتور همکار به همراه بار معلق

با توجه به فرضیه‌های فوق، معادلات حرکت سیستم کوادروتور به همراه بار معلق از آن به صورت زیر بیان می‌شود [۲۳]:

$$\begin{aligned} \ddot{\phi} &= \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \dot{\theta} \dot{\psi} - \frac{J_R}{I_{xx}} \dot{\theta} \Omega_R + \frac{l}{I_{xx}} u_2 \\ \ddot{\theta} &= \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \dot{\phi} \dot{\psi} + \frac{J_R}{I_{yy}} \dot{\phi} \Omega_R + \frac{l}{I_{yy}} u_3 \\ \ddot{\psi} &= \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \dot{\phi} \dot{\theta} + \frac{1}{I_{zz}} u_4 \\ \ddot{x} &= \frac{F_x}{n_Q m_Q} + (\sin \phi \sin \psi + \cos \phi \cos \psi \sin \theta) \frac{u_1}{m_Q} \\ \ddot{y} &= \frac{F_y}{n_Q m_Q} + (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \cos \psi \sin \phi) \frac{u_1}{m_Q} \\ \ddot{z} &= (\cos \theta \cos \phi) \frac{u_1}{m_Q} - g - \frac{m_L g}{n_Q m_Q} \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن m_Q جرم کوادروتور به کیلوگرم، $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ شتاب جاذبه، $J_R = J_m + J_L$ ممان اینرسی کل موتور و l فاصله مرکز جرم کوادروتور تا موتور است. ضرایب u_i نیز عبارت‌اند از [۲۳]:

$$\begin{aligned} u_1 &= \kappa_b (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \\ u_2 &= \kappa_b (\omega_2^2 - \omega_4^2) \\ u_3 &= \kappa_b (\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ u_4 &= \kappa_l (\omega_1^2 + \omega_3^2 - \omega_2^2 - \omega_4^2) \\ \Omega_R &= \omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4 \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن ω_i سرعت زاویه ای روتورها، Ω_R مجموع سرعت زاویه‌ای روتورها بوده و ضرایب κ_b (فاکتور تراست) و κ_l (فاکتور مقاومت هوا) و عبارت J_L به صورت زیر تعریف می‌شوند:

که n_B تعداد پره‌های پروانه، m_B جرم پره، r و A به ترتیب شعاع و مساحت حرکت پروانه می‌باشند، ϵ فاصله بین ریشه پره و تویی موتور، C_T ضریب تراست پروانه است که به هندسه پره بستگی دارد، C_Q ضریب گشتاور و ρ چگالی هوا می‌باشند.

۲-۲- مدل‌سازی آرایش همکاری

در این قسمت تابع هزینه‌ای تعریف می‌شود که با به حداقل رساندن سرعت نسبی اعضا و تثبیت و حفظ فاصله تا رهبر و همچنین ردیابی رهبر، آرایش رهبر پیرو را تشکیل می‌دهد. با الهام گرفتن از مرجع [۲۴] تابع هزینه پیشنهادی عبارت است از:

$$\begin{aligned} J &= \int_0^T (\text{Quadrotor Energy}) dt \\ &+ \sum_{i=1}^3 \sum_{j \in N_i} (v_i - v_j) Q_{ij} (v_i - v_j)^T \\ &+ \sum_{j \in N_i} (v_i - v_j) G (v_i - v_j)^T \\ &+ \sum_{i=1}^3 \sum_{j \in N_i} (p_i - p_j - d) Q_p (p_i - p_j - d)^T \end{aligned} \quad (6)$$

که خطوط تابع هزینه بالا به ترتیب عوامل انرژی مصرفی کوادروتور، کنترل سرعت، ردیابی رهبر و کنترل فاصله بوده و d بیانگر عامل فاصله از رهبر، p_i بیانگر فاصله اعضا، v بیانگر سرعت مطلوب و v_i بیانگر سرعت اعضا می‌باشد که به صورت زیر تعریف شده‌اند.

$$\begin{aligned} d &= [d_x \quad d_y]^T \\ v &= [v_{xd} \quad v_{yd}]^T \\ v_i &= [v_{xi} \quad v_{yi}]^T \\ p_i &= [x_i \quad y_i]^T \\ Q_{ij} &= \text{diag}([3 \quad 3]^T) \times 3000 \\ G &= \text{diag}([3 \quad 3]^T) \times 2000 \\ p &= \text{diag}([3 \quad 3]^T) \times 5000 \end{aligned} \quad (7)$$

عامل انرژی مصرفی کوادروتور در بخش بعد بیان می‌شود.

از:

۳- طراحی مسیر با حداقل انرژی

در این بخش، مسئله کنترل بهینه برای به حداقل رساندن انرژی ورودی‌های کنترلی کوادروتور تعریف می‌شود. ابتدا مدل الکتریکی یک موتور جریان مستقیم بدون جاروبک ارائه می‌شود و در قسمت بعد با در نظر گرفتن معادلات دینامیکی کوادروتور، مسئله مربوط به طراحی مسیر با حداقل انرژی مصرفی موتور فرموله شده است.

مدل باتری موتور جریان مستقیم بدون جاروبک، انرژی مصرفی در سیم‌پیچ‌های مقاومتی و القایی و انرژی مورد نیاز برای غلبه بر اصطکاک داخلی و بار را در نظر می‌گیرد. جریان $i(t)$ در موتور توسط مراجع [۲۵ و ۲۶] داده شده است.

$$i(t) = \frac{1}{K_T} \left[T_f + T_L(\omega(t)) + D_f \omega(t) + (J_R) \frac{d\omega(t)}{dt} \right] \quad (۸)$$

که $\omega(t)$ (rad/s) سرعت زاویه‌ای شفت موتور، K_T (N.m/A) گشتاور ثابت موتور، T_f گشتاور اصطکاک موتور، $T_L(\omega(t))$ سرعت وابسته به گشتاور اصطکاک بار که از درگ پروانه نتیجه می‌شود، D_f (N.m.s/rad) چسبندگی میرایی موتور و $J_R = J_m + J_L$ ممان اینرسی کل موتور می‌باشد. توجه داشته باشید که در یک موتور جریان مستقیم بدون جاروبک، T_f (معمولاً فقط به دلیل درگ بلبرینگ) و D_f که تلفات انرژی در مایع روانکار است، بسیار کوچک هستند. ولتاژ در موتور $e(t)$ به صورت زیر داده شده است [۲۵]:

$$e(t) = R_i(t) + K_E \omega(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (۹)$$

که در آن $R_i(t)$ و L مقاومت و القاء سیم‌پیچ فاز و K_E ثابت ولتاژ موتور [V.s/rad] است. توجه داشته باشید که $K_E = K_T$. علاوه بر این، اگر K_E در مقیاس mV/rpm بیان شود، $K_E = 1000 / K_V$ که K_V ثابت سرعت موتور [V/rpm] است. مقاومت R_L نشان‌دهنده تلفات در مدار مغناطیسی موتور، معمولاً بسیار بزرگ‌تر از R است. از این رو اثر R_L در عملکرد موتور می‌تواند نادیده گرفته شود [۲۵]. در شرایط حالت پایدار، جریان $i(t)$ ثابت است و رابطه (۹) به صورت زیر کاهش می‌یابد:

$$e(t) = R_i(t) + K_E \omega(t) \quad (۱۰)$$

انرژی مصرفی کوادروتور بین زمان اولیه t_0 و زمان پایان t_f عبارت است

$$E = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{j=1}^4 e_j(t) i_j(t) dt \quad (۱۱)$$

با استفاده از رابطه‌های (۸) و (۱۰) برای چهار موتور یکسان و با توجه به اینکه $T_L(\omega(j)) = K_T \omega(j)$ فرض $\omega_j(t_0) = \omega_j(t_f)$ ، $j \in \{1, 2, 3, 4\}$ رابطه (۱۱) به صورت زیر بازنویسی می‌شود [۲۳]:

$$E = \int_{t_0}^{t_f} \left[\sum_{j=1}^4 \left(c_1 + c_2 \omega_j(t) + c_3 \omega_j^2(t) + c_4 \omega_j^3(t) + c_5 \omega_j^4(t) + c_6 \dot{\omega}_j^2(t) \right) \right] dt \quad (۱۲)$$

که $\dot{\omega}_j(t)$ شتاب زاویه‌ای موتور j می‌باشد. ضرایب c_1, c_2, \dots, c_6 که وابسته به پارامترهای موتورها و هندسه پروانه‌ها هستند نیز به صورت زیر می‌باشند:

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{RT_f^2}{K_T^2} & c_3 &= \frac{K_T}{K_T} \left(\frac{2RD_f}{K_T} + K_E \right) \\ c_2 &= \frac{T_f}{K_T} \left(\frac{2RD_f}{K_T} + K_E \right) & c_4 &= \frac{RK_T^2}{K_T^2} \\ c_3 &= \frac{D_f}{K_T} \left(\frac{RD_f}{K_T} + K_E \right) + \frac{2RT_f K_T}{K_T^2} & c_6 &= \frac{RJ^2}{K_T^2} \end{aligned}$$

هدف نهایی این است که مسئله ایجاد مسیر با کمترین انرژی را برای یک کوادروتور به‌عنوان یک مسئله کنترل بهینه استاندارد تعیین شود. برای این منظور، رابطه (۳) در حالت فضای حالت با معرفی بردار حالت $x = [x_1, x_2, \dots, x_{16}]^T \in \mathbb{R}^{16}$ و بردار ورودی $u = [u_1, u_2, u_3, u_4]^T \in \mathbb{R}^4$ ، به شرح زیر بازنویسی می‌شوند:

$$\begin{aligned} x_1 &= x & x_2 &= \dot{x}_1 = \dot{x} & x_3 &= y \\ x_4 &= \dot{x}_3 = \dot{y} & x_5 &= z & x_6 &= \dot{x}_5 = \dot{z} \\ x_7 &= \phi & x_8 &= \dot{x}_7 = \dot{\phi} & x_9 &= \theta \\ x_{10} &= \dot{x}_9 = \dot{\theta} & x_{11} &= \psi & x_{12} &= \dot{x}_{11} = \dot{\psi} \\ x_{13} &= \omega_1 & x_{14} &= \omega_2 & x_{15} &= \omega_3 \\ x_{16} &= \omega_4 & \dot{x}_{13} &= \alpha_1 & \dot{x}_{14} &= \alpha_2 \\ \dot{x}_{15} &= \alpha_3 & \dot{x}_{16} &= \alpha_4 \end{aligned} \quad (۱۳)$$

با این تغییر متغیرها، معادلات دیفرانسیل مرتبه اول سیستم به دست

می‌آیند [۲۳]:

که $\omega_{\max} > 0$ حداکثر سرعت موتور و $x_{i_0}, x_{i_f} \in \mathbb{R}^{16}$ بردارهای حالات اولیه هستند. با قرار دادن رابطه (۱۵) در رابطه (۶)، تابع هزینه کنترل بهینه به دست آمده و در بخش بعد با در نظر گرفتن رابطه‌های (۶)، (۱۴) و (۱۵) به حل عددی مسئله کنترل بهینه پرداخته می‌شود.

۴- حل عددی

رابطه (۶) از طریق ابزار آکادو^۱ در متلب حل شده است. برای روش‌های بهینه‌سازی، گزینه‌های پیش‌فرض زیر در آکادو مورد توجه قرار گرفت: در نتیجه، یک تشخیص چندتابی با ۲۰ گره مورد استفاده قرار گرفت و یکپارچگی با روش رانگ-کوتا (مرتب ۴/۵) انجام شد. بهینه‌سازی برنامه ریاضی تقسیم‌شده بر اساس یک روش برنامه‌نویسی درجه یک متوالی^۲ بود. در نهایت، تلورانس کاروش-کوهن-تاکر^۳ که برای معیار همگرایی الگوریتم برنامه‌نویسی درجه یک متوالی مورد استفاده قرار گرفته بود در تمام آزمایش‌ها^{۵-۱۰} بود و حداکثر تعداد تکرارها ۳۰ در نظر گرفته شد. در شکل ۲ فلوجارت محاسبه مسیر بهینه آورده شده است.

در این شبیه‌سازی یک کوادروتور دی چی آی فانٹوم دو با موتور $E 300 (2212/920 K_V)$ با باتری سه سلولی (LiPo 11/1 V) با ظرفیت $C = 18720 \text{ A.s}$ در نظر گرفته شده است. پارامترهای فیزیکی دی چی آی فانٹوم دو که در سناریو مورد بحث قرار گرفته‌اند، در جدول ۱ نشان داده شده است [۲۴].

۴-۱- شبیه‌سازی حمل بار توسط کوادروتور

در این قسمت به حل عددی مسئله کنترل بهینه با در نظر گرفتن رابطه‌های (۶)، (۱۴) و (۱۵) برای دستیابی حداقل انرژی مصرفی، که کوادروتور را از زمان اولیه $t=0$ از مختصات اولیه $[0, 0, 0]$ به زمان انتهای $t_f=20$ و مختصات انتهایی $[8, 4, 0]$ با مقادیر جرم بار $m_L = 0.5 \text{ kg}$ و سرعت زاویه‌ای ناشی از جاذبه برای معلق ماندن در یک نقطه) پرداخته می‌شود. شکل ۳ مقدار انرژی مصرف‌شده یک کوادروتور با بار معلق را در طول حرکت نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل پیداست حداکثر مقدار انرژی مصرف‌شده در طول پرواز برای یک کوادروتور با وجود بار معلق حدود $23/66 \text{ kJ}$ می‌باشد.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{F_x}{n_Q m_Q} + \frac{K_b}{m_Q} (\sin x_7 \sin x_{11} + \cos x_7 \cos x_{11} \sin x_9) \sum_{k=13}^{16} x_k^2 \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \frac{F_y}{n_Q m_Q} + \frac{K_b}{m_Q} (\cos x_7 \sin x_9 \sin x_{11} - \cos x_{11} \sin x_7) \sum_{k=13}^{16} x_k^2 \\ \dot{x}_5 &= x_6 \\ \dot{x}_6 &= \frac{K_b}{m_Q} (\cos x_9 \cos x_7) \sum_{k=13}^{16} x_k^2 - g - \frac{m_l g}{m_Q n_Q} \\ \dot{x}_7 &= x_8 \\ \dot{x}_8 &= \left(\frac{I_y - I_z}{I_x} \right) x_{10} x_{12} + \frac{l K_b}{I_x} (x_{14}^2 - x_{16}^2) - \frac{J}{I_x} x_{10} (x_{13} - x_{14} + x_{15} - x_{16}) \\ \dot{x}_9 &= x_{10} \\ \dot{x}_{10} &= \left(\frac{I_z - I_x}{I_y} \right) x_8 x_{10} + \frac{l K_b}{I_z} (x_{15}^2 - x_{13}^2) + \frac{J}{I_x} x_8 (x_{13} - x_{14} + x_{15} - x_{16}) \\ \dot{x}_{11} &= x_{12} \\ \dot{x}_{12} &= \left(\frac{I_x - I_y}{I_z} \right) x_8 x_{10} + \frac{K_b}{I_z} (x_{13}^2 - x_{14}^2 + x_{15}^2 - x_{16}^2) \\ \dot{x}_{13} &= \alpha_1, \quad \dot{x}_{14} = \alpha_2, \quad \dot{x}_{15} = \alpha_3, \quad \dot{x}_{16} = \alpha_4 \\ x_{13} &= \dots = x_{16} \end{aligned} \tag{14}$$

توجه داشته باشید که با توجه به متغیرهای حالت کمکی x_{13}, \dots, x_{16} سیستم غیرخطی رابطه (۱۴) وابسته به کنترل α می‌باشد، یعنی به فرم $\dot{x} = F(x) + G(\alpha)$ که در آن میدان برداری $F(x): \mathbb{R}^{16} \rightarrow \mathbb{R}^{16}$ و $G = [0_{4 \times 12} \quad I_{4 \times 4}]^T$ ، که α ماتریس صفر و I ماتریس واحد است. با در نظر گرفتن رابطه‌های (۱۲) و (۱۴)، عامل انرژی مصرفی کوادروتور تابع هزینه کنترل بهینه برای به حداقل رساندن انرژی مصرفی کوادروتور به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۳]:

$$E = \int_{t_0}^{t_f} \left[\sum_{k=13}^{16} \left(c_1 + c_2 x_k(t) + c_3 x_k^2(t) + c_4 x_k^3(t) + c_5 x_k^4(t) + c_6 \sum_{j=1}^4 \alpha_j^2(t) \right) \right] dt \tag{15}$$

$$x(t_0) = x_{i_0}, \quad x(t_f) = x_{i_f}$$

$$0 \leq x_{13} \leq \omega_{\max}, \quad 0 \leq x_{14} \leq \omega_{\max}$$

$$0 \leq x_{15} \leq \omega_{\max}, \quad 0 \leq x_{16} \leq \omega_{\max}$$

- 1 ACADO
- 2 Sequential Quadratic Programming (SQP)
- 3 Karush-Kuhn-Tucker (KKT)

در شکل ۴ مسیر حرکت کوادروتور در حالت انفرادی از مختصات اولیه به مختصات نهایی نمایش داده شده است. مسیر تعیین شده به شکل خطی صاف در نظر گرفته شده است. در حالت عادی و بدون در نظر گرفتن مسئله کنترل بهینه کوادروتور همان مسیر صاف تعریف شده را طی خواهد کرد. اما در اینجا با توجه به اینکه مسیر تعیین شده با کمک مسئله کنترل بهینه، بهینه‌سازی شده است، حرکتی سهموی در محور Z یا همان ارتفاع مشاهده می‌شود که در آن کوادروتور برای رسیدن به مقصد کمترین انرژی را مصرف می‌کند.

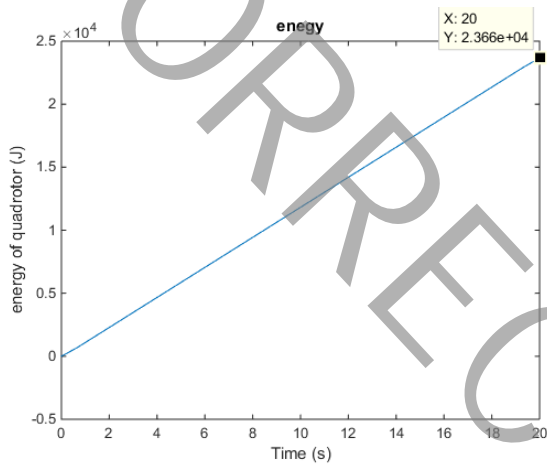


Fig. 3. Quadrotor energy consumption with suspended load

شکل ۳: انرژی مصرفی کوادروتور با بار معلق

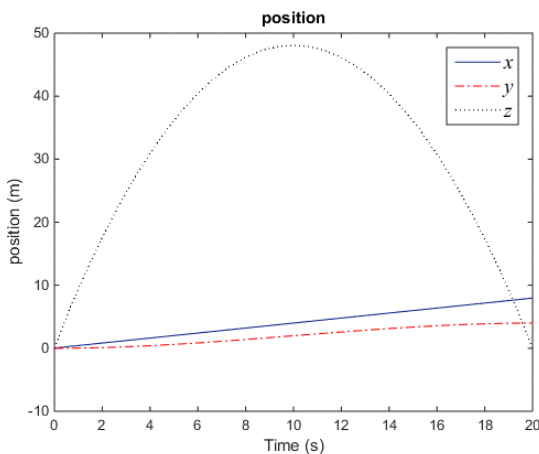


Fig. 4. The quadrotor movement in individual mode from the initial coordinates to the final coordinates

شکل ۴: مسیر حرکت کوادروتور در حالت انفرادی از مختصات اولیه به مختصات نهایی

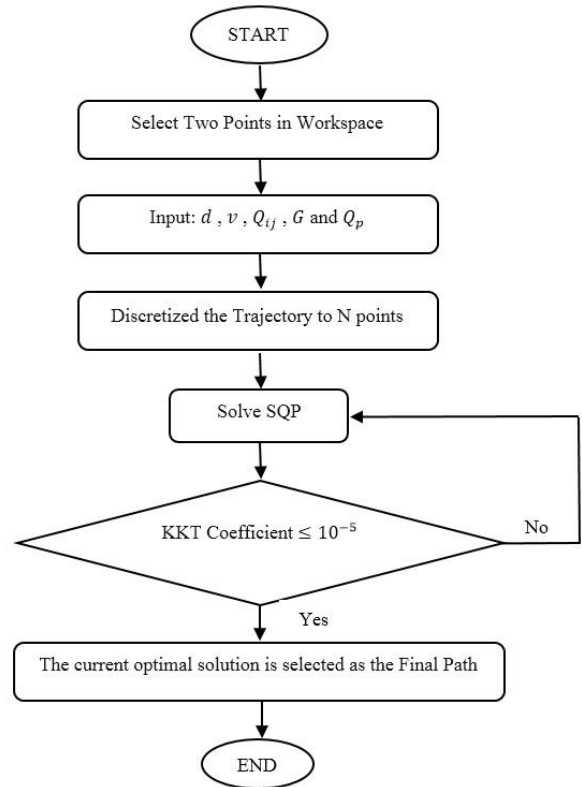


Fig. 2. Flowchart calculation for optimal path planning

شکل ۲: فلوچارت محاسبه مسیر بهینه ربات

جدول ۱: پارامترهای کوادروتور استفاده شده در شبیه‌سازی

Table 1. Quadrotor parameters used in simulation

کمیّت	مقدار	واحد
K_V	۹۲۰	rpm/V
K_E	$9/5493/K_V$	V.s/rad
T_f	4×10^{-2}	N.m
D_f	2×10^{-2}	N.m.s/rad
R	۰/۲	Ω
J_m	$4/9 \times 10^{-6}$	kg/m ²
ω_{max}	۱۰۴۷/۹۷	rad/s
n_B	۲	--
m_B	۰/۰۰۵۵	kg
r	۰/۱۲	m
ϵ	۰/۰۰۴	m
C_T	۰/۰۰۴۸	--
C_Q	$2/3515 \times 10^{-2}$	--
r_{rot}	۰/۰۱۴	m
ρ	۱/۲۲۵	kg/m ³
m	۱/۳	kg
l	۰/۱۷۵	m
J_{xx}	۰/۰۸۱	kg.m ²
J_{yy}	۰/۰۸۱	kg.m ²
I_{zz}	۰/۱۴۲	kg.m ²
m_{rot}	۰/۰۲۵	kg

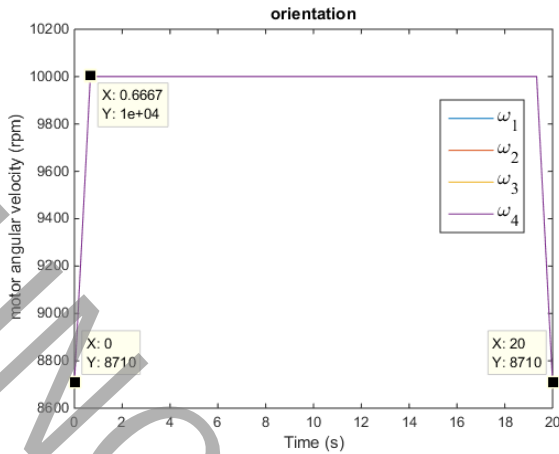


Fig. 6. Angular velocity variations of the quadrotor propellers from the initial coordinates to the final coordinates

شکل ۶: تغییرات سرعت زاویه‌ای روتورهای کوادروتور از مختصات اولیه به مختصات نهایی

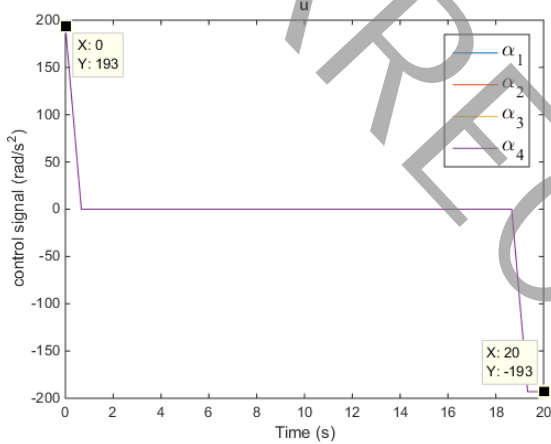


Fig. 7. Angular acceleration variations of the quadrotor propellers from the initial coordinates to the final coordinates

شکل ۷: تغییرات شتاب زاویه‌ای روتورهای کوادروتور از مختصات اولیه به مختصات نهایی

شکل ۸ میانگین انرژی مصرفی یک کوادروتور با بار معلق در حالت گروهی را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود میانگین حداکثر انرژی مصرفی یک کوادروتور در حالت همکاری برابر $15/31$ kJ می‌باشد که در مقایسه با یک کوادروتور در حالت انفرادی $35/29\%$ کاهش در مصرف انرژی در پی دارد. با توجه به اینکه وزن بار تا سه برابر افزایش یافته، اما حرکت دادن کوادروتورها در حالت همکاری به‌منظور حمل بار $1/5$ کیلوگرمی کاهش چشمگیری در مصرف انرژی سیستم در پی داشته است. در واقع استفاده از سه ربات منجر به تعادل بیشتر کوادروتورها در حمل بار شده است و زوایای چرخش دماغه

در شکل ۵ میزان دوران حول محورهای مختصات نشان داده شده است. این شکل بیان می‌کند که کوادروتور برای داشتن حرکتی با حداقل انرژی مصرفی، نیازمند حرکت دورانی حول محور Z یا تغییر در زاویه ψ می‌باشد که این تغییر زاویه تا رسیدن به مقصد ادامه خواهد داشت.

شکل ۶ بیانگر تغییرات سرعت زاویه‌ای روتورهای کوادروتور در مسیر مشخص شده می‌باشد. این شکل نشان می‌دهد که در هنگام شروع پرواز کوادروتور سرعت زاویه‌ای پروانه‌ها برابر 8710 rpm بوده که پس از شروع حرکت سرعت پروانه‌ها به 10000 rpm رسیده که برای حرکت در حالت بهینه تا اواخر مسیر این سرعت حفظ شده و در انتهای مسیر، سرعت پروانه‌ها به سرعتی برابر با سرعت اولیه رسیده است.

مقدار تغییرات شتاب زاویه‌ای روتورهای کوادروتور که همان سیگنال‌های کنترلی تعریف شده هستند نیز در شکل ۷ نشان داده شده است.

۴-۲- شبیه‌سازی حمل بار گروهی توسط کوادروتورهای همکار

در این بخش شرایط شبیه‌سازی یک کوادروتور با بار، با در نظر گرفتن معادلات همکاری، برای سه کوادروتور به‌منظور حمل بار تحت آرایش رهبر پیرو و حفظ آرایش در مسیر اعمال می‌شود. برای حمل بار گروهی برای کوادروتورها، باری برابر $m_L = 1/5$ kg در نظر گرفته شده است که این بار سه برابر وزن باری است که در حالت انفرادی برای کوادروتور تعیین شده است. هدف از این کار بررسی این موضوع است که یک کوادروتور در حالت گروهی چه مقدار انرژی در مقایسه با حالت انفرادی مصرف می‌کند. نتایج شبیه‌سازی انجام شده در ادامه آورده شده است.

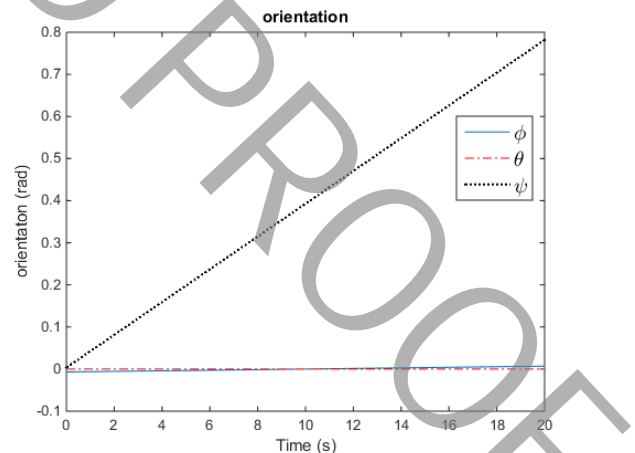


Fig. 5. Quadrotor angles around coordinate axes from the initial point to the final point

شکل ۵: زوایای کوادروتور حول محورهای مختصات از نقطه اولیه به نقطه نهایی

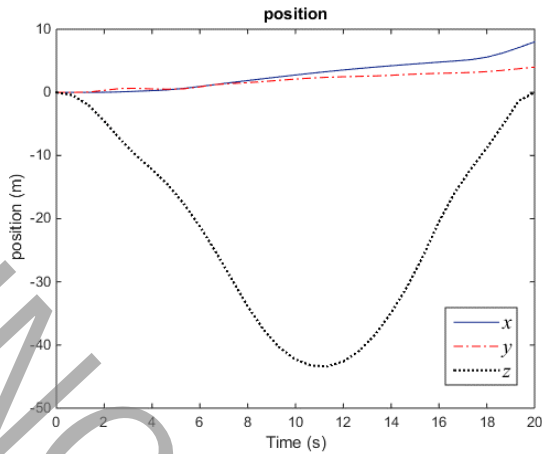


Fig. 9. The quadrotor leader trajectory from the initial coordinates to the final coordinates

شکل ۹: مسیر حرکت کوادروتور رهبر از مختصات اولیه به مختصات نهایی

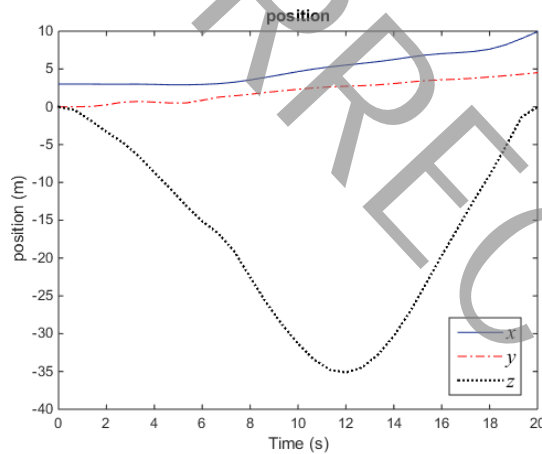


Fig. 10. Path of the second quadrotor (First Follower)

شکل ۱۰: مسیر حرکت کوادروتور دوم (پیرو اول)

و برگشتی مشاهده می‌شود.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی موضوع طراحی مسیر کوادروتورهای همکار برای انتقال بار به صورت گروهی پرداخته شد. در ابتدا مسئله کوادروتورها، مسئله انتقال بار، آرایش ربات‌های همکار و مدل‌سازی و ارائه روابط دینامیکی آن‌ها بیان شد. پس از آن با معرفی روش کنترل بهینه به تعریف مسئله طراحی مسیر با توجه به شتاب زاویه‌ای چهار موتور الکتریکی برای یک کوادروتور به همراه بار معلق توسط کابل به منظور به حداقل رساندن انرژی مصرفی

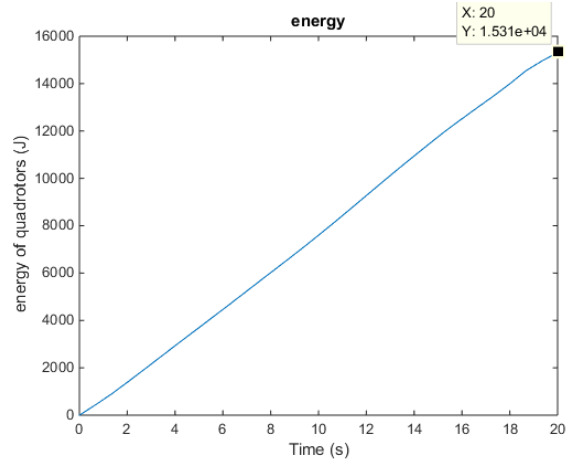


Fig. 8. Average energy consumption of a quadrotor with suspended load in a group mode

شکل ۸: میانگین انرژی مصرفی یک کوادروتور با بار معلق در حالت گروهی

به چپ یا راست حول محور بالا و پایین^۱، چرخش دماغه به بالا یا پایین حول محور بال به بال^۲ و دوران حول محور دماغه تا دم^۳ با توجه به نمودارهای استخراج شده؛ تغییرات کمتری نسبت به تک کوادروتور داشته‌اند و همین امر منجر به کاهش مصرف انرژی آن‌ها شده است. این موضوع بیانگر این است که به وسیله حرکت گروهی کوادروتورها می‌توان بارهایی بیشتر از ظرفیت و توان یک کوادروتور جابه‌جا نمود. اهمیت این موضوع زمانی آشکار می‌شود که برای انتقال محموله زمان کافی برای رفت و برگشت وسیله برای باربری در اختیار نبوده و یا اینکه حجم محموله و اندازه وسایل نقلیه به گونه‌ای باشد که نیازمند جابجایی به صورت گروهی است.

شکل ۹ مسیر حرکت کوادروتور رهبر، شکل ۱۰ مسیر حرکت کوادروتور دوم و شکل ۱۱ مسیر حرکت کوادروتور سوم را در مسیر بهینه‌سازی شده نشان می‌دهد.

مسیر حرکت آرایش رهبر پیرو ایجاد شده و حفظ آن تا انتهای حرکت در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ به ترتیب دوران کوادروتورهای اول، دوم و سوم حول محورهای مختصات نشان داده شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهند که حرکت دورانی دائم کوادروتور در حالت انفرادی با وابسته شدن کوادروتورها به هم تحت آرایش رهبر پیرو تا حد بسیار زیادی از بین رفته و در اکثر مسیر به دلیل وجود بار و نوسان‌های آن، لرزش‌هایی به صورت رفت

- 1 Yaw
- 2 Pitch
- 3 Roll

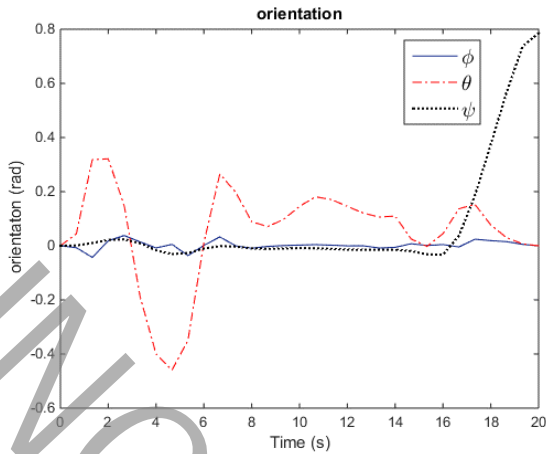


Fig. 13. Angular rotations of the first quadrotor around coordinate axes

شکل ۱۳: دوران کوادروتور اول حول محورهای مختصات

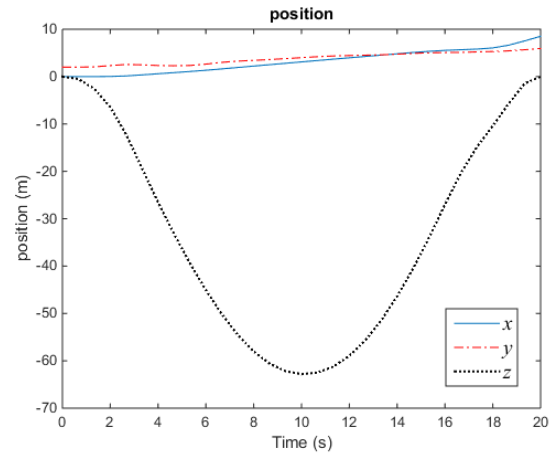


Fig. 11. Path of the third quadrotor (Second Follower)

شکل ۱۱: مسیر حرکت کوادروتور سوم (پیرو دوم)

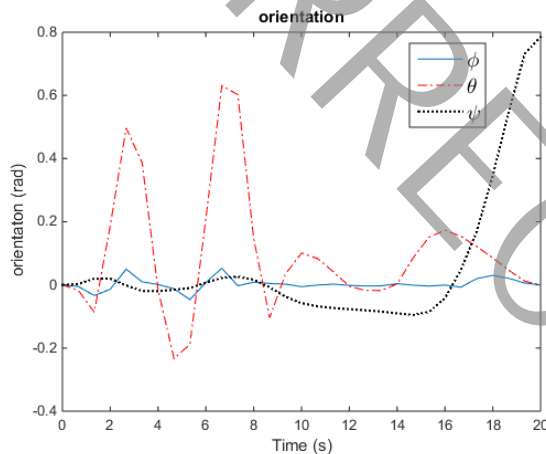


Fig. 14. Angular rotations of the second quadrotor around coordinate axes

شکل ۱۴: دوران کوادروتور دوم حول محورهای مختصات

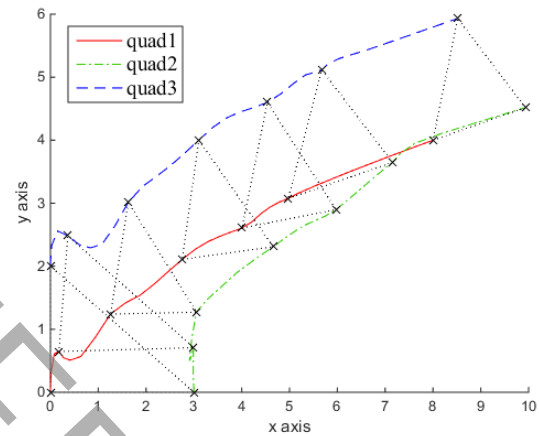


Fig. 12. Path movement of quadrotors formation

شکل ۱۲: مسیر حرکت آرایش کوادروتورها

می‌رساند. از طرفی آرایش گروهی با وابسته کردن حرکت پیرو به رهبر از طریق روابط حفظ فاصله و زاویه تشکیل شد. شکل ۱۰ نشان‌دهنده تحقق این امر بوده که در آن پس از آغاز حرکت اعضا سعی در تشکیل آرایش می‌کنند و پس از آن به حفظ آرایش تا انتهای مسیر می‌پردازند.

در مورد سیستم‌های چندعاملی مهم‌ترین بحث و هدف افزایش توانایی انجام کار است. در مورد این مسئله استفاده از چند عامل باعث می‌شود که کوادروتورها بتوانند بار بیشتری را حمل کنند. در اینجا که انرژی نیز مدنظر بوده است برای بار ثابت ۱/۵ کیلوگرم، کوادروتورها به‌طور میانگین انرژی کمتری نسبت به یک کوادروتور که یک بار ۰/۵ کیلوگرمی را جابه‌جا کرده

سیستم پرداخته شد. پس از آن همین مسئله برای گروهی از کوادروتورهای همکار تحت آرایش رهبر پیرو به‌منظور حمل بار گروهی و مینیموم سازی انرژی سیستم جدید، افزایش ظرفیت بار قابل حمل و حداقل‌سازی سرعت نسبی اعضا بیان شد. تئوری پیشنهادی با استفاده از آزمایش‌های عددی انجام‌شده توسط کوادروتور دی جی آی فانوم دو نشان داده شده است.

نتایج بیانگر کاهش ۳۵/۲۹٪ میانگین انرژی مصرفی یک کوادروتور در حالت همکار نسبت به یک کوادروتور در حالت انفرادی بود که نشانگر افزایش ظرفیت حمل بار کوادروتورها در حالت گروهی بود. این موضوع بیانگر موفقیت‌آمیز بودن تابع هزینه پیشنهادی بوده و صحت آن را به اثبات

مجموع سرعت زاویه‌ای روتورها	Ω_R
سرعت زاویه‌ای شفت روتور	$\omega(t)$
شتاب گرانش	g
جرم کوادروتور	m_Q
تعداد کوادروتور	n_Q
نیروی اعمال شده در دستگاه اینرسی	F_I
ماتریس دوران	R
سیگنال کنترلی	u
فاصله موتور تا مرکز جرم کوادروتور	l
فاکتور تراست	κ_b
فاکتور مقاومت هوا (درگ)	κ_t
تعداد پرها	n_B
جرم پره	m_B
شعاع پره	r
مساحت حرکتی پره	A
فاصله بین ریشه پره و توبی موتور	ϵ
ضریب تراست پروانه	C_r
ضریب گشتاور	C_Q
گشتاور ثابت موتور	K_T
گشتاور اصطکاک موتور	T_f
سرعت وابسته به گشتاور اصطکاک بار	T_L
ضریب چسبندگی میرایی موتور	D_f
ممان اینرسی موتور	J_m
ممان اینرسی بار	J_L
مقاومت سیم پیچ	$R_i(t)$
ثابت سرعت موتور	K_V
ثابت ولتاژ موتور	K_E
ولتاژ موتور	$e(t)$
زمان اولیه	t_0
زمان انتهایی	t_f
ظرفیت باتری	C
ثابت ولتاژ موتور	K_E
شدت جریان موتور	$i(t)$
چگالی هوا	ρ
شعاع روتور	r_{rot}
انرژی مصرفی کوادروتور	E
جرم روتور	m_{rot}
جرم بار	m_L

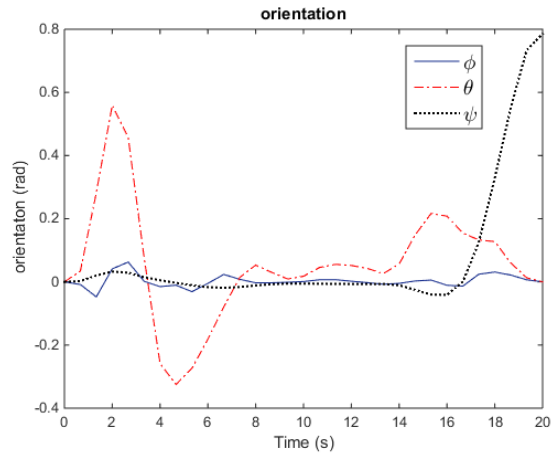


Fig. 15. Angular rotations of the third quadrotor around coordinate axes

شکل ۱۵: دوران کوادروتور سوم حول محورهای مختصات

مصرف کرده‌اند. پس در نتیجه توانایی حمل بار آن‌ها افزایش می‌یابد. اگرچه مجموع انرژی مصرف شده سه کوادروتور باهم بیش از مصرف انرژی یک کوادروتور است که اتفاقی دور از انتظار نیست اما کاهش مصرف انرژی هر کوادروتور به ما کمک می‌کند که بتوان از چند کوادروتور برای مسیره‌های طولانی‌تر و یا بار بیشتر بهره برد (مقایسه نمودار انرژی مصرفی میانگین یک کوادروتور در حالت گروهی و نمودار انرژی مصرفی یک کوادروتور). همچنین در حالت حمل بار توسط یک کوادروتور افزودن بار باعث ناپایداری در زاویه (حرکت حول محور z) شده و این بدین معنی است که کوادروتور باحالت دوران دائم حرکت می‌کند که مطلوب نیست اما در سه عامل، تنها با کنترل حرکت هماهنگ، از دوران کوادروتورها تا حد زیادی جلوگیری شده است (مقایسه نمودارهای دوران برای هر کدام از کوادروتورها). لازم به ذکر است در حالت اول برای مانع شدن از حرکت دورانی نیاز به اندازه‌گیری بار می‌باشد اما در این روش نیازی به سنسور اندازه‌گیری بار نیست.

۶- فهرست علائم

رول	ϕ
پیچ	θ
یاو	ψ
مختصات در دستگاه بدنی	x, y, z
گشتاور اعمالی بدنه	τ
سرعت زاویه‌ای بدنه	ω
ممان اینرسی حول محورهای مختصات	I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}
ممان اینرسی هر روتور حول محور z	J_R

منابع

- [1] L. Yang, J. Qi, J. Xiao, X. Yong, A literature review of UAV 3D path planning, in Proceeding of 11th World Congress on Intelligent Control and Automation,

- (2002) 813-825.
- [11] W. Guanghua, L. Deyi, G. Wenyan, J. Peng, Study on formation control of multi-robot systems, in Proceeding of Intelligent System Design and Engineering Applications (ISDEA), IEEE, (2013) 1335-1339.
- [12] J. Fredslund, M.J. Mataric, A general algorithm for robot formations using local sensing and minimal communication, IEEE transactions on robotics and automation, 18(5) (2002) 837-846.
- [13] I.H. Pizetta, A.S. Brandão, M. Sarcinelli-Filho, Modelling and control of a pvtol quadrotor carrying a suspended load, in Proceeding of International Conference on Unmanned Aircraft Systems, Denver, CO, USA: IEEE, (2015) 444-450.
- [14] I. Palunko, P. Cruz, R. Fierro, Agile load transportation: safe and efficient load manipulation with aerial robots, IEEE robotics & automation magazine, 19(3) (2012) 69-79.
- [15] A. Faust, I. Palunko, P. Cruz, R. Fierro, L. Tapia, Automated aerial suspended cargo delivery through reinforcement learning, Artificial Intelligence, 247(1) (2017) 381-398.
- [16] K. Sreenath, N. Michael, V. Kumar, Trajectory generation and control of a quadrotor with a cable suspended load a differentially flat hybrid system, in Proceeding of International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, Germany: IEEE, (2013) 4888-4895.
- [17] S. Tang, V. Kumar, Mixed integer quadratic program trajectory generation for a quadrotor with a cable-suspended payload, in Proceeding of International Conference on Robotics and Automation, Seattle, Washington, D.C: IEEE, (2015) 2216-2222.
- [18] F.A. Goodarzi, T. Lee, Dynamics and control of Shenyang, China: IEEE, (2014) 2376-2381.
- [2] A. Atyabi, D. M. Powers, Review of classical and heuristic-based navigation and path planning approaches, International Journal of Advancements in Computing Technology, 5(14) (2013) 1-14.
- [3] S. Ghazbi, Y. Aghli, M. Alimohammadi, and A. Akbari, Quadrotors unmanned aerial vehicles: a review, International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 9(1) (2016) 309-333.
- [4] M. Hehn, R. Ritz and R. D'Andrea, Performance benchmarking of quadrotor systems using time-optimal control, Autonomous Robots, 33(1) (2012) 69-88.
- [5] O. Cetin, G. Yilmaz, Real-time autonomous uav formation flight with collision and obstacle avoidance in unknown environment, Journal of Intelligent and Robotic Systems, 84(4) (2016) 415-433.
- [6] V. Jeaneau, A. Kotenkoff, Path planner methods for UAVs in real environment, 12th IFAC Symposium on Robot Control, Budapest, Hungary, 51(22) (2018) 292-297.
- [7] Z. Fu, J. Yu and Y. Mao, A heuristic evolutionary algorithm of UAV path planning, Wireless Communications and Mobile Computing, 28(5) (2018) 1-11.
- [8] L. Cai, J. Jia and J. Lei, Research on path optimization with PSO for unmanned vehicle, International Journal of Online and Biomedical Engineering, 11(8) (2015) 21-24.
- [9] L. Kahina, P. Spiteri and F. Demim, Application optimal control for a problem aircraft flight, Journal of Engineering Science and Technology, 11(1) (2016) 156-164.
- [10] A.K. Das, R. Fierro, V. Kumar, J.P. Ostrowski, J. Spletzer, C.J. Taylor, A vision-based formation control framework, IEEE transactions on robotics and automation, 18(5)

- systems, Berlin, Germany: IEEE, (2013) 1-8.
- [22] K.K. Dhiman, A. Abhishek, M. Kothari, Cooperative load control and transportation, in: AIAA Information Systems, Aerospace, Eds., (2018) 0895.
- [23] F. Morbidi, R. Cano, D. Lara, Minimum-energy path generation for a quadrotor UAV, in Proceeding of International Conference on Robotics and Automation, Stockholm, Sweden: IEEE, (2016) 1492-1498.
- [24] B. Shirani, N. Majdeddin, I. Izadi, Cooperative load transport using multiple quadrotors, Distributed Autonomous Robotic Systems, Series Springer Tracts in Advanced Robotics, (2013).
- [25] D. Motors, Speed controls, Servo systems: an engineering handbook, Electro-Craft Corporation, (1977).
- [26] J.F. Gieras, Permanent magnet motor technology: design and applications: CRC press, (2002).
- quadrotor UAVs transporting a rigid body connected via flexible cables, in Proceeding of American Control Conference, IEEE, (2015) 4677-4682.
- [19] T. Lee, K. Sreenath, V. Kumar, Geometric control of cooperating multiple quadrotor UAVs with a suspended payload, in Proceeding of 52nd Annual Conference on Decision and Control, Florence, Italy: IEEE, (2013) 5510-5515.
- [20] I.H. Pizetta, A.S. Brandão, M. Sarcinelli-Filho, Cooperative quadrotors carrying a suspended load, in Proceeding of International Conference on Unmanned Aircraft Systems, Arlington, VA, USA: IEEE, (2016) 1049-1055.
- [21] K. Sreenath, V. Kumar, Dynamics, control and planning for cooperative manipulation of payloads suspended by cables from multiple quadrotor robots, in Proceeding of International Conference on Robotics: Science and