علوم رایانش و فناوری اطلاعات
نشریه علمی انجمن کامپیوتر ایران
مجلد ۱۹، شماره ۱، ۱۴۰۰
صفحات ۹۴- ۱۰۰
مقاله عادی

بهینه‌سازی چند هدفه تکاملی مبتنی بر نظریه بازی‌های تکاملی برای کنترل حرکت پهپادهای چند موتوره

پژمان غلام نژاد[۱*]

[*]نویسنده مسئول، دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۶، بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۲

[۱] دانش‌آموخته دکترای تخصصی هوش مصنوعی، دانشکده مهندسی رایانه و فناوری اطلاعات، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

چکیده

پهپادهای چند موتوره به دلیل ذاتِ عملگرها، دارای تحرک محدودی می‌باشند. در نتیجه، پهپاد چند موتوره نمی‌تواند مسیرهای دلخواه را در فضا ردیابی کند و از دست دادن تحرک می‌تواند یک عامل محدود کننده باشد. بنابراین، به یک کنترل جامع برای این نوع از پهپادها نیاز می‌باشد. این پژوهش بهینه‌سازی چند هدفه برای مسایل تخصیص کنترل بر اساس نظریه بازی تکاملی برای حل توزیع ورودی کنترل اضافی بر روی سیستم بیش از حد فعال در زمان واقعی بر روی پهپادهای چند موتوره را ارائه می‌دهد. برای بهینه سازی چند هدفه، یک رویکرد مبتنی بر تئوری بازی تکاملی با پویایی تکرارکننده برای یافتن وزن مطلوب با استفاده از روش جمع وزنی استفاده می شود. ایده اصلی این روش این است که بهترین استراتژی یا راه حل غالب را می‌توان به عنوان راه حلی انتخاب کرد که در میان سایر راه حل های غیر غالب باقی می‌ماند. تئوری بازی تکاملی، استراتژی‌ها را به عنوان یک بازیگر در نظر می‌گیرد و بررسی می‌کند که چگونه این استراتژی‌ها می‌توانند با استفاده از پویایی تکرار کننده با ماتریس پرداخت بقاء یابند. نتایج شبیه سازی عددی وزن‌های بهینه انتخاب شده توسط بازی تکاملی و نحوه تغییر بازده را در تکرار کننده پویا نشان می دهد.

کلمات کلیدی: کنترل پهپاد، نظریه بازی‌های تکاملی، بهینه‌سازی چند هدفه تکاملی، پهپادهای چند موتوره

۱- مقدمه

امروزه استفاده از پهپادها به دلیل توانایی آن‌ها از نظر تحرک، خودمختاری، ارتباطات و قدرت پردازش با هزینه نسبتاً کم، طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است و در صنعت و مراکز تحقیقاتی از قبیل مخابرات، ناوبری جهانی، تحقیقات هواشناسی، جغرافیایی و جاسوسی بصورت گسترده‌ای به کار گرفته شده‌اند.

از نظر ساختار شکلی، پهپادها به دو گروه زیر دسته‌بندی می‌شوند[۱]: پهپاد با بال ثابت[۱] که عملکردی مشابه هواپیماهای بال ثابت دارند و پهپاد مبتنی بر ملخ[۲] که عملکردی مشابه بالگردها دارند که بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. زیرا در مقایسه با هواپیماهای معمولی، کارکردی آسان، ارزان و عملکرد قدرتمندی دارند و برای بلند شدن و نشستن به فضای بزرگی نیاز ندارند.

پهپادهای مبتنی بر ملخ در قالب‌های زیر دسته‌بندی می‌شوند[۲]: تک موتوره[۳]، دو موتوره[۴] ، سه موتوره[۵]، چهار موتوره[۶]، پنج موتوره[۷]، شش موتوره[۸]، هشت موتوره[۹].

یکی از ویژگی‌های پهپادهای مبتنی بر ملخ آن است که می‌توانند به عنوان یک سیستم بیش از حد محرک[۱۰] در نظر گرفته شود که دارای موتورهای اضافه[۱۱] است و بایستی تصمیم‌گیری برای کنترل ترکیبی انجام شود. به همین دلیل ، با افزایش تعداد موتورها، مشکل تخصیص کنترل (یا توزیع کنترل) دنبال می‌شود.

actuator در لغت به معنای عملگر یا محرک می‌باشد و تجهیزی است که در آخرین مرحله سیستم کنترلی به منظور اجرا نمودن دستورات کنترلی مورد استفاده قرار می‌گیرد[۳]. یک سیستم بیش از حد محرک، سیستمی است که در آن تعداد ورودی بیشتر از حالت خروجی آن می‌باشد (سیستم‌هایی که تعداد

کنترل قابل استفاده آن‌ها بیشتر از متغیرهای کنترل شده باشد). یک توضیح ساده از یک سیستم بیش از حد محرک، سیستمی است که در آن محرک‌های بیشتری نسبت به درجات آزادی سیستم وجود دارد[۴]. به عنوان مثال، هنگامی که از سه موتور برای اجرای یک بازوی دارای دو ارتباط استفاده می‌شود.

پهپادهای چند موتوره به دلیل ذاتِ عملگرها، دارای تحرک محدودی می‌باشند. به عنوان مثال در دسترس بودن چهار ورودی کنترل مستقل (چهار سرعت چرخش پروانه) در مقابل شش موقعیت/جهت‌گیری موتورها در فضا. در نتیجه، حالت چند موتوره نمی‌تواند مسیرهای دلخواه را در فضا ردیابی کند (به عنوان مثال، فقط در حالت افقی می تواند در نقطه معلق باشد). از آن جا که پهپادها بیشتر به عنوان ربات‌های خدماتی برای تعامل با محیط کار می‌کنند، موضوعِ از دست دادن تحرک به دلیل فعال شدن آن‌ها می‌تواند یک عامل محدود کننده باشد. بنابراین، به یک کنترل جامع برای این نوع از پهپادها نیاز می‌باشد. همچنین ضرورت دارد در این نوع از پهپادها، چندین کنترل غیر ضروری ورودی برای یک سیستم بیش از حد محرک، تخصیص یابد.

در پهپادهای چند موتوره، اضافه بار یک محرک طول عمر کلی آن را کاهش می‌دهد و عملکرد متوسط آن را در مدت زمان طولانی کاهش می دهد. بنابراین، عملکرد و قابلیت اطمینان دو الزامات متناقض هستند. در حالی که قابلیت اطمینان مناسب به متوسط بارها مربوط است، عملکرد خوب مربوط به پاسخ سریع و بارهای کافی است که توسط محرک ها تولید می شود. افزونگی محرک این امکان را می‌دهد تا عملکرد و قابلیت اطمینان را همزمان با تخصیص صحیح بارهای مورد نظر در بین محرک های مازاد برطرف شود.

در این پژوهش، مساله تخصیص زائد کنترل ورودی در پهپادهای چند موتوره، برای یک سیستم بیش از حد محرک، بررسی می‌شود و با استفاده از روش بهینه‌سازی چند هدفه تکاملی[۱۲] مبتنی بر نظریه بازی‌ها[۱۳] یک راه حل مناسب ارائه می‌گردد. نوآوری روش پیشنهادی، بهینه‌سازی و بازدهی بالاتر در استفاده از روش چند هدفه تکاملی مبتنی بر نظریه بازی‌ها می‌باشد. روش پیشنهادی از نظر دو هدف مانند به حداقل رساندن انرژی کنترل و نرخ انحراف کنترل نتایج قابل اعتمادی را نشان می‌دهد

۲- پیشینه تحقیق

در سال ۲۰۱۲، یک پهپاد چند موتوره بیش از حد فعال شده که مانورهایی را انجام می‌دهد که به طور معمول برای پهپادها امکان پذیر نیست طراحی شد[۵]. در این طرح کنترل دینامیک معکوس برای کنترل وسیله نقلیه پرواز اصلاح شده ، با توجه ویژه به کنترل دارایی ارائه شده است. در سال ۲۰۱۴، به مسئله قابلیت اطمینان مطلوب در سیستم‌های بیش از حد فعال پرداخته شد[۶]. اثربخشی روش پیشنهادی از طریق یک برنامه آزمایشی در یک بستر آزمایش پهپاد هشت موتوره نشان داده شده است. همچنین در سال ۲۰۱۴، یک استراتژی جدید برای بهبود عملکرد و تحمل خطا در خودروهای چند موتوره ارائه شد[۷]. در این استراتژی پیشنهادی، از ملخ‌های کج دو محور استفاده نموده و بنابراین سه مکانیزم مختلف فعال‌سازی، یعنی گشتاورهای ژیروسکوپی، بردار رانش و رانش دیفرانسیل را قادر می‌سازد. بر خلاف چهار موتوره معمولی، با ترکیب سه مکانیسم فعال‌سازی، دامنه وسیع‌تری از گشتاورهای کنترلی را ارائه می‌دهد. در سال ۲۰۱۵، یک طرح جدید برای یک پهپاد چهار موتوره با پروانه‌های کج، برای غلبه بر سیستم بیش از حد محرک، ارائه شد[۸]. در این طرح، مجموعه اضافی چهار ورودی کنترلی که زاویه-های کج ملخ را فعال می‌کنند، طراحی شده است که باعث تحریک کامل موقعیت / جهت‌گیری پهپاد چهار موتوره در فضا می‌شود، بنابراین به آن اجازه می‌دهد تا مانند یک وسیله نقلیه کاملاً پرنده رفتار کند. در سال ۲۰۱۶، تخصیص بهینه کنترل پهپادهای ۴ موتوره با توجه به محدودیت‌های محرک بیان شد[۹] که در آن از روش کمترین مربعات وزنی استفاده گردید. در سال ۲۰۱۷، به مشکل تخصیص کنترل اعمال شده بر روی وسیله نقلیه بیش از حد فعال از نوع Hovercraft پرداخته شد[۱۰]. یک معماری کنترل سلسله مراتبی، متشکل از یک کنترل کننده سطح بالا برای ردیابی مسیر، و یک الگوریتم تخصیص کنترل، توسعه داده شده و ثابت شده است که در ردیابی یک مسیر مورد نظر و در عین حال بهینه‌سازی برخی هزینه‌های مربوط به محدودیت‌های محرک موثر است. در سال ۲۰۲۱، در یک پهپاد چهار موتوره، شیب موتور بیش از حد فعال با یک تکنیک تخصیص کنترل نوآورانه، به نام تخصیص سریع کنترل طراحی شد که هر موتور زاویه فرمان مستقل خود را دارد[۱۱]. با استفاده از این رویکرد جدید، پهپاد قابلیت خم شدن خود را افزایش داده و دامنه سرعت جلو/عقب را فعال می‌کند.

۳- مفاهیم، نظریه‌های مربوطه و فرضیه‌ها

در این بخش ابتدا به فرمول‌بندی مساله پرداخته می‌شود و سپس روش استفاده شده برای حل، معرفی می‌گردد. بنابراین در ابتدا مفاهیم مربوط به تخصیص کنترل و بهینگی آن معرفی می‌شود و بهینه‌سازی چند هدفه برای تخصیص کنترل و استفاده از نظریه بازی‌های تکاملی در آن بیان می‌شود.

۳-۱ تخصیص کنترل

افزونگی سخت‌افزاری مثل افزونگی در محرک‌ها یا حسگرها امروزه در کاربردهای صنعتی جهت افزایش مانورپذیری، انعطاف‌پذیری، ایمنی و تحمل‌پذیری سیستم در برخورد با عیب ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. افزونگی محرک‌ها باعث پیچیده شدن سیستم می‌شود و طراحی کنترل‌کننده برای آن سخت‌تر می‌شود، اما اگر بخواهیم از کنترل‌کننده‌ای با طراحی ساده‌تر استفاده کنیم، الگوریتم تخصیص کنترل[۱۴] وظیفه مدیریت سیگنال‌های کنترل بین محرک‌های افزونه را به عهده می‌گیرد و این کار به واسطه استفاده از درجه آزادی به وجود آمده از محرک‌های افزونه امکان‌پذیر است.

یک سیستم پویای بیش از حد محرک در فضای حالت، بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{x} = Ax + B_u u \qquad (۱)$$

که $x \in R^n$، حالت متغیر است و $u \in R^m$ متغیر ورودی کنترل است. $A \in R^{n\times n}$ ماتریس حالت شناخته شده است و $B_u \in R^{n\times m}$ ماتریس اثربخشی کنترل شناخته شده است. همچنین یک فضای خالی $n - m$ بعدی وجود دارد. زیرا B_u دارای $n < m$ است. بنابراین می‌توان تعدادی ورودی کنترل را محاسبه نمود و ماتریس B_u را بصورت زیر بیان نمود:

$$B_u = B_v B \qquad (۲)$$

که $B_v \in R^{n\times k}$ و $B \in R^{k\times m}$ است. با توجه به ورودی‌های کنترل B و u، مساله تخصیص کنترل برای تعیین u می‌تواند بصورت زیر بیان شود:

$$Bu = v \qquad (۳)$$

که $v \in R^k$ ورودی کنترل مجازی است که توسط کنترل کننده خروجی ایجاد می‌شود. بنابراین سیستم پویا می‌تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$\dot{x} = Ax + B_u u = Ax + B_v v \qquad (۴)$$

۳-۱-۱ کنترل به حداقل رساندن انرژی

تابع هدف تعریف شده توسط معادله (۵)، برای به حداقل رساندن جابجایی کل ورودی کنترل نسبت به موقعیت ایده آل است که یکی از ساده‌ترین تابع هدف خطی است:

$$J_1(u_t) = \min_{u_t} \frac{1}{2} W_1 \|u_t - u_d\|_2 \qquad (۵)$$

مشروط به:

$$v = Bu$$

که u_d پارامتر طراحی شده است ، و W_1 ماتریس وزنی قطری مثبت[۱۵] اسـت، یـک محرک خاص می‌تواند به ترتیب اولویت برنامه اولویت بندی شود.

راه حل عددی را می توان با استفاده از تـابع همیلتـونی[۱۶] زیـر بدسـت آورد، کـه λ نشان دهنده ضریب لاگرانژ[۱۷] است.

$$H_1(u_t,\lambda)=\frac{1}{2}(u_t-u_d)^T W_1(u_t-u_d)+\lambda(v-Bu_t) \quad (۶)$$

مساله تخصیص کنترل مبتنی بر بهینه‌سازی با توجه به شرایط محدودیت تقاضـای کنترل $v-Bu$ ، بصورت زیر بیان می‌شود:

$$u_t^*=u_d+W_1^{-1}B^T(BW_1^{-1}B^T)^{-1}(v-Bu_t) \quad (۷)$$

۳-۱-۲ کنترل به حداقل رساندن انحراف ورودی

تابع هدف تعریف شده توسط معادله (۸)، به حداقل رساندن سرعت انحراف کل ورودی کنترل در هر مرحله است. تخصیص نسبت به حداقل انحراف، نرخ انحراف کل را به حداقل می‌رساند:

$$J_2(u_t)=\min_{u_t}\frac{1}{2}W_2\|u_t-u_{t-T}\|_2 \quad (۸)$$
$$\text{مشروط به: } v=Bu$$

که u_{t-T} موقعیت محرک‌ها در مرحله زمان قبلی است، T زمان نمونه‌گیری است و W_2 ماتریس وزن مورب مثبت است که می‌توان یک محرک خاص را به اولویت برنامه اولویت‌بندی نمود، که شبیه به W_1 حل عددی را می‌توان به همان روشی که در فرمول (۶) با تعریف عملکرد همیلتونی به شرح زیر بدست آورد:

$$H_2(u_t,\lambda)=\frac{1}{2}(u_t-u_{t-T})^T W_2(u_t-u_{t-T})+\lambda(v-Bu_t) \quad (۹)$$

راه حل بهینه با توجه به شرایط محدودیت تقاضا، $v-Bu$ ، نیز می‌تواند حاصل شود:

$$u_t^*=u_{t-T}+W_2^{-1}B^T(BW_2^{-1}B^T)^{-1}(v-Bu_{t-T}) \quad (۱۰)$$

۳-۲ بهینه‌سازی چند هدفه برای تخصیص کنترل

الگوریتم‌های تکاملی به عنوان ابزاری موثر برای کاوش در جبهـه‌هـای بهینـه پـارتوِ همگرا[۱۸] و متنوع[۱۹] در مسایل بهینه‌سازی چند هدفه ارائه شده‌اند که به طـور کلـی شامل دو یا سه هدف متناقض است. با این حال، بسـیاری از مسـایل دنیـای واقعـی شامل بهینه‌سازی همزمان چندین هدفِ متناقض است (در بیشتر مـوارد ، بـیش از پنج)، که معمولاً به عنوان مسایل بهینه سازی چنـدین هدفـه شـناخته مـی‌شـوند. مسایل بهینه‌سازی چندین هدفه، مربوط به حل M اهدافِ متضاد به طـور همزمـان در مسایلی است که در آن M بیشتر از سه است[۱۲]. بـه طـور کلـی، یـک مسـاله بهینه‌سازی چندین هدفه فرمول زیر را دارد که توسط معادلـه (۱۱) توصـیف شـده است.

$$\begin{cases} f(x)=[f_1(x),\dots,f_M(x)] \\ s.t. \quad x\in\Lambda \end{cases} \quad (۱۱)$$

که $\Lambda\in\Re^n$ ، فضای تصمیم[۲۰] است و $f:\Lambda\to\Omega\in\Re^M$ ، فضای هدف[۲۱] است و فرض بر این است که f، یک مساله کمینه‌سازی است. بیشتر الگوریتم‌های چندین هدفه تکاملی، بر حفظ تنوع و افزایش همگرایی متمرکز هستند.

بهینه‌سازی چند هدفه برای تخصیص کنترل بصورت زیر بیان می‌شود[۱۳]:

$$\min_{u\in\Omega} J_1(u),J_2(u),\dots,J_p(u) \quad (۱۲)$$
$$\text{مشروط به: } v=Bu$$

که در آن p تعداد توابع هدف است و Ω مجموعه محدودیت‌ها است و u متغیر ورودی کنترل است که متغیر تصمیم‌گیری برای مساله بهینه‌سازی می‌باشد.

با ترکیب توابع هدف (۶) و (۹) می‌توان تابع هدف تقویت شده را بصورت زیر بیان نمود:

$$J_t=\min_{u_t}\frac{1}{2}W_1\|u_t-u_d\|_2+\frac{1}{2}(u_t-u_{t-T})^T W_2(u_t-u_{t-T}) \quad (۱۳)$$

همچنین تابع هدف عددی تقویت شده را می‌توان با ترکیب فرمول‌های (۷) و (۱۰) بصورت زیر بیان نمود:

$$H_t(u_t,\lambda)=\frac{1}{2}(u_t-u_d)^T W_1(u_t-u_d)+\frac{1}{2}(u_t-u_{t-T})^T W_2(u_t-u_{t-T})+\lambda(v-Bu_t) \quad (۱۴)$$

که از روش شبه معکوس وزنی منفرد واحد، و مشتقات جزئی تابع هدف را با توجه به متغیر ورودی، u و ضریب لاگرانژ، λ به شرح زیر می‌باشد:

$$u_t^*=W_0^{-1}(W_1u_d+W_2u_{t-T})+W_0^{-1}(BW_0^{-1}B^T)^{-1}[v-BW_0^{-1}(W_1u_d+W_2u_{t-T})] \quad (۱۵)$$

که $W_0=W_1+W_2$ است.

۳-۳ نظریه بازی‌های تکاملی[۲۲]

نظریه بازی یک مدل ریاضی از تعامل استراتژیک بین بازیکنان یا تصمیم گیرندگان است که در یک بازی معین مشغول هستند[۱۴]. نظریه بازی‌های کلاسیک با تصمیم‌گیری (یا استراتژی) با سایر بازیکنان به منظور افزایش حداکثر سود (یا تناسب اندام) سروکار دارد که یک اندازه‌گیری ریاضی است و نشان می-دهد که بازیکن چقدر موقعیتی را دوست دارد یا دوست ندارد.

در مقابل، نظریه بازی تکاملی به پویایی می‌پردازد که نحوه تغییر جمعیت بازیکنان در طول زمان را توضیح می‌دهد[۱۵]. بینش اصلی نظریه بازی تکاملی تعادل بازی‌هایی است که توسط تعدادی از بازیکنان انجام می‌شود، جایی که سود حاصل از تعامل چند گروه است و موفقیت هر یک از جمعیت‌ها به نحوه تعامل رفتار آن‌ها با دیگران بستگی دارد.

اصلی‌ترین مفهوم نظریه تکاملی استراتژی، استراتژی پایدار تکاملی[۲۳] است[۱۶] که یک استراتژی با سود بالا است و در بین مردم گسترش می‌یابد و اگر استراتژی رایج در بین مردم رایج باشد، یکبار نیز حفظ می‌شود. این بدان معناست که وقتی کل جمعیت از یک استراتژی پایدار تکاملی استفاده می‌کنند، هیچ جمعیتی، به نام جهش یافته[۲۴]، با استفاده از یک استراتژی متفاوت، b، نمی‌توانند به این جمعیت حمله کنند. برای این که یک استراتژی پایدار تکاملی باشد، شرایط زیر باید برآورده شود:

$$u(a,(1-\mu)a+\mu b)>u(b,(1-\mu)a+\mu b) \quad (۱۶)$$

که u بازده مورد انتظار است و μ فراوانی بازی جهش یافته با استراتژی b است که در آن $u(a,b)$ به معنی استراتژی بازده a است، در حالی که جهش یافته استراتژی b را بازی می‌کند. از آن جایی که a یک استراتژی پایدار تکاملی است، سود جمعیتی که از a پیروی می‌کنند باید بیشتر از جهش یافته b باشد. اگر فراوانی بازی جهش یافته با μ به اندازه کافی کوچک باشد، شرایط (۱۶) را می‌توان به صورت زیر مشاهده نمود:

$$u(a,a)>u(b,a) \quad (۱۷)$$

اگر $u(a,a)=u(b,a)$، بخش دوم شرط معادله (۱۶) باید دارای شرایط زیر باشد:

$$u(a,b)>u(b,a)$$

بطوری که: (۱۸)

$$u(a,a)=u(a,b)$$

تفاوت اصلی بین استراتژی پایدار تکاملی و نظریه بازی‌های سنتی، بررسی پویایی تغییر استراتژی است. نظریه تکاملی استراتژی، به پویایی استراتژی‌های

رقابتی در جمعیت، چگونگی تکامل جمعیت در طول زمان علاقه‌مند است. به منظور بیان نرخ رشد جمعیت با استفاده از یک استراتژی خاص، تکرار کننده پویا[۲۵] پویا[۲۵] معرفی شده است. تکرار کننده پویا، نحوه تغییر نسبت بازیکنان هر استراتژی را فرض می‌کند، با این فرض که هر بازیکن، فرزندانی را تولید می‌کند که استراتژی مشابهی را بازی می‌کنند، در حالی که تعداد فرزندان بستگی به سود آن ها دارد. معادله کلی تکرار کننده پویا به شرح زیر تعریف می شود:

$$\dot{w}_i = w_i[u(e^i x) - u(x,x)] \qquad (۱۹)$$

که w_i نسبت جمعیتی است که از استراتژی i-ام پیروی می‌کند، $u(e^i, x)$ پاداش فردی بازیکنی است که از استراتژی i-ام پیروی می‌کند و $u(x, x)$ به ترتیب متوسط درآمد فعلی جمعیت است. این معادله نرخ رشد $\frac{\dot{w}}{w}$ جمعیت را بیان می‌کند. پارامترهایی که در روابط (۱) تا (۱۹) وجود دارند، در جدول ۱، توصیف شده‌اند.

جدول ۱- نمادها و تعریف‌ها

حالت متغیر	x
متغیر ورودی کنترل	u
ماتریس حالت شناخته شده	A
ماتریس اثربخشی کنترل شناخته شده	B
ورودی کنترل مجازی	v
پارامتر طراحی	u_d
ماتریس وزنی قطری مثبت	W_1
ضریب لاگرانژ	λ
موقعیت متحرک‌ها در مرحله زمانی قبلی	u_{t-T}
زمان نمونه‌گیری	T
ماتریس وزنی مورب	W_2
تعداد اهداف متضاد	M
تابع هدف	F
فضای تصمیم	Λ
مجموعه محدودیت‌ها	Ω
استراتژی پایدار تکاملی	a

۴- روش‌شناسی تحقیق

رویکرد حل مسئله یکی از اساسی‌ترین بخش‌های یک پژوهش است که این مهم به این بخش اختصاص یافته است. با توجه به تعریف و مدل ریاضی مساله این پژوهش، روش حلی که برای آن در نظر گرفته شده است، الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه تکاملی با استفاده از نظریه‌بازی می‌باشد که به منظور روش حل مساله پیشنهاد شده است.

طی سه دهه گذشته، تعداد زیادی الگوریتم تکاملی برای حل مسائل بهینه سازی چند هدفه ایجاد شده است. با این وجود، عدم وجود یک بستر نرم افزاری به روز و جامع برای پژوهشگران برای ارزیابی صحیح الگوریتم‌های موجود و برای استفاده پژوهشگران از الگوریتم‌های انتخاب شده، برای حل مسایل می‌تواند به عنوان یک چالش مطرح باشد. وقتی کد منبع بسیاری از الگوریتم‌های پیشنهادی در دسترس عموم قرار نگرفته باشد، به منظور عدم مواجه با چنین چالشی، در این تحقیق، از یک سَکو[۲۶] در بستر نرم‌افزار متلب[۲۷] برای بهینه‌سازی چند هدفه تکاملی، به نام پِلَت ای ام آ[۲۸] ، استفاده شده است که شامل بیش از ۵۰ الگوریتم تکاملی چند هدفه و بیش از ۱۰۰ مسئله آزمون چند هدفه، همراه با چندین عملکرد پرکاربرد است. این سکو کاملاً متن باز است، به گونه‌ای که کاربران می توانند براساس آن، الگوریتم‌های جدیدی بسازند. کد منبع platEMO ، در آدرس [۱۷] قابل دسترسی است.

این نرم‌افزار مبنای حل دقیق برای مدل پیشنهادی این پژوهش است و هدف اعتبارسنجی مدل است. در بخش یافته‌های تحقیق، مدل پیشنهادی با روش دقیق و با استفاده از این نرم‌افزار اعتبارسنجی خواهد شد.

این تحقیق از نظر هدف توسعه‌ای می‌باشد، چون به دنبال یافتن روشی علمی مناسب برای حل یک مساله است. از نظر ماهیت داده ها آمیخته (کمی و کیفی) و از نظر روش گردآوردی داده‌ها نیز توصیفی است. روش تحقیق در این پژوهش بر اساس ماهیت و نحوه گردآوری داده‌های آن، توصیفی (موردی و زمینه ای) است. با رویکرد آمیخته (کمی و کیفی) است. چون قرار است در یک مورد خاص عمیقا پژوهش به عمل آید. در این پژوهش، در دامنه وسیعی، آزمایشاتی به منظور نشان دادن عملکرد مدل مفهومی پیشنهادی انجام شده است.

۵- یافته‌های تحقیق

ایده اصلی مساله بهینه‌سازی چند هدفه تکاملی مبتنی بر بازی است که نوعی بازی غیر مشارکتی[۲۹] است که در آن متغیرهای تصمیم‌گیری و توابع هزینه به عنوان بازیگران عمل می‌نمایند. در میان توابع هدف، هدفی که دارای اولویت است، حداقل بر یکی دیگر از توابع هدف غلبه می‌کند و وزن به تابع هدفی که نسبت به عملکردی که بهینه می‌شود حساس‌تر است اعمال می‌شود که می‌توان آن را با مفهوم تعادل نَش[۳۰] در نظریه بازی، مقایسه کرد. تعادل در نظریه بازی یافتن راه حل تعادل در یک بازی غیر مشارکتی مستلزم تجزیه و تحلیل آمادگی بازیکن برای تدوین ماتریس سود است. متغیرهای تصمیم‌گیری و توابع هزینه به عنوان بازیگران عمل می‌کنند و اهداف بهینه شده استراتژی‌های ممکن هستند. وزن یک مساله بهینه‌سازی چند هدفه را نیز می‌تواند به عنوان تعادل نش در استراتژی‌های مخلوط در نظر گرفته شود، که راه حل غیر مشارکتی است.

یک بازی شامل بازیکنانی است که در آن فرض بر این است که هر بازیکن استراتژی تعادل را می‌داند و دلیلی برای تغییر استراتژی خود وجود ندارد. بنابراین، جدول بازده را می‌توان به گونه ای تعریف کرد که سطر تابع هدف و ستون متغیرهای تصمیم بهینه مربوط به هر تابع هدف باشد. ماتریس پرداخت (۱۲) را می توان به شرح زیر تعریف نمود:

	u_1	u_2	...	u_p
j_1	$j_1(u_1)$	$j_1(u_2)$	...	$j_1(u_p)$
j_2	$j_2(u_1)$	$j_2(u_2)$	...	$j_2(u_p)$
.	.	.	⋱	.
.	.	.		.
j_p	$j_p(u_1)$	$j_p(u_2)$	...	$j_p(u_p)$

جدول بازده را می‌توان به ماتریس ۲ × ۲ کاهش داد، زیرا تعداد توابع هدف ۲ است که در بخش قبلی تعریف شده است. بنابراین، ماتریس پرداخت (۱۳) را می‌توان به صورت زیر ترکیب کرد:

	u_1^*	u_2^*
j_1	$j_1(u_1^*)$	$j_1(u_2^*)$
j_2	$j_2(u_1^*)$	$j_2(u_2^*)$

که u_i^* راه حل بهینه برای i-امین تابع هدف است. همچنین روش نرمال‌سازی می‌تواند بر ماتریس بازده تاثیرگذار باشد. مقیاس‌های مختلف هر تابع هزینه بر اهمیت نسبی تأثیر می‌گذارد، بنابراین توابع هزینه نرمال‌سازی می‌شوند. ماتریس بازده عادی خطی به صورت زیر تشکیل شده است:

$$\bar{A}_{ij} = \frac{j_i(u_j^*)}{+ \; j_i} \qquad (۲۰)$$

با استفاده از ماتریس بازده نرمال‌سازی شده، پویایی در حال تکامل برازش[۳۱]، می‌تواند با پویایی تکرار کننده بصورت زیر نمایش داده شود:

$$\dot{w} = w_i\left(e_i^T A w - w^T A w\right) \quad (۲۱)$$

که در آن A، ماتریس بازده است و e_i یک بردار ستونی است که داری مقدار ۱ در i-امین عنصر و مقدار صفر در بقیه عناصر ماتریس می‌باشد و w، سهم i-امین استراتژی در جمعیت است.

راه حل تکاملی پایدار $\bar{w}$ را می‌توان از مشتق‌گیری پویا تکرار کننده بدست آورد. به این معنی که تفاوت سود بین فرد و متوسط جمعیت در نقطه پایدار صفر می‌شود:

$$A\bar{w}^T - \bar{w}^T A\bar{w} = 0 \quad (۲۲)$$

که بازده افراد به متوسط بازده جمعیت همگرا می‌شود. پایداری نقطه پایدار را می‌توان زمانی تعیین نمود که رابطه زیر حاصل شود:

$$\begin{cases} w^T A\bar{w} < \bar{w}^T A\bar{w} \\ w^T A w < \bar{w}^T A w \quad \text{if } \bar{w}^T A\bar{w} = \bar{w}^T A\bar{w} \end{cases} \quad (۲۳)$$

شرط اول بدان معنا است که $u(a,a) > u(b,a)$ که شرط تعادل نش تکاملی است. شرط دوم بدان معنا است که اگر $u(a,a) = u(b,a)$، آن‌گاه: $u(a,b) > u(b,b)$ که شرط پایداری است.

۵-۱ شبیه‌سازی عددی

سامانه پهپاد دارای بیش از ۴موتور با استفاده از سیستم بیش از حد محرک پویا مدل‌سازی شده است. معادله زیر پویایی نگرش پهپاد چند حرکتی را شرح می دهد:

$$\begin{aligned} \dot{p} &= \frac{I_y - I_z}{I_x} qr + \frac{1}{I_x} l \\ \dot{q} &= \frac{I_z - I_x}{I_y} rp + \frac{1}{I_y} m \\ \dot{r} &= \frac{I_x - I_y}{I_z} pq + \frac{1}{I_z} n \end{aligned} \quad (۲۴)$$

که I_x، I_y و I_z اینرسی است و p، q و r سرعت زاویه‌ای می‌باشد و l، m و n ممان اینترسی در بدنه ثابت شده چارچوب هستند. بنابراین z، بردار سرعت در چارچوب اینرسی می‌باشد:

$$\dot{z} = -g + \frac{\cos\phi\cos\theta}{m} T \quad (۲۵)$$

که g، شتاب گرانسی است و ϕ و θ، موقعیت زاویه‌ای در چرخش و بردار محور شیب است. m، جرم پهپاد است و T، مجموع نیروی رانش است و در فضای حالت به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g \\ \frac{I_y - I_z}{I_x} qr \\ \frac{I_z - I_x}{I_y} rp \\ \frac{I_x - I_y}{I_z} pq \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\cos\phi\cos\theta}{m} \\ \frac{1}{I_x} \\ \frac{1}{I_y} \\ \frac{1}{I_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ l \\ m \\ n \end{bmatrix} \quad (۲۶)$$

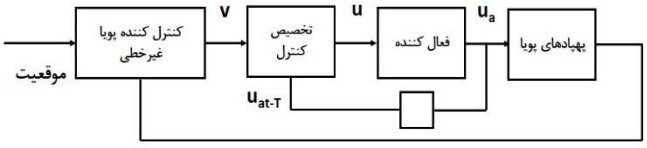
مشاهده می‌شود که می‌تواند بصورت $\dot{x} = f(x) + g_v(x)v$ بیان شود که معادل فرمول (۵) است و بصورت معادله زیر بیان می‌شود:

$$\begin{bmatrix} T \\ l \\ m \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{t1} & c_{t2} & \dots & c_{tm} \\ c_{t1}d_l & c_{t2}d_l & \dots & c_{tm}d_l \\ c_{t1}d_m & c_{t2}d_m & \dots & c_{tm}d_m \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nm} \end{bmatrix} \quad (۲۷)$$

که فرمول (۲۷) می‌تواند بصورت $v = Bu$ بیان شود که معادل فرمول (۴) می‌باشد و c_t ضریب رانش و c_n ضریب گشتاور است.

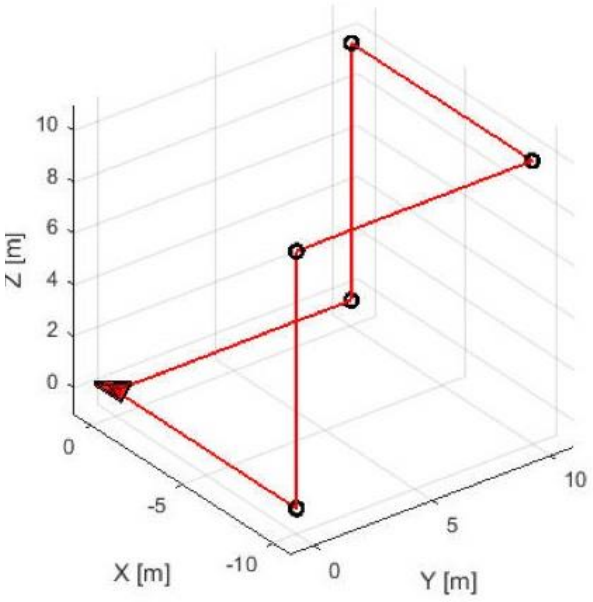
۵-۲ نتایج شبیه‌سازی

روش ارائه شده برای ناوبری نقطه‌ای پهپادهای چند موتوره استفاده شده است. این شبیه‌سازی با کنترل کننده‌های حلقه داخلی و حلقه بیرونی انجام می‌شود تا مسیر و نگرش پهپادها را با استفاده از روش وارونگی پویای غیرخطی[۳۲] برای ایجاد ورودی کنترل مجازی، (v) کنترل کند، که در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- بلوک دیاگرام کنترلر و کنترل کننده

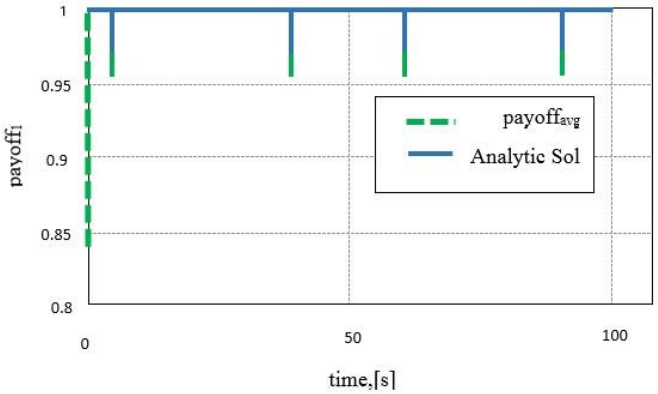
در شکل (۱)، از یک سیستم بیش از حد فعال استفاده شده است که عملکرد آن در بخش ۴-۱ (شبیه‌سازی عددی) بیان شده است. همچنین طراحی بخش تخصیص کنترل در بخش ۲-۱، توضیح داده شده است. در واقع سیستم پیشنهادی از یک الگوریتم کنترلی که دارای چندین ورودی و چندین خروجی دارای بازخورد استفاده می‌کند. شکل (۲) نتیجه شبیه سازی عددی را نشان می دهد.



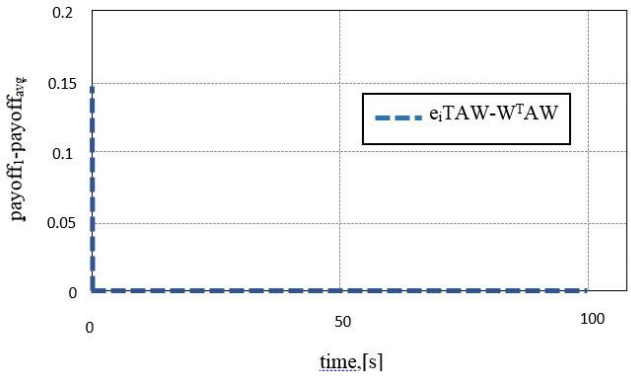
شکل ۲- مسیر پهپاد

همانطور که اشکال نشان می‌دهند، وزن‌ها تغییر کرده‌اند، هنگامی که فرمان مجازی (v) تولید می‌شود. معنای فیزیکی این است که وزن‌ها به طور کلی سعی می‌کنند انرژی کنترل را به حداقل برسانند، که به نظر می رسد یک مساله بهینه‌سازی تک هدفه است، زیرا بدون فرمان مجازی، نیازی نیست که حداقل میزان انحراف کنترل در نظر گرفته شود، زیرا انحراف کنترل وجود ندارد. با این حال، هنگامی که کنترل مجازی ایجاد می‌شود، وزن بهینه‌سازی انرژی کنترل برای برآوردن فرمان کاهش می‌یابد، و وزن برای نرخ انحراف کنترل افزایش می یابد تا از انحراف ناگهانی ورودی کنترل جلوگیری شود.

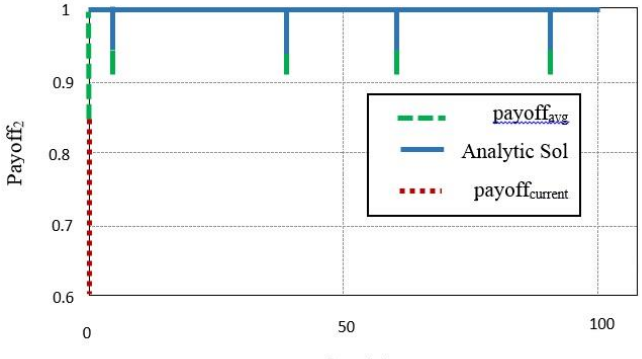
همانطور که ذکر شد، بازده فردی با متوسط بازده جمعیت در نقطه وزن پایدار همگرا می‌شود. شکل (۳)، شکل (۴)، شکل (۵) و شکل (۶) به ترتیب نتایج ماتریس تقویت شده، بازده فردی و متوسط بازده را نشان می‌دهد.



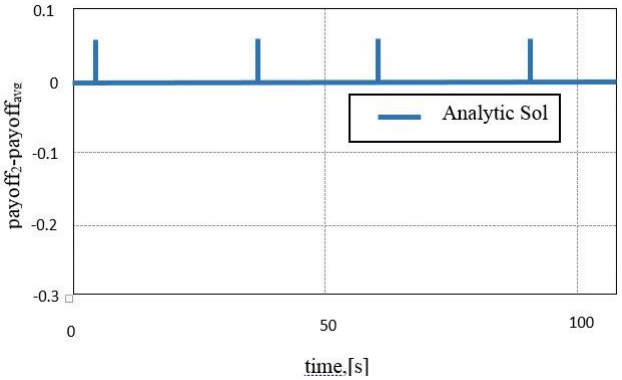
شکل ۳- سابقه زمان تنوع بازده تابع هدف۱



شکل ۴- متوسط سابقه زمان و تنوع بازده تابع هدف۱

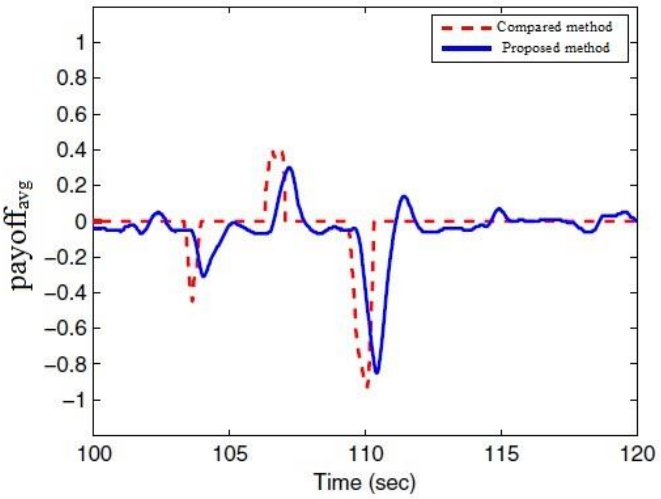


شکل۵- سابقه زمان تنوع بازده تابع هدف ۲



شکل۶- متوسط سابقه زمان میانگین و تنوع بازده تابع هدف ۲

مشاهده می‌شود که این سه مقدار به هم نزدیک می‌شوند و تفاوت بین بازده فردی و متوسط صفر می‌شود. بنابراین، عبارت داخلی عبارت سمت راست فرمول (۲۱) صفر می‌شود. همانطور که در دو شکل (۳) و شکل (۴) نشان داده شده است. علاوه بر این، مشتق وزن به صفر همگرا می شود و دینامیک تکرار کننده، پایدار می‌شود. همچنین روش پیشنهادی با روش تخصیص بهینه کنترل پهپاد بر اساس روش حداقل مربعات وزنی مقایسه شده است. نتایج مقایسه در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل۷- مقایسه روش پیشنهادی و روش حداقل مربعات وزنی

مشاهده می‌شود که میانگین راندمان روش پیشنهادی نسبت به روش حداقل مربعات وزنی[۹] بهتر می‌باشد که علت آن بر اساس استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه تکاملی مبتنی بر نظریه بازی‌ها می‌باشد. در واقع روش حداقل مربعات وزنی به دلیل عدم استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه نمی‌تواند نتایج مطلوبی را ارائه دهد.

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه را برای حل مشکل تخصیص کنترل برای سیستم بیش از حد فعال که دارای ورودی کنترل اضافی است، پیشنهاد می‌دهد. بر اساس نظریه بازی تکاملی با پویایی تکرار کننده برای بیان مسایل بهینه‌سازی چند هدفه، روش پیشنهادی نتایج قابل اعتمادی را از نظر تخصیص کنترل نشان می‌دهد. روش پیشنهادی از نظر دو هدف مانند به حداقل رساندن انرژی کنترل و نرخ انحراف کنترل نتایج قابل اعتمادی را نشان می‌دهد. نتایج این روش بستگی به ماتریس بازدهی دارد که برای حل تکرارکننده پویا و راه حل‌های تحلیلی استفاده می‌شود، بنابراین، نکته کلیدی این روش یافتن یک ماتریس سود مناسب است.

انتظار می‌رود این مطالعه روشی برای طراحی راه حلی برای کنترل مسایل تخصیص در هر سیستم بیش از حد فعال ارائه دهد. چنین روشی، با بهره‌گیری از مفهوم نظریه بازی‌های تکاملی با پویایی تکرار کننده، می‌تواند برای مقابله با اهداف بیشتر و حل اهداف متضاد گسترش یابد.

مراجع

[1] M. R. James, S. Robson, S. d'Oleire-Oltmanns, and U. Niethammer, "Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment," *Geomorphology,* vol. 280, pp. 51-66, 2017.

[2] T. P. Nascimento and M. Saska, "Position and attitude control of multi-rotor aerial vehicles: A survey," *Annual Reviews in Control,* vol. 48, pp. 129-146, 2019.

[3] J. Li, C. Gao, C. Li, and W. Jing, "A survey on moving mass control technology," *Aerospace Science and Technology,* vol. 82, pp. 594-606, 2018.

[4] V. Kostenko and A. Y. Tolstonogov, "CONTROL ALLOCATION APPROACHES FOR OVER-ACTUATED UNDERWATER VEHICLES: A BRIEF REVIEW."
[5] R. Falconi and C. Melchiorri, "Dynamic model and control of an over-actuated quadrotor UAV," *IFAC Proceedings Volumes,* vol. 45, no. 22, pp. 192-197, 2012.
[6] A. Chamseddine, D. Theilliol, I. Sadeghzadeh, Y. Zhang, and P. Weber, "Optimal reliability design for over-actuated systems based on the MIT rule: Application to an octocopter helicopter testbed," *Reliability Engineering & System Safety,* vol. 132, pp. 196-206, 2014.
[7] P. Segui-Gasco, Y. Al-Rihani, H.-S. Shin, and A. Savvaris, "A novel actuation concept for a multi rotor UAV," *Journal of Intelligent & Robotic Systems,* vol. 74, no. 1, pp. 173-191, 2014.
[8] M. Ryll, H. H. Bülthoff, and P. R. Giordano, "A novel overactuated quadrotor uav: Modelling, control and experimental validation," *IEEE Transactions on Control Systems Technology, Institute of Electrical and Electronics Engineers,* vol. 23, no. 2, pp. 510-556, 2015.
[9] J. C. Monteiro, F. Lizarralde, and L. Hsu, "Optimal control allocation of quadrotor UAVs subject to actuator constraints," in *2016 American Control Conference (ACC)*, 2016, pp. 500-505: IEEE.
[10] C. Nainer, M. Furci, A. Seuret, L. Zaccarian, and A. Franchi, "Hierarchical control of the over-actuated ROSPO platform via static input allocation," *IFAC-PapersOnLine,* vol. 50, no. 1, pp. 12698-12703, 2017.
[11] M. Santos, L. Honório, A. Moreira, M. Silva, and V. Vidal, "Fast Real-Time Control Allocation Applied to Over-Actuated Quadrotor Tilt-Rotor," *Journal of Intelligent & Robotic Systems,* vol. 102, no. 3, pp. 1-20, 2021.
[12] B. Li, J. Li, K. Tang, and X. Yao, "Many-objective evolutionary algorithms: A survey," *ACM Computing Surveys (CSUR),* vol. 48, no. 1, pp. 1-35, 2015.
[13] S.-A. N. Alexandropoulos, C. K. Aridas, S. B. Kotsiantis, and M. N. Vrahatis, "Multi-objective evolutionary optimization algorithms for machine learning: A recent survey," in *Approximation and optimization*: Springer, 2019, pp. 35-55.
[14] J. R. Marden and J. S. Shamma, "Game theory and control," *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems,* vol. 1, pp. 105-134, 2018.
[15] W. H. Sandholm, "Evolutionary game theory," *Complex Social and Behavioral Systems: Game Theory and Agent-Based Models,* pp. 573-608, 2020.
[16] E. Perry, "Evolutionary Game Theory and Evolutionarily Stable Strategies," 2018.
[17] Y. Tian, R. Cheng, X. Zhang, and Y. Jin, "PlatEMO: A MATLAB platform for evolutionary multi-objective optimization [educational forum]," *IEEE Computational Intelligence Magazine,* vol. 12, no. 4, pp. 73-87, 2017.

پژمان غلام نژاد مدرک دکترای تخصصی در رشته مهندسی کامپیوتر گرایش هوش مصنوعی را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب در سال ۱۳۹۹ اخذ نموده است. زمینه‌های مورد علاقه ایشان عبارتند از: پردازش تکاملی، یادگیری ماشین، بازشناسی الگو آماری و سیستم‌های فازی. آدرس پست الکترونیکی ایشان عبارت است از:

pezhman.gholamnezhad@gmail.com

[1] Fix wing
[2] Multi Rotor
[3] Single copter
[4] Dual copter
[5] Three copter
[6] Quad copter
[7] Panta copter
[8] Hexa copter
[9] Octa copter

[10] Over-actuated system
[11] redundant rotors
[12] Multi-Objective Evolutionary Algorithms (MOEAs)
[13] Game Theory
[14] Control Allocation
[15] positive diagonal weighting matrix
[16] Hamilton
[17] Lagrange multiplier
[18] Pareto-optimal fronts
[19] Diversified
[20] Decision Space
[21] Objective space
[22] Evolutionary Game Theory
[23] Evolutionary Stable Strategy (ESS)
[24] mutant
[25] Replicator Dynamics
[26] platform
[27] Matlab
[28] PlatEMO
[29] Non-cooperative game
[30] Nash-equilibrium
[31] fitness
[32] Nonlinear Dynamic Inversion (NDI)

The CSI Journal on Computing Science and Information Technology
Vol. 19, No.1, 2021

Multi-objective optimization evolutionary algorithm based on evolutionary game theory to control the motion of multi-engine UAVs

Pezhman Gholamnezhad [1]

[1] Faculty of Computer Engineering and Information Technology, Shahid Sattari University of Aeronautical Sciences and Technology, Tehran, Iran

Abstract

Multi rotors UAVs have limited mobility due to the nature of the actuators. As a result, the multi-rotors UAV is unable to track the desired paths in space, and loss of mobility can be a limiting factor. Therefore, a comprehensive control is needed for this type of UAV. This research presents multi-objective optimization for control allocation problems based on evolutionary game theory to solve the distribution of additional control input on the over-active system in real time on multi-rotor drones. For multi-objective optimization, an evolutionary game theory-based approach with iterative dynamics is used to find the desired weight using the weighted sum method. The main idea of this method is that the best strategy or dominant solution can be chosen as the solution that remains among other non-dominant solutions. Evolutionary game theory considers strategies as an actor and examines how these strategies can survive using repetitive dynamics with the payment matrix. The numerical simulation results show the optimal weights selected by the evolutionary game and how the efficiency changes in the dynamic repeater.

Keywords: UAV control, Evolutionary game theory, Evolutionary multi-objective optimization, Multi-engine UAVs.