

ارائه رویکرد جدید در ربات چهار ملخه با استفاده از پردازش تصویر مبنی بر منطق فازی

سعید سیراوند^۱،* دکتر جهانبخش حامدی^۲

^۱. کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، گرایش طراحی ربات ها و سیستم های مکترونیکی

^۲. دکتری تخصصی، عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز

چکیده

امروزه با پیشرفت روز افزون فناوری، ربات‌ها نقش به سزایی در زندگی روزمره پیدا کرده اند. در این میان، ربات‌های پرنده بدون سرنشین در چند سال اخیر از این قاعده مستثنی نبوده و پیشرفت های چشمگیری در این راستا داشته اند. اهمیت ربات های پرنده بی سرنشین زمانی آشکار خواهد شد که از آن ها برای انجام ماموریت در مکان های پرخطر و غیرقابل دسترس استفاده شود. یو ای وی ها با بال های چرخنده نسبت به هواپیماهای بی سرنشین با بال های ثابت دارای مزایایی همچون برخاست و نشست عمودی و مانور جنگی بیشتر هستند قابلیت اجرا به صورت تیمی بین ربات‌های همکار چهارملخه برای انجام عملیات‌های جستجو وسیع با ربات‌های ساده انجام می‌شود. ربات چهار ملخه با بال‌های چرخشی دارای سیستم پردازش داخلی جهت کنترل ربات و انجام پردازش‌های مورد نیاز در ماموریت‌های تعریف شده برای آن است. تشخیص خودکار موقعیت هدف نسبت به یک مرجع مشخص در موقعیت یابی ربات چهار ملخه می‌تواند عملکرد مناسبی را برای آنها در موقعیت‌های مختلف فراهم کند. با توجه به اینکه تنها سنسور بازخوردی ربات چهار ملخه برای دریافت اطلاعات محیطی دوربین تک چشمی است، علاوه بر اندازه کوچک و عدم تحمیل بار اضافی بر این ربات، پردازش کمتری را انجام می‌دهد. این ربات از سیستم ارتباطی بی‌سیم برخوردار است و می‌توان برای ارتباط با سیستم مرکزی و ربات‌های چهار ملخه دیگر در ماموریت‌های تیمی استفاده کرد. قابلیت شناور ماندن در هوا ربات‌های چهار ملخه باعث می‌شود بهترین انتخاب برای ماموریت‌هایی در محیط‌های شلوغ را یافت کند و در صورت نیاز، در هوا به صورت ثابت بماند. امکان حرکت با سرعت کم، عدم نیاز به باند برای فرود و بلند شدن از زمین، نزدیک شدن به هدف تا کمترین فاصله ممکن با بال‌های چرخشی نسبت به نوع بال‌های ثابت آن است. این رویکرد، این امکان را به ربات می‌دهد که در هر نقطه دلخواه در تمامی جهات ممکن به صورت آنی تغییر موقعیت دهد و حتی حرکت رو به پشت داشته باشد. به خاطر این ویژگی ها، اینگونه ربات ها انتخاب اول در ماموریت‌های بازرسی و شناسایی است. از این رو باید با طراحی وساخت و کنترل برای در نظر گرفتن قابلیت جستجو محیط و موقعیت یابی هدف مناسب و دقیق رسید. این رویکرد را می‌توان با استفاده از پردازش تصویر مبنی بر منطق فازی برای جلوگیری از مشکلات محاسباتی و عدم قطعیت در ذخیره اطلاعات دریافتی سنسورهای ربات چهار ملخه در نظر داشت. ارائه الگوریتم کارا و قوی منطق فازی در پردازش تصویر برای استفاده از اطلاعات دریافتی از یک دوربین به نوبری ربات چهار ملخه بدون سرنشین جهت جستجو محیط و موقعیت یابی هدف در محیط‌های ناشناخته تعریف می‌شود.

واژگان کلیدی: ربات چهار ملخه، موقعیت‌یابی هدف، پردازش تصویر، منطق فازی

۱. مقدمه

در عصر حاضر لزوم استفاده از ربات ها بدلائل زیادی از جمله سرعت عمل، دقت بالا، هزینه کمتر و بازده بهتر برای تمام صنایع و کارخانه ها مشخص می باشد. ربات یک ماشین هوشمند است که قادر است در شرایط خاصی که در آن قرار می گیرد، کار تعریف شده ای را انجام دهد و همچنین قابلیت تصمیم گیری در شرایط مختلف را نیز ممکن است داشته باشد، می توان گفت ربات ها برای کارهای مختلفی می توانند تعریف و ساخته شوند. مانند کارهایی که انجام آن برای انسان غیرممکن یا دشوار باشد. علمی که به طراحی، ساخت، نگهداری و تعمیر ربات ها می پردازد، رباتیک نام دارد. رباتیک دانش و فناوری وابسته به ابزارهای مکانیکی کنترل شونده به وسیله رایانه است و هدف آن اتصال هوش از ادراک به رفتار می باشد. رباتها آنقدر گسترده اند که امروزه نمی توان بدون آنها زندگی کرد. حدود ۹۰ درصد آنها، ربات های صنعتی هستند، یعنی ربات هایی که در کارخانه ها، آزمایشگاه ها، انبارها، نیروگاه ها، بیمارستان ها و بخش های مشابه به کار گرفته می شوند. کمتر کارخانه ای را می توان یافت که در آن از ربات استفاده نشود. ربات های جوشکار، رنگرز، بسته بند، تراشکار، چاپگر، کنترل کیفیت، سوراخکار، کنترل کننده ی دما، هشدار دهنده ی نشت گاز، غربال کننده های سانتریفوژ های خودکار و ... همگی نمونه هایی از ربات ها در کارخانه ها هستند. البته ربات ها در مصارفی مانند امداد و نجات، هوافضا، خدمات شهری، نظافت، کشاورزی، و نیز حضوری فعال و اجتناب ناپذیر دارند.

پیشینه صورت گرفته در خارج از کشور

شائو و همکاران^۱ (۲۰۲۰) در پژوهشی با عنوان کنترل قوی یکپارچه سازگاری عصبی از ربات چهار ملخه بصری برای ردیابی یک جسم متحرک بیان کردند که هدف از این پژوهش دستیابی به ردیاب ربات چهار ملخه بصری برای هدف حرکت زمین با عدم قطعیت های مختلف است. الگوریتم با تقریب شبکه عصبی در حلقه فیدفوروارد جبران می شود، خطاهای تخمین باقیمانده در حلقه بازخورد را کاهش می دهد. در نتیجه محافظه کاری که با استفاده از دستاوردهای بالا در هنگام مواجهه با عدم قطعیت زیاد، آزاد است. با استفاده از خاصیت کنترل RISE، پایداری مجانبی می تواند با ورودی های کنترلی پیوسته و محدود تضمین شود و با استفاده از فناوری شبکه عصبی چندلایه^۲ (MLP)، تعداد پارامترهای یادگیری شبکه عصبی برای سیستم حلقه بسته کاهش یافته و بار محاسباتی آنلاین به شدت کاهش می یابد. در نتیجه، اعتبار و برتری روش پیشنهادی از طریق شبیه سازی ها و مقایسه تایید می شوند

وانگ و همکاران^۳ (۲۰۱۹) در پژوهشی با عنوان موقعیت ترکیبی پویا یا کنترل نیرو برای ربات چهار ملخه بیان کردند که هدف از این پژوهش برآورده کردن چالش های کلیدی که نه تنها موقعیت را کنترل کند بلکه نیرویی که توسط عوامل موثر روی آن و در حین انجام وظایف پیچیده مانند دستکاری اشیاء، بازرسی و مونتاژ اعمال می شود با ارائه یک کنترل کننده نیرو یا موقعیت ترکیبی پویا برای تحمل ربات چهار ملخه با چند درجه آزادی عمل می باشد. سیستم تحت شرایطی مدل سازی می شود که محدودیت های عملکرد ربات به وسیله مجموعه ای از سطوح ترکیبی شرح داده می شوند و سپس پویایی سیستم با در نظر گرفتن افزونگی سیستم توسعه می یابد. برای تایید کارایی کنترل کننده هایبرید پیشنهادی، شبیه سازی های عددی را برای دو سناریوی کاربردی مختلف شامل جایگذاری یک واحد سنسور بر روی یک دیوار عمودی

^۱ Shao et al^۲ Multilayer perceptron^۳ Wang et al

و بازرسی با یک دیوار منحنی اعمال کردند. نتایج نشان داد که این سیستم قادر به حفظ نیرو و موقعیت مورد نظر در هر دو مورد دارد

بدر و همکاران^۴ (۲۰۱۹) در پژوهشی با عنوان مدل سازی، کنترل و اجرای اصلاح طراحی برای پهنپاد چهار ملخه بیان کردند که هدف از این پژوهش یک اصلاح طراحی با تایید تجربی به منظور افزایش درجه ربات چهار ملخه و بهبود قابلیت شناوری آن است. چهار چرخش اضافی برای ملخ‌های در مورد محور عمود بر روی دستگاه به سمت سیستم تحریک را می‌توان برای ایجاد یک حرکت افقی با زاویه انحراف صفر استفاده کرد. انتخاب محورهای چرخشی متفاوت، مزایای این تغییر را افزایش می‌دهد که شامل افزایش درجات آزادی و بهبود وضعیت پرند و ربات‌های چهار ملخه می‌باشد. یک کنترلر PID برای اجرای عملی طرح پیشنهادی بکار رفته و شبیه‌سازی و نتایج تجربی اعتبار طرح پیشنهادی را نشان داد [۱۳].

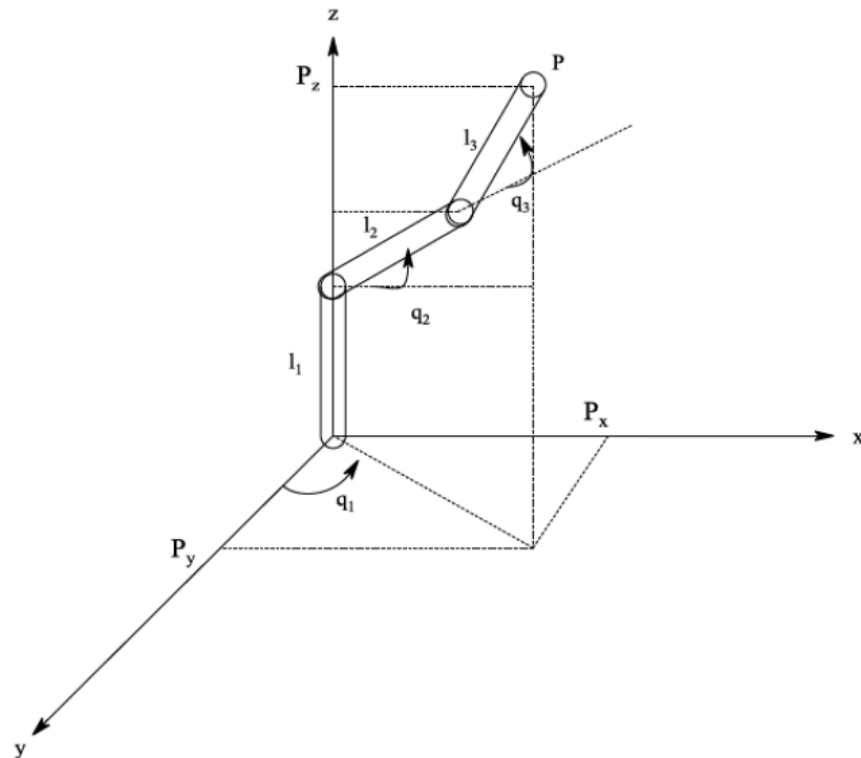
روش

سیستم پیشنهادی پردازش تصویر مطابق با منطق فازی قابلیت یادگیری برای تقریب زدن توابع غیرخطی را دارد. بنابراین منطق فازی به عنوان یک برآورد جهانی مطرح شده است و اختلاف آن با روش‌های دیگر از جمله روش‌های سیناپس و تعمیم و غیره در این است که برای توصیف پدیده‌های غیر قطعی و نامشخص به کار برده می‌شود و این روش گسترده‌ای در سیستم‌های کنترل و پیش‌بینی تصمیم قابل استفاده است و به راحتی مدل سازی می‌شود. آنچه در این پژوهش اهمیت دارد، حل بهینه، کارآمد و سریع مسأله و کنترل ربات با قابلیت جستجو محیط و موقعیت یابی هدف می‌باشد

معادلات سینماتیک ربات

ربات سه درجه آزادی با سه لینک نشان داده شده در شکل را در نظر بگیرید، این ربات یک درجه آزادی دورانی حول محور عمودی دارد تا بتواند مسیرهای در فضای کاری را طی کند. زوایای مفصل این ربات به ترتیب $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ که بر اساس نشانه گذاری های دنویت-هارتنبرگ ارائه شده است. همچنین او را نیز L_1, L_2, L_3 نمایانگر طول لینک های آن است.

^۴ Badr et al



شکل ۳-۱ شماتیک ربات در فضای سه بعدی

سینماتیک معکوس یک روش آنالیز برای محاسبه ی مختصات و مکان هندسی ست که برای یک مجموعه مختصات عملگر انتهایی ربات مختصات هریک از زوایای آن را به ما می دهد. این روش در بر گیرنده ی حل مجموعه ای از معادلات است که بصورت کلی غیر خطی و پیچیده است. قدم اول در طراحی کنترل کننده، مدلسازی آن است. به عبارت دیگر، ما نیازمند مشخصات فیزیکی یا معادلات ریاضی معادل آن هستیم تا بتوانیم کنترل مناسبی برای ربات طراحی کنیم. برای بررسی دینامیک ربات دو روش وجود دارد، روش اول سینماتیک مستقیم و روش دوم سینماتیک معکوس نام دارد که ارتباط بین نیروها و جابجایی ها در دینامیک ربات بررسی می گردد.

در صورتی که با استفاده از موقعیت هریک از مفاصل موقعیت عملگر انتهایی ربات را بدست آوریم از سینماتیک مستقیم استفاده کرده ایم، به عبارت دیگر در سینماتیک مستقیم مقادیر هریک از پارامترهای مفاصل ربات موجود هستند و با استفاده از این مقادیر، مکان هریک از قسمت ها را می توان استخراج کرد. در واقعیت سینماتیک مستقیم یک ارتباط نگاشت بین فضای مفاصل به فضای مختصات مکان ایجاد می کند. براساس شکل بالاسینماتیک مستقیم این ربات را می توان بصورت زیر نوشت:

$$P_x = (l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) * \sin \theta_1$$

رابطه ۳-۱

$$P_y = (l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) * \cos \theta_1 \quad \text{رابطه ۲-۳}$$

$$P_z = l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_1 \quad \text{رابطه ۳-۳}$$

برای نوشتن سینماتیک معکوس، باید بتوان زوایای هریک از لینک ها را بر اساس موقعیت مکان عملگر انتهای ربات نوشت. مشخص است که نوشتن سینماتیک معکوس دارای پیچیدگی بسیار بالایی نسبت به سینماتیک مستقیم است. با توجه به شکل داریم:

$$\theta_1 = \tan^{-1}(P_y, P_x) \quad \text{رابطه ۴-۳}$$

$$r = \pm \sqrt{P_y^2 + P_x^2} \quad \text{رابطه ۵-۳}$$

$$D = \pm \sqrt{(P_z - l_1)^2 + r^2} \quad \text{رابطه ۶-۳}$$

$$\theta_3 = \cos^{-1}\left(\frac{D^2 - l_3^2 - l_2^2}{2l_3l_2}\right) \quad \text{رابطه ۷-۳}$$

$$\theta_3 = \cos^{-1}\left(\frac{(P_z - l_1)^2 + P_x^2 + P_y^2 - l_3^2 - l_2^2}{2l_3l_2}\right) \quad \text{رابطه ۸-۳}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}(r, P_z - l_1) - \tan^{-1}(l_2 + l_3 \cos \theta_3, l_3 \sin \theta_3) \quad \text{رابطه ۹-۳}$$

برای یافتن ارتباط بین سرعت ها، با استفاده از مشتق گیری از رابطه ۳-۳ داریم:

$$\begin{aligned}\dot{x} = & (\cos \theta_1 * (l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \cos \theta_2)) * \dot{\theta}_1 \\ & - (\sin \theta_1 * (l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \sin \theta_2)) * \dot{\theta}_2 \\ & - (l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) * \sin \theta_1) * \dot{\theta}_3\end{aligned}$$

رابطه ۳-۱۰

$$\begin{aligned}\dot{y} = & (-\sin \theta_1 * (l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \cos \theta_2)) * \dot{\theta}_1 \\ & - (\cos \theta_1 * (l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \sin \theta_2)) * \dot{\theta}_2 \\ & - (l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) * \cos \theta_1) * \dot{\theta}_3\end{aligned}$$

رابطه ۳-۱۱

$$\begin{aligned}\dot{z} = & (l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \cos \theta) * \dot{\theta}_2 \\ & + (l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \cos \theta) * \dot{\theta}_3\end{aligned}$$

رابطه ۳-۱۲

با توجه به بردارهای θ, X می توان نوشت

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix}$$

رابطه ۳-۱۳

$$x = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

رابطه ۳-۱۴

رابطه ۳-۱۵

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} C_1(l_3 C_{23} + l_2 C_2) & -S_1(l_3 S_{23} + l_2 S_2) & -l_3 S_{23} S_1 \\ -S_1(l_3 C_{23} + l_2 C_2) & -C_1(l_3 S_{23} + l_2 S_2) & -l_3 S_{23} C_1 \\ 0 & l_3 C_{23} + l_2 C_2 & l_3 C_{23} \end{bmatrix} \dot{\theta} = J \dot{\theta}$$

که در معادلات فوق د بیانگر (sin) و C بیانگر (cos) ول ماتریس ژاکوبین ربات است و تعریف آن یکی از مفاهیم پایه در ربات ها است. دترمینان ماتریس ژاکوبین بصورت زیر بدست می آید:

۱۶-۳

$$\det(J) = \frac{1}{2} l_2 l_3 (l_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) - l_3 \sin \theta_2 - l_2 \sin(\theta_2 - \theta_3) + l_3 \sin(\theta_2 + 2\theta_3))$$

ریشه های معادله ی فوق بیانگر نقاط تکین بازوی رباتیک هستند. نقاط تکین نقاطی هستند که در آنها ربات نمی تواند در یک جهت خاص حرکتی داشته باشد.

مدلسازی دینامیکی

آنالیز دینامیکی ربات رابطه ای بین مکان، سرعت و شتاب هریک از اجزا با نیروها و گشتاورهای مفاصل که توسط تحریک کننده ها (موتورها) اعمال می شوند تولید می کند. دینامیک ربات پیچیده و غیر خطی می- باشد و ممکن است کنترل آنرا پیچیده کند. معادلات دینامیکی ربات ها معمولا با استفاده از رابطه زیر بیان می شوند:

۱۷-۳

$$Q = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q)$$

این رابطه، یک رابطه دارای درهمگیرش مکانیکی است که از لاگرانژین استخراج می شود. در روابط، $M(q)$ ماتریس

ایترسی $c(q, \dot{q})$ ماتریس کوریولیس ایترسی است، $G(q)$ نیز بردار جاذبه است و Q نیز گشتاور ورودی می باشد. متغیر مربوط به مفاصل، یک بردار مرتبه n است که شامل زوایای مفاصل می- باشد. ماتریس های مربوط به هریک از پارامترهای فوق به شرح زیر می باشد:

۱۸-۳

$$\begin{aligned}
 M(1,1) &= \frac{1}{2} m_1 R_1^2 + \frac{1}{3} m_2 l_2^2 \cos^2 \theta_2 + \frac{1}{3} m_2 l_3^2 \cos(\theta_2 + \theta_3)^2 \\
 &+ m_3 l_2^2 \cos^2 \theta_2 + m_3 l_2 l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_2 \\
 M(1,2) &= 0 \\
 M(1,3) &= 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M(2,2) &= \frac{1}{3} m_2 l_2^2 \cos^2 \theta_2 + \frac{1}{3} m_3 l_2^2 + m_3 l_2 l_3 \cos \theta_3 \\
 M(2,3) &= \frac{1}{3} m_3 l_3^2 + m_3 l_2^2 + \frac{1}{3} m_3 l_2 l_3 \cos \theta_3 \\
 M(3,1) &= 0 \\
 M(3,2) &= \frac{1}{3} m_3 l_3^2 + m_3 l_2^2 + \frac{1}{3} m_3 l_2 l_3 \cos \theta_3 \\
 M(3,3) &= \frac{1}{3} m_3 l_3^2
 \end{aligned}$$

رابطه ۳-۱۹

$$\begin{aligned}
 C(1,1) &= \left[-\frac{4}{3} m_2 l_2^2 \sin 2\theta_2 - \frac{1}{3} m_3 l_3^2 \sin 2(\theta_2 + \theta_3) - m_3 l_2 l_3 \sin(2\theta_2 + \theta_3) \right] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 \\
 &+ \left[-\frac{1}{3} m_3 l_3^2 \sin 2(\theta_2 + \theta_3) - m_3 l_2 l_3 \cos \theta_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) \right] \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C(2,1) &= \\
 &[-m_3 l_3 l_2 \sin \theta_3] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + [-\frac{1}{2} m_3 l_3 l_2 \sin \theta_3] \dot{\theta}_3^2 + [\frac{1}{6} m_2 l_2^2 \sin 2\theta_2 + \frac{1}{6} m_3 l_3^2 \sin 2(\theta_2 + \theta_3) \\
 &+ \frac{1}{2} m_3 l_2^2 \sin 2\theta_2 + \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 \sin(2\theta_2 + \theta_3)] \dot{\theta}_1^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C(3,1) &= [\frac{1}{2} m_3 l_3 l_2 \sin \theta_3] \dot{\theta}_1^2 + \\
 &[\frac{1}{6} m_3 l_3^2 \sin 2(\theta_2 + \theta_3) + \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 \cos \theta_2 \sin(\theta_2 + \theta_3)] \dot{\theta}_1^2
 \end{aligned}$$

رابطه ۳-۲۰

$$G(1,1) = 0$$

$$G(2,1) = \frac{1}{2} m_2 g l_2 \cos \theta_2 + \frac{1}{2} m_3 g l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + m_3 g l_2 \cos \theta_2$$

$$G(3,1) = \frac{1}{2} m_3 g l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

دو الگوریتم جامع پیشنهادی برای محاسبه خروجی یک سیستم فازی نوع ۲

سیستم فازی نوع ۲. Error! Reference source not found. را در نظر بگیرید. می‌خواهیم با استفاده از آنچه تاکنون گفته شد الگوریتمی را برای محاسبه خروجی y_c این سیستم به ازای یک ورودی معین، $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_p]^T$ ، ارائه دهیم. فرض کنید پایگاه قوانین شامل N_R قانون بصورت زیر باشد:

$$R^j : \text{if } x_1 \text{ is } \tilde{F}_1^j \text{ and } x_2 \text{ is } \tilde{F}_2^j \text{ and...and } x_p \text{ is } \tilde{F}_p^j \text{ then } y \text{ is } \tilde{G}^j, j = 1, \dots, M$$

آنگاه برای یافتن خروجی می‌توان از الگوریتم‌های زیر استفاده کرد.

الگوریتم ۱

در این الگوریتم از مفهوم برش و صفحه آلفا در استنتاج استفاده می‌شود. همچنین غیرفازی‌سازی آن نیز بر مبنای الگوریتم K-M می‌باشد.

۱. فازی‌سازی: از آنجاکه فازی‌سازی غیرمنفرد بر پیچیدگیهای محاسباتی می‌افزاید، در اینجا برای سادگی از فازی‌ساز منفرد استفاده می‌کنیم

۲. استنتاج: به ازای $j = 1, \dots, N_R$ مراحل زیر را انجام دهید:

۱-۲: فضای $[0, 1]$ را به تعداد n_α نقطه گسسته $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n_\alpha}$ با فواصل مساوی تقسیم کنید.

۲-۲: به ازای $i = 1, \dots, p$ و $k = 1, \dots, n_\alpha$ برش-آلفا مجموعه $(\tilde{F}_i^j)_{\hat{x}_i}$ را محاسبه کنید:

$$\left((\tilde{F}_i^j)_{\hat{x}_i} \right)_{\alpha_k} = [f_{i,j}^{l,\alpha_k}, f_{i,j}^{r,\alpha_k}]$$

۳-۲: به ازای $k = 1, \dots, n_\alpha$ و $y \in Y$ برش-آلفا مجموعه \tilde{G}_y^j را محاسبه کنید:

$$\left(\tilde{G}_y^j \right)_{\alpha_k} = [g_y^{l,\alpha_k}, g_y^{r,\alpha_k}]$$

۴-۲: برش-آلفا مجموعه خروجی قانون j ام را به ازای y های مختلف بصورت زیر بدست آورید:

$$\begin{aligned} (\tilde{B}_y^j)_{\alpha_k} &= \left(\left(\bigwedge_{i=1}^P (F_i^j)_{\bar{x}} \right) \hat{*} G^j \right)_{\alpha_k} \\ &= \left[g_y^{l,\alpha_k} \hat{*} \left(\bigwedge_{i=1}^P f_{i,j}^{l,\alpha_k} \right), g_y^{r,\alpha_k} \hat{*} \left(\bigwedge_{i=1}^P f_{i,j}^{r,\alpha_k} \right) \right] = [b_{y,j}^{l,\alpha_k}, b_{y,j}^{r,\alpha_k}] \end{aligned} \quad (1-0)$$

۵-۲: برش-آلفا مجموعه خروجی کل را به ازای y ها و α های مختلف بصورت زیر بدست آورید:

$$(\tilde{B}_y)_{\alpha_k} = \bigwedge_{j=1}^M (\tilde{B}_y^j)_{\alpha_k} = \left[\bigwedge_{j=1}^M b_{y,j}^{l,\alpha_k}, \bigwedge_{j=1}^M b_{y,j}^{r,\alpha_k} \right] = [b_y^{l,\alpha_k}, b_y^{r,\alpha_k}] \quad (2-0)$$

نکته ۱: در روابط فوق، T و $\hat{*}$ معرف نرم- t و S معرف نرم- s می باشد.

نکته ۲: مراحل (۱-۲) تا (۳-۲) می توانند از قبل محاسبه و ذخیره شده باشند.

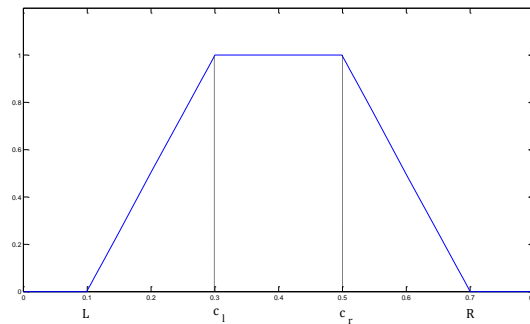
نکته ۳: چنانچه توابع عضویت ثانویه، مجموعه هایی با تابع عضویت گوسی باشند آنگاه برشهای آلفا متناظر با این مجموعه ها از رابطه زیر بدست می آیند:

$$\begin{aligned} F_x(u) &= e^{-\frac{(u-\mu)^2}{\sigma^2}} \\ (F_x)_\alpha &= [f_x^l, f_x^r] = [\mu - \sqrt{-\sigma \cdot \log(\alpha)}, \mu + \sqrt{-\sigma \cdot \log(\alpha)}] \end{aligned} \quad (3-0)$$

و چنانچه توابع عضویت ثانویه مثلثی و یا در حالت کلی دوزنقه ای باشند، برشهای آلفا بصورت زیر محاسبه می گردند:

$$(F_x)_\alpha = [f_x^l, f_x^r] = [\alpha(c_l - L) + L, \alpha(c_r - R) + R] \quad (4-0)$$

جاییکه R, c_l, c_r و L پارامترهای دوزنقه مطابق شکل می باشند.



شکل ۱- تابع عضویت ذوزنقه ای

۳. کاهش مرتبه و غیرفازی سازی: طبق آنچه در مرحله قبل انجام شد، برشهای آلفای مجموعه خروجی به ازای تمام $y \in Y$ بدست آمد، در نتیجه صفحه های آلفای مجموعه خروجی نیز در دسترس است. بنابراین با استفاده از **Error! Reference source not found.** و الگوریتم K-M می توان مجموعه کاهش یافته و مقدار غیرفازی شده را بطریق زیر بدست آورد:

۳-۱: به ازای $k = 1, \dots, n_\alpha$ مجموعه فازی متناظر با صفحه-آلفای $\alpha = \alpha_k$ از مجموعه خروجی \tilde{B} یعنی مجموعه \tilde{B}^{α_k} را از رابطه **Error! Reference source not found.** محاسبه کرده و پارامترهای c_{\max}^k و c_{\min}^k از مجموعه کاهش یافته متناظر با \tilde{B}^{α_k} را با استفاده از الگوریتم K-M بدست آورید.

۳-۲: مقادیر مرزی مجموعه کاهش یافته خروجی را بصورت زیر محاسبه کنید:

$$B_{tr}(y = c_{\max}^k) = B_{tr}(y = c_{\min}^k) = \alpha_k \quad (5-0)$$

۳-۳: مقدار نهایی غیرفازی شده، y_c ، را بصورت زیر بدست آورید:

$$y_c = \frac{\sum_{k=1}^{n_\alpha} \alpha_k (c_{\max}^k + c_{\min}^k)}{2 \sum_{k=1}^{n_\alpha} \alpha_k} \quad (6-0)$$

۱ الگوریتم ۲

در این الگوریتم، از عملیات مینیمم گیری و ماکزیمم گیری گسترش یافته جهت استنتاج استفاده می شود. برای انجام غیرفازی سازی نیز از عملیات میانگین گیری وزن دار استفاده می گردد. نخست تعریف زیر را در نظر بگیرید:

تعریف- مجموعه‌های مرتب شده: مجموعه $\mathfrak{S} = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ که شامل مجموعه‌های فازی نوع ۱ و نرمال می‌باشد را در نظر بگیرید. مجموعه‌های H_1, H_2, \dots, H_n را مجموعه‌های مرتب شده متناظر با مجموعه‌های F_1, F_2, \dots, F_n گویند اگر

$$H_i \in \mathfrak{S} \quad ۱.$$

$$C_{H_1} \leq C_{H_2} \leq \dots \leq C_{H_n} \quad ۲.$$

جاییکه C_{H_i} مرکز مجموعه H_i می‌باشد. (مرکز یک مجموعه فازی، نقطه‌ایست که مجموعه در آن نقطه بیشترین ارتفاع را دارد). حال برای یافتن خروجی y_c می‌توان مراحل زیر را طی کرد:

۱. **فازی‌سازی:** در اینجا نیز برای سادگی از فازی‌ساز منفرد استفاده می‌کنیم

۲. **استنتاج:** ابتدا فضای خروجی، Y ، را به تعداد n_y نقطه y_1, y_2, \dots, y_{n_y} و فضای $[0, 1]$ را به تعداد n_u

نقطه u_1, u_2, \dots, u_{n_u} با فواصل یکسان گسسته‌سازی کنید. سپس به ازای $k = 1, \dots, n_y$ مراحل زیر را انجام دهید

۱-۲: به ازای $j = 1, \dots, N_R$ اعمال زیر را انجام دهید:

۱-۱-۲: مجموعه‌های مرتب شده H_i^j ، $i = 1, \dots, p+1$ متناظر با مجموعه‌های $(\tilde{F}_i^j)_{\hat{x}_i}$ را بدست آورید.

سپس مجموعه آتش^۵، f_j ، مربوط به قانون j ام را با استفاده از رابطه **Error! Reference source not found** بصورت زیر محاسبه کنید:

$$f_j(u) = (\bigcap_{i=1}^p H_i^j)(u) = \begin{cases} \bigvee_{i=1}^p (H_i^j(u)) & u < C_{H_1} \\ \bigwedge_{i=1}^m (H_i^j(u)) & C_{H_m} \leq u \leq C_{H_{m+1}}, 1 \leq m \leq p-1 \\ \bigwedge_{i=1}^p (H_i^j(u)) & u > C_{H_p} \end{cases} \quad (۷-۰)$$

۲-۱-۲: مجموعه‌های مرتب شده \hat{H}_1^j و \hat{H}_2^j متناظر با مجموعه‌های f_j و $\tilde{G}_{y_k}^j$ را بدست آورده و برش

عرضی مجموعه خروجی قانون j ام را به روش زیر بدست آورید:

$$\tilde{B}_{y_k}^j(u) = (\hat{H}_1^j \cap \hat{H}_2^j)(u) = \begin{cases} (\hat{H}_1^j(u) \vee \hat{H}_2^j(u)) & u < C_{\hat{H}_1^j} \\ \hat{H}_1^j(u) & C_{\hat{H}_1^j} \leq u \leq C_{\hat{H}_2^j} \\ (\hat{H}_1^j(u) \wedge \hat{H}_2^j(u)) & u > C_{\hat{H}_2^j} \end{cases} \quad (۸-۰)$$

۲-۲: مجموعه‌های مرتب شده \bar{H}^j ، $j = 1, \dots, N_R$ متناظر با مجموعه‌های $\tilde{B}_{y_k}^j(u)$ را بدست آورده و مجموعه

خروجی نهایی را با استفاده از رابطه **Error! Reference source not found** بصورت زیر محاسبه کنید:

^۵ Firing set

$$\tilde{B}_{y_k}(u) = (\bigcup_{i=1}^{N_R} \bar{H}^j)(u) = \begin{cases} T_{i=1}^{N_R}(\bar{H}^j(u)) & u < C_{\bar{H}_1} \\ T_{i=m+1}^{N_R}(\bar{H}^j(u)) & C_{\bar{H}_m} \leq u \leq C_{\bar{H}_{m+1}}, 1 \leq m \leq N_R - 1 \\ \bigvee_{i=1}^{N_R}(\bar{H}^j(u)) & u > C_{\bar{H}_{N_R}} \end{cases} \quad (9-0)$$

جاییکه $C_{\bar{H}_1} \leq C_{\bar{H}_2} \leq \dots \leq C_{\bar{H}_{N_R}}$ مراکز مجموعه‌های \bar{H}^j و مرتب شده نقاط $C_{\tilde{B}_y^1}, C_{\tilde{B}_y^2}, \dots, C_{\tilde{B}_y^{N_R}}$ می‌باشند.

نکته: می‌توان نشان داد که

$$C_{\tilde{B}_{y_k}^j} = C_{\hat{H}_1^j} = \min(C_{H_1^j}, C_{\tilde{G}_{y_k}^j}) \quad (10-0)$$

بنابراین با داشتن مراکز $C_{\hat{H}_1^j}$ و $C_{\tilde{G}_{y_k}^j}$ براحتی می‌توان از قبل مراکز $C_{\bar{H}_j}$ را در اختیار داشت و در بدست آوردن مجموعه‌های مرتب شده \bar{H}^j و در نهایت در محاسبه رابطه (۹-۰) بکار برد.

۳. غیرفازی‌سازی: در مرحله ۲، برشهای عرضی مجموعه خروجی یعنی $\tilde{B}_y(u)$ را به ازای تمام $y \in \mathbf{Y} = \{y_1, \dots, y_{n_y}\}$ بدست آوردیم. بنابراین با استفاده از روش میانگین گیری وزن دار که قبلاً ذکر شد براحتی می‌توان مجموعه کاهش یافته و مقدار غیرفازی شده را بصورت زیر بدست آورد.

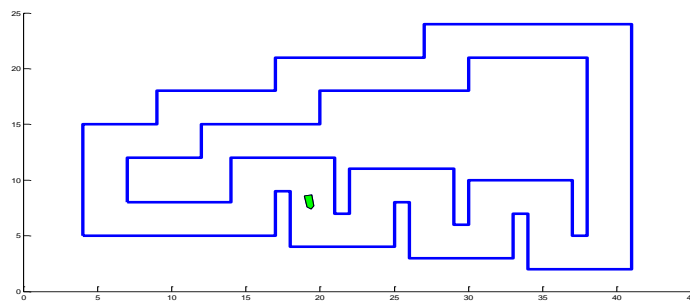
$$y_c = \frac{\sum_{k=1}^{n_y} y_k \cdot w_k}{\sum_{k=1}^{n_y} w_k} \quad (11-0)$$

$$w_k = \sum_{i=1}^{n_u} u_i \cdot \tilde{B}_{y_k}(u_i) \quad (12-0)$$

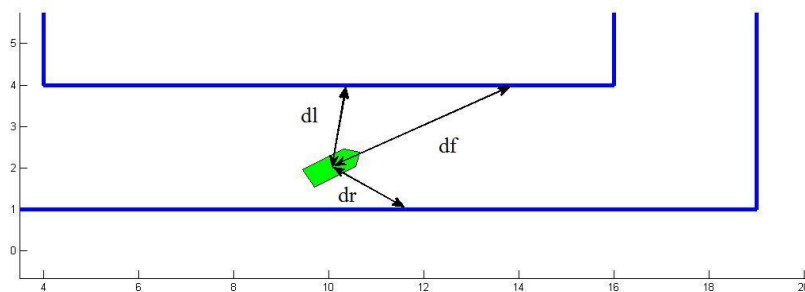
ردیابی یک مسیر از پردازش تصویر در حضور نویز اندازه گیری

در این سناریو هدف طراحی کنترلر فازی مناسب جهت حرکت کوادروتور در پردازش تصویر MATLAB است. مطابق شکل می‌باشد. در واقع در اینجا کنترلر می‌بایست در هر لحظه بسته به فاصله کوادروتور از مرزهای جاده هوایی، زاویه حرکت مناسب را تعیین کرده و گشتاورهای مورد نیاز جهت ردیابی این زاویه را به موتورهای اعمال کند. این عمل می‌تواند با اضافه کردن یک کنترلر سینماتیک به ساختار **Error! Reference source not found.** صورت پذیرد. ساختار کنترلر حاصل در شکل نمایش داده شده است. کنترلر سینماتیک طراحی شده در این سناریو یک کنترلر فازی نوع ۱ می‌باشد که در هر لحظه فاصله کوادروتور از مرزهای جلو، سمت چپ و سمت راست را به عنوان ورودی دریافت

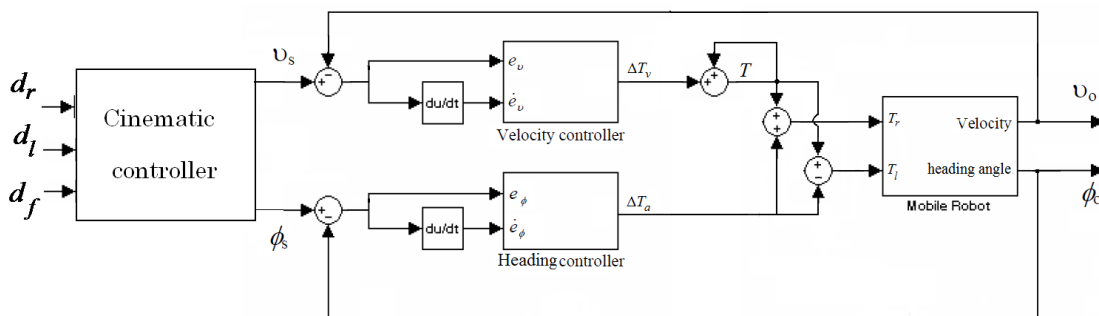
کرده و میزان زاویه حرکت و سرعت مطلوب را محاسبه می‌کند. البته در اینجا فرض شده است که کوادروتور همواره با یک سرعت ثابت حرکت می‌کند و در واقع کنترلر سینماتیک تنها زاویه حرکت را کنترل می‌کند. همانطور که گفته شد کنترلر سینماتیک دارای سه ورودی می‌باشد: ۱- فاصله از مرز یا مانع مقابل، ۲- فاصله از مرز یا مانع سمت چپ و ۳- فاصله از مرز یا مانع سمت راست. این فواصل مطابق شکل توسط سه سنسور که یکی در ضلع جلویی و دو سنسور در اضلاع کناری و با زاویه ۴۵ درجه نسبت به بدنه قرار دارند، اندازه گرفته می‌شوند. وجود این زوایای ۴۵ درجه در واقع یک پیشبینی از وضعیت موجود در آینده به دست می‌دهد که در عملکرد کوادروتور در پیچهای تند کمک فراوانی می‌کند.



شکل ۴-۸. مسیر حرکت کوادروتور

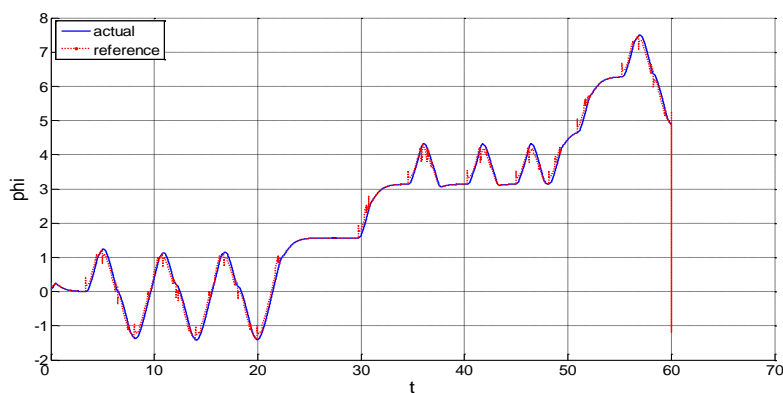


شکل ۴-۹. اندازه گیری فاصله از مرزها توسط سه سنسور

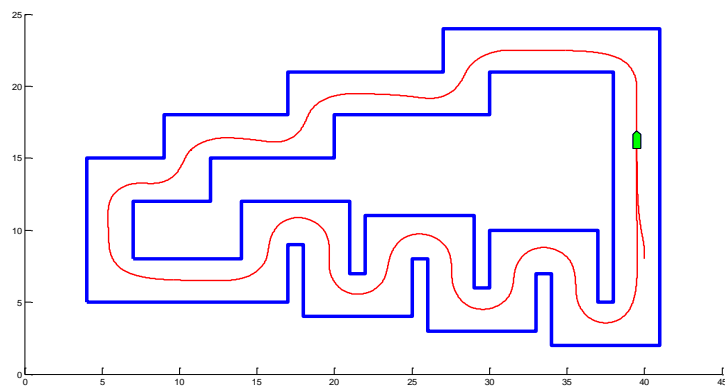


شکل ۴-۱۰. شماتیک کنترلر سناریوی ۴

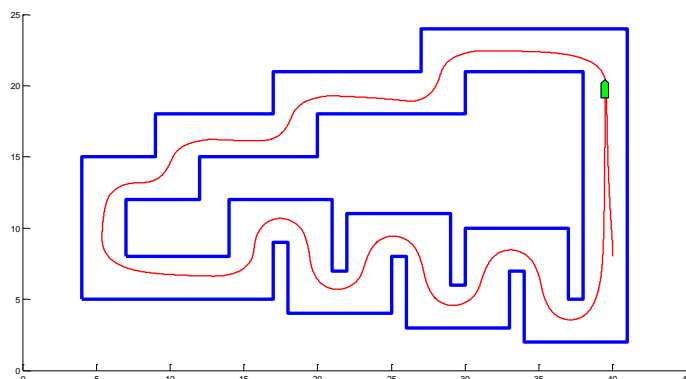
در این آزمایش، نویزی مشابه سناریوی ۲ بر روی اندازه‌گیری سنسورها در نظر گرفته شده است. برای کنترل دینامیک کوادروتور، هم کنترلر نوع ۱ و هم کنترلر نوع ۲ در غیاب نویز طراحی شدند و عملکرد آنها در حضور نویز مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازیها نشان می‌دهد که کنترلر نوع ۲ بخوبی توانسته است مسیر را طی کند، این در حالیست که کنترلر نوع ۱ در حضور نویز قادر به طی مسیر نمی‌باشد.



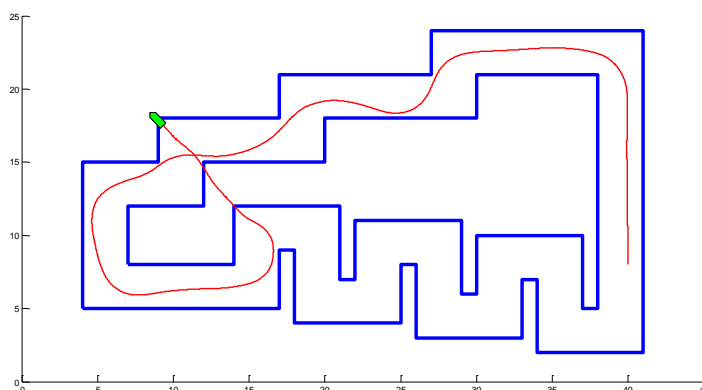
شکل ۴-۱۱. ردیابی زاویه توسط کنترلر نوع ۲



شکل ۴-۱۲. مسیر طی شده توسط کوادروتور کنترل شونده با کنترلر نوع ۲ در سناریوی ۴ در حضور نویز



شکل ۴-۱۳. مسیر طی شده توسط کوادروتور کنترل شونده با کنترلر نوع ۱ در سناریوی ۴ در غیاب نویز



شکل ۴-۱۴. مسیر طی شده توسط کوادروتور کنترل شونده با کنترلر نوع ۱ در سناریوی ۴ در حضور نویز

بررسی مدت زمان پردازش کنترلرهای مختلف

همانطور که قبلاً نیز گفته شد، یکی از دغدغه‌های اصلی در رابطه با سیستم‌های فازی نوع ۲ مدت زمان نسبتاً زیادی است که صرف پردازش در استنتاج و غیرفازی‌سازی می‌گردد. در اینجا با بکارگیری مجموعه‌های منفرد برای مجموعه‌های نتیجه قوانین، میزان قابل توجهی از حجم محاسبات و در نتیجه زمان پردازش کاسته شده است. جدول زمان پردازش را برای کنترلرهای مختلف ذکر شده در مسئله کنترل کوادروتور در سناریوهای ۱ تا ۳ را نشان می‌دهد. این زمان در واقع مدت زمانی است که طول می‌کشد تا خروجی کنترلر پس از اعمال ورودی‌ها محاسبه و اعمال گردد.

جدول ۴-۱۲. مقایسه مدت زمان پردازش برای کنترلرهای مختلف فازی در سناریوهای ۱ تا ۳

نوع کنترلر	فازی نوع ۱	فازی نوع ۲ با غیرفازی سازی به روش K-M	فازی نوع ۲ با غیرفازی سازی به روش برش-آلفا فازی	فازی نوع ۲ با غیرفازی سازی به روش میانگین گیری وزن دار	فازی نوع ۲ با غیرفازی سازی به روش بیشترین امکان
زمان پردازش msec.	۰.۳	۰.۸	۰.۵	۰.۴	۱.۷

جدول ۴-۱۳. مقایسه زمان پردازش کنترل کننده های نوع ۱ و نوع ۲ در سناریوی ۴

نوع کنترلر	فازی نوع ۱	فازی نوع ۲ با غیرفازی سازی به روش بیشترین امکان
زمان پردازش msec.	۰.۷	۲.۴

بحث و نتیجه گیری

در این مقاله کنترلر یک ربات چهار ملخه با قابلیت جستجوی محیط و موقعیت یابی هدف با استفاده از پردازش تصویر طراحی گردید. در این طراحی از کنترل کننده فازی به دلیل سرعت سریع پاسخ و مقاوم بودن در برابر نویز و عدم قطعیت و هموار بودن پاسخ در مقایسه با سایر کنترل کننده ها استفاده گردید. علاوه بر این با توجه به اینکه سیستم های فازی نوع دو قابلیت بیشتری جهت مدلسازی عدم قطعیت ها دارند، از سیستم های فازی نوع دوم در طراحی کنترل کننده استفاده شد و موقعیت یابی هدف با استفاده از پردازش تصویر مبنی بر منطق فازی پرداخته شد. بدین منظور، مسئله ردیابی زاویه هدایت و سرعت حرکت را در حضور نویز و عدم قطعیت های ناشی از تغییر پارامترهای کوادروتور مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به نتایج شبیه سازی، کنترلرهای فازی نوع ۲ همگی بجز کنترلر K-M، نسبت به نویز از مقاومت نسبتاً بالایی برخوردار بودند. در واقع هرچه ناحیه عدم قطعیت (ناحیه بین توابع عضویت فوقانی و تحتانی) بزرگ تر باشد، توانایی کنترلر در حذف اثر نویز بیشتر می گردد. از طرف دیگر افزایش این ناحیه از یک حد بیشتر، موجب تضعیف عملکرد کلی سیستم می گردد. بنابراین می بایست یک مصالحه میان حذف نویز و دقت ردیابی در حالت کلی برقرار نمود. نکته قابل تأمل دیگر در رابطه با طراحی کنترلرهای نوع ۲، خطای نسبتاً زیاد کنترلر بدست آمده از روش K-M حتی در غیاب نویز است. در واقع به ازای هر مقدار Δs ، عملکرد این کنترلر نسبت به کنترلر نوع ۱ دارای خطای بیشتری می گردد که با افزایش Δs این خطا افزایش می یابد.

منابع و مراجع

- [۱] Gohari, P. S., Mohammadi, H., & Taghvaei, S. (۲۰۱۹). Using chaotic maps for 3D boundary surveillance by quadrotor robot. *Applied Soft Computing*, ۷۶, ۷۸-۷۷.
- [۲] Dong, W., Ding, Y., Huang, J., Yang, L., & Zhu, X. (۲۰۱۹). An optimal curvature smoothing method and the associated real-time interpolation for the trajectory generation of flying robots. *Robotics and Autonomous Systems*, ۱۱۵, ۷۳-۸۲.
- [۳] Al-Isawi, M. M., & Sasiadek, J. Z. (۲۰۱۹). Pose estimation for mobile and flying robots via vision system. In *Aerospace Robotics III* (pp. ۸۳-۹۶). Springer, Cham.
- [۴] Mantegazza, D., Guzzi, J., Gambardella, L. M., & Giusti, A. (۲۰۱۹, March). Learning Vision-Based Quadrotor Control in User Proximity. In ۲۰۱۹ ۱۴th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI) (pp. ۳۶۹-۳۶۹). IEEE.
- [۵] Lyu, Y., Lai, G., Chen, C., & Zhang, Y. (۲۰۱۹). Vision-Based Adaptive Neural Positioning Control of Quadrotor Aerial Robot. *IEEE Access*, ۷, ۷۵۰۱۸-۷۵۰۳۱.
- [۶] Zhang, L. D., Wang, B., Liu, Z. X., Zhang, Y. M., & Ai, J. L. (۲۰۱۹). Motion planning of a quadrotor robot game using a simulation-based projected policy iteration method. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, ۲۰(۴), ۵۲۵-۵۳۷.
- [۷] Pi, C. H., Hu, K. C., Cheng, S., & Wu, I. C. (۲۰۲۰). Low-level autonomous control and tracking of quadrotor using reinforcement learning. *Control Engineering Practice*, ۹۵, ۱۰۴۲۲۲.
- [۸] Biswas, S., & Sharma, R. (۲۰۱۹). Goal-aware Navigation of Quadrotor UAV for Infrastructure Inspection. In *AIAA Scitech ۲۰۱۹ Forum* (p. ۱۶۹۱).
- [۹] Sampedro, C., Rodriguez-Ramos, A., Bavle, H., Carrio, A., de la Puente, P., & Campoy, P. (۲۰۱۹). A fully-autonomous aerial robot for search and rescue applications in indoor environments using learning-based techniques. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, ۹۵(۲), ۶۰۱-۶۲۷.
- [۱۰] Kaputa, D. S., & Owens, K. J. (۲۰۲۰). Quadrotor Drone System Identification via Model-Based Design and In-Flight Sine Wave Injections. In *AIAA Scitech ۲۰۲۰ Forum* (p. ۱۲۳۸).
- [۱۱] Shao, X., Liu, N., Wang, Z., Zhang, W., & Yang, W. (۲۰۲۰). Neuroadaptive integral robust control of visual quadrotor for tracking a moving object. *Mechanical Systems and Signal Processing*, ۱۳۶, ۱۰۶۵۱۳.
- [۱۲] Wang, T., Umemoto, K., Endo, T., & Matsuno, F. (۲۰۱۹). Dynamic hybrid position/force control for the quadrotor with a multi-degree-of-freedom manipulator. *Artificial Life and Robotics*, ۱-۱۲.
- [۱۳] Badr, S., Mehrez, O., & Kabeel, A. E. (۲۰۱۹). A design modification for a quadrotor UAV: modeling, control and implementation. *Advanced Robotics*, ۳۳(۱), ۱۳-۳۲.
- [۱۴] دمیرچی، علی، ۱۳۹۸، طراحی کنترل کننده کوادروتور با استفاده از مدل سازی LPV بر پایه تحلیل مولفه های اصلی بدست آمده از شبکه های عصبی، پایان نامه کارشناسی رشته کنترل، دانشگاه شاهد.
- [۱۵] کریمی، علی، ۱۳۹۷، طراحی کنترل متحمل عیب فعال پرنده چهار ملخ با استفاده از کنترلر فازی، پایان نامه کارشناسی ارشد پرواز و کنترل، دانشگاه تربیت مدرس.
- [۱۶] مرآتی، مجید، ۱۳۹۶، طراحی و کنترل ربات پرنده جهت بازرسی خطوط فشار قوی به وسیله پردازش تصویر، پایان نامه کارشناسی ارشد مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[۲۰] Kumar, B. S., Vijayan, V., & Davim, J. P. (۲۰۱۹). Machine Vision in Measurement. In *Measurement in Machining and Tribology* (pp. ۱۱۳-۱۲۳). Springer, Cham.

[۲۱] Wu, H., & Prasad, S. (۲۰۱۸). Semi-Supervised Deep Learning Using Pseudo Labels for Hyperspectral Image Classification. *IEEE Transactions on Image Processing*, 27(۳), ۱۲۵۹-۱۲۷۰.

[۲۲] گلی، محمد، ۱۳۹۶، طراحی و تنظیم پارامترهای کنترل کننده بهینه PID به کمک الگوریتم بهینه سازی PSO، دانشگاه آزاد

اسلامی واحد مرودشت، دانشکده فنی و مهندسی

[۲۳] گلی، محمد، ۱۳۹۶، طراحی و تنظیم پارامترهای کنترل کننده بهینه PID به کمک الگوریتم بهینه سازی PSO، دانشگاه

آزاد اسلامی واحد مرودشت، دانشکده فنی و مهندسی