



طراحی و پیاده‌سازی کنترل فازی دوربین رباتیک جهت ردگیری هدف

علی اصغر عرب^۱، محمد مهدی فاتح^{۲*} و سید محمد رضا یزدان پرست^۳

^۱ دانشجوی ارشد کنترل، دانشکده برق، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ استاد کنترل، دانشکده برق، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران

^۳ عضو گروه اپتیک مفتوح، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۰۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۱۰/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۱/۱۷

چکیده

این مقاله به طراحی و پیاده‌سازی کنترل فازی دوربین رباتیک برای ردگیری هدف می‌پردازد. دوربین رباتیک که از بازوی رباتیک و دوربین تشکیل شده‌است هدف متحرک را در مرکز فریم تصویر قرار می‌دهد. طرح کنترل‌کننده پیشنهادی از راهبرد کنترل ولتاژ استفاده می‌نماید و خطای ردگیری فضای کار را توسط سیستم‌های فازی به خطای ردگیری فضای مفصلی تبدیل می‌نماید. این طرح کنترلی که برای نخستین بار در عمل اجرا شده‌است مستقل از مدل دینامیکی ربات بوده و نسبت به عدم قطعیت‌های اطلاعات تصویر نیز مقاوم است. روش کنترل پیشنهادی ساده‌تر و کم محاسبه‌تر از روش مرسوم کنترل ربات است که مبتنی بر راهبرد کنترل گشتاور است. همچنین جهت ردگیری جسم در فریم تصویر، از ترکیب الگوریتم ردگیری مرکز و الگوریتم ردگیری حساب استفاده می‌شود. نتایج تجربی روی دوربین رباتیک دو-رابط مجهز به موتورهای جریان مستقیم مغناطیس دائم نشان می‌دهد که کنترل پیشنهادی در مقایسه با کنترل تناسی-مشتقی عملکرد بهتری دارد.

کلمات کلیدی: دوربین رباتیک؛ کنترل فازی؛ ردگیری هدف؛ راهبرد کنترل ولتاژ.

Design and implement of fuzzy control of a robotic camera for target tracking

A.A. Arab¹, M.M. Fateh^{2,*} and S.M.R. Yazdanparast

¹ M.Sc., Control Eng., Shahrood University, Shahrood, Iran

² Prof., Control Eng., Shahrood University, Shahrood, Iran

³ Mofateh Optic Group, Tehran, Iran

Abstract

This paper presents the design and implementation of fuzzy control for a robotic camera in tracking an object. The robotic camera which consists of a robotic arm and a camera, locates the moving object on the center of the image frame. The proposed controller uses the voltage control strategy and transforms the task-space tracking error to the joint-space tracking error using fuzzy systems. This control approach which has been implemented for the first time, is free from the dynamical model of the arm and is robust against image uncertainties. Compared with the conventional control of robot that is based on the torque control strategy, it is simpler and computationally more efficient. In addition, it employs the blob tracking algorithm and centroid tracking algorithm for tracking the object in image frame. The experimental results are provided by a two-link robotic camera driven by permanent magnet dc motors. They show that the proposed control approach is superior to the proportional-derivative control.

Keywords: Camera robot; fuzzy control; target tracking; voltage control strategy.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۳۳۹۳۱۱۶-۲۷۳؛ فکس: ۳۳۹۳۱۱۶-۲۷۳

آدرس پست الکترونیک: mmfateh@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

استفاده از سیستم بینایی در دو دهه اخیر به صورت چشم‌گیری توسعه یافته است. سیستم امنیتی [۱]، کنترل ترافیک [۲]، ناوبری [۳]، خط تولید صنعتی [۴] و رباتیک [۵] را می‌توان به عنوان کاربرد بینایی ماشین نام برد. کنترل حلقه بسته با به‌کارگیری دوربین را کنترل بینا^۱ می‌نامند [۶-۸]. در کنترل بینا دو مسئله بینایی ماشین و کنترل به صورت همزمان باید بررسی شوند. کنترل بینا در سه دهه اخیر از جابجایی ساده جسم از یک نقطه به نقطه دیگر آغاز و تا ردگیری پیشرفت نموده‌است. بطور کلی می‌توان کنترل‌کننده‌های بینا در رباتیک را بر اساس نوع قرارگیری دوربین به سه دسته تقسیم نمود [۹]. دوربین به ربات متصل باشد، جدا از ربات بوده و ترکیبی از این دو باشد. در این خصوص مقالات ارزشمندی ارائه شده‌است. کنترل‌کننده‌های بینا برای ربات شش درجه آزادی در تعقیب مسیر ناشناخته سه بعدی با سرعت بالا ارائه شده‌است که در آن دوربین به ربات متصل می‌باشد [۱۰].

روش مرسوم کنترل ربات مبتنی بر راهبرد کنترل گشتاور است. در عمل، فرمان گشتاور نمی‌تواند بطور مستقیم به عنوان ورودی ربات اعمال گردد و در اجرا نیازمند وجود محرکه‌ها است. ضعف راهبرد کنترل گشتاور این است که از دینامیک موتورها در اجرای فرمان صرف‌نظر می‌نماید. بعلاوه، راهبرد کنترل گشتاور به خاطر دینامیک ربات، پیچیده می‌شود. از این رو، راهبرد کنترل ولتاژ برای کنترل بازوی ربات پیشنهاد شده‌است [۱۱]. طراحی کنترل‌کننده مستقل از معادلات پیچیده ربات است و ربات به عنوان بار موتور عمل می‌کند. در این راهبرد، ولتاژ موتورها به عنوان ورودی کنترلی سیستم رباتیک عمل می‌نماید درحالی‌که در راهبرد مرسوم کنترل گشتاور، گشتاور مفاصل به عنوان ورودی کنترلی سیستم در نظر گرفته شده‌است. از جمله طرح‌های کنترلی با راهبرد کنترل ولتاژ می‌توان در مورد ربات‌های سفت به کنترل بر مبنای مدل موتور [۱۱]، کنترل مقاوم در فضای کار [۱۲] و کنترل فازی مقاوم [۱۳] و در مورد ربات‌های انعطاف‌پذیر به کنترل مقاوم [۱۴]، کنترل تطبیقی [۱۵] و کنترل فازی نوع ۲ [۱۶] اشاره کرد.

این مقاله به طراحی و پیاده‌سازی کنترل فازی دوربین رباتیک با به‌کارگیری راهبرد ولتاژ می‌پردازد. خطای ردگیری فضای کار را توسط سیستم فازی به خطای ردگیری فضای مفصلی تبدیل می‌نماید. این ربات فیلم‌بردار از بازوی رباتیک دو درجه آزادی و دوربین تشکیل شده‌است و دوربین به انتهای رابط دوم متصل است. در این کاربرد، پس از آشکار شدن هدف در تصویر، همواره هدف را در مرکز تصویر نگه می‌دارد. قسمت بینایی ماشین این سیستم با ردگیری هدف در هر لحظه اطلاعات لازم را به کنترل‌کننده ربات ارسال می‌نماید. این اطلاعات شامل انحراف هدف از مرکز تصویر در راستای افقی و عمودی تصویر می‌باشد. سپس، کنترل‌کننده فازی پیشنهادی با غلبه بر عدم قطعیت به ردگیری جسم متحرک و قرار دادن آن در مرکز تصویر می‌پردازد.

در اینجا دو مسئله مطرح می‌شود: اول، مسئله ردگیری هدف در تصویر است که در الگوریتم‌های ردگیری ابتدا هدف معرفی می‌شود و در ادامه به ردگیری هدف در محدوده رؤیت به وسیله ایجاد تمایز بین هدف و زمینه و مشخص کردن موقعیت آن در رشته تصاویر می‌پردازد [۱۷]. در بیشتر سیستم‌های ردیاب، پردازش ردیابی در داخل دریچه‌ای انجام می‌شود که روی هدف قرار می‌گیرد [۱۸]. ردگیری اجسام در تصاویر ویدئویی با زمینه شلوغ و پس زمینه متحرک هنوز از مسائل مطرح در زمینه پردازش تصویر می‌باشد. دوم، مسئله کنترل ربات جهت قرار دادن هدف در مرکز تصویر است. مسئله کنترل ربات با عدم قطعیت مواجه بوده و مقالات ارزشمندی در این زمینه ارائه شده‌است. برای نمونه می‌توان کنترل مقاوم ربات [۱۹، ۲۰]، کنترل تطبیقی ربات [۲۱] و کنترل ربات به کمک شبکه‌های عصبی [۲۲] و منطق فازی [۲۳] را نام برد.

در این مقاله ابتدا مدل فضای حالت ربات با وجود موتورهای جریان مستقیم ارائه شده‌است. سپس، کنترل‌کننده فازی طراحی و پیاده‌سازی می‌شود. مزیت کنترل پیشنهادی آن است که مستقل از مدل ربات است. کارایی الگوریتم ردگیری پیشنهادی با ترکیب الگوریتم ردگیری مرکز^۲ و الگوریتم ردگیری حساب^۳ بهبود یافته است. به علاوه نتایج

^۲ Centroid tracking algorithm^۳ Blob tracking algorithm^۱ Visual servoing

R_a ماتریس قطری شامل مقاومت آرمیچرها، L_a ماتریس ضریب القایی موتورها، k_b ماتریس ضریب برگشتی موتور، بردار جریان موتورها و U بردار ولتاژ موتورها می‌باشد. گشتاور اعمالی به موتورها با جریان موتورها توسط ماتریس k_m رابطه مستقیم دارند. با فرض انتقال کامل گشتاور از موتورها به بازوی ربات می‌توان نوشت:

$$\tau_m = k_m I \quad (5)$$

در نتیجه مدل فضای حالت ربات به کمک معادلات (۱)- (۵) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

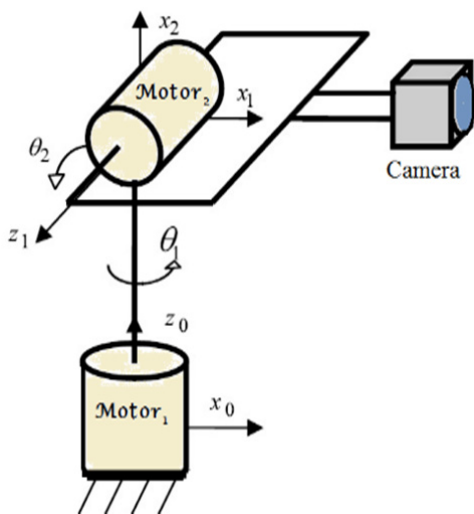
$$\dot{z} = f(z) + bU \quad (6)$$

که U ورودی سیستم و z بردار متغیرهای حالت و $f(z)$ به صورت زیر می‌باشد:

$$f(z) = \begin{bmatrix} z_2 \\ (Jr^{-1} + rM(z_1))^{-1} \cdot \left((Br^{-1} + rC(z_1, z_2))z_2 + (K_m z_3 - r(G(z_1) + \tau_r)) \right) \\ -L_a^{-1} (K_b r^{-1} z_2 + R_a z_3) \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_a^{-1} \end{bmatrix}, \quad z = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ I \end{bmatrix} \quad (7)$$

معادله (۷) نشان می‌دهد که مدل ربات غیرخطی، پیچیده و دارای تزیوج می‌باشد.



شکل ۱- ربات دو درجه آزادی و نحوه اتصال دوربین

نشان می‌دهد که کنترل‌کننده فازی به خوبی بر عدم قطعیت‌ها غلبه می‌نماید.

در ادامه، مقاله بصورت زیر به ارائه مطالب می‌پردازد. بخش دوم، به مدل‌سازی ربات در فضای حالت با در نظر گرفتن محرکه‌های ربات می‌پردازد. بخش سوم، الگوریتم ردگیری هدف در تصویر را تشریح می‌نماید. بخش چهارم، کنترل فازی جهت تنظیم موقعیت هدف در مرکز تصویر را طراحی می‌نماید. بخش پنجم، نتایج را بررسی می‌کند. در پایان، بخش ششم نتیجه‌گیری می‌نماید.

۲- مدل‌سازی

بازوی رباتیک دو درجه آزادی شکل ۱ از ربات‌های پرکاربرد در سیستم‌های ردگیری است. زیرا دوربین متصل به ربات قادر است تمام فضا را جهت ردگیری اجسام پوشش دهد. این ربات از دو رابط اول ربات پر کاربرد هنرمند^۳ تشکیل می‌شود. در این بخش مدل ربات در فضای حالت با در نظر گرفتن دینامیک محرکه‌ها ارائه شده‌است. مدل دینامیکی بازوی ربات [۲۴] به صورت زیر است:

$$D(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) + \tau_r = \tau_r \quad (1)$$

در اینجا θ بردارهای $n \times 1$ متغیرهای مفاصل، $D(\theta)$ ماتریس $n \times n$ اینرسی که متقارن مثبت است، $C(\theta, \dot{\theta})$ ماتریس $n \times n$ گشتاور جانب مرکز و کریولیس، $G(\theta)$ بردار $n \times 1$ گشتاور ثقلی و τ_r بردار $n \times 1$ گشتاور ربات است که $n = 2$ برابر با تعداد مفاصل ربات است. مدل الکتریکی موتور که در شکل ۲ نمایش داده شده‌است گشتاور ربات را با رابطه زیر تأمین می‌سازد:

$$Jr^{-1}\ddot{\theta} + Br^{-1}\dot{\theta} + r\tau_r = \tau_m \quad (2)$$

که τ_m بردار $n \times 1$ گشتاور ورودی موتور و J ، B و r ماتریس $n \times n$ موتور به ترتیب به نام ماتریس اینرسی، ضریب اصطکاک و نسبت تبدیل کاهنده چرخ‌دنده می‌باشند. بردار متغیرهای مفصلی ربات θ با بردار زوایای محور موتورها توسط ماتریس نسبت تبدیل کاهنده به صورت زیر در ارتباط می‌باشد.

$$\theta = r\theta_m \quad (3)$$

با توجه به اینکه ولتاژ موتورها تنها ورودی‌های سیستم می‌باشند، مدل پیشنهادی موتورها به صورت زیر می‌باشد:

$$U = R_a I + L_a \dot{I} + k_b \dot{\theta}_m \quad (4)$$

یعنی ردگیری جریان نوری^۱ نیز نتوانست به بهترین جواب برسد. در نهایت با استفاده از الگوریتم ترکیبی زیر شناسایی و ردگیری انجام شده است.

الف- دریافت تصویر و حذف ۵ درصد تصویر از اطراف و حذف ۱۰ درصد تصویر از بالا و پایین برای حذف نویزهای اضافی.
ب- انجام فیلترهای ترکیبی جهت حذف نویزهای ریز موجود در تصویر.

ج- افزایش سلول‌های تصویر (Pixels) با شکل پایه صلیبی (به دو دلیل، بزرگ‌نمایی جسم کوچک نورانی در مرکز و بزرگ‌نمایی نویزهای پس زمینه و به هم چسبیده شدن آن‌ها و تولید یک جسم خیلی بزرگ از نویزها و پیوسته شدن آن‌ها)

د- انجام فرسایش جهت کاهش نسبی بزرگ‌نمایی‌های مرحله قبلی

ه- ردگیری حباب و مشخص کردن حباب‌های تصویر با فیلتر مشخص اندازه

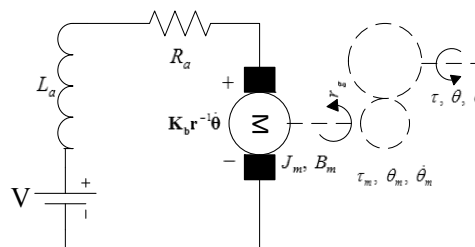
و- انتخاب بزرگ‌ترین و نزدیک‌ترین حباب به مرکز تصویر به عنوان هدف اولیه

ز- ردگیری جسم در فریم‌های بعدی با الگوریتم زیر:

- انجام مراحل الف تا و
- مرتب کردن تمامی اجسام صفحه بر حسب ارتفاع
- مقایسه اجسام صفحه از بالا تا پایین با جسم انتخاب شده در فریم قبلی
- انتخاب اولین فریم که تغییر اندازه و مکانی کمتر از حد آستانه نسبت به فریم قبلی داشته است به عنوان جسم مورد نظر در فریم فعلی
- ح- تولید خطای ردگیری جهت ارسال به کنترل کننده فازی

۴- کنترل کننده فازی ولتاژ در فضای کار

در عمل باید ولتاژ موتورها کنترل شود تا ربات به زاویه مطلوب برسد. ولی مشکلی که با آن روبرو هستیم وجود عدم قطعیت در تبدیل خطای ردگیری در تصویر به خطای زاویه مفصل ربات می‌باشد. برای این منظور، سینماتیک ربات و رابطه تبدیل هر سلول تصویر به زاویه ربات را نیاز داریم. کنترل کننده فازی طراحی شده در این قسمت این تبدیل را



شکل ۲- مدار معادل موتور جریان مستقیم مغناطیس دائم

۳- ردگیری هدف در تصویر

الگوریتم‌های ردگیری به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند. الگوریتم‌هایی که به صورت منطقه‌ای کار می‌کنند و الگوریتم‌هایی که از ویژگی‌ها استفاده می‌نمایند [۲۶ و ۲۵]. الگوریتم‌هایی که از ویژگی‌ها استفاده می‌نمایند دارای مزیت‌هایی مانند چند هدفی و وابستگی کمتر به تغییرات هستند. این الگوریتم معمولاً نویز پذیرتر بوده ولی هدف را کمتر از دست می‌دهند. الگوریتم‌هایی که به صورت منطقه‌ای کار می‌کنند، محدوده تصویری هدف را محیط کرده و احتمال تشخیص جسم مشابه را کاهش می‌دهد. همچنین نویز پذیری کمتری داشته ولی در عوض امکان از دست دادن هدف از معایب آن است [۲۷].

هدف این مقاله ردگیری جسم دوربین رباتیک است. به دلیل حرکت دوربین از روش‌های معمول برای حذف پس زمینه نمی‌توان استفاده نمود. زیرا حرکت دوربین و جسم موجب اختلال الگوریتم‌های موجود برای حذف پس زمینه می‌شود. هم چنین، سرعت پردازش باید بالا باشد تا در پیوستگی کار ربات مشکل ایجاد نکند. الگوریتم مورد استفاده در این مقاله ترکیبی از دو روش فوق است. بعلاوه، از روش ردگیری حباب [۲۸] جهت تشخیص جسم در تصویر نیز استفاده شده است. این روش به دلیل بکار نرفتن اطلاعات مشتق از سرعت بالایی در یافتن لکه‌های حباب در تصویر برخوردار است. الگوریتم ردگیری در شکل ۳ آمده است.

به علت حرکت دوربین از روش‌های معمول برای حذف پس زمینه نمی‌توان استفاده نمود، چون حرکت دوربین و جسم تمامی الگوریتم‌های موجود برای حذف پس زمینه را مختل می‌نماید. راه‌حل‌های متفاوتی اعمال و مهمترین آن‌ها

^۱ Optical flow

زوایای ربات را می‌توان به صورت تابعی از موقعیت مجری نهایی نوشت:

$$\theta = T(x) \quad (۹)$$

خطای ردگیری e_x برابر با اختلاف مرکز تصویر x با مرکز هدف x_d است.

$$e_x = x_d - x \quad (۱۰)$$

مرکز هدف x_d برابر با صفر است. پس، خطای ردگیری $e_x = -x$ می‌باشد.

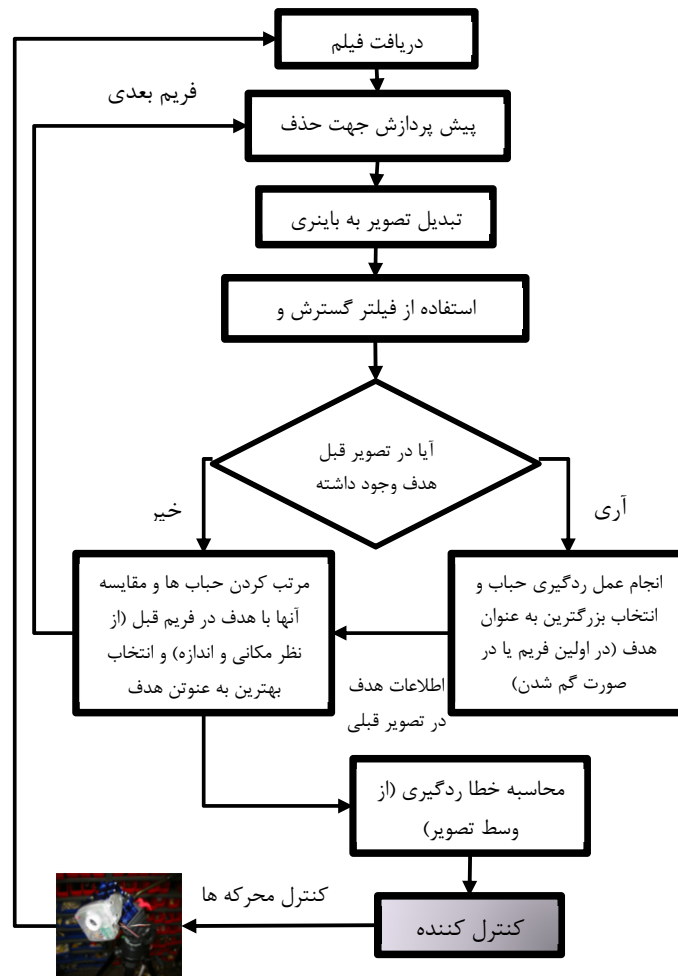
با تعریف خطای زاویه e_θ

$$e_\theta = \theta_d - \theta \quad (۱۱)$$

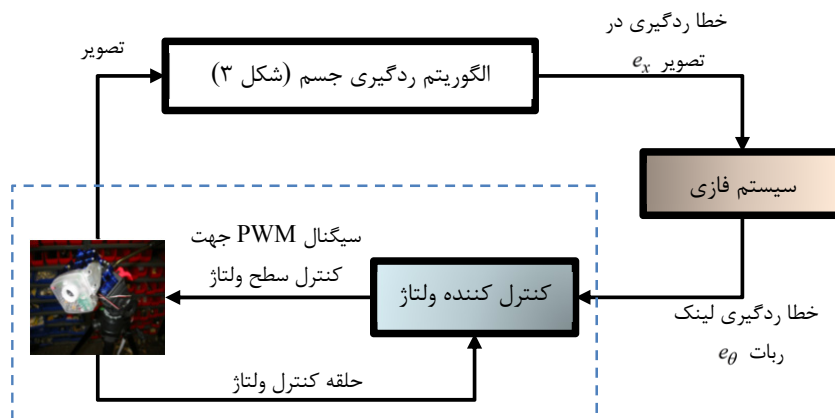
انجام می‌دهد. سپس خروجی کنترل‌کننده فازی توسط کنترل‌کننده ولتاژ موتورها به صورت مدولاسیون پهنای پالس به موتورها اعمال می‌گردد. کنترل‌کننده ولتاژ از راهبرد کنترل ولتاژ بر مبنای مدل موتور استفاده نموده‌است [۱۱]. این راهبرد مستقل از مدل ربات می‌باشد و کنترل موتور به نحوی صورت می‌گیرد که گشتاورهای ناشی از دینامیک ربات تاثیری بر عملکرد کنترل‌کننده نگذارد. دیاگرام کنترل در شکل ۴ آمده است.

قانون کنترل ولتاژ به صورت زیر پیشنهاد می‌گردد.

$$U = R_a I + k_b (\dot{\theta}_d + K_p (\theta_d - \theta)) \quad (۸)$$



شکل ۳- الگوریتم ردگیری

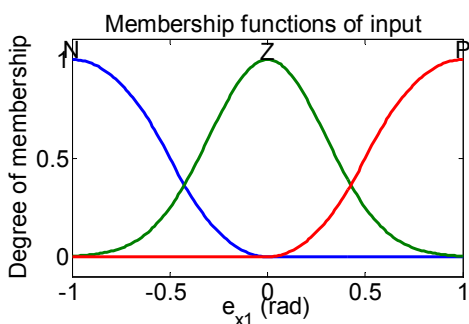


شکل ۴- سیستم کنترل

ردگیری فضای کار توسط سیستم فازی به خطای ردگیری فضای مفصلی تبدیل می‌شود. توابع عضویت ورودی سیستم فازی در شکل ۵ نشان داده شده‌است. هر ورودی و خروجی دارای سه تابع تعلق N, Z, P می‌باشد و سیستم فازی برای هر مفصل ربات دارای سه قانون می‌باشد. برای سیستم فازی ۱، e_{x1} ورودی و $e_{\theta1}$ خروجی است. همچنین برای سیستم فازی ۲، e_{x2} ورودی و $e_{\theta2}$ خروجی است. با بکارگیری قانون کنترل (۸) و رابطه (۱۱)، کنترل کننده موتور ۱ و موتور ۲ بصورت زیر در می‌آیند:

$$U_1 = R_{a1}I_1 + k_{b1}(\dot{\theta}_{d1} + K_{p1}e_{\theta_1}) \quad (18)$$

$$U_2 = R_{a2}I_2 + k_{b2}(\dot{\theta}_{d2} + K_{p2}e_{\theta_2}) \quad (19)$$



شکل ۵- توابع عضویت ورودی

توابع تعلق خروجی را به صورت گوسین در نظر می‌گیریم که به صورت زیر است.

که در آن

$$\theta_d = T(x_d) \quad (12)$$

بنابراین،

$$e_\theta = T(x_d) - T(x) \quad (13)$$

سری تیلور $T(x)$ را در $x = x_d$ بسط می‌دهیم،

$$T(x) = T(x_d) + \frac{\partial T}{\partial x} e_x + T_{h.o.t} \quad (14)$$

که $T_{h.o.t}$ ترم‌های با مرتبه بالاتر است. جایگذاری (۱۴) در (۱۳) می‌دهد

$$e_\theta = \frac{\partial T}{\partial x} e_x + T_{h.o.t} \quad (15)$$

با توجه به اینکه ربات دو مفصل دارد می‌توان رابطه (۱۵)

را بصورت زیر بازنویسی نمود

$$e_{\theta_1} = h_1(e_{x_1}) + \eta_1 \quad (16)$$

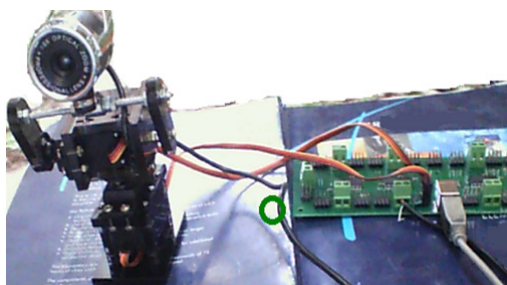
$$e_{\theta_2} = h_2(e_{x_2}) + \eta_2 \quad (17)$$

نوشتن معادلات (۱۶) و (۱۷) به این منظور است که

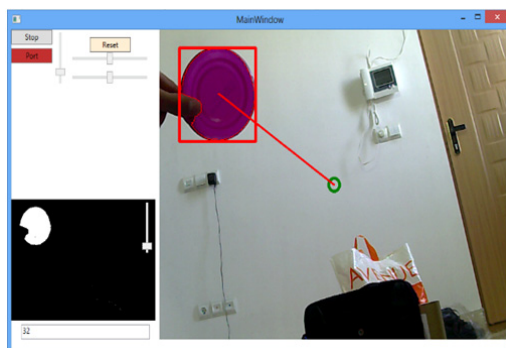
بتوان به طراحی کنترل کننده ساده برای هر مفصل موسوم به کنترل مجزا پرداخت. در این معادلات η_1 و η_2 عدم قطعیت هستند. $h_1(e_{x_1})$ و $h_2(e_{x_2})$ به ترتیب توابعی از e_{x_1} و e_{x_2} هستند. بعلاوه، می‌توان گفت که e_{θ_1} تابعی از e_{x_1} و e_{θ_2} تابعی از e_{x_2} است ولی با عدم قطعیت مواجه هستند. این عدم قطعیت شامل دینامیک‌های مدل نشده بوده که بصورت مجتمع در عدم قطعیت η_1 و η_2 آمده‌اند.

e_{θ_1} و e_{θ_2} توابع نامعلومی هستند. پس برای تخمین آن‌ها، سیستم فازی پیشنهاد می‌گردد. در واقع، خطای

۷. نرم‌افزار جسم نمونه را تشخیص داده‌است و خط واصل بین مرکز تصویر و مرکز هدف را رسم نموده‌است. پارامترهای استفاده شده در قانون کنترل (۱۸) و (۱۹) در جدول ۱ ارائه شده‌است. مرکز توابع تعلق کنترل‌کننده فازی اول $\hat{y}_1 = [-0.4 \ 0 \ 0.4]^T$ و کنترل‌کننده فازی دوم $\hat{y}_2 = [-0.5 \ 0 \ 0.5]^T$ انتخاب شده‌است. خطای ردگیری جسم نمونه توسط کنترل پیشنهادی در شکل ۸ نشان داده شده‌است. نتایج در فایل متنی ذخیره شده و سپس توسط نرم‌افزار متلب رسم شده‌است. ردگیری جسم نمونه به خوبی انجام گرفته که تأخیر زمانی آن حدود 30ms می‌باشد. فراجش‌هایی که در شکل دیده می‌شود نشانگر تغییر موقعیت ناگهانی هدف در تصویر می‌باشد. این تغییر موقعیت در ابتدا نسبت به دینامیک سیستم سریع تر می‌باشد ولی مشاهده می‌شود که بزرگ شدن خطا باعث می‌شود کنترل‌کننده سریعاً ربات را به سمت هدف حرکت دهد تا خطای ردگیری به مقدار کمی میل کند. پاسخ زمانی در حالت ردگیری جسم



شکل ۶- ربات و مدار درایو



شکل ۷- ردگیری جسم نمونه و محاسبه خطا توسط نرم‌افزار

(۲۰) $\mu_{C_i}(e_{xi}) = \exp\left(-\left(\frac{(e_{xi} - \hat{y}_i)^2}{2\sigma^2}\right)\right)$ که در آن \hat{y}_i مرکز C_i است. با در نظر گرفتن موتور استنتاج ضرب ممدانی، فازی ساز منفرد و غیر فازی ساز میانگین مراکز، سیستم فازی به صورت زیر محاسبه می‌شود: [۲۹]:

$$e_{\theta_i} = \sum_{l=1}^3 \hat{y}_l \psi_l(e_{xi}) = \hat{y}^T \Psi \quad (21)$$

که $\hat{y} = [\hat{y}_1 \ \dots \ \hat{y}_3]^T$ و $\Psi = [\psi_1 \ \dots \ \psi_3]^T$ است. از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

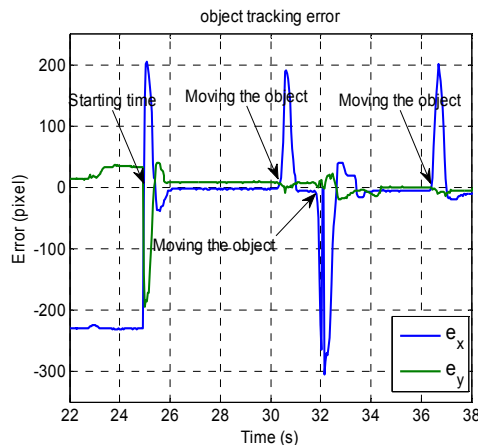
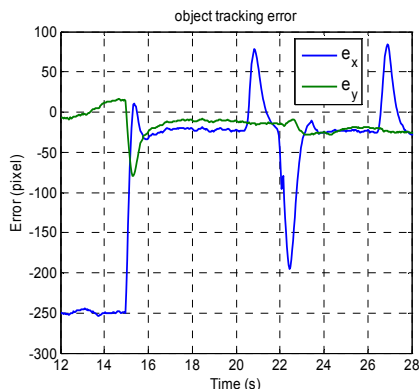
$$\psi_l(e_{xi}) = \frac{\mu_{A_l}(e_{xi})}{\sum_{l=1}^3 \mu_{A_l}(e_{xi})} \quad (22)$$

که در آن $\mu_{A_l}, \mu_{C_l} \in [0,1]$ است و با توجه به همین شرط می‌توان به این نتیجه رسید که $|\psi_l(e_{xi})| \leq 1$ است. بنابراین Ψ محدود است. پارامترهای \hat{y} به صورت تجربی با روش سعی و خطا برای دستیابی به نتیجه رضایت‌بخش به دست آمده‌اند. با توجه به محدود بودن Ψ و \hat{y} ، خطای زاویه e_{θ_i} در (۲۱) محدود است.

۵- نتایج عملی

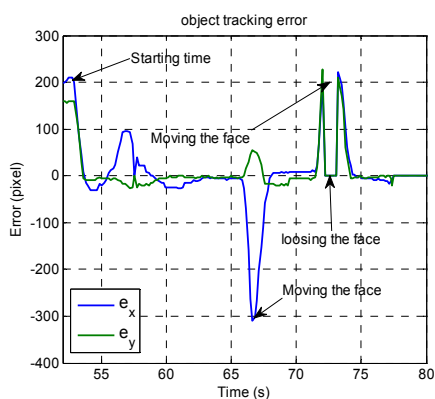
قوانین کنترل پیشنهادی در یک نرم‌افزار پیاده‌سازی شده- است. این نرم‌افزار در محیط Visual Studio 2010، C# طراحی شده‌است. همچنین از کتابخانه‌های Emgu-CV و AForge در پردازش تصویر استفاده شده‌است. نتایج عملی این روش بر روی ربات دو درجه آزادی شکل ۶ که ساخته‌ایم جهت ردگیری یک جسم نمونه در تصویر و ردگیری صورت به صورت بدست آمده است. اتصالات ربات در نرم‌افزار Catia طراحی شده‌است و به کمک CNC ساخته شده‌است. ربات- های ربات از جنس پلکسی می‌باشد. همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود پایه دوربین به یک شفت بلند در انتهای رابط دوم توسط پیچ و مهره سفت شده‌است. دو موتور جریان مستقیم در ربات استفاده شده‌است و قانون کنترل با روش مدولاسیون پهنای پالس به آن‌ها اعمال می‌گردد. مدار واسط ارتباط مدار درایو مدولاسیون پهنای پالس با کامپیوتر به درگاه یو-اس-بی متصل می‌گردد. از مدار درایو SD84 و موتورهای SG-5010 در این ربات استفاده شده‌است. در شکل

عملکرد سیستم کنترل پیشنهادی در ردگیری هدف مشاهده و ارزیابی گردید و عملکرد آن با کنترل کننده تناسبی



شکل ۸- ردگیری جسم نمونه توسط کنترل پیشنهادی

شکل ۹- ردگیری جسم نمونه با کنترل تناسبی-مشتقی



شکل ۱۰- ردگیری چهره توسط کنترل پیشنهادی

جدول ۱- پارامترهای انتخابی در قانون کنترل

R_{a2}	k_{b2}	K_{p2}	R_{a1}	k_{b1}	K_{p1}
۰/۱	۱	۰/۳	۰/۱	۱	۰/۵

در شکل ۸ کمتر از یک ثانیه می‌باشد و اندازه خطا در این زمان به مقداری کم تر از پنج پیکسل همگرا می‌شود. پنج پیکسل در این تصویر مقدار ناچیزی بشمار می‌آید.

در شکل ۹ ردگیری جسم نمونه توسط کنترل کننده تناسبی-مشتقی در بازه زمانی مشابه نشان داده شده‌است. پاسخ زمانی این کنترل کننده در حدود ۲ ثانیه و خطای ردگیری در حدود ۲۰ پیکسل می‌باشد که عملکرد ضعیف تری نسبت به کنترل کننده پیشنهادی این مقاله دارد. مشاهده می‌شود که عملکرد کنترل کننده پیشنهادی در سرعت پاسخ زمانی و خطای حالت ماندگار بهتر از کنترل کننده تناسبی-مشتقی سنتی می‌باشد. در کنترل کننده پیشنهادی عدم قطعیت‌ها به وسیله کنترل کننده فازی جبران شده و کنترل کننده ولتاژ نیز مستقل از مدل ربات می‌باشد و مدل ربات توسط جریان پسخورد جبران می‌شود.

در حالت ردگیری چهره در شکل ۱۰ پاسخ زمانی کنترل کننده پیشنهادی بیشتر از سه ثانیه است که دلیل آن تأخیر موجود در سیستم می‌باشد. خطای ردگیری در این حالت مشابه حالت ردگیری جسم در حدود ۵ پیکسل می‌باشد.

مشتقی مقایسه گردید که در آن ضرایب کنترل کننده تناسبی-مشتقی با روش سعی و خطا برای عملکرد مناسب انتخاب شده‌است. پاسخ زمانی کنترل کننده فازی در ردگیری جسم در شکل ۸ حدود نیم ثانیه می‌باشد و اندازه خطا در این زمان به مقدار کمتر از پنج پیکسل همگرا شده‌است. پاسخ زمانی کنترل کننده تناسبی-مشتقی در شکل ۹ در حدود ۲ ثانیه و خطای ردگیری در حدود ۲۰ پیکسل است که عملکرد ضعیف تری نسبت به کنترل کننده فازی دارد. نتایج آزمایشگاهی، کارایی کنترل کننده پیشنهادی را در ردگیری جسم و چهره نشان داده‌است.

- [10] Ganglo JA, Mathelin MF (1999) Visual servoing of a 6 DOF manipulator for unknown 3D profile following. *IEEE transaction on robotics and automation* 18(4): 511–520.
- [11] Fateh MM (2008) On the voltage-based control of robot manipulators. *Int. J. Control. Autom. Syst.* 6(5): 702–712.
- [12] Fateh MM (2010) Robust voltage control of electrical manipulators in task-space, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control* 6(6): 2691–2700.
- [13] Fateh MM (2010) Robust fuzzy control of electrical manipulators. *Journal of Intelligent Robotic Systems* 60(3-4): 415–434.
- [14] Fateh MM (2012) Robust control of flexible-joint robots using voltage control strategy. *Nonlinear Dyn* 67(2): 1525–1537.
- [15] Fateh MM (2012) Nonlinear control of electrical flexible joint robots. *Nonlinear Dyn* 67(4): 2549–2559.
- [16] Moradi Zirkohi M, Fateh MM, Aliyari Shoorehdeli M (2013) Type-2 fuzzy control of a flexible-joint robot using voltage control strategy. *International Journal of Automation and Computing* 10(3): 242–255.
- [17] Moallem P Memarmoghaddam A, Ashourian M (2007) Robust and Fast Tracking Algorithm in video Sequences by Adaptive Window Sizing Using a Novel Analysis on Spatiotemporal Gradient Powers. *Int J Circuit Sys Computers* 16(2): 305–317.
- [18] Wolfe W, Zissis G (1985) *The Infrared Handbook*. SPIE Press.
- [19] Torres S, Mendez JA, Acosta L, Becerra VM (2007) On improving the performance in robust controllers for robot manipulators with parametric disturbances. *Control Engineering Practice* 15(5): 557–566.
- [20] Spong MW (1992) On the robust control of robot manipulators. *IEEE Trans. Automatic Control* 37(11): 1782–1786.
- [21] Chiu CS, Lian KY, Wu TC (2004) Robust adaptive motion/force tracking control design or uncertain constrained robot manipulator. *Automatica* 40(12): 2111–2119.
- [22] Tang Y, Sun F, Sun Z (2006) Neural network control of flexible-link manipulators using sliding mode. *Neurocomputing* 70(1): 288–295.
- [23] Purwar S, Kar IN, Jha AN (2005) Adaptive control of robot manipulators using fuzzy logic systems under actuator constraints. *Fuzzy Sets and Systems* 152(3): 651–664.
- [24] Spong MW, Hutchinson S, Vidyasagar M (2006) *Robot modelling and control*. New York, John Wiley & Sons.
- [25] Wang D (1998) Unsupervised video segmentation based on water-sheds and temporal tracking. *Trans. Circuit Sys. Video Technol* 8(5): 539–546.

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله به طراحی و پیاده‌سازی کنترل دوربین رباتیک پرداخته‌است. طرح کنترل‌کننده پیشنهادی از راهبرد کنترل ولتاژ استفاده نموده‌است و خطای ردگیری فضای کار را توسط سیستم فازی به خطای ردگیری فضای مفصلی تبدیل نموده است. برای ردگیری هدف متحرک از ترکیب الگوریتم ردگیری مرکز و الگوریتم ردگیری حباب استفاده شده‌است. از مزایای روش کنترلی پیشنهادی نسبت به روش‌های گذشته این است که برای کنترل موقعیت در فضای کار، یک سیستم فازی ساده طراحی شده و خروجی آن توسط کنترل‌کننده ولتاژ به موتورها اعمال شده‌است. راهبرد کنترل ولتاژ این برتری را نسبت به راهبرد کنترل گشتاور دارد که معادلات پیچیده ربات در قانون کنترل ظاهر نمی‌شود و کنترل ربات از طریق کنترل موتورها انجام می‌شود.

مراجع

- [1] Abdul Kareem SA, Akmeliawati R, Muhida R (2011) design of a light tracking system using machine vision technique. 4th Int. Conf. on Mechatronics ICOM, Malaysia.
- [2] Betke M, Haritaoglu E, Davis SS (1996) Multiple vehicle detection and tracking in hard real-time. *Proc. Intelligent Vehicles Symposium*: 351–356.
- [3] DeSouza GN, Kak AC (2002) Vision for mobile robot navigation: a survey. *IEEE transaction on pattern analysis and machine intelligence*: 24(2): 237–264.
- [4] Shirai Y, Inoue H (1973) Guiding a robot by visual feedback in assembling tasks. *Pattern Recognition* 5: 99–108.
- [5] Bourquardez O, Mahony R, Guenard N, Chaumette F, Hamel T, Eck L (2009) Image-based visual servo control of the translation kinematics of a quadrotor aerial vehicle. *IEEE transaction on robotics* 25(3): 743–750.
- [6] Hashimoto K (1993) Visual servoing. *World Scientific* 7: 1–127.
- [7] Chaumette F, Hutchinson S (2006) Visual servo control, part I: Basic approaches *IEEE Robotics and Automation Magazine* 13(4): 82–90.
- [8] Chaumette F, Hutchinson S (2007) Visual servo control, Part II: Advanced approaches. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 14(1): 109–118.
- [9] Kragic D, Christensen HI (2002) Survey on visual servoing for manipulation. *Computational Vision and Active Perception Laboratory, Fiskartorpsv*, 15.

- [28] Lindeberg T (1993) Detecting salient blob-like image structures and their scales with a scale-space primal sketch: A method for focus-of-attention. *Int J Computer Vision* 11(3): 283–318.
- [29] Wang LX (1997) *A course in fuzzy systems and control*. Prentice-Hall International, Inc, Upper Saddle River, NJ, USA.
- [26] Wang Y, Van Dyck RE, Doherty JF (2000) Tracking moving objects in video sequences. In *Conference on Information Sciences and Systems* 2: 24–29.
- [27] Amidi O, Kanade T, Fujita K (1999) A visual odometer for autonomous helicopter flight. *Robotics and Autonomous Systems* 28(2): 185–193.