

طراحی بهینه کنترل کننده فازی تناسبی - انتگرالی - مشتقی برای یک ربات کابلی صفحه‌ای سه درجه آزادی بر پایه بهینه‌سازی دسته میگو

ادیب قنواتی

محمدجواد محمودآبادی*

مجتبی بیگ زاده عباسی

کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران،
ag68mech@gmail.com

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران،
mahmoodabadi@sirjantech.ac.ir

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران،
dialog2u@yahoo.de

چکیده

در این پژوهش، سینماتیک و دینامیک یک ربات کابلی صفحه‌ای سه درجه آزادی، به همراه کنترل مسیر آن مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. ابتدا، کششی بودن نیروی کابل‌ها با توجه به این نکته بررسی شده که ربات مورد نظر یک مکانیسم زنجیره‌ای سینماتیک بسته بوده و عملکرد از طریق چند کابل محرک به پایه متصل می‌شود. سپس، کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی-مشتقی و فازی تناسبی-انتگرالی-مشتقی برای کنترل ربات کابلی به ازای شرایط نهایی مطلوب متعدد و متفاوت بکار گرفته شده‌اند. توجه به این نکته ضروری است که یک قانون کنترلی مناسب برای ربات‌های کابلی نه تنها سبب تعقیب مسیر تعریف شده می‌شود، بلکه مثبت بودن نیروی کششی کابل‌ها را در تمامی حالت‌ها نیز باید تضمین نماید. برای تعیین ضرایب کنترل‌کننده‌ها، از الگوریتم دسته میگو، که یک الگوریتم بهینه‌سازی بر پایه جمعیت است، استفاده شده است. نتایج بدست آمده حاکی از موفقیت استراتژی پیشنهادی در هدایت ربات کابلی به اهداف مطلوب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: کابل کششی، ربات کابلی، کنترل کننده فازی تناسبی-انتگرالی-مشتقی، الگوریتم بهینه‌سازی دسته میگو.

Optimal Design of the Proportional-Integral-Derivative Fuzzy Controller for a Three Degree-of-Freedom Plane Cable Robot based on Krill Herd Optimization

A. Ghanavati

M. J. Mahmoodabadi

M. Beigzadeh Abbasi

Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

Abstract

In this study, the kinematics and dynamics of a plane direct-guided cable robot with three degree-of-freedom and the control of its direction have been studied and investigated. First, the tensile of the cables has been investigated regarding that the robot is a closed kinematic chain mechanism and the end-effector is adjoined to the base through several actuating cables. Afterwards, the Proportional-Integral-Derivative (PID) controller and the fuzzy PID controller have been applied on the cable robot for different and various final desired conditions. It is noticeable that a proper control rule for the cable robot not only causes the tracking of the desired trajectory, but also guarantees the positivity of the cable tension forces for all states. In order to determine the parameters of the controllers, the krill herd algorithm as a population-based optimization procedure is implemented. The obtained results indicate the successfulness of the proposed strategy to guide the cable robot to the desired objectives.

Keywords: Cable robot; Fuzzy proportional-integral-derivative controller; Krill herd optimization algorithm.

اولین ربات کابلی مستقیم هدایت شونده، ربات روبوکرین است که توسط شرکت NES برای استفاده در بندر کشتیرانی ساخته شد [۲]. این وسیله مشابه با پلنفرم استوارت [۳] می‌باشد که در آن شش کابل، جایگزین پایه‌های سیلندر هیدرولیکی شده است. تاکنون، روش‌های کنترل غیرخطی مختلفی مانند خطی‌سازی بازخورد [۴] و کنترل حالت لغزان [۵]، بر روی ربات‌های کابلی پیاده شده‌اند. مسأله دیگر در کنترل این‌گونه از ربات‌ها، موضوع نحوه کاهش ارتعاش ناشی از انعطاف کابل‌هاست که در مرجع [۶] بررسی شده‌است. زنجیره‌ی بسته سینماتیکی که در آن مجری نهایی توسط حداقل دو حلقه‌ی بسته حرکتی به پایه ثابت متصل می‌شود را ساختار موازی رباتیک می‌نامند [۷]. در یک ربات موازی با محرک کابل، کابل‌ها جایگزین بازوهای صلب در زنجیره سینماتیکی هستند. استفاده از یک ربات موازی کابلی با تعداد کابل‌های کمتر از تعداد درجات آزادی زمانی توجیه دارد که بنا به وظیفه‌ی ربات، کنترل تمام درجات آزادی در اولویت نبوده و عواملی نظیر کاهش هزینه، زمان برپایی، پیچیدگی و کاهش امکان تداخل کابل‌ها نیز در نظر گرفته شود. نیروی فشاری وارده به سیستم و کشش کابل‌ها بایستی شرایط تعادل را ارضا کنند.

۱- مقدمه

ربات‌های کابلی، نسل جدیدی از ربات‌های موازی هستند که اخیراً به طور گسترده مورد توجه دانشمندان علم رباتیک قرار گرفته‌اند. ربات‌های کابلی ظاهر ساده‌ای دارند که در آن یک صفحه^۱ یا یک مجری نهایی به تعدادی کابل متصل شده است [۱]. این ربات‌ها از لحاظ ساختاری بسیار ساده بوده و در آن‌ها از کابل به عنوان کارانداز استفاده شده و جابجایی و کنترل مجری نهایی به کمک آن‌ها صورت می‌گیرد. در این ربات‌ها، مجری نهایی توسط موتورهایی که طول کابل‌ها را تنظیم می‌کنند، کنترل می‌شوند. نام دیگر این ربات‌ها، ربات تاندونی^۲ یا ربات معلق کابلی^۳ است که در آن‌ها، با کشیدن یا شل کردن کابل‌ها توسط موتورها می‌توان وضعیت مجری نهایی را کنترل کرد. نکته بدیع در ربات‌های کابلی، استفاده از کابل‌ها به عنوان رابط‌های موازی و موتورها به عنوان محرک‌هاست.

^۱ Platform

^۲ Tendon-driven robot

^۳ Cable-suspended robot

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mahmoodabadi@sirjantech.ac.ir -

مشکل کار از آنجا شروع می‌شود که در اینگونه ربات‌ها، مجری نهایی به راحتی نوسان می‌کند و نیرو-ممان خارجی، مکان مجری نهایی را تغییر می‌دهد. پیشنهاد معیار پایداری می‌تواند ملاکی برای ارزشیابی توانایی ربات برای بازگشت به حالت تعادل اولیه‌اش تحت تأثیر اغتشاشات خارجی باشد [۸].

زارع بیدوکی و همکاران برای تنظیم سطوح در ربات‌های کابلی موازی در تحقیق خود یک کنترل‌کننده تطبیقی را برای ربات‌های کابلی معلق که جرم و ممان اینرسی آن‌ها نامقید است، پیشنهاد دادند [۹]. خسروی و تقی‌راد، تحلیل دینامیکی یک ربات کابلی مستقیم هدایت شونده را بررسی و یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی کاملاً مقید را بر روی ربات خود پیاده کردند. از آنجایی که در این دسته از ربات‌ها، کابل‌ها باید برای انجام همه مانورها در فضای کاری تحت کشش باقی بمانند. آن‌ها مفهوم نیروی اولیه را در الگوریتم کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی، پیشنهاد کردند [۱۰]. کراس و همکاران، از یک روش کنترل ترکیبی نیرو و موقعیت برای تنظیم حرکت و پایداری عملگر یک ربات کابلی الاستیک استفاده کردند. سپس، کارایی روش خود را به صورت آزمایشگاهی بر روی یک ربات واقعی به اثبات رساندند [۱۱]. بیانی و همکاران مطالعه‌ای بر روی پایداری‌سازی یک ربات کابلی صفحه‌ای سه درجه آزادی به روش‌های مختلف کنترلی جایدهی قطب، مود لغزشی و تطبیقی، به کمک پردازش تصویر انجام دادند [۱۲]. جباری اصل و جنبی شریفی از یک روش تطبیقی بر پایه‌ی شبکه‌های عصبی برای کنترل یک ربات موازی کابلی یک با ورودی اشباع استفاده کردند [۱۳]. کاتیلیار و همکاران از یک پایدار ساز مدل پیشگو برای کنترل زمان واقعی برای یک ربات کابلی استفاده کردند [۱۴]. افلاکیان و همکاران مطالعه‌ای تجربی بر روی مدل‌سازی و کنترل اثرگذار انتهایی یک ربات کابلی به دو روش متفاوت انجام دادند و ضمن مقایسه نتایج حاصل از این روش‌ها به تحلیل فضای کاری ربات مربوطه نیز پرداختند [۱۵]. کومار و همکاران از روش کنترل جایدهی قطب بر پایه خطی‌سازی پس‌خورد ورودی-خروجی برای تنظیم وضعیت یک ربات کابلی در حضور اغتشاشات خارجی بهره بردند [۱۶]. خلیل پور و همکاران پس از فرمول‌بندی دینامیکی یک ربات کابلی با در نظر گرفتن مدل محرک‌ها، یک توپولوژی کنترلی جدید برای آن پیشنهاد کرده و پایداری آن را به کمک قضیه‌ی مستقیم لیاپانوف به اثبات رساندند [۱۷].

به طور کلی می‌توان گفت که جهت دستیابی به عملکرد قابل قبول کنترل‌کننده‌ها، تنظیم بهره‌های آن‌ها نقش اساسی و بسیار مهمی را بازی می‌کند. در سال‌های اخیر روش‌های زیادی برای یافتن مقادیر بهینه بهره‌های کنترلی ارائه شده است که یکی از موفق‌ترین آن‌ها به-کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی است. به عنوان مثال، حاجی و مونه برای تعیین پارامترهای کنترل‌کننده‌های مرتبه کسری از الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذره بهره برده و این ایده را بر روی یک نیروگاه چرخه ترکیبی پیاده کردند [۱۸]. چن و همکاران از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی ضرایب یک کنترل‌کننده فازی جهت ردیابی مسیر توسط یک زیردریایی بهره بردند [۱۹]. ساهو و پاندا، ابتدا روش بهینه‌سازی گرگ خاکستری را بهبود بخشیده و پس از آن در جهت بهبود عملکرد یک کنترل‌کننده فازی-تناسبی-انتگرالی-مشتقی طراحی شده برای کاهش فرکانس‌های سیستم‌های قدرت کمک گرفتند [۲۰].

عزیزی و همکاران برای کنترل ارتعاشات یک سازه فولادی غیر خطی از سیستم‌های بر پایه منطق فازی بهینه شده با یک نسخه جدید الگوریتم وال بهره بردند [۲۱]. راجش و همکاران، پس از بهبود عملکرد الگوریتم جستجو بر مبنای الگوی حرکتی کرم شب‌تاب از آن برای بهینه‌سازی کنترل‌کننده ترکیبی فازی تناسبی-انتگرالی-مشتقی مرتبط با سیستم-های تولید توان استفاده کردند [۲۲]. محمودآبادی و رضایی برای ارتقای عملکرد کنترل‌کننده‌ی مقاوم از یک الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه بر پایه تجمعی ذرات کمک گرفته و آن را بر روی کوادروتور چهار درجه آزادی اعمال کردند [۲۳].

گام ابتدایی در این تحقیق، مطالعه سینماتیک و دینامیک یک ربات کابلی است. سپس، با کمک روش‌های کنترلی تناسبی-انتگرالی-مشتقی و فازی تناسبی-انتگرالی-مشتقی نیروی مربوط به کابل‌ها طراحی می‌شوند. در نهایت، برای بهبود نتایج و صرفه جویی در مصرف انرژی، از الگوریتم دسته میگو که یک الگوریتم بهینه‌سازی بر پایه دسته میگوهای قطب جنوب است [۲۴]، استفاده خواهد شد.

۲- سینماتیک ربات کابلی

در این قسمت، سینماتیک یک ربات کابلی سه درجه آزادی با در نظر گرفتن عدم برخورد کابل‌ها با عملگر بررسی می‌شود. ربات کابلی مور نظر، شامل یک عملگر صلب در موازات با n کابل است که از طریق n محرک کششی کنترل می‌شود. برای عملیات سه درجه صفحه‌ای، باید حداقل سه کابل وجود داشته باشد. از آنجایی که کابل‌ها باید به عملگر نیروی کششی وارد کنند، نیاز به یک کابل بیشتر است، تا از موقعیت‌هایی که عملگر ممکن است شل شود و یا کنترل خودش را از دست دهد جلوگیری کند. نمادهای سینماتیکی ربات کابلی مورد نظر با چهار کابل مطابق شکل ۱ بدین صورت در نظر گرفته شده‌اند که l_i نشان‌دهنده بردار کابل i ام و اندازه l_i نشان‌دهنده طول کابل i ام می‌باشد. k_i نشان‌دهنده طول بردار واحد در امتداد با کابل i ام از پایه به عملگر است. T_i و H_i به ترتیب نشان دهنده نقاط اتصال کابل i ام به پایه و عملگر است. موقعیت نقاط اتصال T_i و H_i به ترتیب توسط بردار t_i و h_i نشان داده شده است. t_i بردار ثابت در چهارچوب پایه و h_i بردار ثابت در چهارچوب عملگر است. نقطه P به عنوان مبدا چهارچوب عملگر فرض شده که مرکز جرم عملگر نیز در این نقطه قرار دارد. بر این اساس، موقعیت نقطه P به صورت معادله (۱) بدست می‌آید:

$$P = t_i + l_i - h_i \quad (1)$$

همه بردارها در چهارچوب پایه اندازه‌گیری می‌شوند و طول هر کابل از معادله (۲) محاسبه می‌شود:

$$L_i^2 = [P - t_i + h_i]^T \cdot [P - t_i + h_i] \quad (2)$$

محیط از طرف عملگر می‌باشد. با دیفرانسیل‌گیری از این معادله نسبت به زمان داریم:

$$\dot{L} = \dot{J}t \quad (3)$$

$$\dot{J} = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & \dots & S_n \\ h_1 \times S_1 & h_2 \times S_2 & \dots & h_n \times S_n \end{bmatrix}^T$$

$$\dot{L} = [l_1, l_2, \dots, l_n]^T$$

به عملگر است.

با توجه به نمادهای مذکور، معادله (۴) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = -J^T\tau \quad (10)$$

که پارامترهای معادله (۱۰) به صورت زیر بیان می‌شوند

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} M_{13 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & E^T I_p E \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 1} \\ E^T \{ I_p \dot{E} \dot{\theta} + (E\dot{\theta}) \times I_p (E\dot{\theta}) \} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$C(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & E^T I_p \dot{E} + E^T (E\dot{\theta})_x (I_p E) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$G(\theta) = \begin{bmatrix} -mg \\ 0_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$(E\dot{\theta})_x = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

۴- کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی ربات کابلی

برای تعقیب مسیر

در این قسمت، به کنترل موقعیت ربات کابلی برای تعقیب کامل مسیر تعریف شده پرداخته خواهد شد. در واقع می‌بایست نیروی اعمالی توسط کابل‌ها به گونه‌ای محاسبه و اعمال شوند که مجری نهایی و بار متصل به آن با توجه به جرم و ممان اینرسی آن‌ها، مسیر تعریف شده را با دقت و کمترین خطا تعقیب نماید. توجه به این نکته ضروری است که قانون کنترلی مناسب برای ربات‌های کابلی نه تنها مسیر تعریف شده را باید با دقت تعقیب کند، بلکه مثبت بودن نیروی کششی کابل‌ها را در تمامی حالت‌ها نیز باید تضمین نماید. همچنین به منظور محک روش کنترلی استفاده شده در برابر نامعینی‌های مدل دینامیکی، سعی شده است نامعین‌های ساختاری به آن تحمیل شود. به همین منظور فرض شده که ماتریس جاکوبی عملگرها به صورت دقیق قابل محاسبه نبوده و مجبور به استفاده از یک ماتریس جاکوبی تقریبی غیردقیق هستیم. لذا قانون کنترلی براساس این فرضیات به نحوی طراحی می‌شود که بتواند با وجود چنین نامعینی، پایداری مقاوم سیستم دینامیکی ربات کابلی مورد نظر را تضمین نماید. معادله دینامیکی حاکم بر ربات کابلی مورد مطالعه را به صورت معادله (۱۰) در نظر بگیرید. کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی به صورت زیر طراحی می‌شود:

$$-J^T\tau = K_v\dot{e} + K_p e + K_i \int_0^t e(s) ds \quad (16)$$

$$e = \theta_d - \theta \quad (17)$$

$$F_{PID} = -J^T\tau \quad (18)$$

که در این رابطه، θ_d بردار مسیر مطلوب است، e نشان دهنده خطای موقعیت و جهت است. F_{PID} گشتاور اعمال شده به عملگر از طریق کابل‌هاست، که به صورت زیر نیز می‌توان آن را تعریف کرد.

$$F_{PID} = [f_x; f_y; f_0] \quad (19)$$

$$\theta = [x \ y \ \theta] \quad (20)$$

$$\theta_d = [x_d \ y_d \ \theta_d] \quad (21)$$

$$\dot{e} = \dot{\theta}_d - \dot{\theta} \quad (22)$$

که هر کدام از گشتاورها نیز به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

بردار $t = [p^T, \omega^T]^T = [p_x^T, p_y^T, p_z^T, \omega_x^T, \omega_y^T, \omega_z^T]^T$ نشان دهنده چرخش عملگر است. همچنین، \hat{J} نشان دهنده ماتریس جاکوبی می‌باشد. \dot{p} بردار سرعت نقطه p و ω سرعت زاویه‌ای عملگر را نشان می‌دهد.

۳- دینامیک ربات کابلی

برای ربات کابلی، جرم کابل در برابر با با جرم عملگر بسیار کوچک است و بنابراین می‌توان از آن صرف نظر کرد. براساس نمادهای دینامیکی شکل ۱ وقتی همه کابل‌ها تحت تنش باشند می‌توان معادلات حرکت را با استفاده از قوانین نیوتن به شکل معادله (۴) بیان کرد [۱۰].

$$\begin{bmatrix} M_{13 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{p} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{3 \times 1} \\ \omega \times I_p \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -mg \\ 0_{3 \times 1} \end{bmatrix} = -J^T\tau \quad (4)$$

در این معادلات، M نشان دهنده جرم عملگر، I_p نشان دهنده تانسور اینرسی عملگر در نقطه G در چهارچوب پایه است. $I_{3 \times 3}$ ماتریس همانی است. $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]$ نشان دهنده بردار نیروهای کابل‌هاست، در حالی که τ_1 عددی نشان دهنده نیروی کششی کابل θ می‌باشد. g نشان دهنده بردار شتاب گرانش زمین است $\theta = [x_p, y_p, z_p, \alpha, \beta, \theta]^T$ را به عنوان بردار مختصات کلی در نظر بگیرید، آنچنان که $\theta = [\alpha, \beta, \theta]^T$ نشان دهنده بردار مجموعه‌ای از زاویه انحراف اوایلر است. با این تعریف، ماتریس چرخش $f_{oR_{fe}}$ را می‌توان بر حسب زوایای انحراف اوایلر به صورت معادله (۵) بیان کرد.

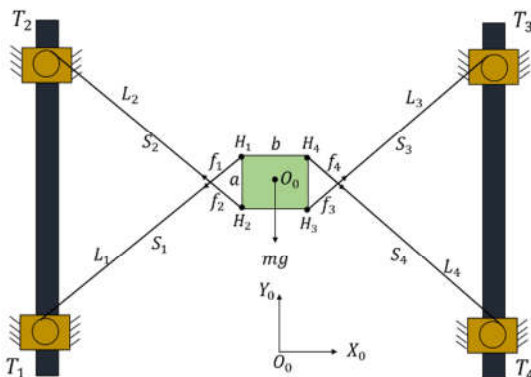
$$f_{oR_{fe}} = \begin{bmatrix} C\beta C\theta & C\theta S\alpha S\beta - C\alpha S\theta & C\alpha C\theta S\beta + S\alpha S\theta \\ C\beta S\theta & C\alpha C\theta + S\alpha S\beta S\theta & -C\theta S\alpha + C\alpha S\beta S\theta \\ -S\beta & C\beta S\alpha & C\alpha C\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

که در آن C و S نشان دهنده \cos و \sin می‌باشند. علاوه بر این سرعت زاویه‌ای عملگر می‌تواند به صورت معادله (۶) نوشته شود.

$$\omega = E\dot{\theta}, \dot{\theta} = [\dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\theta}]^T \quad (6)$$

که در آن

$$E = \begin{bmatrix} C\beta C\gamma & -S\gamma & 0 \\ C\beta S\gamma & C\gamma & 0 \\ -S\beta & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$



شکل ۱- ساختار و مشخصات ربات کابلی مورد مطالعه در این تحقیق از طرف دیگر، معادله زیر را در نظر بگیرید:

$$\dot{L} = J\dot{\theta} \quad (8)$$

که در آن

$$J = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & E \end{bmatrix} \quad (9)$$

یک از این روش‌ها، دارای حوزه اثر کامل نیستند و نمی‌توان کارایی آن-ها را در تمام موارد تضمین کرد. از طرفی، در روش کنترل کلاسیک، طراحی کنترل‌کننده با یک مدل ریاضی از فرآیند شروع می‌شود و کنترل‌کننده‌ها برای مدل طراحی می‌گردند. در حالی که برای بسیاری از مسائل کنترل عملی، یافتن یک مدل ریاضی ساده و در عین حال دقیق مشکل می‌باشد. فازی‌سازی ضرایب برای این نوع مسائل بیش از هر روش دیگری مفید می‌باشد؛ چرا که در این روش، مجموعه‌ای از قواعد اگر-آنگاه فازی بر اساس اطلاعات افراد خبره و یا دانش حوزه مورد بررسی جمع آوری و در ادامه سیستم‌های فازی بر اساس این قواعد طراحی می‌شوند. حال اگر به کارگیری سیستم فازی طراحی شده در عمل رضایت بخش نباشد، قواعد مجدداً به صورت مناسبی تنظیم می‌گردند و یا دوباره از ابتدا ایجاد می‌گردند. این عمل آن‌قدر ادامه می‌یابد تا پس از چند چرخه سعی و خطا عملکرد نهایی رضایت بخش گردد [۲۷-۲۵]. در کنترل‌کننده فازی تناسبی-انترگالی-مشتقی مورد نظر، عبارات کنترلی بیان شده در معادلات (۲۳) تا (۲۵) به صورت زیر بازنویسی می‌شوند.

$$\ddot{x} = \bar{k}_{px}e_x(t) + \bar{k}_{ix} \int_0^t e_x(t)d(t) + \bar{k}_{dx} \frac{de_x(t)}{dt} \quad (34)$$

$$\ddot{y} = \bar{k}_{py}e_y(t) + \bar{k}_{iy} \int_0^t e_y(t)d(t) + \bar{k}_{dy} \frac{de_y(t)}{dt} \quad (35)$$

$$\ddot{\theta} = \bar{k}_{p\theta}e_\theta(t) + \bar{k}_{i\theta} \int_0^t e_\theta(t)d(t) + \bar{k}_{d\theta} \frac{de_\theta(t)}{dt} \quad (36)$$

$$F_{\text{Fuzzy pid}} = [\ddot{x}; \ddot{y}; \ddot{\theta}] \quad (37)$$

که در آن $F_{\text{Fuzzy pid}}$ عمل کنترل فازی تناسبی-انترگالی-مشتقی را نشان می‌دهد و $\bar{k}_{px}, \bar{k}_{ix}, \bar{k}_{dx}, \bar{k}_{py}, \bar{k}_{iy}, \bar{k}_{dy}, \bar{k}_{p\theta}, \bar{k}_{i\theta}, \bar{k}_{d\theta}$ ضرایب کنترل‌کننده فازی تناسبی-انترگالی-مشتقی می‌باشند که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\bar{k}_{px} = k_{px}^b + k_{px}^r \Delta w_1 \quad (38)$$

$$\bar{k}_{py} = k_{py}^b + k_{py}^r \Delta w_2 \quad (39)$$

$$\bar{k}_{p\theta} = k_{p\theta}^b + k_{p\theta}^r \Delta w_3 \quad (40)$$

$$\bar{k}_{dx} = k_{dx}^b + k_{dx}^r \Delta w_4 \quad (41)$$

$$\bar{k}_{dy} = k_{dy}^b + k_{dy}^r \Delta w_5 \quad (42)$$

$$\bar{k}_{d\theta} = k_{d\theta}^b + k_{d\theta}^r \Delta w_6 \quad (43)$$

$$\bar{k}_{ix} = k_{ix}^b + k_{ix}^r \Delta w_7 \quad (44)$$

$$\bar{k}_{iy} = k_{iy}^b + k_{iy}^r \Delta w_8 \quad (45)$$

$$\bar{k}_{i\theta} = k_{i\theta}^b + k_{i\theta}^r \Delta w_9 \quad (46)$$

از $\Delta w_i, i = 1, 2, \dots, 9$ متغیرهای فازی می‌باشند که با استفاده از سیستم فازی با فازی‌ساز منفرد، موتور استنتاج ضرب و غیر فازی‌ساز میانگین مراکز و ورودی‌های $[x, \dot{x}, \ddot{x}, y, \dot{y}, \ddot{y}, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}]$ محاسبه می‌شوند. توابع عضویت در شکل ۳ و جدول ۱ و همچنین قوانین فازی در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. همچنین در روابط (۳۸) تا (۴۶) ضرایب $k_{px}^b, k_{ix}^b, k_{dx}^b, k_{py}^b, k_{iy}^b, k_{dy}^b, k_{p\theta}^b, k_{i\theta}^b, k_{d\theta}^b, k_{px}^r, k_{ix}^r, k_{dx}^r, k_{py}^r, k_{iy}^r, k_{dy}^r, k_{p\theta}^r, k_{i\theta}^r, k_{d\theta}^r$ به ترتیب متغیرهای پایه و تنظیمی نامیده می‌شوند. برای تعیین این متغیرها می‌توان از روش سعی و خطا استفاده کرد اما جهت ایجاد یک رفتار کنترلی بهینه در این مقاله از روش بهینه‌سازی دسته میگو استفاده شده است.

$$f_x = k_{px} \times e_x + k_{dx} \times \dot{e}_x + k_{ix} \times \int_0^t e_x(s)ds \quad (23)$$

$$f_y = k_{py} \times e_y + k_{dy} \times \dot{e}_y + k_{iy} \times \int_0^t e_y(s)ds \quad (24)$$

$$f_\theta = k_{p\theta} \times e_\theta + k_{d\theta} \times \dot{e}_\theta + k_{i\theta} \times \int_0^t e_\theta(s)ds \quad (25)$$

$$e_x = x_d - x \quad (26)$$

$$e_y = y_d - y \quad (27)$$

$$e_\theta = \theta_d - \theta \quad (28)$$

همانگونه که در قبل اشاره شد، در مدل‌های کاملاً مقید ریات کابلی، افزونگی در تحریک ضروری است. لذا ماتریس جاکوبی مکانیسمی غیرمربعی و در نتیجه، در دستگاه معادله (۱۶)، اگر $[J^T]$ وارون‌پذیر باشد، راه حل‌های بسیاری برای مسأله وجود دارد. در این موارد، حالت کلی حل معادله (۱۶) به صورت زیر است:

$$\tau = P + Q \quad (29)$$

در اینجا τ نشان دهنده بردار تنش در کابل‌هاست و P کمترین راه حل ممکن برای معادله (۱۶) که با استفاده از شبه معکوس ترانهاده ماتریس جاکوبی احتمالی بدست می‌آید.

$$P = -\hat{J}([J^T])^{-1} F_{PID} \quad (30)$$

بردار Q به منظور اطمینان از اینکه همه کابل‌ها در کشش باقی بمانند، استفاده شده است و می‌توان آن را به شکل زیر فرمول بندی کرد:

$$Q = N([J^T])c \quad (31)$$

که در آن $N([J^T])$ فضای خالی (پوچ) یا بردار کرنل ماتریس J^T و c برابر با $(n - r)$ ابعاد بردار است. r رتبه ماتریس J^T و n تعداد کابل‌هاست. Q می‌تواند به صورت فیزیکی به عنوان بردار نیروی اولیه تفسیر شود که استحکام سیستم را افزایش می‌دهد. براساس توصیفات بیان شده، شرایط کششی بودن کابل‌ها با استفاده از بردار نیروی اولیه به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\tau \geq 0 \quad (32)$$

قابل ذکر است که در بعضی مواقع که P منفی باشد، ممکن است Q توان مثبت کردن τ را نداشته باشد، لذا در یک عدد حقیقی ζ ضرب می‌شود. ζ را می‌توان یک پارامتر طراحی در نظر گرفت که مقدار بهینه آن به کمک الگوریتم دسته میگو بدست خواهد آمد.

$$\tau = P + \zeta \times Q \quad (33)$$

بر اساس آنچه بیان شد می‌توان طرح نیروی کنترل پیشنهادی را به صورت شکل ۲ خلاصه کرد.

۵- کنترل‌کننده فازی تناسبی-انترگالی-مشتقی ریات کابلی برای تعقیب مسیر

کنترل‌کننده تناسبی-انترگالی-مشتقی شناخته‌شده‌ترین مکانیزم کنترلی در میان سایر روش‌های کنترلی و پرکاربردترین آن‌ها در صنعت است، تا جایی که اگر این کنترل‌کننده از صنعت کنونی حذف شود، عملاً بسیاری از صنایع و کارخانه‌ها تعطیل خواهند شد. در کنار قدرت، محبوبیت و سادگی این ساختار کنترلی، مشکلی وجود دارد که تاکنون راه حل دقیق و قطعی برای آن ارائه نشده است و آن تعیین مقادیر مناسب ضرایب و ثوابت مربوط به این کنترل‌کننده است. هر چند روش‌های مختلفی برای حل این مشکل ارائه شده است، اما تقریباً هیچ

مشاهدات تشکیل گروه میگو، پیشنهاد شده‌اند [۳۲]. بعضی از نتایج بدست آمده از مشاهدات بیانگر تشکیل ازدحام میگو براساس نوع آن- هاست. به عبارت دیگر برای فهمیدن تشکیل ازدحام میگو، بهتر است موارد تقریبی و فاکتورهایی که مطابق با تجمع میگوها هستند، تعیین شوند [۳۳]. وقتی که صیادانی از قبیل خوک آبی، پنگون یا مرغ ماهی خوار به این دسته از میگوها حمله می‌کنند؛ آن‌ها به صورت فردی فرار کرده و در نتیجه تراکم میگوها کاهش می‌یابد. شکل‌گیری دسته میگوها بعد از شکار به پارامترهای زیادی بستگی دارد و در واقع، جمع شدن میگوها یک فرایند چند هدفه شامل دو هدف اصلی افزایش تراکم میگوها و رسیدن به غذا می‌باشد. در این فرآیند، وقتی که یک میگو بالاترین تراکم جمعیت و غذا را جستجو کرد به سمت بهترین راه حل می‌رود. ضرایب الگوریتم بهینه‌سازی دسته میگوها، براساس مرور مطالب تخصصی در این زمینه و مشاهدات آزمایشگاهی رفتار میگوها بدست آمده‌اند [۳۴ و ۳۵].

۶-۱- روش و اصول الگوریتم دسته میگو

- به طور کلی، مراحل بهینه سازی توسط الگوریتم دسته میگو را می‌توان به صورت گام‌های زیر معرفی کرد [۲۴]:
- ۱- ساختار داده‌ها: حدود متغیرها، پارامترهای الگوریتم و غیره تعیین می‌شوند.
 - ۲- مقدار دهی اولیه: جمعیت اولیه به صورت تصادفی در فضای جستجو ایجاد می‌شود.
 - ۳- ارزیابی سازگاری: هر میگو در امتداد با موقعیتش ارزیابی می‌شود.
 - ۴- محاسبات حرکت:

- ✓ حرکت ناشی از حضور دیگر میگوها
- ✓ حرکت برای یافتن غذا
- ✓ انتشار تصادفی

به عبارت دیگر، در این مرحله، موقعیت جدید میگو مورد نظر از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$X_{i+1} = X_i + \Delta t \frac{dx_i}{dt} \quad (47)$$

که در آن X_{i+1} موقعیت جدید، X_i موقعیت قدیم، Δt پارامتر تنظیمی، $\frac{dx_i}{dt}$ با استفاده از اصل لاگرانژی زیر بدست می‌آید:

$$\frac{dx_i}{dt} = N_i + F_i + D_i \quad (48)$$

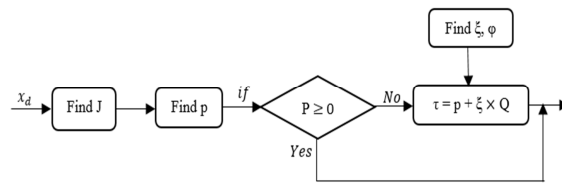
که در این رابطه N_i حرکت ناشی از سایر میگوها، F_i حرکت برای یافتن غذا و D_i انتشار تصادفی است.

- ۵- پیاده سازی عملگرهای ژنتیکی
- ۶- به روز رسانی: به روز کردن موقعیت هر میگو در فضای جستجو
- ۷- تکرار: بازگشت به مرحله ۳ تا زمانی که معیارهای اتمام الگوریتم برآورده شوند.
- ۸- پایان

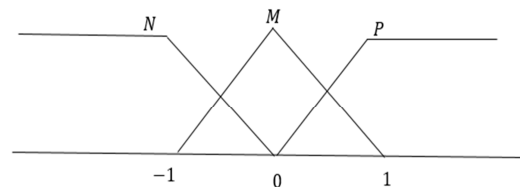
۶-۲- طراحی بهینه کنترل کننده

در این پژوهش، هنگام بهینه‌سازی کنترل کننده، ضرایب آن‌ها به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، در فرایند بهینه‌سازی انجام شده، مجموع مساحت نمودارهای خط‌های راستای x ، y و θ به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده‌اند که می‌توان آن را به صورت زیر بیان کرد:

$$\text{هدف تابع} = \int |e_x(t)| dt + \int |e_y(t)| dt + \int |e_\theta(t)| dt \quad (49)$$



شکل ۲- دیاگرام بلوکی روش کنترلی پیشنهادی



شکل ۳- توابع عضویت متغیر فازی Δw_i

جدول ۱- روابط ریاضی تابع عضویت Δw_i

if	then
$x \leq -1$	$N = 1$ $M = 0$ $P = 0$
$-1 \leq x \leq 0$	$N = -x$ $M = x + 1$ $P = 0$
$0 \leq x \leq 1$	$N = 0$ $M = -x + 1$ $P = x$
$x \geq 1$	$N = 0$ $M = 0$ $P = 1$

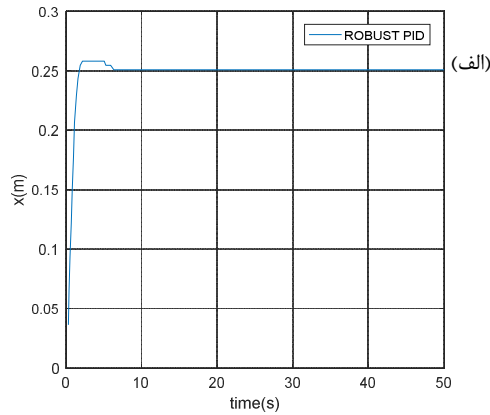
جدول ۲- قوانین سیستم فازی Δw_i

if	then
N	$\Delta w_i = -1$
M	$\Delta w_i = 0$
P	$\Delta w_i = 1$

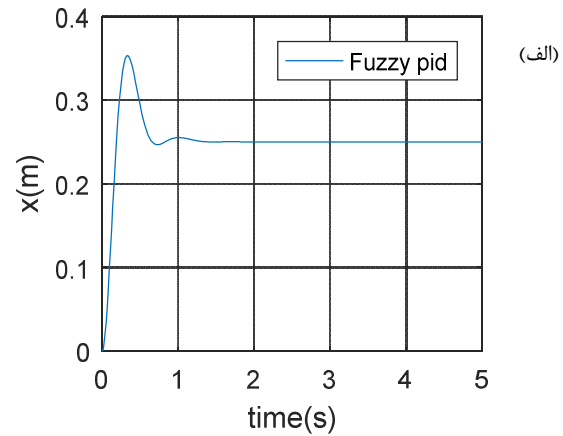
۶-۳- بهینه‌سازی به کمک الگوریتم دسته میگو

گروه‌های مختلفی از حیوانات دریایی به صورت پراکنده و بدون تصادف، تشکیل شده‌اند. مطالعات بسیاری بر روی مکانیزم‌های حاکم بر نحوه شکل‌گیری گروه‌های مذکور انجام شده که از جمله مهم‌ترین آن- ها می‌توان به توانایی پیدا کردن غذا، افزایش تولید مثل، حفاظت در برابر شکارچیان و شرایط زیست محیطی اشاره کرد. در همین راستا، مدل‌های ریاضی متعددی به منظور ارزیابی ارتباط نسبی بین این مکانسیم‌ها بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی توسعه داده شدند [۲۸]. میگو قطب جنوب یکی از بهترین گونه‌های مطالعاتی حیوانات دریایی است که دسته آن‌ها به شکل جهت‌های غیر موازی در مقیاس زمانی از ساعت بر روز و مقیاس فضایی ۱۰ ثانیه تا ۱۰۰ ثانیه بر متر تجمع می‌کنند. یکی از مشخصه‌های اصلی این فرآیند، توانایی تشکیل یک تجمع وسیع است [۲۹ و ۳۰]. در سه دهه اخیر، مطالعات زیادی به منظور شناسایی محیط زیست و توزیع این نوع میگو انجام شده است. البته هنوز تردیدهایی مربوط به تعیین نیروهای توزیع کننده دسته میگوها وجود دارد [۳۱] و بر همین اساس مدل‌های تصویری برای توضیح

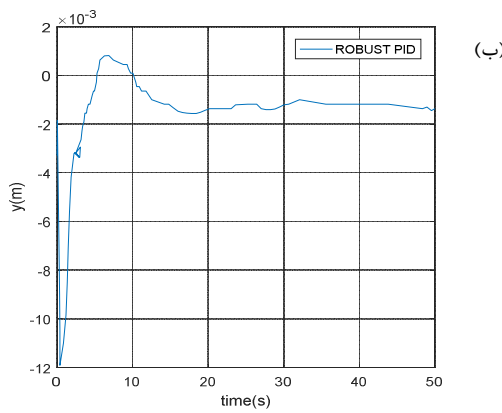
در جدول ۳، تنظیمات مربوط به الگوریتم بهینه‌سازی دسته میگو آورده شده‌اند.



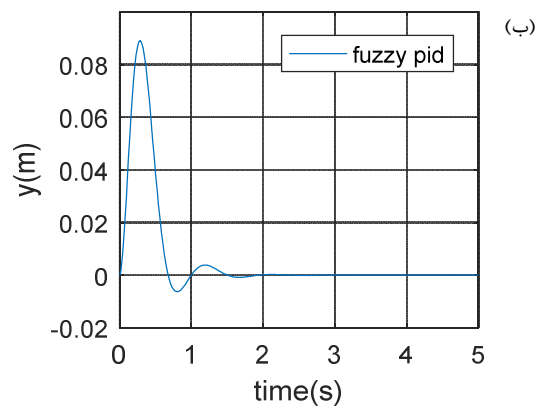
(الف)



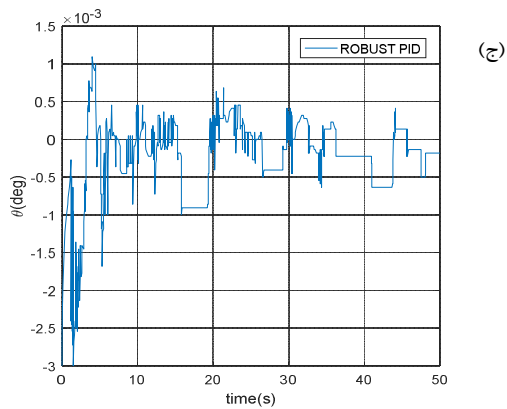
(الف)



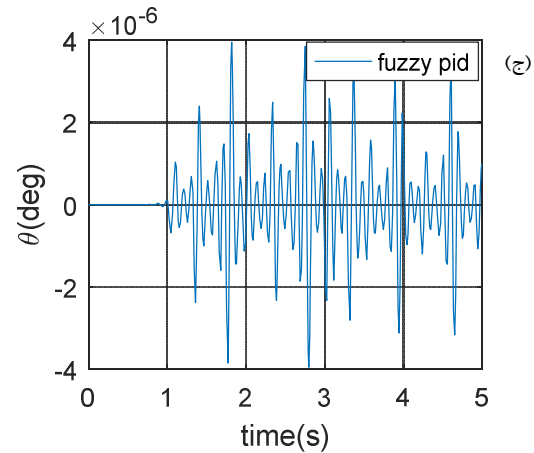
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل ۵- موقعیت ربات کابلی همراه با کنترل‌کننده ROBUST PID برای حالت مطلوب $\theta_d = [0.25 \text{ m } 0.0]$.

الف- موقعیت نسبت به محور x به موقعیت نسبت به محور y

ج- چرخش حول محور z

شکل ۴- موقعیت ربات کابلی همراه با کنترل‌کننده فازی PID بهینه شده برای حالت مطلوب $\theta_d = [0.25 \text{ m } 0.0]$.

الف- موقعیت نسبت به محور x به موقعیت نسبت به محور y

ج- چرخش حول محور z

جدول ۳- تنظیمات مربوط به الگوریتم بهینه‌سازی دسته میگو

توضیحات	علامت	اندازه
بیشترین تعداد تکرار	MI	۲۰۰
تعداد جمعیت اولیه	NK	۲۵
بیشترین سرعت تولید شده	N^{\max}	۰/۰۱
سرعت مربوط به پیدا کردن غذا	V_f	۰/۰۲
بیشترین سرعت انتشار	D^{\max}	۰/۰۰۵

جدول ۴- ضرایب بهینه شده کنترل کننده فازی PID

اندازه	ضرایب کنترل کننده فازی PID
۲۳۲/۸۰۰	k_{px}^b
۱۰۰/۰۳۸	k_{py}^b
۱۰۶/۵۷۰	k_{pe}^b
۲۵/۷۶۰	k_{dx}^b
۲۰/۰۳۰	k_{dy}^b
۴/۱۶۴	k_{de}^b
۶۵۹/۰۲۲	k_{ix}^b
۷۳۹/۴۰۸	k_{iy}^b
۷۹/۸۴۰	k_{ie}^b
۱۷۸/۷۵۰	k_{px}^r
۳۵۸/۴۰۰	k_{py}^r
۴۳/۷۶۸	k_{pe}^r
۴/۴۵۶۷	k_{dx}^r
۵/۳۳۵	k_{dy}^r
۷/۲۷۲	k_{de}^r
۴۲/۷۰۶	k_{ix}^r
۱۰۴/۱۳۸	k_{iy}^r
۱۵/۷۰۰	k_{ie}^r
۱۰۰/۴۲۰	ζ

جدول ۵- ضرایب بهینه شده کنترل کننده PID

اندازه	ضرایب کنترل کننده PID
۲۷۹/۰۲۸	k_{px}
۱۱۶/۰۶۸	k_{py}
۷۵/۰۲۶	k_{pe}
۲۸/۲۹۴	k_{dx}
۱۷/۶۵۶	k_{dy}
۴/۳۸۶	k_{de}
۹۵۸/۱۶۴۳	k_{ix}
۱۲۴/۴۵۳	k_{iy}
۵۴/۳۳۹	k_{ie}
۱۰۱/۳۳۰	ζ

۸- نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش کنترل بهینه فازی تناسبی-انترگالی-مشتقی جهت تنظیم موقعیت عملگر یک ربات کابلی سه درجه آزادی با در نظر گرفتن مثبت بودن نیروی کششی کابل‌ها را در تمامی حالت‌ها مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. ابتدا، سینماتیک و دینامیک مکانیزم زنجیره‌ای بسته مورد نظر بررسی و سپس، کنترل کننده‌های تناسبی-انترگالی-مشتقی و فازی تناسبی-انترگالی-مشتقی برای آن طراحی شدند. برای تعیین ضرایب کنترل کننده‌ها، از الگوریتم بهینه‌سازی بر پایه جمعیت دسته میگو استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که با هر دو کنترل کننده، امکان دسترسی به نقاط و مسیرهای مختلف در فضای کاری وجود دارد. اما کنترل کننده فازی تناسبی-انترگالی-مشتقی نسبت به کنترل کننده تناسبی-انترگالی-مشتقی، ربات کابلی را بهتر کنترل و امکان انجام مانورهای مختلف با صرف زمان و توان کمتر را فراهم می‌کند.

۷- شبیه سازی و نتایج

در این بخش، مساله تنظیم موقعیت ربات کابلی مورد نظر بر روی مقادیر مطلوب متفاوت، بررسی و نتایج مربوطه ارائه، تحلیل و بررسی خواهند شد. به منظور مقایسه نتایج با مرجع [۱۰]، مشخصات فیزیکی ربات مورد نظر به صورت زیر لحاظ شده‌اند که دقیقاً مطابق با این مرجع می‌باشد.

$$M = ۲/۵ \text{ kg}$$

جرم عملگر

$$I_p = ۰/۲۷۰۸۳۰ \text{ kgm}^2$$

ممان اینرسی عملگر

$$a \times b = ۰/۲ \times ۰/۳ \text{ m}^2$$

ابعاد عملگر

$$g = ۸/۹ \text{ m/s}^2$$

شتاب گرانشی

۱-۱- مثال ۱ (اعتبار سنجی)

جهت اعتبارسنجی الگوریتم کنترلی پیشنهادی، نتایج به دست آمده از آن با نتایج روش پیشنهادی در مرجع [۱۰] (روش ROBUST PID) مقایسه شده است. در این مثال، شرایط اولیه ربات کابلی دقیقاً مطابق با مرجع مورد نظر و برابر صفر در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، مقادیر حالت‌های مطلوب نیز به صورت $\theta_d = [۰/۲۵ \ ۰ \ ۰]$ لحاظ شده است. نمودارهای شکل ۴، بیانگر موقعیت عملگر ربات کابلی برای روش کنترلی فازی PID می‌باشند. به طور مشابه، نمودارهای شکل ۵، همین کمیت را بر اساس روش پیشنهادی ROBUST PID در مرجع [۱۰] نشان می‌دهند. مطابق با این نمودارها، زمان رسیدن به نقطه مطلوب و درصد خطا برای کنترل کننده فازی PID نسبت به کنترل کننده مرجع [۱۰] کمتر است.

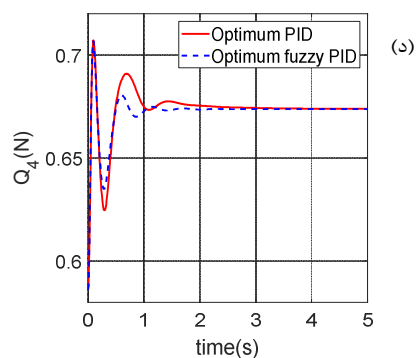
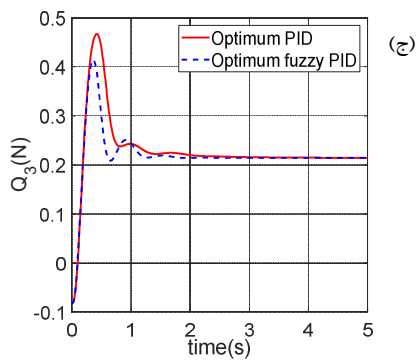
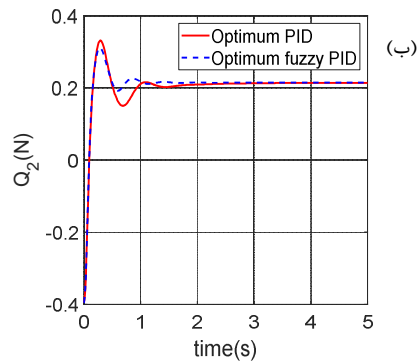
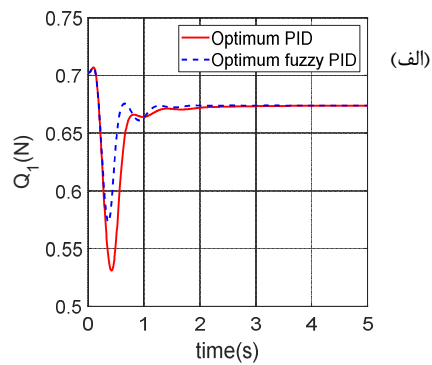
۲-۲- مثال ۲

در این مثال، شرایط مطلوب به صورت $[۰/۵ \text{m} \cdot \text{deg}]$ در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، یک اغتشاش خارجی برابر با $۰/۰۱$ رادین بر مجذور ثانیه در راستای دورانی θ در زمان $t=2s$ بر عملگر اعمال شده است. مقادیر بهره‌های کنترلی بهینه به دست آمده از الگوریتم دسته میگو برای دو نوع کنترل کننده فازی PID و PID به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ و همچنین اندازه توابع هدف مربوط به آن‌ها در جدول ۶ آورده شده است.

همان طور که از شکل ۶ و جدول ۶ مشهود است، مساحت نمودار بر اساس کنترل کننده فازی PID برای موقعیت‌های x و y کمتر از کنترل کننده PID است و مساحت زاویه چرخش θ حول محور z ، برای هر دو کنترل کننده صفر است. علاوه بر این، شکل ۷ نشان می‌دهد که به طور کلی اندازه Q کوچک بوده و در بعضی از زمان‌ها منفی می‌باشد و توان مثبت کردن P را ندارد. پس طبق معادله (۳۳) باید Q را در یک ضریب بهینه شده مانند $\bar{\zeta}$ ضرب کرد. همچنین، از شکل ۸ مشخص است که مقادیر Q تقویت شده‌اند و جمع اعداد این کمیت با P_i منجر به اعدادی مثبت خواهد شد. با توجه به شکل ۹ مشخص است که ربات کابلی مورد نظر با هر دو کنترل کننده تناسبی-انترگالی-مشتقی و فازی تناسبی-انترگالی-مشتقی با نیروهای مثبت کنترل می‌شود (کابل‌ها در حالت کشش هستند) و اندازه نیروی بیشینه در کنترل کننده فازی تناسبی-انترگالی-مشتقی بیشتر است.

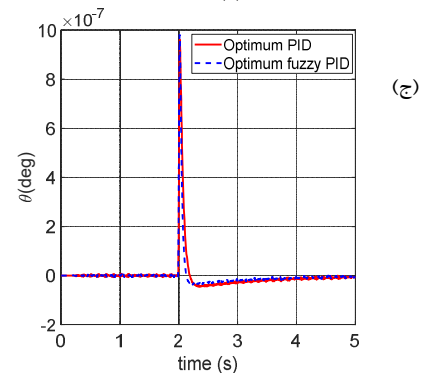
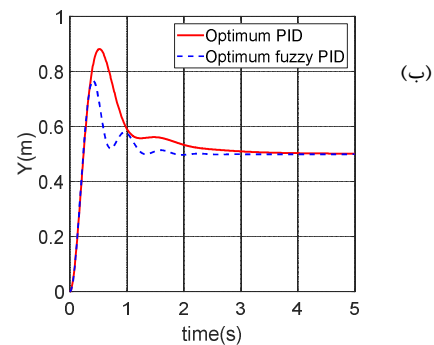
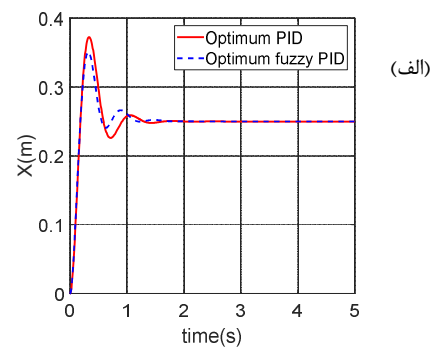
جدول ۶- اندازه توابع هدف برای حالت $\vartheta_d = [0/25m \cdot / \Delta m \cdot deg]$

تابع هدف	نوع کنترل کننده	اندازه
$\int e_x dt$	PID	۰/۰۶۴۳
$\int e_y dt$	PID	۰/۳۳۸۹
$\int e_o dt$	PID	$1/2442 \times 10^{-10}$
$\int e_x dt + \int e_y dt + \int e_o dt$		۰/۴۰۳۲
$\int e_x dt$	فازی PID	۰/۰۵۴
$\int e_y dt$	فازی PID	۰/۱۷۶
$\int e_o dt$	فازی PID	$9/6151 \times 10^{-10}$
$\int e_x dt + \int e_y dt + \int e_o dt$		۰/۲۳۱



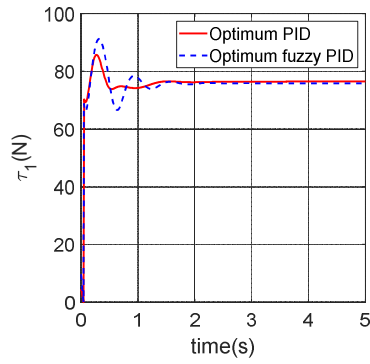
شکل ۷- ربات کابلی برای کنترل کننده‌های فازی PID و PID بهینه شده برای حالت $\vartheta_d = [0/25m \cdot / \Delta m \cdot deg]$.

الف- نیروی اولیه کابل اول ب- نیروی اولیه کابل دوم
ج- نیروی اولیه کابل سوم د- نیروی اولیه کابل چهارم

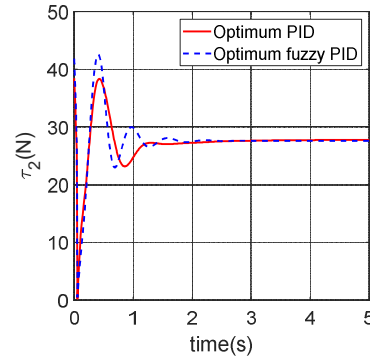


شکل ۶- موقعیت ربات کابلی برای کنترل کننده‌های فازی PID و PID بهینه شده برای حالت $\vartheta_d = [0/25m \cdot / \Delta m \cdot deg]$.

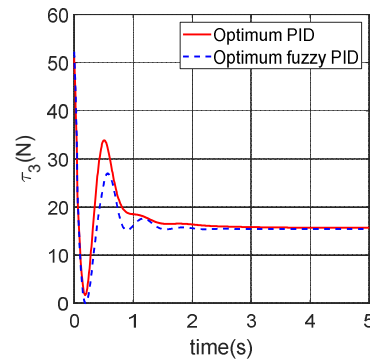
الف- موقعیت نسبت به محور X ب- موقعیت نسبت به محور Y
ج- چرخش حول محور z



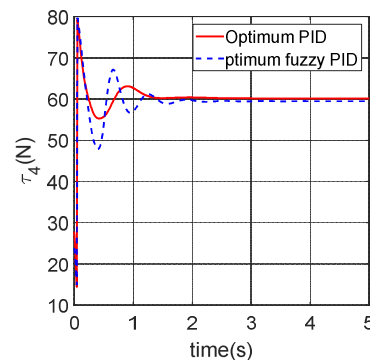
(الف)



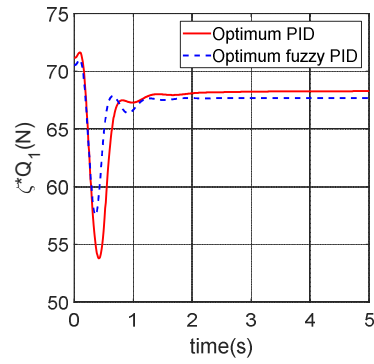
(ب)



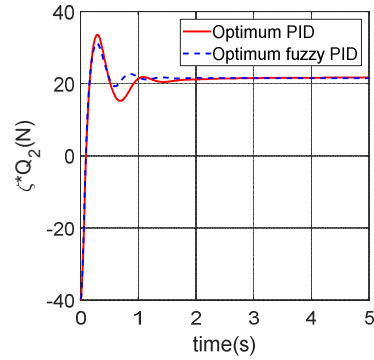
(ج)



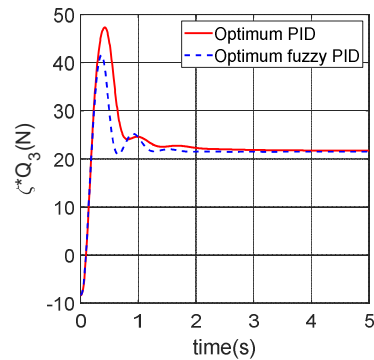
(د)



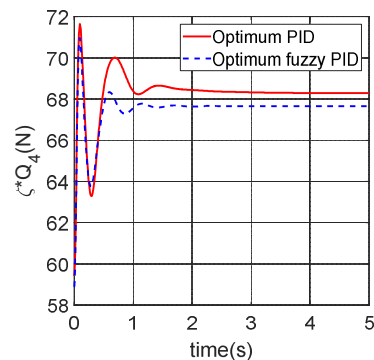
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۹- گشتاورهای ربات کابلی برای کنترل کننده‌های فازی PID

و PID بهینه شده برای حالت $\theta_d = [0/25m \cdot / \Delta m \cdot deg]$

- الف- نیروی کابل اول
- ب- نیروی کابل دوم
- ج- نیروی کابل سوم
- د- نیروی کابل چهارم

شکل ۸- $\zeta \times Q$ ربات کابلی برای کنترل کننده‌های فازی PID و PID

بهینه شده برای حالت $\theta_d = [0/25m \cdot / \Delta m \cdot deg]$

- الف- نیروی اولیه کابل اول
- ب- نیروی اولیه کابل دوم
- ج- نیروی اولیه کابل سوم
- د- نیروی اولیه کابل چهارم

- [20] Sahoo B. P. and Panda S., Improved grey wolf optimization technique for fuzzy aided PID controller design for power system frequency control, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Vol. 16, pp. 278-299, 2018.
- [21] Azizi M., Goli Ejlali R., Mousavi Ghasemi S. A. and Talatahari S., Upgraded Whale Optimization Algorithm for fuzzy logic based vibration control of nonlinear steel structure, *Engineering Structures*, Vol. 192, pp. 53-70, 2019.
- [22] Rajesh K. S., Dash S. S. and Rajagopal R., Hybrid improved firefly-pattern search optimized fuzzy aided PID controller for automatic generation control of power systems with multi-type generations, *Swarm and Evolutionary Computation*, Vol. 44, pp. 200-211, 2019.
- [23] Mahmoodabadi M. J. and Rezaee Babak N., Robust fuzzy linear quadratic regulator control optimized by multi-objective high exploration particle swarm optimization for a 4 degree-of-freedom quadrotor, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 97, Article 105598, 2020.
- [24] Gandomi A. H. and Alavi A. H., Krill herd: a new bio-inspired optimization algorithm, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 17, No. 12, pp. 4831-4845, 2012.
- [25] Najafi A. and Keighobadi J., Full-state-feedback, Fuzzy type I and Fuzzy type II control of MEMS accelerometer, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 32, No. 2, pp. 793-798, 2018.
- [26] Keighobadi J. and Mohamadi Y., Fuzzy robust trajectory tracking control of WMRs, *Intelligent Control and Innovative Computing*, Vol. 110, pp. 77-90, 2011.
- [27] Moghanni M.R., Keighobadi J. and Ghanbari A., Fuzzy adaptive sliding mode controller for MEMS vibratory rate gyroscope, *IFAC Proceedings* Vol. 44, No. 1, pp. 4192-4197, 2011.
- [28] Flierl G., Grünbaum D., Levins S. and Olson D., From individuals to aggregations: the interplay between behavior and physics, *Journal of Theoretical biology*, Vol. 196, No. 4, pp. 397-45, 1999.
- [29] Hardy A. C. and Gunther E. R., The plankton of the South Georgia whaling grounds and adjacent waters, *The University Press*, pp. 1926-1927, 1935.
- [30] Marr J. W. S., The natural history and geography of the Antarctic krill (*Euphasia superba* Dana), *The University Press*, 1962.
- [31] Nicol S., Living Krill, Zooplankton and Experimental Investigations: a Discourse on the Role of Krill and Their Experimental Study in Marine Ecology, *Marine, Freshwater Behaviour and Physiology*, Vol. 36, No. 4, pp.191-205, 2003.
- [32] Murphy E., Morris D., Watkins J. and Priddle J., Scales of Interaction Between Antarctic Krill and the Environment, *Antarctic Ocean and resources variability, Springer Berlin Heidelberg*, pp. 120-130, 1988.
- [33] Miller D. and Hampton I., Krill Aggregation Characteristics: Spatial Distribution Patterns from Hydroacoustic Observations, *Polar Biology*, Vol. 10, No. 2, pp. 125-134, 1989.
- [34] Morin A., Okubo A. and Kawasaki K., Acoustic Data Analysis and Models of Krill Spatial Distribution, *Scientific Committee for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, Selected Scientific Papers*, Part I: pp. 311-329, 1988.
- [35] Price H. J., Swimming Behavior of Krill in Response to Algal Patches: a Mesocosm Study, *Limnology and Oceanography*, Vol. 34, No. 4, pp. 649-659, 1989.
- [1] Alp A. B., *Cable-suspended parallel robots*, University of Delaware, 2001.
- [2] Lytle A. M., Saidi K. S., Bostelman R. V., Stone W. C. and Scott N. A., Adapting a teleoperated device for autonomous control using three-dimensional positioning sensors: experiences with the NIST RoboCrane, *Automation in Construction*, Vol. 13, No. 1, pp. 101-11, 2004.
- [3] Stewart D., A platform with six degrees of freedom, *Proceedings of the institution of mechanical engineers*, Vol. 180, No. 1, pp. 371-386, 1965.
- [4] Oh S. R. and Agrawal S. K., A control Lyapunov approach for feedback control of cable-suspended robots, *Robotics and Automation*, IEEE International Conference on, IEEE, 2007.
- [5] Bartolini G., Orani N., Pisano A. and Usai E., Load swing damping in overhead cranes by sliding mode technique, *Decision and Control, Proceedings of the 39th IEEE Conference on*, IEEE, 2000.
- [6] Gexue R., Qiuhai L., Ning H., Rendong N. and Bo P., On vibration control with Stewart parallel mechanism, *Mechatronics*, Vol. 14, No. 1, pp. 1-13, 2004.
- [7] Merlet J. P., *Parallel robots*, Solid mechanics and its applications, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2000.
- [8] Bamdad M. and Faroghi S., Stability measure for a parallel cable driven robot, pp. 25-34, 2013.
- [9] Zarebidoki M., Lotfavar A. and Fahham H., Dynamic modeling and adaptive control of a cable-suspended robot, *Proceedings of the world congress on engineering*, 2011.
- [10] Khosravi M. A. and Taghirad H. D., Robust PID control of fully-constrained cable driven parallel robots, *Mechatronics*, Vol. 24, No. 2, pp. 87-97, 2014.
- [11] Kraus W., Miermeister P., Schmidt V. and Pott A., Hybrid position/force control of a cable-driven parallel robot with experimental evaluation, *New Trends in Mechanism and Machine Science*, Vol. 24, pp. 553-561, 2015.
- [12] Bayani H., Masouleh M. T. and Kalhor A., An experimental study on the vision-based control and identification of planar cable-driven parallel robots, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 75, pp. 187-202, 2016.
- [13] Asl H. J. and Janabi-Sharifi F., Adaptive neural network control of cable-driven parallel robots with input saturation, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 65, pp. 252-260, 2017.
- [14] Katliar M., Fischer J., Frison G., Diehl M., Teufel H. and Bühlhoff H. H., Nonlinear Model Predictive Control of a Cable-Robot-Based Motion Simulator, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 50, pp. 9833-9839, 2017.
- [15] Aflakian A., Safaryazdi A.R., Tale Masouleh M. and Kalhor A., Experimental study on the kinematic control of a cable suspended parallel robot for object tracking purpose, *Mechatronics*, Vol. 50, pp. 160-176, 2018.
- [16] Kumar A. A., Antoine J. F. and Abba G., Input-Output Feedback Linearization for the Control of a 4 Cable-Driven Parallel Robot, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 52, pp. 707-712, 2019.
- [17] Khalilpour S. A., Khorrambakht R., Taghirad H. D. and Cardou P., Robust cascade control of a deployable cable-driven robot, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 127, pp. 513-530, 2019.
- [18] Haji V. H. and C. A. Monje, Fractional order fuzzy-PID control of a combined cycle power plant using Particle Swarm Optimization algorithm with an improved dynamic parameters selection, *Applied Soft Computing*, Vol. 58, pp. 256-264, 2017.
- [19] Chen J.W., Zhu H., Zhang L. and Sun Y., Research on fuzzy control of path tracking for underwater vehicle based on genetic algorithm optimization, *Ocean Engineering*, Vol. 156, pp. 217-223, 2018.