



کنترل گام به عقب تطبیقی ربات اسکارا ۴ درجه آزادی در حضور نامعینی

حبیب احمدی^{۱*}، حسین حسین پور کلاته^۲، هانیه اسماعیلی^۳^۱ استادیار، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی مکانیک^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی مکانیک^۳ کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی مکانیک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۱/۱۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۹/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۰۹

چکیده

از آنجا که دینامیک حاکم بر ربات، دارای معادلات غیرخطی است، برای دستیابی به ردیابی مناسب و همگرایی مجانبی، استفاده از روش‌های کنترل غیرخطی بسیار سودمند است. در این مقاله، برای کنترل ربات اسکارا در حضور نامعینی از روش گام به عقب استفاده شده است. روش گام به عقب، تکنیک سیستماتیک بر پایه لیاپانوف جهت طراحی یک سیستم کنترل پایدار برای سیستم‌های دینامیکی غیرخطی است. از آنجایی که در عمل اغتشاشات و عدم قطعیت‌های مختلفی در سیستم وجود دارد، نیاز است که کنترلر طراحی شده در برابر این عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات مقاوم باشد؛ بنابراین در این تحقیق، با استفاده از روش گام به عقب انتگرالی، یک کنترلر کننده پایدار جهت ردیابی مسیر برای سیستم غیرخطی ربات اسکارا طراحی و پایداری آن بر مبنای تئوری لیاپانوف اثبات شده است. با توجه به اینکه در عمل پارامترهای جرم و اینرسی ربات به صورت دقیق مشخص نمی‌باشند، با اضافه کردن کنترلر کننده تطبیقی، کنترلر کننده گام به عقب تطبیقی برای سیستم مورد مطالعه طراحی و به این وسیله تخمین پارامترهای نامعلوم برای استفاده در کنترلر انجام شده و شبیه‌سازی سیستم با توجه به کنترلرهای طراحی شده روی ربات اسکارا با سه مفصل دورانی و یک مفصل کشویی صورت پذیرفته است. نتایج نشان داد که روش گام به عقب، انتخاب مناسبی در حضور عدم قطعیت پارامتری و اغتشاشات خارجی است.

کلمات کلیدی: کنترل گام به عقب؛ کنترل گام به عقب تطبیقی؛ بازوی ماهر اسکارا.

Adaptive Backstepping Control for 4 DOF SCARA Robot in Presence of Uncertainties

H. Ahmadi^{1,*}, H. Hosseinpour Kalateh², and H. Esmaeli³¹ Assis. Prof., Mech. Eng., Shahrood Univ. of Technology, Shahrood, Iran.² MSc Student, Mech. Eng., Shahrood Univ. of Technology, Shahrood, Iran.³ MSc Student, Mech. Eng., Shahrood Univ. of Technology, Shahrood, Iran.

Abstract

Since the robot dynamic equations contain non-linear parameters, non-linear control techniques could be a logical choice to achieve a proper tracking and asymptotic convergence. According to this principle, in this work, the backstepping control method is applied to control a SCARA robot in the presence of uncertainties. The backstepping control method is a systematic technique used for designing stable non-linear control systems based on the Lyapunov stability criterion. In practice, the proposed controller should be robust to overcome the disturbances and uncertainties. Therefore, in this work, using the integrated back-stepping method, a stable controller of a SCARA robot is designed with the aim of tracking trajectory. With respect to that, since the mass and inertia of the robot can not be determined practically, an adaptive backstepping controller is implemented in order to estimate the unknown parameters of the system. These controllers are simulated considering the SCARA robot with three rotational and one prismatic joints. The results of the backstepping method in the presence of external disturbances, and without it, reveal that the backstepping method is a right choice for both cases.

Keywords: Backstepping Control; Adaptive Backstepping Control; SCARA Manipulator.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: (+۹۸)۲۳-۳۲۳۳۰۰۲۵۸

آدرس پست الکترونیک: habibahmadif@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از اساسی‌ترین مسائل در کنترل ربات این است که ردیابی مسیر در حضور نامعینی و اغتشاشات خارجی به خوبی انجام شود. به منظور دستیابی به این هدف، طرح‌های کنترلی بسیاری مانند: کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID)، کنترل بهینه، مود لغزشی، تطبیقی و کنترل فازی ارائه و عملکرد این روش‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. در مرجع [۲]، توسعه و کنترل یک زنجیره SCARA نمونه برای اهداف آموزشی بررسی شده است، در این تحقیق، نمونه‌ای که در آن مفصل کشویی در پایه قرار گرفته است، به یک مفصل کشویی در انتهای ربات تبدیل شده است، ایشان در کنترل موقعیت انتهایی از میکروکنترلر پی‌آی‌سی استفاده نموده است. در مرجع [۳] نیز، مسئله کنترل موقعیت برای ربات اسکارا با درجه آزادی اضافی با استفاده از کنترل‌کننده‌های تناسبی-مشتقی (PD) و شبکه عصبی، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۴]، مدلسازی و کنترل ربات اسکارا با روش جدیدی مورد توجه قرار گرفته است، در این تحقیق، با توجه به پیشرفت روزافزون کامپیوتر در مسائل مهندسی، روش مدلسازی و طراحی حمایت شده با کامپیوتر بکار رفته و از یک کنترلر تناسب انتگرالی مشتقی برای کنترل سیستم مورد مطالعه استفاده شده است. مرجع [۵]، در حضور عدم قطعیت پارامتری و با استفاده از کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی تطبیقی ردیابی مسیر را برای ربات اسکارای دو درجه آزادی انجام داده است. در مرجع [۶]، کنترل موقعیت و نیروی یک ربات اسکارای ۴ درجه آزادی با در نظر گرفتن قید حرکتی در مسیر حرکت، مورد بررسی قرار گرفته است.

گروهی از محققان طراحی کنترلر را در مطالعات خود بر مبنای تئوری لیاپانوف و قضایای مربوطه به انجام رسانده‌اند. تئوری تابع لیاپانوف به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای کنترل غیرخطی و همچنین خطی شناخته می‌شود؛ در عین حال استفاده از آن در طراحی کنترل‌کننده غیرخطی با یک مانع بزرگ روبرو است و آن پیدا کردن تابع لیاپانوف مناسب است، در حقیقت اگر تابع لیاپانوف برای یک سیستم کاندید شود، می‌توان در مورد پایدار بودن سیستم حلقه بسته اظهار نظر کرد. پیدا کردن چنین تابعی اغلب به تجربه و دید فیزیکی طراح برمی‌گردد که باتوجه به پیچیدگی‌های زیاد در

دینامیک سیستم‌های غیرخطی، اهمیت و دشواری این کار مشخص می‌شود. یکی از روش‌های طراحی کنترلر بر مبنای تئوری لیاپانوف، روش گام به عقب است که بر پایه تئوری فوق، ابزاری قدرتمند برای طراحی به وجود می‌آورد. انعطاف روش گام به عقب به آن اجازه می‌دهد که تعداد زیادی از مسائل طراحی را تحت شرایطی گسترده‌تر از آن چیزی حل نماید که روش‌های دیگر با آن روبرو می‌باشند. این روش به طور موفقیت‌آمیزی برای طیف گسترده‌ای از مسائل غیرخطی بکار برده شده است [۷-۹]. روش گام به عقب، یک روش طراحی کنترل سیستماتیک بر پایه تئوری لیاپانوف است که برای سیستم‌های غیرخطی به کار می‌رود، ایده این روش، گسترش تابع لیاپانوف از یک سیستم ساده به سیستم‌هایی شامل، متغیرهای حالت اضافه و به طور همزمان طراحی کنترل پس‌خورده برای تضمین پایداری است. دلیل نام‌گذاری گام به عقب برای این روش، به خاصیت بازگشتی آن در طراحی کنترل باز می‌گردد، جایی که یک قانون کنترل برای تضمین پایداری سیستم ساخته می‌شود. روش گام به عقب، یک الگوریتم پله‌ای را دنبال نموده، برای دسته‌ای از سیستم‌ها به نام سیستم‌های پس‌خورده صریح کاربرد دارد که اولین بار توسط کرس‌تیک و همکارانش در سال ۱۹۹۵ ارائه شد [۱۰]. در واقع زمانی که فرآیندهای کنترل شده جزء دسته‌ای از سیستم‌های قابل تبدیل به فرم پس‌خورده صریح باشند، کنترلر طراحی شده بر مبنای این روش، مشخصات تعقیب و تنظیم محلی یا کلی را تضمین می‌کند، یکی از مهم‌ترین مزایای روش گام به عقب این است که قابلیت جلوگیری از حذف المان‌های غیرخطی کاربردی را دارد.

روش کنترل گام به عقب در رباتیک نیز، مورد توجه قرار گرفته است؛ که از آن جمله می‌توان به کنترل موقعیت و کنترل مسیر برای ربات‌های متحرک، کنترل ربات‌های انعطاف پذیر و ربات‌های موازی [۱۱-۱۲] اشاره کرد. در حوزه کنترل ردیابی مسیر برای بازوی ماهر ربات، در مرجع [۱۳]، روش پس‌خورده صریح به همراه کنترل‌کننده تطبیقی برای کنترل موقعیت سیستم غیرخطی ربات با سه درجه آزادی مورد استفاده قرار گرفته است. روش بکار رفته پایداری مجانبی و ردیابی موقعیت و سرعت مطلوب را تضمین نموده است. در مرجع [۱۴]، کنترل گام به عقب تطبیقی برای ربات با سه مفصل دورانی در حضور عدم قطعیت پارامتری و

کننده پایدار وضعیت برای سیستم غیرخطی فوق طراحی و پایداری آن توسط تئوری لیاپانوف اثبات شده‌است. سپس با توجه عدم قطعیت‌های مربوط به پارامترهای جرم و اینرسی، با اضافه کردن کنترل‌کننده تطبیقی، تخمین پارامترها صورت گرفته‌است. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی برای روش‌های گام به عقب انتگرالی و گام به عقب تطبیقی با صرف نظر از اغتشاش خارجی و سپس با اعمال اغتشاش خارجی، ارائه شده‌است.

۲- دینامیک ربات

ربات اسکرای مورد مطالعه، دارای ۴ درجه آزادی شامل سه درجه مفصل لولایی و یک درجه مفصل کشویی مطابق شکل ۱ است، موقعیت تعمیم‌یافته برای مفصل i ام با q_i نشان داده می‌شود. این موقعیت برای مفصل‌های لولایی برحسب رادیان و برای مفصل کشویی، برحسب متر بیان می‌شود. برای بررسی سینماتیک ربات، از روش استاندارد دنویت-هارتبرگ استفاده شده‌است. بر اساس روش فوق، دستگاه-های مختصاتی مطابق شکل ۱ در نظر گرفته می‌شود. با توجه این شکل، دستگاه مختصات $x_0y_0z_0$ به عنوان دستگاه مرجع و دستگاه $x_3y_3z_3$ به عنوان دستگاه مفصل آخر در نظر گرفته شده‌است.

بنابراین معادلات حرکت ربات اسکرای ۴ درجه آزادی با فرض عدم وجود انعطاف پذیری در مفاصل، با استفاده از روش لاگرانژ به صورت رابطه (۱) به دست می‌آید.

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

که در معادله (۱) داریم:

$q \in R^n$: بردار مختصات تعمیم یافته مفاصل و n نماینگر درجات آزادی سیستم است (در این تحقیق $n=4$ می‌باشد).

$\dot{q} \in R^n$: بردار مختصات تعمیم یافته سرعت مفاصل

$D(q)$: ماتریس اینرسی مثبت معین و قطری $n \times n$

$C(q, \dot{q})$: ماتریس $n \times n$ ناشی از اثر نیروهای کوریولیس و

گریز از مرکز

$G(q)$: بردار نیروی ناشی از گرانش

τ : بردار تعمیم یافته گشتاور مفاصل

همچنین، دینامیک محرک‌ها که شامل موتورهای DC می‌باشند، به صورت رابطه (۲) بدست می‌آید [۱۶، ۱۳]:

$$L\dot{I} + RI + K_m\dot{q} = V \quad (2)$$

اغتشاش، مورد بررسی قرار گرفته‌است و در مرجع [۱۵]، برای دستیابی به ردیابی دقیق مسیر ربات اسکرای ۲ درجه آزادی، روش فازی تطبیقی گام به عقب ارائه و مقاوم بودن، قابلیت حذف اغتشاشات و ردیابی خوب مسیر از مزایای روش استفاده شده در این تحقیق است. در مرجع [۱۶]، اعمال روش کنترل گام به عقب انتگرالی برای ربات با پنج مفصل دورانی برای یک سیستم معین از نظر پارامتری، مورد مطالعه قرار گرفته و کنترل‌کننده مناسب برای تحقق اهداف ردیابی مسیر، ارائه شده‌است.

در مرجع [۱۷]، کنترلر گام به عقب فازی-عصبی، برای بازوی ربات دو لینکی ارائه و عملکرد مناسب روش فوق، نشان داده شده‌است. در مرجع [۱۸]، کنترلر گام به عقب، فازی بر اساس الگوریتم تطبیقی برای بازوی ربات طراحی و عملکرد مناسب آن در حضور عدم قطعیت و اغتشاشات خارجی به اثبات رسیده‌است. در مرجع [۱۹]، عملکرد کنترلر گام به عقب، فازی تطبیقی برای ربات دو لینکی به منظور ردیابی مسیر در حضور عدم قطعیت پارامتری و اغتشاش ارزیابی شده و پایداری مجانبی آن به اثبات رسیده‌است.

در تحقیقات گذشته، دینامیک ربات اسکرای ۴ درجه آزادی استخراج شده‌است؛ اما در این مقاله با لحاظ کردن دینامیک محرک‌ها معادلات به فرم پسخور صریح استخراج شده‌است. در ادامه با داشتن فرم پسخور صریح، کنترلر گام به عقب طراحی گردیده‌است. سپس با تبدیل دینامیک سیستم به فرم پارامتری، کنترلر گام به عقب تطبیقی به منظور تخمین پارامترهای نامعلوم طراحی می‌شود. در انتها با وارد کردن اغتشاش خارجی، نتایج مورد ارزیابی قرار گرفت.

لذا موضوع مورد بررسی در این تحقیق، سه تفاوت اصلی و نوآوری نسبت به دیگر تحقیقات در حوزه کنترل ربات اسکرای ۴ درجه آزادی دارد: اول لحاظ کردن دینامیک محرک‌ها در معادلات دینامیکی، دوم ارائه روش کنترل گام به عقب تطبیقی برای ربات اسکرای ۴ درجه آزادی و سوم، بررسی عملکرد کنترلر در حضور اغتشاش خارجی و عدم قطعیت پارامتری در حوزه رباتیک.

در این مقاله، به منظور کنترل ردیابی مسیر توسط یک ربات اسکرای دارای سه مفصل دورانی و یک مفصل کشویی، ابتدا با استفاده از روش گام به عقب انتگرالی، یک کنترل-

۳- بیان فضای حالت

جهت تبیین روش کنترل بر مبنای گام به عقب، نیاز به فرم فضای حالت است؛ لذا برای نوشتن فرم فضای حالت سیستم دینامیکی، بردارهای حالت (۶-۹) در نظر گرفته می‌شود:

$$\xi = [\xi_1, \xi_2]^T \quad (6)$$

$$\xi_3 = [I_1, I_2, I_3, I_4] \quad (7)$$

$$\xi_1 = [q_1, q_2, q_3, q_4] \quad (8)$$

$$\xi_2 = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, \dot{q}_4] \quad (9)$$

که ξ_1, ξ_2 و ξ_3 به ترتیب، بردارهایی متشکل از موقعیت، سرعت و جریان موتور، برای مفاصل ربات می‌باشند؛ بنابراین، معادلات فضای حالت با توجه به معادلات (۵) تا (۹) به صورت رابطه (۱۰) بدست می‌آید:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = \begin{bmatrix} \xi_2 \\ -D^{-1}C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - D^{-1}G(\xi_1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -D^{-1}K_r \end{bmatrix} \xi_3 \\ \dot{\xi}_3 = -L^{-1}R\xi_3 - L^{-1}k_m\xi_2 + L^{-1}V \end{cases} \quad (10)$$

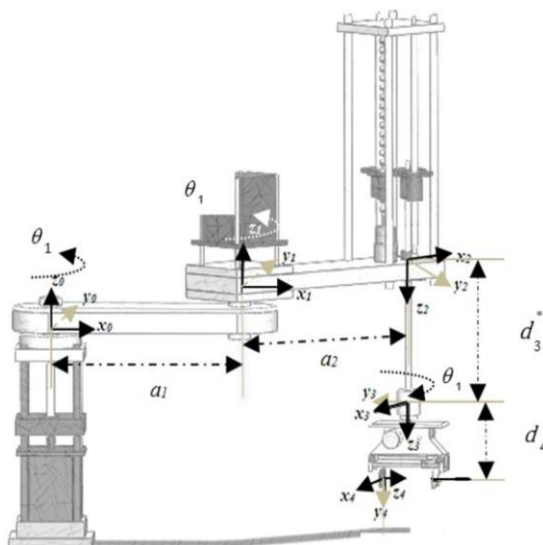
می‌توان معادلات (۱۰) را به شکل کلی رابطه (۱۱) نوشت:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = f(\xi) + g(\xi)\xi_3 \\ \dot{\xi}_3 = f_1(\xi, \xi_3) + g_1(\xi, \xi_3)V \end{cases} \quad (11)$$

که در معادله (۱۱) داریم: $\xi \in R^{2n}$ ، $\xi_3 \in R^n$ و $V \in R^n$.

۴- روش گام به عقب انتگرالی

گام به عقب، یک روش طراحی کنترل بازگشتی بر مبنای تئوری لیپانوف به صورت نظام‌مند است. ریشه آن در روش خطی سازی پس‌خورده است که در سال ۱۹۸۰ ارائه شد [۱۶]. در روش فوق روابط بازگشتی، قوانین کنترل بازخورد، توابع لیپانوف، توابع ذخیره‌سازی و توابع پایدارسازی در یک روش سیستماتیک معرفی می‌شوند [۲۰]. طراحی گام به عقب غیر خطی، به شدت به روش خطی سازی پس‌خورده نزدیک و وابسته است، با این تفاوت که روش خطی‌سازی پس‌خورده، تمام عبارتهای غیرخطی را حذف می‌کند؛ اما می‌توان نشان داد، هنگامی که از روش‌های کنترل گام به عقب استفاده می‌شود، طراح می‌تواند با قابلیت انعطاف بالا المان‌های غیرخطی خوب را از بد جدا کرده، اثر المان‌های ناپایدار کننده سیستم را حذف نماید. به عنوان مثال، می‌توان با اضافه کردن ترم میراکننده غیرخطی به سیستم، در روش گام به عقب انتگرالی، سیستم را در برابر عدم قطعیت‌ها مقاوم کرد. این موضوع در سیستم‌های کنترلی در صنعت اهمیت



شکل ۱- طرح بازوی ماهر اسکارا

که در معادله (۲) داریم:

L : ماتریس $n \times n$ مثبت معین ثابت و قطری که به عنوان اندوکتانس الکتریکی استفاده می‌شود
 R : ماتریس $n \times n$ مثبت معین ثابت و قطری مقاومت الکتریکی

I : بردار $n \times 1$ جریان مفاصل

K_m : ماتریس $n \times n$ مثبت معین ثابت قطری از ضرایب محرک

V : بردار $n \times 1$ ولتاژ ورودی آرمیچر

رابطه بین بردار گشتاور مفاصل و بردار جریان آرمیچر به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود [۱۳]:

$$\tau = K_r I \quad (3)$$

که در معادله (۳) داریم:

K_r : ماتریس $n \times n$ مثبت معین و قطری است که بیانگر ضریب تبدیل الکترومکانیکی بین جریان و گشتاور بازو است.

با جایگذاری معادله (۳) در (۱)، معادله (۴) بدست می‌آید:

$$K_r I = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (4)$$

براساس مرجع [۱۳، ۱۶] و با توجه به فرمول‌های (۲) و (۴)، شکلی دیگر از معادله دینامیکی به صورت رابطه (۵) بدست می‌آید:

$$\begin{cases} D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = K_r I \\ LI + RI + K_m \dot{q} = V \end{cases} \quad (5)$$

با توجه به رابطه (۱۵)، رابطه (۲۰) برای محاسبه $\frac{\delta\alpha_0(\xi)}{\delta\xi}$

بدست می‌آید:

$$\frac{\delta\alpha_0(\xi)}{\delta\xi} = \frac{\delta}{\delta\xi} ((\xi_3 - \xi_{3d}) - (\xi_2 - \xi_{2d})) \\ = \{ [0]_{n \times n}, [-1]_{n \times n} \} \quad (20)$$

با جایگذاری ξ و ξ_3 از (۱۰) و $\frac{\delta\alpha_0(\xi)}{\delta\xi}$ از (۲۰) در رابطه

(۱۹)، رابطه (۲۱) برای مشتق تابع لیاپانوف، بدست می‌آید:

$$\dot{V}(\xi, \xi_3) = (\xi_1 - \xi_{1d})^T (\xi_2 - \xi_{2d}) + \\ y^T (-L^{-1}(R\xi_3 + k_m \xi_2) + L^{-1}V - \xi_{3d} + \\ D^{-1}(K_r \xi_3 - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - G(\xi_1))) \quad (21)$$

برای اینکه پایداری مجانبی در سیستم ایجاد شود، باید مشتق تابع لیاپانوف در رابطه (۲۱)، منفی معین باشد؛ لذا اگر رابطه (۲۲) برقرار باشد، پایداری مجانبی سیستم برقرار می‌شود:

$$\dot{V}(\xi, \xi_3) \leq -y^T \cdot y \quad (22)$$

با توجه به رابطه‌های (۲۱) و (۲۲)، باید رابطه (۲۳) برقرار باشد:

$$-y^T \cdot y - (\xi_1 - \xi_{1d})^T (\xi_2 - \xi_{2d}) \geq \\ y^T (-L^{-1}(R\xi_3 + k_m \xi_2) + L^{-1}V - \xi_{3d} + \\ D^{-1}(K_r \xi_3 - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - G(\xi_1))) \quad (23)$$

از طرفی با توجه به رابطه‌های (۱۲) و (۱۵)، رابطه (۲۴) بدست می‌آید:

$$y = (\xi_2 - \xi_{2d}) \quad (24)$$

با جایگذاری رابطه (۲۴) در (۲۳)، رابطه (۲۵) بدست می‌آید:

$$-y^T (y + (\xi_1 - \xi_{1d})) \geq \\ y^T (-L^{-1}(R\xi_3 + k_m \xi_2) + L^{-1}V - \xi_{3d} + \\ D^{-1}(K_r \xi_3 - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - G(\xi_1))) \quad (25)$$

معادله (۲۵) را می‌توان به شکل رابطه (۲۶) بازنویسی کرد:

$$-((\xi_2 - \xi_{2d}) + (\xi_1 - \xi_{1d})) \geq \\ (-L^{-1}(R\xi_3 + k_m \xi_2) + L^{-1}V - \xi_{3d} + \\ D^{-1}(K_r \xi_3 - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - G(\xi_1))) \quad (26)$$

و با توجه به روابط (۱۱، ۱۰)، رابطه (۲۷) برقرار است:

$$g_1(\xi, \xi_3) = L \neq 0 \quad (27)$$

زمانی که g_1 به ازای تمام مقادیر ξ_1 ، ξ_2 و ξ_3 غیر تکین باشد، قانون کنترل (۲۸) برای اعمال در معادلات سیستم (۱۰) پیشنهاد می‌شود:

فراوانی دارد؛ چون حذف تمام المان‌های غیرخطی احتیاج به مدل دقیق سیستم داشته و دست یافتن به مدل دقیق سیستم، در عمل کار بسیار دشواری است [۱۶، ۲۰].

۵- قانون کنترلی به روش گام به عقب برای ردیابی مسیر توسط ربات

براساس مرجع [۱۶]، برای اطمینان از پایداری مجانبی سیستم در روش گام به عقب، نیاز به در نظر گرفتن یک خروجی، تثبیت یک تابع ذخیره‌ساز و به‌دست آوردن تابع پایدارساز معتبر برای هر مرحله است. در سیستم مورد مطالعه و در بخش به‌دست آوردن تابع پایدارساز معتبر، فقط یک مرحله وجود دارد که در آن، هدف پیدا کردن قانون کنترل ولتاژ V برای ایجاد پایداری سیستم در معادله (۵) است. با در نظر گرفتن خروجی به‌صورت معادله (۱۲):

$$y = \beta(\xi_3 - \xi_{3d}) - \alpha_0(\xi) \quad (12)$$

و در نظر گرفتن تابع لیاپانوف به‌صورت معادله (۱۳)،

$$V(\xi, \xi_3) = W(\xi) + \frac{1}{2} y^T y \quad (13)$$

تابع ذخیره‌سازی به‌صورت معادله (۱۴) در نظر گرفته می‌شود:

$$W(\xi) = \frac{1}{2} (\xi_1 - \xi_{1d})^T (\xi_1 - \xi_{1d}) \quad (14)$$

و بطوری که تابع پایدارساز برابر رابطه (۱۵) باشد،

$$\alpha_0(\xi) = \beta(\xi_3 - \xi_{3d}) - (\xi_2 - \xi_{2d}) \quad (15)$$

با انتخاب $\beta = I_{n \times n}$ و با استفاده از معادله (۱۳) مشتق تابع لیاپانوف توسط رابطه (۱۶) بدست می‌آید:

$$\dot{V}(\xi, \xi_3) = \dot{W} + y^T \dot{y} \quad (16)$$

که در رابطه (۱۶) \dot{W} و \dot{y} توسط روابط (۱۷) و (۱۸) تعریف شده‌است:

$$\dot{W} = (\xi_1 - \xi_{1d})^T (\xi_2 - \xi_{2d}) \quad (17)$$

$$\dot{y} = \beta(\dot{\xi}_3 - \dot{\xi}_{3d}) - \frac{\delta\alpha_0(\xi)}{\delta\xi} \dot{\xi} \quad (18)$$

با جایگذاری رابطه (۱۷) و (۱۸) در معادله (۱۶)، رابطه (۱۹) بدست می‌آید:

$$\dot{V}(\xi, \xi_3) = (\xi_1 - \xi_{1d})^T (\xi_2 - \xi_{2d}) + \\ y^T \left(\dot{\xi}_3 - \dot{\xi}_{3d} - \frac{\delta\alpha_0(\xi)}{\delta\xi} \dot{\xi} \right) \quad (19)$$

بخش ۶-۱ توضیح داده می‌شود.

$$D(\xi_1)\xi_2^* + C(\xi_1, \xi_2)\xi_2^* + G(\xi_1) = Y(\xi_1, \xi_2, \xi_2^*, \xi_2^*)p \quad (34)$$

۶-۱- تخمین پارامترها

با توجه به مدل دینامیکی (۱)، تخمین پارامترها با روش تطبیقی مستقیم و بر پایه استراتژی محاسبه جریان مطلوب بدست می‌آید، بنابراین جریان مطلوب به شکل رابطه (۳۵) تعریف می‌شود:

$$\xi_{3d} = K_r^{-1}\hat{Y}p - K_d\varepsilon \quad (35)$$

که در رابطه (۳۵)، $\hat{Y}p$ برابر رابطه (۳۶) است:

$$\hat{Y}p = D(\xi_1)\xi_2^* + C(\xi_1, \xi_2)\xi_2^* + G(\xi_1) \quad (36)$$

که برای سیستم مورد مطالعه بصورت $p = [p_1, p_2, \dots, p_{10}]$ بوده، در ادامه تعریف خواهد شد. برای بدست آوردن قانون تطبیق، تابع لیاپانوفی با توجه به رابطه (۳۷) پیشنهاد می‌شود:

$$V = \frac{1}{2}(\varepsilon^T D(\xi_1)\varepsilon + \tilde{p}^T \Gamma^{-1}\tilde{p}) \quad (37)$$

که در رابطه (۳۷)، $\Gamma = [\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{10}]$ ماتریس مثبت معین، برداری 10×1 از خطای تخمین پارامترهای p_i ، مطابق رابطه (۳۸) است.

$$\tilde{p} = p - \hat{p} \quad (38)$$

با توجه به رابطه (۳۷) و مثبت معین بودن Γ و D ، تابع لیاپانوف V مثبت معین خواهد بود. مشتق تابع لیاپانوف فوق نسبت به زمان، به صورت رابطه (۳۹) بدست می‌آید.

$$\dot{V} = \varepsilon^T (D(\xi_1)\dot{\varepsilon} + \frac{1}{2}\dot{D}(\xi_1)\varepsilon) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1}\dot{\tilde{p}} \quad (39)$$

با توجه روابط حاکم در دینامیک ربات جمله $\varepsilon^T (\dot{D} - 2C)\varepsilon$ پادمقارن است؛ لذا عبارت $\dot{D}(q) - 2C(q, \dot{q})$ برابر صفر بوده، در نتیجه رابطه (۴۰) را می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{2}\varepsilon^T \dot{D}(\xi)\varepsilon = \varepsilon^T C(\xi_1, \xi_2)\varepsilon \quad (40)$$

با جایگذاری رابطه (۴۰) در (۳۹)، معادله (۴۱) حاصل می‌شود:

$$\dot{V} = \varepsilon^T (D(\xi_1)\dot{\varepsilon} + C(\xi_1, \xi_2)\varepsilon) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1}\dot{\tilde{p}} \quad (41)$$

با جایگذاری ε از رابطه (۳۲) و مشتق آن در (۴۱)، رابطه (۴۲) بدست می‌آید:

$$\dot{V} = \varepsilon^T (D(\xi_1)\dot{\xi}_2 - D(\xi_1)\xi_2^* + C(\xi_1, \xi_2)\xi_2^* - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2^*) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1}\dot{\tilde{p}} \quad (42)$$

$$V = L(L^{-1}(R\xi_3 + k_m\xi_2) + \xi_{3d} - (\xi_2 - \xi_{2d}) - (\xi_1 - \xi_{1d})) + D^{-1}(-K_r\xi_3 + C(\xi_1, \xi_2)\xi_2^* + G(\xi_1)) \quad (28)$$

پایداری سیستم حلقه بسته با روش بازگشتی گام به عقب تضمین می‌شود. با فرض اینکه تمام پارامترها شناخته شده و همچنین موقعیت، سرعت، شتاب و جریان مطلوب (I_d) معلوم باشند، با بازنویسی معادله (۵)، می‌توان آنرا به صورت رابطه (۲۹) نمایش داد:

$$\begin{cases} D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \\ K_r I_d + K_r \tilde{I} \\ L\dot{I} + RI + K_m \dot{q} = V \end{cases} \quad (29)$$

که در معادله (۲۹)، \tilde{I} خطای جریان و I_d جریان مطلوب است. در این حالت، رابطه اول از معادله (۲۹) می‌تواند به عنوان یک زیر سیستم دیده شود که دارای جمله اختلال $K_r \tilde{I}$ بوده، با جمله $K_r I_d$ کنترل می‌شود؛ بنابراین، با تبدیل مختصات به متغیرهای فضای حالت رابطه (۳۰) بدست می‌آید:

$$\xi_{3d} = K_r^{-1}[D(\xi)\xi_2^* + C(q, \dot{q})\xi_2^* + G(\xi) - K_d\varepsilon] \quad (30)$$

که در رابطه (۳۰) ξ_2^* و ε ، به صورت رابطه (۳۱) و (۳۲) تعریف می‌شوند:

$$\xi_2^* = \xi_{2d} - \lambda(\xi_1 - \xi_{1d}) \quad (31)$$

$$\varepsilon = \xi_2 - \xi_{2d} + \lambda(\xi_1 - \xi_{1d}) = \xi_2 - \xi_2^* \quad (32)$$

در روابط (۳۱-۳۲)، ε خطا و λ یک ماتریس $n \times n$ مثبت معین است. بردار متغیر حالت مطلوب و خطای آن به صورت رابطه (۳۳) ارائه می‌شود:

$$\tilde{\xi}_2 = \xi_2 - \xi_{2d}, \tilde{\xi}_1 = \xi_1 - \xi_{1d}, \tilde{\xi}_3 = \xi_3 - \xi_{3d} \quad (33)$$

۶- قانون گام به عقب تطبیقی برای ردیابی مسیر

زمانی که ربات حرکت می‌کند، پارامترهای جرم و اینرسی به طور دقیق مشخص نمی‌باشند؛ بنابراین پیدا کردن یک روش قابل اعتماد به منظور تخمین این پارامترها، امری ضروری است. این تخمین می‌تواند با توجه به روش تطبیقی مستقیم و یا تطبیقی غیرمستقیم انجام شود [۱۲]. در این مقاله از روش مستقیم استفاده شده، برای بدست آوردن این تخمین، نیاز است که معادله دینامیکی ربات در رابطه (۱) به فرم فضای حالت در رابطه (۳۴) نوشته شود که جزئیات آن در

$$K_d I_d = D(\xi) \xi_2^* + C(\xi_1, \xi_2) \xi_2^* + \quad (52)$$

$$G(\xi_1) = \hat{Y}(\xi_1, \xi_2, \xi_2^*, \xi_2^*) p$$

که در (۵۲)، $Y \in R^{n \times r}$ ماتریسی از توابع شناخته شده بر حسب مختصات تعمیم یافته و مشتقات مراتب بالاتر آن‌ها و $p \in R^r$ بردار r بعدی از پارامترهای ربات است؛ لذا p_i تا p_{10} توابعی از جرم (m_i)، اینرسی (I_i) و طول لینک‌ها (L_i) می‌باشند.

مدل دینامیکی ربات اسکرای مورد مطالعه را می‌توان به شکل ماتریسی، به صورت رابطه (۵۳) بیان کرد:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & 0 & D_{24} \\ 0 & 0 & D_{33} & 0 \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{d}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ G_{31} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & 0 & C_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{41} & C_{42} & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{d}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ G_{31} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (53)$$

در نتیجه برای نوشتن دینامیک ربات اسکارا به فرم رابطه (۳۴) و به منظور تخمین پارامترها، دینامیک ربات بر حسب پارامترهای ثابت به شکل روابط زیر نوشته می‌شود، پارامترهای ثابت فوق در جدول ۱ معرفی شده‌اند:

$$D_{11} = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 + 2p_7C_2 + p_8C_2$$

$$D_{12} = p_2 + p_4 + p_6 + p_7C_2 + \frac{p_8C_2}{2}$$

$$D_{14} = -p_{10}; D_{21} = p_2 + p_4 + p_6 + p_7C_2 + \frac{p_8C_2}{2}$$

$$D_{22} = p_2 + p_4 + p_6; D_{24} = -p_{10}; D_{33} = p_9$$

$$D_{41} = -p_{10}; D_{42} = -p_{10}; D_{43} = p_{10}; G_{31} = -gp_9$$

$$C_{11} = 0.5p_8q_{d2}S_2 - p_7q_{d2}S_2;$$

$$C_{12} = -0.5p_8S_2(q_{d1} + q_{d2}) - p_{10}(q_{d1} + q_{d2})$$

$$C_{21} = q_{d1}S_2(0.5p_8 + p_7);$$

جدول ۱- پارامترهای ربات

پارامترهای ۱ تا ۵	پارامترهای ۶ تا ۱۰
$p_1 = I_1$	$p_6 = a_2^2(m_3 + m_4)$
$p_2 = I_2 + I_3 + I_4$	$p_7 = a_1a_2(m_3 + m_4)$
$p_3 = a_1^2m_1$	$p_8 = a_1a_2m_2$
$p_4 = a_2^2m_2$	$p_9 = m_3 + m_4$
$p_5 = a_1^2(m_2 + m_3 + m_4)$	$p_{10} = I_4$

با توجه به روابط فوق و با توجه به رابطه (۵۳)، ماتریس Y^T به شکل زیر بدست می‌آید:

با توجه به رابطه اول معادله (۲۹)، می‌توان معادله (۴۳) را نوشت:

$$D(\xi_1) \xi_2^* + C(\xi_1, \xi_2) \xi_2^* + G(\xi_1) = K_r \xi_{3d} \quad (43)$$

و با در نظر گرفتن (۴۲) و (۴۳)، رابطه (۴۴) بدست می‌آید:

$$\dot{V} = \varepsilon^T (K_r \xi_{3d} - C(\xi_1, \xi_2) \xi_2^* - G(\xi_1) - D(\xi_1) \xi_2^* + C(\xi_1, \xi_2) \xi_2^* - C(\xi_1, \xi_2) \xi_2^*) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (44)$$

با ساده‌سازی رابطه (۴۴)، رابطه (۴۵) حاصل می‌شود،

$$\dot{V} = \varepsilon^T (K_r \xi_{3d} - G(\xi_1) - D(\xi_1) \xi_2^* - C(\xi_1, \xi_2) \xi_2^*) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (45)$$

با توجه به (۳۰) و (۴۵)، رابطه (۴۶) بدست می‌آید:

$$\dot{V} = \varepsilon^T (\tilde{D}(\xi_1) \xi_2^* + \tilde{C}(\xi_1, \xi_2) \xi_2^* + \tilde{G}(\xi_1) - K_d \varepsilon) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (46)$$

که در رابطه (۴۶) داریم:

$$\tilde{D} = \hat{D} - D, \quad \tilde{C} = \hat{C} - C, \quad \tilde{G} = \hat{G} - G$$

رابطه (۳۴) را در فرم خطای پارامتری می‌توان به صورت

رابطه (۴۷) نوشت:

$$\tilde{D}(\xi_1) \xi_2^* + \tilde{C}(\xi_1, \xi_2) \xi_2^* + \tilde{G}(\xi_1) = Y(\xi_1, \xi_2, \xi_2^*, \xi_2^*) \tilde{p} \quad (47)$$

با توجه به رابطه (۴۶) و (۴۷)، رابطه (۴۸) نتیجه می‌شود:

$$\dot{V} = \varepsilon^T [Y - K_d \varepsilon] + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} = -\varepsilon^T K_d \varepsilon + \tilde{p}^T [Y^T \varepsilon + \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}}] \quad (48)$$

برای آنکه \dot{V} در رابطه (۴۸) منفی معین باشد، باید رابطه (۴۹) برقرار باشد:

$$\tilde{p}^T [Y^T \varepsilon + \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}}] = 0 \quad (49)$$

لذا با توجه به رابطه (۴۹)، معادله (۴۸) به صورت (۵۰) تبدیل می‌شود.

$$\dot{V} = -\varepsilon^T K_d \varepsilon \leq 0 \quad (50)$$

رابطه (۵۰) نشان می‌دهد که با برقراری رابطه (۴۹)، مقدار \dot{V} منفی معین بوده، پایداری مجانبی برای سیستم برقرار خواهد شد. قانون تطبیق با استفاده از رابطه (۴۹)، به صورت رابطه (۵۱) بدست می‌آید:

$$\dot{\tilde{p}} = -\Gamma \hat{Y}^T \varepsilon \quad (51)$$

۶-۲- محاسبه ماتریس \hat{Y} و تخمین پارامترها

تخمین پارامترها با توجه به تعریف دینامیک سیستم در فضای مفصلی با توجه به رابطه (۵۲) انجام می‌شود:

حالت، بهره‌های کنترل‌کننده یعنی λ و K_d ماتریس‌هایی قطری با درایه‌های قطر اصلی ۱۰۰ در نظر گرفته شده‌اند. شکل ۲ تا ۴ به ترتیب، ردیابی موقعیت، خطای ردیابی موقعیت و مقادیر تلاش کنترلی لینک‌ها را در ۱۰ ثانیه برای کنترل‌کننده گام به عقب انتگرالی و شکل ۵ تا ۷، نتایج مشابه‌ای را برای کنترل‌کننده گام به عقب تطبیقی نشان می‌دهد. همانطور که از شکل‌های ۲ و ۵ مشاهده می‌شود، ردیابی موقعیت برای هر دو کنترلر گام به عقب انتگرالی و تطبیقی به خوبی انجام شده است و مقادیر خطای ردیابی موقعیت در شکل‌های ۳ و ۶، به مقادیر بسیار کمی محدود شده است. حالت دوم شبیه‌سازی، به ارزیابی کنترل‌کننده در حضور اغتشاش اختصاص داده شده است. جمله اغتشاشی به مقدار $V_d = 0.1 \times \sin(\pi.t/4)$ در سیستم لحاظ شده است. در این حالت، بهره‌های کنترل‌کننده یعنی λ و K_d ماتریس‌هایی قطری با درایه‌های قطر اصلی ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده‌اند. شکل ۸ تا ۱۰ به ترتیب، ردیابی موقعیت، خطای ردیابی موقعیت و مقادیر تلاش کنترلی لینک‌ها را در ۱۰ ثانیه برای کنترل‌کننده گام به عقب انتگرالی و شکل ۱۱ تا ۱۳ برای کنترل‌کننده گام به عقب تطبیقی نشان می‌دهد. همانطور که از شکل‌های ۸ و ۱۱ مشاهده می‌شود، ردیابی موقعیت برای هر دو کنترلر گام به عقب، انتگرالی و تطبیقی در حضور اغتشاش به خوبی انجام شده است و مقادیر خطای ردیابی موقعیت در شکل‌های ۹ و ۱۲ به مقادیر بسیار کمی محدود شده است. با مقایسه نمودارهای ۳ با ۶ و ۹ با ۱۲ مشخص می‌شود که روش گام به عقب تطبیقی از نظر خطای حالت ماندگار، عملکرد بهتری نسبت به گام به عقب انتگرالی داشته و ردیابی موقعیت با دقت بهتری انجام شده است.

$$Y^T = \begin{bmatrix} \ddot{q}_1^* \\ \ddot{q}_1^* + \ddot{q}_2^* \\ \ddot{q}_1^* \\ \ddot{q}_1^* + \ddot{q}_2^* \\ \ddot{q}_1^* \\ \ddot{q}_1^* + \ddot{q}_2^* \\ C_2(2\ddot{q}_1^* + \ddot{q}_2^*) - S_2 q_{d2}(\ddot{q}_1^* + \ddot{q}_2^*) - q_{d1} S_2 \ddot{q}_2^* \\ C_2(\ddot{q}_1^* + \ddot{q}_2^*/2) - 0.5 S_2 q_{d2}(\ddot{q}_1^* + \ddot{q}_2^*) - 0.5 q_{d1} S_2 \ddot{q}_2^* \\ 0 \\ 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \ddot{q}_1^* + \ddot{q}_2^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \ddot{q}_1^* + \ddot{q}_2^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \ddot{q}_1^* + \ddot{q}_2^* & 0 & 0 \\ \ddot{q}_1^* C_2 + q_{d1} S_2 \ddot{q}_1^* & 0 & 0 \\ \ddot{q}_1^* C_2 / 2 + 0.5 q_{d1} S_2 \ddot{q}_1^* & 0 & 0 \\ -\ddot{q}_4^* & 0 & -(\ddot{q}_1^* + \ddot{q}_2^* - \ddot{d}_3^*) \\ 0 & \ddot{d}_3^* - g & 0 \end{bmatrix}$$

۷- پارامترهای سیستم

پارامترهای سیستم شامل، جرم، اینرسی و طول اعضا و همچنین مقادیر پارامترهای مدارات موتور، در جدول ۲ و ۳ ارائه شده است:

جدول ۲- مشخصات ربات اسکارای طراحی شده

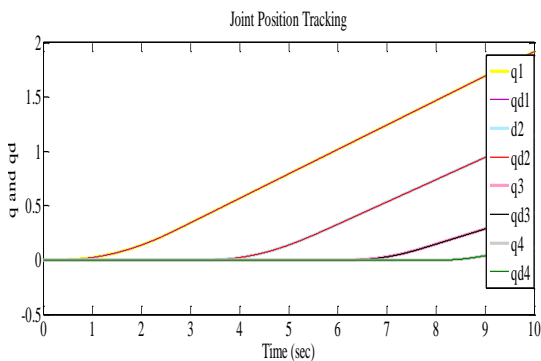
شماره رابطه	جرم ربات (kg)	طول ربات (m)
۱	$m_1=1.2$	$a_1=0.35$
۲	$m_2=1.16$	$a_2=0.37$
۳	$m_3=0.56$	d_3 =متغیر
۴	$m_4=0.02$	$d_4=0.04$

جدول ۳- پارامترهای الکتریکی

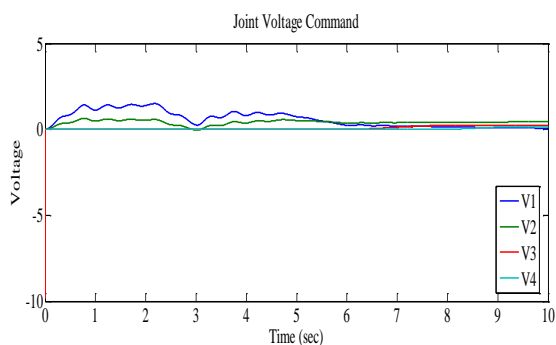
K_m (V.s)	K_r (V.s)	R (ohm)	L (V.s/A)
۱.۶	۲.۱۲۴	۰.۲۶	۰.۰۱

۸- نتایج شبیه‌سازی

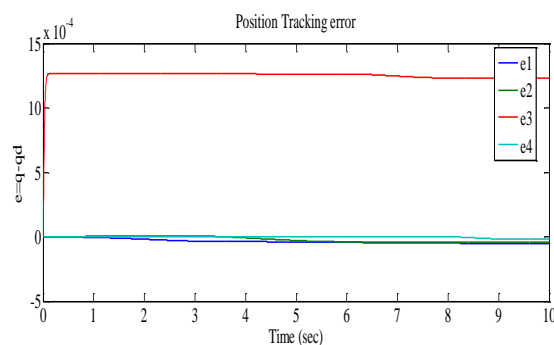
شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه به دو حالت تقسیم شده است، حالت اول شبیه‌سازی، مربوط به ردیابی مسیر توسط ربات است، زمانی که هیچ اغتشاشی وجود ندارد. در این



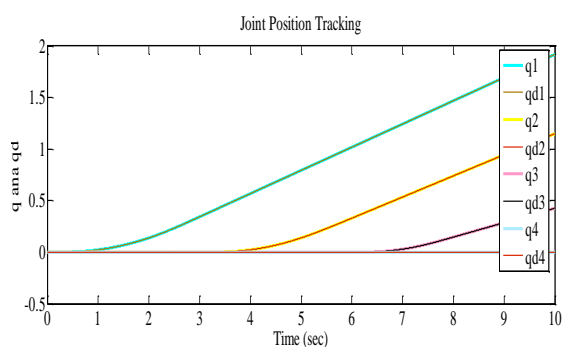
شکل ۲- ردیابی مسیر مفاصل کنترل‌کننده انتگرالی بخش اول



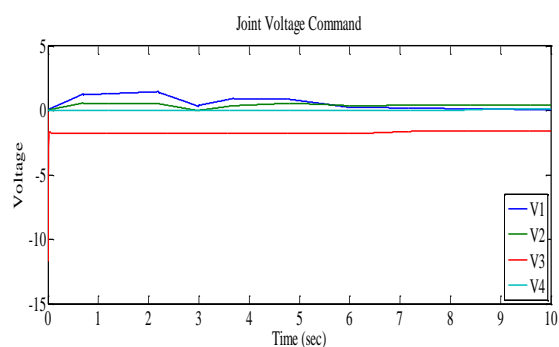
شکل ۷- ولتاژ مفاصل کنترل کننده تطبیقی حالت اول



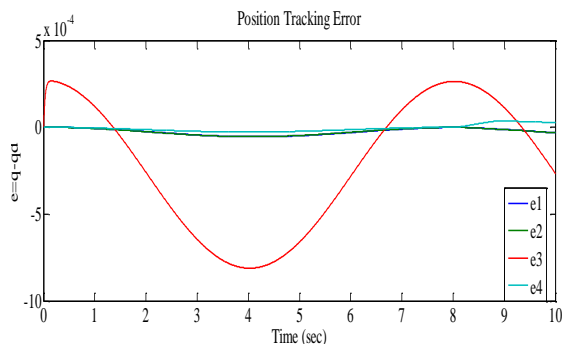
شکل ۳- خطای ردیابی مسیر کنترل کننده انتگرالی حالت اول



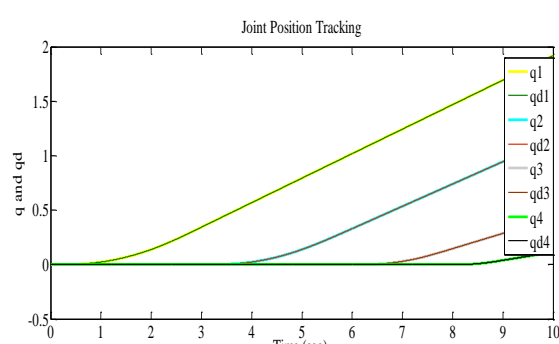
شکل ۸- ردیابی مسیر مفاصل کنترل کننده انتگرالی حالت دوم



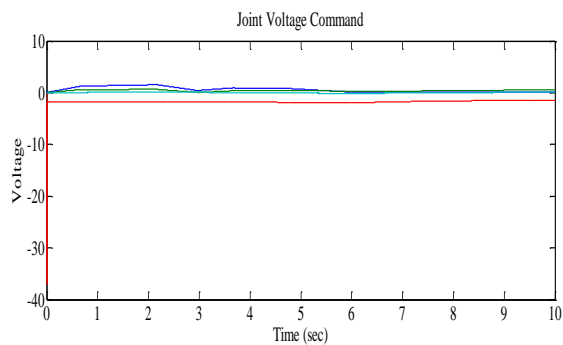
شکل ۴- ولتاژ مفاصل کنترل کننده انتگرالی حالت اول



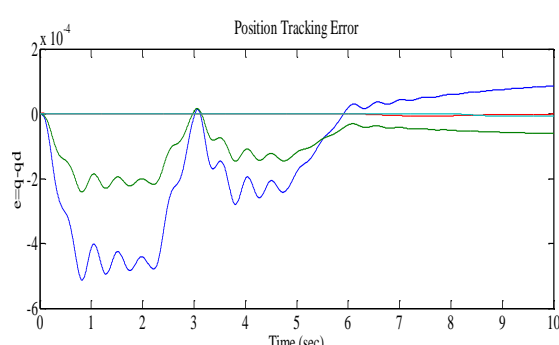
شکل ۹- خطای ردیابی مسیر کنترل کننده انتگرالی حالت دوم



شکل ۵- ردیابی مسیر مفاصل کنترل کننده تطبیقی حالت اول



شکل ۱۰- ولتاژ مفاصل کنترل کننده انتگرالی حالت دوم



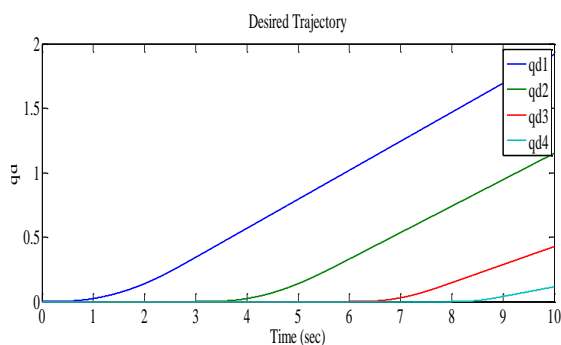
شکل ۶- خطای ردیابی مسیر کنترل کننده تطبیقی حالت اول

پارامترهای جرم و اینرسی به منظور بالا بردن مقاومت کنترلر در برابر عدم قطعیت‌های پارامتری در طراحی کنترلر اضافه شد، خطای کمتر و تعقیب بهتر در این روش، نسبت به روش گام به عقب انتگرالی محقق شده است. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که هیچگونه ناپایداری در نتایج شبیه‌سازی وجود نداشته و در مقایسه با روش کنترلی مد لغزشی، پدیده چترینگ (وزوز) در نمودارها مشاهده نمی‌شود که این مورد، یکی از مزایای کنترلر گام به عقب نسبت به کنترلر مد لغزشی است؛ بنابراین با توجه به نتایج شبیه‌سازی می‌توان نتیجه گرفت که روش کنترلر گام به عقب برای سیستم‌های غیرخطی‌ای که به فرم پس‌خورد صریح هستند، حتی در حضور عدم قطعیت و اغتشاش نیز، دارای دقت بسیار خوبی است.

جهت اعتبارسنجی، نتایج تحقیق حاضر با نتایج مرجع [۱۳] و مراجع مشابه دیگر مقایسه شده است. به طور خلاصه با توجه به نتایج شبیه‌سازی در تحقیق حاضر و مقایسه آن با تحقیقات در مراجع فوق که از روش گام به عقب به منظور ردیابی مسیر ربات استفاده کرده‌اند، مشاهده می‌شود که ردیابی مسیر با دقت خوبی به انجام رسیده است.

۹- پیوست

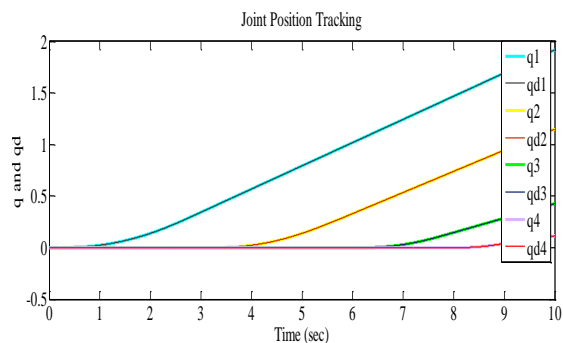
مسیر مطلوب بازوی ربات در شکل شماره ۱۴ نمایش داده شده است.



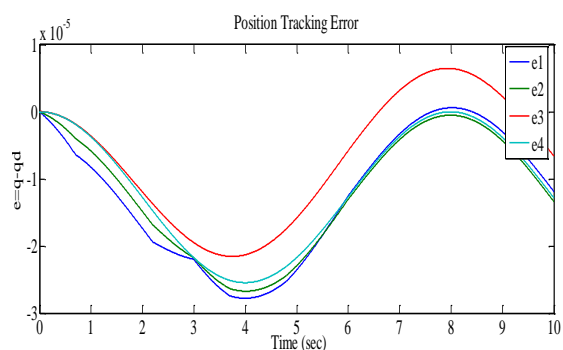
شکل ۱۴- مسیر مطلوب رابط‌های ۱ تا ۴

۱۰- نتیجه گیری

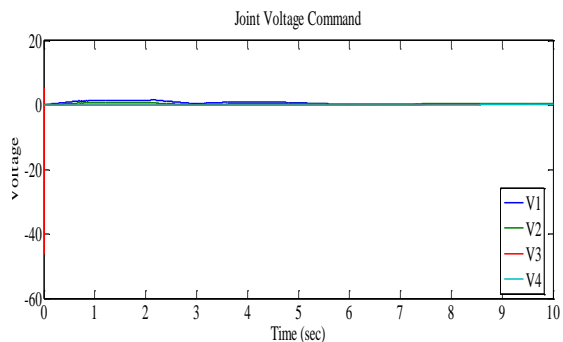
با توجه به دینامیک غیرخطی حاکم بر معادلات حرکت ربات، در این مقاله برای کنترل یک ربات اسکرای ۴ درجه آزادی در حضور نامعینی از روش گام به عقب استفاده شد. از آنجایی



شکل ۱۱- ردیابی مسیر مفاصل کنترل کننده تطبیقی حالت دوم



شکل ۱۲- خطای ردیابی مسیر کنترل کننده تطبیقی حالت دوم



شکل ۱۳- ولتاژ مفاصل کنترل کننده تطبیقی حالت دوم

به طور خلاصه با مشاهده نتایج شبیه‌سازی می‌توان دقت بالای روش کنترلی گام به عقب را مشاهده کرد. با توجه به نمودارهای ارائه شده مشاهده می‌شود که هر دو کنترلر طراحی شده توسط روش‌های گام به عقب انتگرالی و تطبیقی، تعقیب مسیر مطلوب را برای ربات به خوبی انجام داده‌اند. کنترلرهای طراحی شده توسط این دو روش در حضور اغتشاش نیز، عملکرد خوبی را از خود نشان داده‌اند. از آنجایی که در روش گام به عقب تطبیقی، تخمین

- [7] Zhou J, Wen C (2008) Adaptive backstepping control of uncertain systems. Springer.
- [8] Krstić M, Kanellakopoulos I, Kokotović P (1995) Nonlinear and adaptive control design. Wiley.
- [9] Astrom KJ, Wittenmark B (1995) Adaptive control. Addison-Wesley Publishing Company.
- [10] Li Y, Tong S, Li T (2013) Adaptive backstepping control for a single-link flexible robot manipulator driven DC motor. Hammamet 483-494.
- [11] Yang X, Sam GS (2014) Backstepping control and active vibration control for a free-flying space robot with rigid-flexible links by singular perturbation approach. IEEE International Conference on Information and Automation Hailar 164-169.
- [12] Wang L, Lu Z, Liu X, Liu K, Zhang D (2008) Adaptive control of a parallel robot via backstepping technique. Int J Syst Contr Comm 6(1): 84-96.
- [13] Nganga-Kouya D, Saad M, Lamarche L, Khairallah C (2001) Backstepping adaptive position control for robotic manipulators. Proc ACC, Arlington, 636-640.
- [14] Hu Q, Xu L, Zhang A (2012) Adaptive backstepping trajectory tracking control of robot manipulator. J Franklin Institute 349: 1087-1105.
- [15] Wei Y, Hou L, Sun Z, Jia F, Li (2013) Backstepping adaptive fuzzy scheme for SCARA GRB400 robot. Telkomnika 11(8): 4229-4237.
- [16] Lotfazar A, Eghtesad M, Mohseni M (2003) Integrator backstepping control of a 5 dof robot manipulator with cascaded dynamics. IJE 16(4): 373-383.
- [17] Wai RJ (2014) Design of fuzzy-neural-network inherited backstepping control for robot manipulator including actuator dynamics. IEEE Trans on Fuzzy Systems 22(4): 709-722.
- [18] Piltan F, Sulaiman N, Jalali A, Siamak S, Nazari I (2011) Artificial Robust control of robot arm: design a novel SISO backstepping adaptive lyapunov based variable structure control. IJCAS 4(4): 91-110.
- [19] Wei Y, Zhang J, Hou L, Jia F, Chang Q (2013) Backstepping adaptive fuzzy control for two-link robot manipulator. Int J Comput Sci Issues 10(2): 303-308.
- [20] Harkegrad O (2001) Flight control design using backstepping. Ph.D Dissertation, Dept. of Elect. Eng, Linkopings Universitet, Linkoping, Sweden.
- که در عمل اغتشاشات و عدم قطعیت‌های مختلفی در سیستم وجود دارد، کنترلی طراحی شد که در برابر این عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات مقاوم باشد؛ بنابراین در این تحقیق، با استفاده از روش گام به عقب انتگرالی، یک کنترل‌کننده پایدار جهت ردیابی مسیر برای سیستم غیرخطی ربات اسکارا طراحی و پایداری آن بر مبنای تئوری لیاپانوف اثبات شد. برای غلبه بر عدم قطعیت پارامتری، با اضافه کردن کنترل-کننده تطبیقی، کنترل‌کننده گام به عقب تطبیقی برای سیستم مورد مطالعه طراحی شد. نتایج نشان داد که روش گام به عقب، ردیابی مسیر را در حضور عدم قطعیت پارامتری و اغتشاشات به خوبی انجام می‌دهد. علاوه بر این، مشاهده شد که هیچگونه ناپایداری در نتایج شبیه‌سازی وجود نداشته و در مقایسه با روش کنترلی مد لغزشی، پدیده چترینگ (وزوز) در نمودارها مشاهده نمی‌شود که این مورد، یکی از مزایای کنترل گام به عقب، نسبت به کنترل مد لغزشی است.

۱۱- مراجع

- [1] Nganga-Kouya D, Saad M, Lamarche L (2002) Backstepping adaptive hybrid force/position control for robot manipulators. Proceedings of the American Control Conf Anchorage 6(10): 4595-4600.
- [2] ZH Jiang, T Ishida (2007) Trajectory tracking control of industrial robot manipulators using a neural network controller. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics 2390-2395.
- [3] Urrea C, Kern J (2012) Modeling, simulation and control of a redundant SCARA-Type manipulator robot. Int J Adv Robotic Sy 9: 1-14
- [4] Ibrahim BSKK, Zargoun AMA (2014) Modelling and control of SCARA manipulator. PCS 42: 106-113.
- [5] Dessaint LA, Maarouf S, Bernard H, Kamal A, (1992) An adaptive controller for a direct-drive scara robot. IEEE T Ind Electron 105-111.
- [6] Rascon R, Rosas D, Moreno L (2013) Tracking and force control of a Scara robot under a constraint using sliding mode control. CNCA 604-609.