



کنترل گام به عقب تطبیقی برای گرفتن ایمن یک جسم توسط پنجه ربات

حسین حسین پور کلاته¹، حبیب احمدی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

* شاهرود، صندوق پستی 316، habibahmadif@shahroodut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 اردیبهشت 1394

پذیرش: 10 مرداد 1394

ارائه در سایت: 08 شهریور 1394

کلید واژگان:

کنترل گام به عقب تطبیقی

کنترل لغزش

عمل گرفتن

جسم

پنجه ربات

چکیده

این مقاله به مسئله گرفتن ایمن جسم توسط یک ربات با استفاده از روش کنترل گام به عقب می‌پردازد. با توجه به مانورهای ربات در طی حرکت امکان لغزش و افتادن جسم وجود دارد؛ لذا به منظور کنترل لغزش و ردیابی مسیرهای مطلوب در نظر گرفته شده از کنترل گام به عقب تطبیقی استفاده شده است. ابتدا معادلات دینامیکی ربات مورد مطالعه شامل بازوی مکانیکی با 3 مفصل دورانی، 1 مفصل کشویی و پنجه فک موازی به همراه دینامیک محرک‌های الکتریکی برای گرفتن یک جسم استخراج می‌شود. سپس، روش گام به عقب که یک تکنیک سیستماتیک بر پایه لیاپانوف است جهت طراحی این سیستم غیرخطی به کار گرفته می‌شود. به واسطه وجود عدم قطعیت‌های مختلف در این سیستم از جمله جرم و اینرسی ربات و جرم جسم نیاز است که کنترل کننده طراحی شده قابلیت مقابله با این عدم قطعیت‌ها را داشته باشد. از این رو، با استفاده از روش گام به عقب تطبیقی، یک کنترل کننده پایدار برای تخمین نامعینی‌های پارامتری برای سیستم مورد مطالعه طراحی می‌شود. آنالیز پایداری بر اساس نظریه لیاپانوف اثبات می‌شود. شبیه‌سازی جهت بررسی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی انجام می‌شود. نتایج نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی است.

Adaptive Backstepping Control for Safe Grasping of an Object by a Robotic Gripper

Hossein Hosseinpour Kalateh, Habib Ahmadi*

Department of Mechanical Engineering, University of Shahrood, Shahrood, Iran

* P.O.B. 316 Shahrood, Iran, habibahmadif@shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 08 May 2015
Accepted 01 August 2015
Available Online 30 August 2015

Keywords:

Adaptive Backstepping Control
Slip Control
Grasping
Object
Robot Gripper

ABSTRACT

This paper deals with the problem of safe grasping of an object. According to robot maneuvers during movement, the slipping or falling of the objects is possible. Here, an adaptive backstepping control method is used for controlling of slipping and tracking of desirable paths. First, the robot dynamics of grasping of an object including mechanical arm with three rotational joints, one prismatic joint, jaw gripper as well as dynamic of the electrical actuators is derived. Then, backstepping technique, which is a systematic approach based on Lyapunov theory, is applied for this nonlinear system. Because of existence of different uncertainties in this system such as mass and inertia of robot and object mass, it is required to design a controller to be able to cope with these uncertainties. Accordingly, a stable controller using adaptive backstepping control methodology is also designed to estimate of these parameters' uncertainties. Stability analysis is provided based on Lyapunov theory. Simulations are carried out to evaluate the performance of the proposed controller. Results show the effectiveness of the proposed control method.

1- مقدمه

شکستگی و یا تغییر شکل جسم، از سر خوردن آن جلوگیری کرده و به‌طور پایدار آن را جابجا کند.

یکی از راه‌های پیشگیری و کنترل لغزش رخ داده در دست ربات انسان‌نما و یا صنعتی راهبرد کنترل نیروست. مارک ترمبلی و همکارانش [1] در سال 1993، با استفاده از حسگر لمسی، لغزش را در مرحله اولیه شناسایی نموده و یک کنترل کننده ترکیبی نیرو - موقعیت به‌کار بردند که در راستای مماسی موقعیت و در راستای عمودی نیرو را کنترل می‌نماید. بعضی از سیستم‌ها نیز [2] بر مبنای استفاده از ویژگی‌های سیستم حسگری در

در کاربردهای صنعتی ربات مثل صنایع مونتاژ و غیرصنعتی مثل همیاری انسان در امور جاری روزمره، فرآیند جابجایی ایمن اجسام دارای اهمیت می‌باشد. این موضوع با توجه به مانورهای ربات در طی حرکت که امکان لغزش و افتادن جسم را به وجود می‌آورد، حائز اهمیت است. گرفتن و نگهداری اجسام ظریفی چون لیوان آب توسط پنجه ربات، مفهوم گرفتن ایمن را روشن می‌سازد. برای این منظور، وقتی ربات جسم را گرفته و جابجا می‌نماید، بایستی به طریقی مناسب و با اعمال حداقل نیرو برای اجتناب از

Please cite this article using:

H. Hosseinpour Kalateh, H. Ahmadi, Adaptive Backstepping Control for Safe Grasping of an Object by a Robotic Gripper, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 56-66, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مزایای روش گام به عقب این است که قابلیت جلوگیری از حذف المان‌های غیرخطی کاربردی را دارد.

روش کنترل گام به عقب در حوزه‌ی کنترل ردیابی مسیر برای بازوی ماهر ربات، نیز مورد توجه قرار گرفته است، در [12] روش پس‌خورد صریح به همراه کنترل کننده تطبیقی برای کنترل موقعیت سیستم غیرخطی ربات با سه درجه آزادی مورد استفاده قرار گرفته است. روش به کار رفته پایداری جانبی و ردیابی موقعیت و سرعت مطلوب را تضمین نموده است. در [13] روش گام به عقب تطبیقی برای ردیابی مسیر بازوی ماهر ربات در فضای کار و در حضور عدم قطعیت پارامتری و اغتشاش خارجی طراحی شده است. نتایج تحقیق فوق مقاوم بودن این روش کنترلی به منظور ردیابی مسیر در حضور عدم قطعیت مدل و اغتشاش خارجی متغیر با زمان را به اثبات رساند. در [14] برای دستیابی به ردیابی دقیق مسیر ربات اسکارای 2 درجه آزادی، روش فازی تطبیقی گام به عقب ارائه شده و مقاوم بودن، قابلیت حذف اغتشاشات، و ردیابی خوب مسیر از مزایای روش استفاده شده در این تحقیق می‌باشد. در [15]، اعمال روش کنترل گام به عقب انتگرالی برای ربات با پنج مفصل دورانی مورد مطالعه قرار گرفته و کنترل کننده مناسب برای تحقق اهداف ردیابی مسیر، ارائه شده است. در [16]، روش کنترلی شبکه‌ی فازی-عصبی مبتنی بر گام به عقب به منظور کنترل موقعیت ربات طراحی گردیده است. در این روش، چارچوب شبکه فازی-عصبی به تقلید از قانون کنترل گام به عقب طراحی شده است و در شبیه‌سازی ارائه شده برای ربات دولینکی عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. در [17]، کنترلر گام به عقب فازی براساس الگوریتم تطبیقی برای بازوی ربات طراحی شده و عملکرد مناسب آن در حضور عدم قطعیت و اغتشاشات خارجی بررسی شده است. در [18]، عملکرد کنترل کننده گام به عقب فازی تطبیقی برای ربات دو لینکی به منظور ردیابی مسیر در حضور عدم قطعیت پارامتری و اغتشاش ارزیابی شده و پایداری جانبی آن به اثبات رسیده است. در حوزه کنترل ربات به منظور گرفتن اجسام طراحی یک روش کنترل مقاوم برای ربات یک درجه آزادی با در نظر گرفتن دینامیک محرک و عدم قطعیت جسم و اپراتور به منظور گرفتن اجسام براساس روش گام به عقب طراحی شده و عملکرد آن، در حضور نامعینی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [19].

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که در حوزه گرفتن و مهار لغزش اجسام توسط ربات کمتر دینامیک محرک‌ها مورد توجه بوده است. همچنین روش کنترل گام به عقب برای سیستم رباتیک جهت گرفتن ایمن و انجام مانورهای متنوع تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است. لذا موضوع مورد بررسی در این تحقیق سه تفاوت اصلی و نوآوری نسبت به دیگر تحقیقات در حوزه گرفتن ایمن اجسام توسط یک ربات اسکارای مجهز شده به گریپر فک موازی دارد که در ادامه می‌آید. اولین مورد مربوط به لحاظ دینامیک محرک‌ها به دینامیک ربات اسکارا با 3 مفصل دورانی و 1 مفصل کشویی به همراه پنجه فک موازی می‌باشد که در ادامه با تبدیل آن‌ها به فرم پس‌خورد صریح قابلیت طراحی کنترل گام به عقب محقق می‌شود. دومین مورد استفاده از روش کنترل گام به عقب برای سیستم رباتیک جهت گرفتن ایمن و انجام مانورهای متنوع و طراحی کنترل کننده برای مهار لغزش جسم و جابه‌جایی آن توسط ربات به صورت همزمان با استفاده از رابطه بازگشتی گام به عقب و بر مبنای تئوری لیاپانوف بوده و پایداری آن به اثبات رسیده است و سومین مورد اضافه کردن کنترل کننده تطبیقی جهت تخمین پارامترهای نامعلوم ربات و جرم جسم، و اثبات پایداری آن توسط تئوری لیاپانوف می‌باشد که علاوه بر تخمین

شناسایی نیروها و کنترل لغزش طراحی شده‌اند. استفاده از کنترل لغزش براساس کنترل نیرو به این‌جا محدود نشد. پس از ارائه روش‌های کنترل هوشمند و از آن‌جا که کنترل کننده می‌تواند دارای قابلیت یادگیری از مشاهدات و تجربیات پیرامون خود باشد، تحقیقات در زمینه کنترل هوشمند زمینه کاری بسیاری از محققین شد. در این راستا فاتح راهبرد کنترل لغزش ساختار متغیر را برای گرفتن اجسام توسط نقطه نهایی ربات گسترش داده است [3] او برای این منظور از یک کنترل کننده ترکیبی متشکل از کنترل کننده فازی و تناسبی-انتگرالی برای دست ربات دوانگشتی با محرک موتور جریان مستقیم مغناطیس دائم استفاده می‌کند. در تحقیقی دیگر با اعمال کنترل کننده عصبی فازی، که به روش برگشت به عقب آموزش داده شده، به پنجه ربات این مهارت داده می‌شود که عملیات گرفتن را به‌درستی و بدون لغزش و یا صدمه دیدن جسم انجام دهد [4]. در ادامه روش‌های به کار رفته برای کنترل لغزش، بعضی از محققین در طرح خود از یک کنترل کننده چند حالتی استفاده نموده‌اند تا بتواند شرایط واقعی تر لغزش بین جسم و پنجه را با توجه به شرایط اصطکاکی هر فاز، شبیه‌سازی نمایند [5,6]. دی انگبرگ و جی میک، پس از مطالعه و اعمال کنترل کننده‌های مختلف نیرو و موقعیت بر روی دست مصنوعی دوانگشتی یک درجه آزادی، یک الگوریتم پیشگیری از لغزش تطبیقی طراحی کرده‌اند [7]. احمدی و همکاران [8] در یک ربات اسکارا به همراه پنجه فک موازی با در نظر گرفتن مدل کامل اصطکاک به منظور جبران لغزش و تضمین رفتار حلقه بسته مطلوب، از کنترل گشتاور محاسبه شده استفاده کردند.

گروهی از محققین طراحی کنترل کننده را در مطالعات خود بر مبنای تئوری لیاپانوف و قضایای مربوطه به انجام رسانده‌اند. تئوری تابع لیاپانوف به عنوان ابزاری قدرتمند برای کنترل غیرخطی و همچنین خطی شناخته می‌شود؛ در عین حال استفاده از آن در طراحی کنترل کننده غیرخطی با یک چالش روبرو است و آن پیدا کردن تابع لیاپانوف مناسب است، پیدا کردن چنین تابعی اغلب به تجربه و دید فیزیکی طراح بر می‌گردد که با توجه به پیچیدگی‌های زیاد در دینامیک سیستم‌های غیرخطی اهمیت و دشواری این کار مشخص می‌شود. یکی از روش‌های طراحی کنترل کننده 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 که روش‌های دیگر با آن روبرو می‌باشند، حل نماید. این روش به طور موفقیت‌آمیزی برای طیف گسترده‌ای از مسائل غیرخطی به کار برده شده است [9-11]. روش گام به عقب یک روش طراحی کنترل سیستماتیک 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 پس‌خورد 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 و برای دسته‌ای از سیستم‌ها به نام سیستم‌های پس‌خورد صریح کاربرد دارد که اولین بار توسط کرسٹیک و همکارانش در سال 1995 ارائه شد. در واقع زمانی که فرآیندهای کنترل شده جزء دسته‌ای از سیستم‌های قابل تبدیل به فرم پس‌خورد صریح باشند، کنترل کننده طراحی شده بر مبنای این روش، مشخصات تعقیب و تنظیم محلی یا کلی را تضمین می‌کند، یکی از مهم‌ترین

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 (3) تعریف می‌شود [12]:

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

که در معادله (3) داریم:

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

با جای گذاری معادله (3) در (1)، معادله (4) بدست می‌آید:

$$K_r I = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) - J^T F \quad (4)$$

با توجه به فرمول‌های (2) و (4) معادله دینامیکی سیستم مشتمل بر ربات و محرک‌ها را می‌توان به صورت رابطه (5) نوشت:

$$\begin{cases} D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) - J^T F = \tau \\ L\dot{I} + RI + K_m \dot{q} = V \end{cases} \quad (5)$$

جهت تبیین روش کنترل برمبنای گام به عقب نیاز به فرم فضای حالت می‌باشد؛ لذا برای نوشتن فرم فضای حالت سیستم دینامیکی، بردارهای حالت مطابق رابطه‌های (6) تا (9) در نظر گرفته می‌شود:

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

$$\xi_3 = [I_1, I_2, I_3, I_4, I_5]^T \quad (7)$$

$$\xi_1 = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5]^T \quad (8)$$

$$\xi_2 = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, \dot{q}_4, \dot{q}_5]^T \quad (9)$$

که ξ_1, ξ_2 و ξ_3 به ترتیب بردارهایی متشکل از موقعیت، سرعت و جریان موتور، برای مفاصل ربات می‌باشند. بنابراین، معادلات حرکت (5) به شکل فضای حالت با توجه به معادلات (6) تا (9) به صورت رابطه (10) بدست می‌آید:

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

می‌توان معادلات (10) را به شکل کلی رابطه (11) 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 (11)، $\xi \in R^{2n}$ ، $\xi_3 \in R^n$ و $V \in R^n$ می‌باشد.

2-3- دینامیک جسم

از آنجا که ربات اسکارای مذکور جسمی را توسط پنجه گرفته و جابه‌جا می‌نماید، در طی مانور حرکتی امکان لغزش جسم با توجه به شتاب‌های اعمالی وجود دارد؛ لذا در لحظاتی از حرکت که جسم توسط پنجه گرفته و لغزشی ندارد، شتاب آن با شتاب پنجه ربات یکسان است و در لحظاتی که جسم در حال لغزش بین انگشتان است، شتاب آن در جهات لغزش از شتاب پنجه تبعیت نمی‌کند. در این وضعیت معادلات حرکت جسم را می‌توان با توجه به شرایط لغزش نوشت. در تحلیل و بررسی این مسئله فرض‌های ذیل برای سیستم مورد مطالعه در نظر گرفته شده است [8].

پارامترهای ربات مورد مطالعه، تخمین جرم جسم گرفته شده توسط ربات نیز به انجام می‌رسد.

2- مدل سازی سیستم

در این قسمت مدل سازی برای سیستم مورد مطالعه انجام شده است. به جهت فرض گرفتن ایمن جسم در تحقیق حاضر، امکان سرخوردن و لغزش جسم بر اثر وزن آن و یا تحریکی که ممکن است توسط مانور ربات در جابه‌جایی جسم در آن ایجاد شود وجود دارد. لذا دینامیک سیستم شامل یک ربات اسکارا و جسمی که قرار است توسط پنجه این ربات گرفته شده و در شرایط ایمن جابه‌جا شود، بررسی شده است. در ادامه دینامیک ربات و محرک‌ها و سپس دینامیک جسم ارائه شده است.

2-1- دینامیک ربات

ربات مطابق شکل 1 دارای سه مفصل لولایی، یک مفصل کشویی به همراه پنجه فک موازی می‌باشد. با توجه به [8]، معادلات حرکت دینامیکی ربات n لینکی در تعامل با جسم با فرض عدم وجود انعطاف پذیری در مفاصل توسط معادله (1) بیان می‌شود.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) - J^T F = \tau \quad (1)$$

که در معادله (1) داریم:

$q \in R^n$: بردار مختصات تعمیم یافته مفاصل و n نماینگر درجات آزادی سیستم می‌باشد (در این تحقیق $n=5$ 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

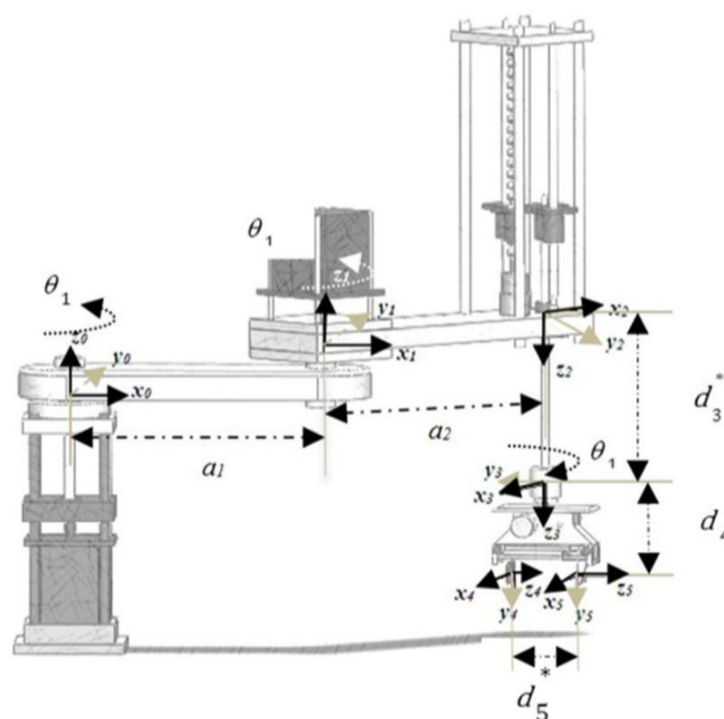
F : بردار عکس العمل نیروهای اعمالی از جسم به پنجه در مختصات $x_0 y_0 z_0$.

2-2- دینامیک محرک‌ها

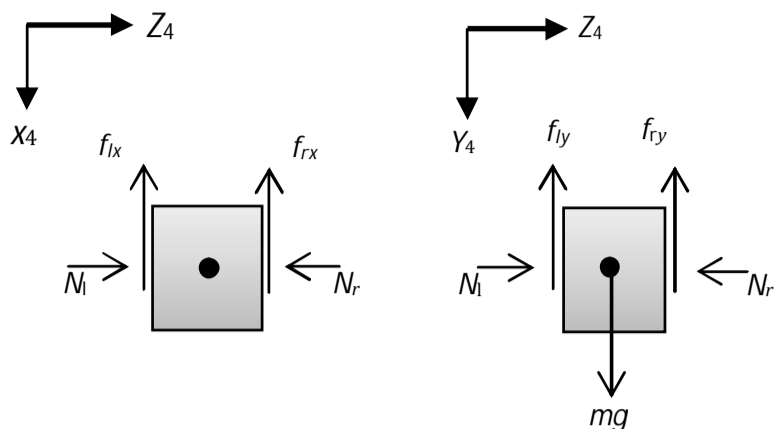
دینامیک محرک‌ها که شامل موتورهای DC می‌باشند، به صورت رابطه (2) بدست می‌آید [12,15]:

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

که در معادله (2) داریم:



شکل 1 طرح بازوی ماهر اسکارا به همراه پنجه فک موازی [8]

شکل 2 دیاگرام آزاد جسم در دو صفحه X_4-Z_4 و Y_4-Z_4 [8]

در رابطه (13)، K_f سختی معادل برای انعطاف پذیری سیستم مورد مطالعه بوده و q_{5_0} موقعیت اولیه انگشت است.

با توجه به این که هدف، نگهداری جسم با اعمال حداقل نیروست و جسم در معرض مانورهای مختلف ربات قرار می گیرد، وضعیت های مختلف حرکتی بین جسم و انگشتان ایجاد می شود. این وضعیت ها شامل رهایی جسم، آستانه لغزش بین جسم و انگشتان، لغزش بین آن ها و در نهایت عدم لغزش بین جسم و انگشتان است که بسته به هر کدام از این فازها نیروهای اصطکاکی مربوطه محاسبه خواهد شد [20].

4- کنترل برای مهار لغزش

در این بخش، ابتدا روش کنترلی گام به عقب تطبیقی برای اهداف ردیابی ارائه می شود. سپس برای محقق شدن گرفتن ایمن جسم، با توجه به روشی که در ادامه بیان شده است، مسیر مطلوب برای انگشت به دست آمده است.

4-1- روش گام به عقب

گام به عقب یک روش طراحی کنترلی بازگشتی بر مبنای تئوری لیاپانوف به صورت نظام مند می باشد. ریشه آن در روش خطی سازی پس خورد است که در سال 1980 ارائه شد [15]. در روش فوق روابط بازگشتی، قوانین کنترلی باز خورد، توابع لیاپانوف، توابع ذخیره سازی و توابع پایدارسازی در یک روش سیستماتیک معرفی می شوند [21]. طراحی گام به عقب غیرخطی به شدت به روش خطی سازی پس خورد نزدیک و وابسته می باشد، با این تفاوت که روش خطی سازی پس خورد تمام عبارات های غیرخطی را حذف می کند. اما می توان نشان داد، هنگامی که از روش های کنترلی گام به عقب استفاده می شود، طراح می تواند با قابلیت انعطاف بالا المان های غیرخطی خوب را از بد جدا کرده و اثر المان های ناپایدار کننده سیستم را حذف نماید. به عنوان مثال، می توان با اضافه کردن ترم میراکننده غیرخطی به سیستم، در روش گام به عقب انتگرالی، سیستم را در برابر عدم قطعیت ها مقاوم نمود. این موضوع در سیستم های کنترلی در صنعت اهمیت فراوانی دارد؛ چون حذف تمام المان های غیرخطی احتیاج به مدل دقیق سیستم داشته و دست یافتن به مدل دقیق سیستم، در عمل کار بسیار دشواری است [15,20].

4-2- قانون کنترلی به روش گام به عقب برای ردیابی مسیر ربات

بر اساس [15]، برای اطمینان از پایداری مجانبی سیستم در روش گام به عقب، نیاز به در نظر گرفتن یک خروجی، تثبیت یک تابع ذخیره ساز و به دست آوردن تابع پایدار ساز معتبر برای هر مرحله می باشد. در سیستم مورد مطالعه و در بخش به دست آوردن تابع پایدار ساز معتبر، فقط یک مرحله وجود دارد که در آن، هدف پیدا کردن قانون کنترل ولتاژ V برای ایجاد پایداری

1. اجسامی که توسط ربات گرفته می شوند مکعبی شکل هستند و گرفتن توسط انگشتان به صورت متقارن است.
2. فک ها همواره طوری جسم را مهار می کنند که مرکز جرم جسم در راستای مرکز هندسی سطح آن ها باشد.
3. ضریب اصطکاک بین جسم و انگشت ها معلوم و در دو طرف یکسان است.
4. توزیع نیروی اصطکاک در سطح فک یکنواخت فرض می شود.
5. جسم گرفته شده صلب است، اما تماس انگشت و جسم به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته می شود. این خاصیت الاستیک می تواند مجموعه ای از انعطاف پذیری موجود در انگشت و یا سطح تماس باشد که نهایتاً به عنوان یک فنر معادل سازی شده است.
6. نیروی اصطکاکی و عمودی بین جسم و انگشت توسط حسگرهای لمسی تعبیه شده در انگشتان قابل اندازه گیری و یا محاسبه است. با توجه به فرضیات فوق، دیاگرام آزاد جسم در دستگاه مختصات پنجه ربات در شکل 2 ترسیم می شود (شایان ذکر است دستگاه مختصات پنجه مطابق با شکل 1 دستگاه شماره 4 است). در این شکل نیروهای اعمالی در دو صفحه X_4-Z_4 و Y_4-Z_4 نشان داده شده است.

بردار $f = [f_{rx} + f_{lx} \quad f_{ry} + f_{ly} \quad N_r + N_l]^T$ بردار نیروی اعمالی از طرف پنجه به جسم در مختصات پنجه است. شایان ذکر است N_l و N_r نیروی عمودی اعمالی از طرف انگشتان بر سمت چپ و راست، f_{rx} و f_{lx} نیروهای اصطکاکی در نقاط تماس از سمت چپ و راست و در راستای X_4 و f_{ry} و f_{ly} نیروهای اصطکاکی در نقاط تماس بر سمت چپ و راست جسم در راستای محور Y_4 هستند.

با توجه به فرضیات فوق و سازوکار معرفی شده برای گرفتن جسم توسط پنجه ربات اسکارا، لغزش جسم بین انگشتان تنها در امتداد محورهای X_4 و Y_4 خواهد بود و متحمل چرخشی نخواهد شد؛ لذا می توان معادلات حرکت جسم را به صورت معادله (12) نمایش داد. شایان ذکر است که به دلیل سهولت در اندازه گیری مقدار لغزش رخ داده برای جسم معادلات حرکت آن در امتداد محورهای پنجه (البته در مختصات مرجع) نوشته شده است.

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_{obj} \\ \ddot{y}_{obj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_{rx} - f_{lx} \\ -f_{ry} - f_{ly} + W \end{bmatrix} \quad (12)$$

که در معادله فوق W و m به ترتیب معرف وزن و جرم جسم هستند. x_{obj} و y_{obj} نیز به ترتیب معرف تصویر موقعیت مطلق جسم در امتداد محورهای X_4 و Y_4 هستند.

3- مدل سازی دینامیکی لغزش

بررسی حالت های مختلف لغزش جسم نیازمند بررسی رفتار دینامیکی آن می باشد. بنابر روابطی که در بخش مدل سازی جسم بیان شد، می توان حالت های مختلف نسبی را بین جسم و پنجه در نظر گرفت. بدین منظور تمامی نیروهای عکس العملی بین جسم و پنجه در نظر گرفته می شوند. لازم به توضیح است که مقدار نیروی عمودی بین جسم و گریپر به دلیل تقارن ($N = N_r = N_l$) با توجه معادله (13) محاسبه می شود و نحوه محاسبه نیروهای اصطکاکی در ادامه می آید.

$$N = K_f (q_5 - q_{5_0}) \quad (13)$$

معادله (27) را می توان به شکل رابطه (28) بازنویسی نمود:

$$-\left((\xi_2 - \xi_{2d}) + (\xi_1 - \xi_{1d})\right) \geq \left(-L^{-1}(R\xi_3 + K_m\xi_2) + L^{-1}V - \dot{\xi}_{3d} + D^{-1}(K_r\xi_3 - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - G(\xi_1) + J^T F)\right) \quad (28)$$

و با توجه به روابط (10 و 11)، رابطه (29) را داریم،

$$g_1(\xi, \xi_3) = L \neq 0 \quad (29)$$

زمانی که g_1 به ازای تمام مقادیر ξ_1 ، ξ_2 و ξ_3 غیر تکین باشد، قانون کنترل (30) با توجه به رابطه (28) برای معادله (10) به صورت رابطه (30) پیشنهاد می گردد:

$$V = (L^{-1}(R\xi_3 + K_m\xi_2) + \dot{\xi}_{3d} - (\xi_2 - \xi_{2d}) - (\xi_1 - \xi_{1d}) + D^{-1}(-K_r\xi_3 + C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 + G(\xi_1) - J^T F)) \quad (30)$$

با انتخاب کنترل کننده مطابق رابطه (30)، پایداری سیستم حلقه بسته با روش بازگشتی گام به عقب تضمین می شود.

با فرض این که تمام پارامترها شناخته شده باشد و همچنین با داشتن موقعیت، سرعت و شتاب های مطلوب و همچنین جریان مطلوب (I_d) می توان معادله (5) را به صورت رابطه (31) بازنویسی نمود:

$$\begin{cases} D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) - J^T F = K_r I_d + K_r \dot{I} \\ L\dot{I} + RI + K_m \dot{q} = V \end{cases} \quad (31)$$

که در معادله (31)، \dot{I} خطای جریان و I_d جریان مطلوب می باشد. در این حالت، رابطه اول از معادله (31) می تواند به عنوان یک زیر سیستم دیده شود که دارای جمله اختلال $K_r \dot{I}$ بوده و با جمله $K_r I_d$ کنترل می شود. بنابراین، با تبدیل مختصات به متغیرهای فضای حالت با توجه به رابطه (31) می توان رابطه (32) را برای جریان مطلوب نوشت:

$$\xi_{3d} = K_r^{-1}[\hat{D}(\xi_1)\xi_2^* + \hat{C}(\xi_1, \xi_2)\xi_2^* + \hat{G}(\xi_1) - J^T \hat{F} - K_d \varepsilon] \quad (32)$$

که در رابطه فوق ξ_2^* و ε به صورت رابطه (33) و (34) تعریف می شوند:

$$\xi_2^* = \xi_{2d} - \lambda(\xi_1 - \xi_{1d}) \quad (33)$$

$$\varepsilon = \xi_2 - \xi_{2d} + \lambda(\xi_1 - \xi_{1d}) = \xi_2 - \xi_2^* \quad (34)$$

در روابط فوق، ε متغیر کمکی بر مبنای خطا و λ یک ماتریس $n \times n$ مثبت معین است. بردار خطای حالت های سیستم به صورت رابطه (35) تعریف می شود:

$$\bar{\xi}_2 = \xi_2 - \xi_{2d}, \bar{\xi}_1 = \xi_1 - \xi_{1d}, \bar{\xi}_3 = \xi_3 - \xi_{3d} \quad (35)$$

3-4- قانون گام به عقب تطبیقی برای ردیابی مسیر

با توجه به وجود نامعینی های پارامتری مثل جرم و اینرسی در ربات ها، تخمین این پارامترها به منظور کنترل سیستم امری ضروری می باشد. برای به دست آوردن این تخمین، نیاز است که معادله دینامیکی ربات در رابطه (1) به فرم پارامتری مطابق با رابطه (36) نوشته شود، که جزئیات آن در بخش 1-3-4 توضیح داده شده است.

$$D(\xi_1)\xi_2^* + C(\xi_1, \xi_2)\xi_2^* + G(\xi_1) - J^T F = Y(\xi_1, \xi_2, \xi_2^*, \xi_2^*)p \quad (36)$$

در رابطه فوق p بردار پارامترها و Y ماتریس وزن نامیده می شود.

1-3-4- تخمین پارامترها

با توجه به مدل دینامیکی (1)، تخمین پارامترها با روش تطبیقی و بر پایه ی استراتژی محاسبه جریان مطلوب بدست می آید، بنابراین جریان مطلوب را بر اساس پارامترهای نامعلوم سیستم می توان به شکل رابطه (37) نوشت:

سیستم حلقه بسته با توجه به معادله (5) می باشد. با در نظر گرفتن خروجی به صورت معادله (14):

$$y = \beta(\xi_3 - \xi_{3d}) - \alpha_0(\xi) \quad (14)$$

و در نظر گرفتن تابع مثبت معین به صورت معادله (15) به عنوان تابع لیاپانوف:

$$V(\xi, \xi_3) = W(\xi) + \frac{1}{2}yy^T \quad (15)$$

تابع ذخیره سازی به صورت معادله (16) در نظر گرفته می شود:

$$W(\xi) = \frac{1}{2}(\xi_1 - \xi_{1d})^T(\xi_1 - \xi_{1d}) \quad (16)$$

تابع پایدار ساز نیز برابر رابطه (17) در نظر گرفته می شود:

$$\alpha_0(\xi) = \beta(\xi_3 - \xi_{3d}) - (\xi_2 - \xi_{2d}) \quad (17)$$

که در رابطه (17) $\beta = I_{n \times n}$ انتخاب می شود. برای بررسی پایداری سیستم و یافتن کنترلر مناسب نیاز به بررسی مشتق تابع لیاپانوف می باشد؛ لذا با استفاده از معادله (15) مشتق تابع لیاپانوف توسط رابطه (18) به دست می آید:

$$\dot{V}(\xi, \xi_3) = \dot{W} + y^T \dot{y} \quad (18)$$

که در رابطه (18)، \dot{W} و \dot{y} توسط روابط (19) و (20) تعریف شده است:

$$\dot{W} = (\xi_1 - \xi_{1d})^T(\dot{\xi}_2 - \dot{\xi}_{2d}) \quad (19)$$

$$\dot{y} = \beta(\dot{\xi}_3 - \dot{\xi}_{3d}) - \frac{\delta \alpha_0(\xi)}{\delta \xi} \dot{\xi} \quad (20)$$

با جای گذاری رابطه (19) و (20) در معادله (18) رابطه (21) به دست می آید:

$$\dot{V}(\xi, \xi_3) = (\xi_1 - \xi_{1d})^T(\dot{\xi}_2 - \dot{\xi}_{2d}) + y^T(\dot{\xi}_3 - \dot{\xi}_{3d} - \frac{\delta \alpha_0(\xi)}{\delta \xi} \dot{\xi}) \quad (21)$$

با توجه به رابطه (17)، رابطه (22) برای محاسبه $\frac{\delta \alpha_0(\xi)}{\delta \xi}$ به دست می آید:

$$\frac{\delta \alpha_0(\xi)}{\delta \xi} = \frac{\delta}{\delta \xi}((\xi_3 - \xi_{3d}) - (\xi_2 - \xi_{2d})) = \{[0]_{1 \times n}, [1]_{1 \times n}\} \quad (22)$$

با جای گذاری ξ و $\dot{\xi}_3$ از (10) و $\frac{\delta \alpha_0(\xi)}{\delta \xi}$ از (22) در رابطه (21)، رابطه (23) برای مشتق تابع لیاپانوف، به دست می آید:

$$\dot{V}(\xi, \xi_3) = (\xi_1 - \xi_{1d})^T(\dot{\xi}_2 - \dot{\xi}_{2d}) + y^T(-L^{-1}(R\xi_3 + K_m\xi_2) + L^{-1}V - \dot{\xi}_{3d} + D^{-1}(K_r\xi_3 - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - G(\xi_1) + J^T F)) \quad (23)$$

برای این که سیستم پایدار باشد، باید مشتق تابع لیاپانوف در رابطه (23)، منفی باشد؛ لذا اگر رابطه (24) برقرار باشد، پایداری مجانبی سیستم برقرار می شود:

$$\dot{V}(\xi, \xi_3) \leq -y^T \cdot y \quad (24)$$

با توجه به رابطه های (23) و (24)، می توان رابطه (25) را استنتاج نمود:

$$-y^T \cdot y - (\xi_1 - \xi_{1d})^T(\dot{\xi}_2 - \dot{\xi}_{2d}) \geq y^T(-L^{-1}(R\xi_3 + K_m\xi_2) + L^{-1}V - \dot{\xi}_{3d} + D^{-1}(K_r\xi_3 - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - G(\xi_1) + J^T F)) \quad (25)$$

از طرفی با توجه به رابطه های (14) و (17)، رابطه (26) بدست می آید:

$$y = (\xi_2 - \xi_{2d}) \quad (26)$$

با جای گذاری رابطه (26) در (25)، رابطه (27) به دست می آید:

$$-y^T \left(y + (\xi_1 - \xi_{1d}) \right) \geq y^T(-L^{-1}(R\xi_3 + K_m\xi_2) + L^{-1}V - \dot{\xi}_{3d} + D^{-1}(K_r\xi_3 - C(\xi_1, \xi_2)\xi_2 - G(\xi_1) + J^T F)) \quad (27)$$

$$\dot{V} = \varepsilon^T [Y - K_d \varepsilon] + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} = -\varepsilon^T K_d \varepsilon + \tilde{p}^T [Y^T \varepsilon + \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}}] \quad (50)$$

برای آنکه \dot{V} در رابطه (50) منفی معین باشد، باید رابطه (51) برقرار باشد:

$$\tilde{p}^T [Y^T \varepsilon + \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}}] = 0 \quad (51)$$

لذا با توجه به رابطه (51) معادله (50) به صورت (52) تبدیل می شود.

$$\dot{V} = -\varepsilon^T K_d \varepsilon \leq 0 \quad (52)$$

رابطه تابع لیاپانوف (39) و مشتق آن (52) نشان می دهند که سیستم پایدار می باشد. لذا قانون تطبیق با استفاده از رابطه (55)، به صورت رابطه (53) بدست می آید:

$$\dot{\tilde{p}} = -\Gamma \hat{Y}^T \varepsilon \quad (53)$$

4-3-2- محاسبه ماتریس وزن \hat{Y} و تخمین پارامترها

مدل دینامیکی سیستم (1) را به فرم پارامتری می توان به شکل رابطه (54) نوشت:

$$K_r I_d = D(\xi_1) \dot{\xi}_2^* + C(\xi_1, \xi_2) \dot{\xi}_2^* + G(\xi_1) - J^T F = \hat{Y}(\xi_1, \xi_2, \dot{\xi}_2^*, \ddot{\xi}_2^*) p \quad (54)$$

که در (54)، $Y \in R^{n \times r}$ ماتریسی از توابع شناخته شده بر حسب مختصات تعمیم یافته و مشتقات مراتب بالاتر آن ها و $p \in R^r$ بردار r بعدی از پارامترهای نامعلوم ربات می باشد؛ لذا در سیستم مورد مطالعه p_1 تا p_{20} توابعی از جرم (m_i)، اینرسی (I_i)، طول لینکها (a_i) و جرم جسم گرفته شده (m_{obj}) می باشند که در جدول (1) ارائه شده است. مدل دینامیکی ربات اسکارا را به شکل ماتریسی، می توان به صورت رابطه (55) بیان نمود:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & 0 & D_{24} & D_{25} \\ 0 & 0 & D_{33} & 0 & 0 \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & 0 & 0 \\ D_{51} & D_{52} & 0 & 0 & D_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{d}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 & C_{14} & C_{15} \\ C_{21} & C_{22} & 0 & C_{24} & C_{25} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{41} & C_{42} & 0 & C_{44} & C_{45} \\ C_{51} & C_{52} & 0 & C_{54} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{d}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ G_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \\ K_5 \end{bmatrix} \quad (55)$$

در نتیجه برای نوشتن دینامیک ربات اسکارا به فرم رابطه (54) و به منظور تخمین پارامترها، دینامیک ربات بر حسب پارامترهای نامعلوم به صورت روابط موجود در پیوست بازنویسی شده است. لازم به ذکر است که با توجه به رابطه (54)، روابط موجود در پیوست و پارامترهای p که در جدول 1 آورده شده، ماتریس وزن Y استخراج می شود.

جدول 1 پارامترهای ربات

پارامترهای 1 تا 10	پارامترهای 10 تا 20
$p_1 = I_1$	$p_{11} = a_1 a_2 m_2$
$p_2 = I_2 + I_3 + I_4 + I_5$	$p_{12} = a_2 m_5$
$p_3 = a_1^2 m_1$	$p_{13} = a_1 m_2$
$p_4 = a_2^2 m_2$	$p_{14} = a_2 m_5 d_5$
$p_5 = a_1^2 (m_2 + m_3 + m_4 + m_5)$	$p_{15} = a_1 m_5 d_5$
$p_6 = a_2^2 (m_3 + m_4 + m_5)$	$p_{16} = I_4 + I_5$
$p_7 = m_5$	$p_{17} = m_3 + m_4 + m_5$
$p_8 = m_5 d_5$	$p_{18} = a_1 m_{obj}$
$p_9 = m_5 d_5^2$	$p_{19} = m_{obj}$
$p_{10} = a_1 a_2 (m_3 + m_4 + m_5)$	$p_{20} = a_2 m_{obj}$

$$\xi_{3d} = K_r^{-1} \hat{Y} p - K_d \varepsilon \quad (37)$$

که در رابطه (37)، فرم پارامتری دینامیک سیستم بوده و با توجه به رابطه (38) به دست می آید،

$$\hat{Y} p = D(\xi_1) \dot{\xi}_2^* + C(\xi_1, \xi_2) \dot{\xi}_2^* + G(\xi_1) - J^T F \quad (38)$$

که در رابطه (38)، بردار پارامترهای سیستم مورد مطالعه به صورت $p = [p_1, p_2, \dots, p_{20}]$ بوده و در بخش 5 تعریف خواهد شد. برای بدست آوردن قانون تطبیق، تابع لیاپانوفی با توجه به رابطه (39) پیشنهاد می شود:

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

که در رابطه (37)، $\Gamma = [\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{20}]$ بردار مثبت معین، و \tilde{p} برداری 20×1 از خطای تخمین پارامترهای p_i ، مطابق رابطه (40) می باشد.

$$\tilde{p} = p - \hat{p} \quad (40)$$

با توجه به رابطه (39) و مثبت معین بودن Γ و D ، تابع لیاپانوف V مثبت معین خواهد بود. مشتق تابع لیاپانوف فوق نسبت به زمان، به صورت رابطه (41) به دست می آید.

$$\dot{V} = \varepsilon^T \left(D(\xi_1) \dot{\varepsilon} + \frac{1}{2} \dot{D}(\xi_1) \varepsilon \right) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (41)$$

با توجه روابط حاکم در دینامیک ربات جمله $\dot{D}(q) - 2C(q, \dot{q}) \varepsilon$ پادمتقارن می باشد؛ لذا عبارت $\varepsilon^T (\dot{D} - 2C) \varepsilon$ برابر صفر بوده و در نتیجه رابطه (42) را می توان نوشت:

$$\frac{1}{2} \varepsilon^T \dot{D}(\xi_1) \varepsilon = \varepsilon^T C(\xi_1, \xi_2) \varepsilon \quad (42)$$

با جای گذاری رابطه (42) در (41)، معادله (43) حاصل می شود:

$$\dot{V} = \varepsilon^T (D(\xi_1) \dot{\varepsilon} + C(\xi_1, \xi_2) \varepsilon) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (43)$$

با جای گذاری ε از رابطه (38) و مشتق آن در (47)، رابطه (44) بدست می آید:

$$\dot{V} = \varepsilon^T (D(\xi_1) \dot{\xi}_2 - D(\xi_1) \dot{\xi}_2^* + C(\xi_1, \xi_2) \dot{\xi}_2 - C(\xi_1, \xi_2) \dot{\xi}_2^*) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (44)$$

با توجه به رابطه اول معادله (31)، می توان معادله (45) را نوشت:

$$D(\xi_1) \dot{\xi}_2 + C(\xi_1, \xi_2) \dot{\xi}_2 + G(\xi_1) - J^T F = K_r \xi_{3d} \quad (45)$$

با استخراج $D(\xi_1) \dot{\xi}_2$ از معادله (45) و جای گذاری آن در رابطه (44)، رابطه (46) به دست می آید:

$$\dot{V} = \varepsilon^T (K_r \xi_{3d} - C(\xi_1, \xi_2) \dot{\xi}_2 - G(\xi_1) + J^T F - D(\xi_1) \dot{\xi}_2^* + C(\xi_1, \xi_2) \dot{\xi}_2 - C(\xi_1, \xi_2) \dot{\xi}_2^*) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (46)$$

با ساده سازی رابطه (46)، رابطه (47) حاصل می شود:

$$\dot{V} = \varepsilon^T (K_r \xi_{3d} - G(\xi_1) + J^T F - D(\xi_1) \dot{\xi}_2^* - C(\xi_1, \xi_2) \dot{\xi}_2^*) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (47)$$

با جای گذاری ξ_{3d} از رابطه (32) در (47) و مرتب سازی رابطه (48) به دست می آید:

$$\dot{V} = \varepsilon^T (\bar{D}(\xi_1) \dot{\xi}_2^* + \bar{C}(\xi_1, \xi_2) \dot{\xi}_2^* + \bar{G}(\xi_1) - J^T \bar{F} - K_d \varepsilon) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (48)$$

که در رابطه (48) داریم:

$$\bar{D} = \hat{D} - D \quad \bar{C} = \hat{C} - C \quad \bar{G} = \hat{G} - G \quad \bar{F} = \hat{F} - F$$

رابطه (36) را در فرم خطای پارامتری می توان به صورت رابطه (49)

بازنویسی نمود:

$$\bar{D}(\xi_1) \dot{\xi}_2^* + \bar{C}(\xi_1, \xi_2) \dot{\xi}_2^* + \bar{G}(\xi_1) - J^T \bar{F} = Y(\xi_1, \xi_2, \dot{\xi}_2^*, \ddot{\xi}_2^*) \tilde{p} \quad (49)$$

با در نظر گرفتن رابطه (49) می توان (48) را به صورت رابطه (50)

نوشت:

مشخصات نشان داده شده در جدول 2 است. همچنین، جسم گرفته شده، تماماً از ویژگی‌هایی که در بخش 2-3 عنوان شد پیروی می‌نماید. با توجه به اهداف شبیه‌سازی در کنترل و مهار لغزش، مسیر مطلوب برای مفاصل 1 تا 4 ربات مطابق با شکل 8 از پیوست در نظر گرفته می‌شود. همچنین، موقعیت مطلوب انگشت برای گرفتن ایمن جسم با توجه به مانورهای حرکتی تعریف شده مطابق شکل 3 به دست می‌آید. بهره‌های کنترل کننده یعنی λ و K_d ماتریس‌هایی قطری با درایه‌های قطر اصلی 100 در نظر گرفته شده‌اند. پس از اعمال کنترل کننده پیشنهادی برای گرفتن جسم و مهار لغزش آن، مقدار خطای ردیابی مسیر برای مفاصل 1 تا 5 محاسبه شده است و نتایج آن در شکل 4 آمده است. همچنین تلاش کنترلی برای کنترل کننده گام به عقب تطبیقی در شکل 5 نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل 5 مشاهده می‌شود، با اعمال کنترل کننده گام به عقب تطبیقی هر یک از بازوهای ربات در بازه زمانی حرکت 10 ثانیه‌ای خود مسیر مطلوب داده شده را با خطای اندک ردیابی می‌نماید و میزان خطا بعد از مدتی در مقدار کمی محدود می‌گردد. با توجه به نتایج مربوط به خطای ردیابی بازوی 5 (پنجه) که در شکل 5 (ه) ارائه شده است، مشاهده می‌شود حداکثر میزان لغزش در بازه زمانی 6 تا 8 ثانیه اتفاق افتاده و معادل 0/4 میلی‌متر می‌باشد و بعد از آن مقدار لغزش به 0/1 میلی‌متر محدود می‌گردد. که نشان می‌دهد کنترل لغزش به خوبی انجام شده است.

نتایج تخمین پارامترها جهت استفاده در کنترلر در شکل 6 ارائه شده است. با توجه به این شکل تغییرات در پارامترها متناسب با تغییر در مانورهای حرکتی ربات مطابق با شکل 7 می‌باشد و نتایج نشان می‌دهد که روش به کار رفته در تخمین پارامترها به خوبی توانسته است تخمین مناسب پارامترها را جهت استفاده در کنترلر برای همگرایی مناسب در خطای ردیابی ایجاد نماید.

جهت اعتبارسنجی، نتایج تحقیق حاضر با نتایج مرجع [12] 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. مقایسه فوق برای مبحث ردیابی مسیر انجام شده است؛ اما در مبحث گرفتن جسم و کنترل لغزش جسم، با توجه به اینکه روش گام به عقب تطبیقی برای اولین بار در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، مقدار اندک لغزش، دقت بالای این روش در کنترل لغزش جسم گرفته شده که تحت مانورهای ناشی از حرکت ربات قرار داشته است را به اثبات می‌رساند. بنابراین با توجه به نتایج شبیه‌سازی می‌توان

4-4- تعیین مسیر مطلوب برای حرکت انگشتان

مقدار مطلوب موقعیت انگشت جهت گرفتن ایمن جسم با توجه به شتاب اعمالی به جسم در اثر حرکت بازوها و وزن جسم محاسبه می‌شود. شتاب مطلوب حرکت جسم a_{obj}^d در فاز عدم لغزش همان شتاب اعمالی به پنجه در زمانی است که مفاصل‌های 1 تا 4 در موقعیت مطلوب خود قرار دارند و از معادلات دینامیکی ربات به دست می‌آید. مؤلفه‌های این شتاب a_{obj-x}^d ، a_{obj-y}^d و a_{obj-z}^d می‌باشند که تصویر شتاب‌های مطلق جسم به ترتیب در راستای X_4 و Y_4 و Z_4 هستند (مطابق با رابطه 56).

$$\begin{aligned} a_{obj-x}^d &= a_{grip-x} \\ a_{obj-y}^d &= a_{grip-y} \\ a_{obj-z}^d &= a_{grip-z} \end{aligned} \quad (56)$$

حال به منظور کنترل لغزش و جلوگیری از رخداد آن، می‌بایست نیروی اعمالی به جسم، جبران کننده مجموع نیروی وزن جسم و نیروی اینرسی حاصل از شتاب بازوها شود؛ که این نیروها با جای‌گذاری رابطه (56) در معادله دینامیکی جسم، یعنی معادله (12)، به صورت روابط (57) و (58) حاصل می‌شود.

$$f_{d-x} = m_{obj} a_{obj-x}^d \quad (57)$$

$$f_{d-y} = m_{obj} g + m_{obj} a_{obj-y}^d \quad (58)$$

که در روابط (57) و (58)، f_{d-x} و f_{d-y} به ترتیب نیروهای لازم برای کنترل لغزش در راستای X_4 و Y_4 هستند. به این ترتیب اندازه بیشینه نیروی مماسی مطلوب برای کنترل لغزش جسم و برقراری ایمنی در هنگام گرفتن جسم در تمام جهت‌های احتمالی لغزش به صورت رابطه (59) است.

$$f_d = \sqrt{f_{d-x}^2 + f_{d-y}^2} \quad (59)$$

بنابراین نیروی عمودی مطلوبی که از طرف انگشت ربات و در جهت عمود بر جسم وارد می‌شود تا از لغزش آن جلوگیری کند از تقسیم اندازه f_d بر ضریب اصطکاک سطح تماس مطابق با رابطه (60) به دست می‌آید.

$$N_d = \frac{f_d}{\mu} \quad (60)$$

همچنین، با توجه به رابطه (13) مقدار نیروی عمودی مطلوب انگشت به شکل رابطه (61) به دست می‌آید. حال می‌توان با استفاده از این رابطه و جای‌گذاری نیروی مطلوب، موقعیت مطلوب انگشت را مطابق با رابطه (62) محاسبه نمود.

$$N_d = K_f (q_5^d - q_{5_0}) \quad (61)$$

$$q_5^d = \frac{N_d}{K_f} + q_{5_0} \quad (62)$$

5- پارامترهای سیستم

پارامترهای سیستم شامل جرم، اینرسی و طول اعضا در جدول 2 ارائه شده است، همچنین مقادیر پارامترهای مدارات موتور، در جدول 3 ارائه شده است.

6- شبیه‌سازی

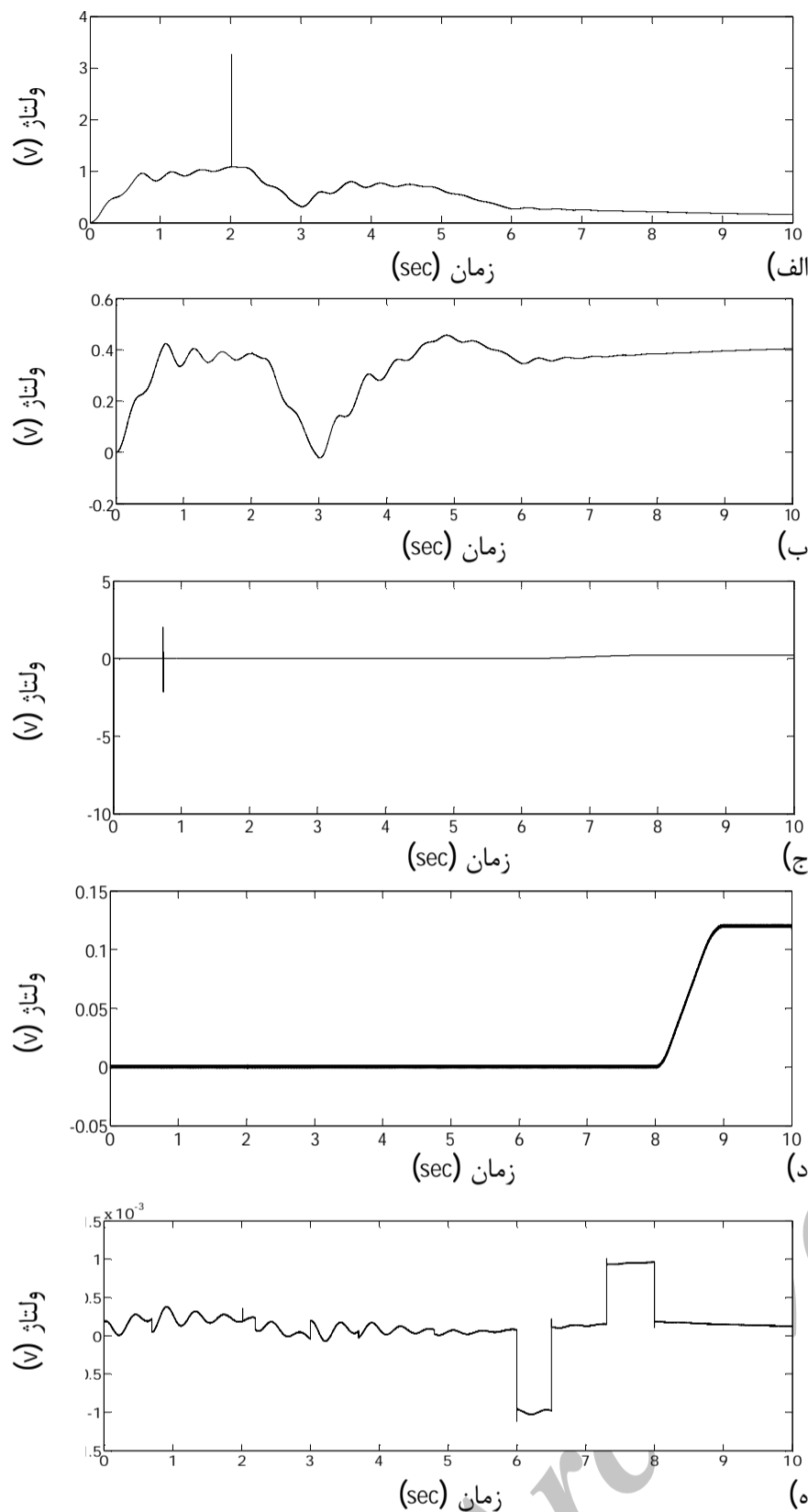
در این بخش، برای بررسی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی مانوری برای ربات در نظر گرفته می‌شود که شرایط ایجاد لغزش را برای جسم گرفته شده فراهم نماید تا از این طریق قابلیت کنترل کننده بررسی شود. در این شبیه‌سازی، یک ربات اسکارای 4 درجه آزادی به همراه یک درجه آزادی در پنجه با مفصل کشویی به کار برده شده است. ربات اسکارای مورد مطالعه شامل پنجه فک موازی با قابلیت حرکت انگشتان در طی مانور ربات، دارای

جدول 2 مشخصات ربات اسکارای مورد مطالعه

شماره رابطه	جرم ربات (kg)	طول ربات (m)
1	$m_1 = 1/2$	$a_1 = 0/35$
2	$m_2 = 1/16$	$a_2 = 0/37$
3	$m_3 = 0/56$	متغیر d_3
4	$m_4 = 0/02$	$d_4 = 0/04$
5	$m_5 = 0/2$	متغیر d_5

جدول 3 پارامترهای الکتریکی

L (V.s/A)	R (ohm)	K_f (V.s)	K_m (V.s)
0/01	0/26	2/124	1/6

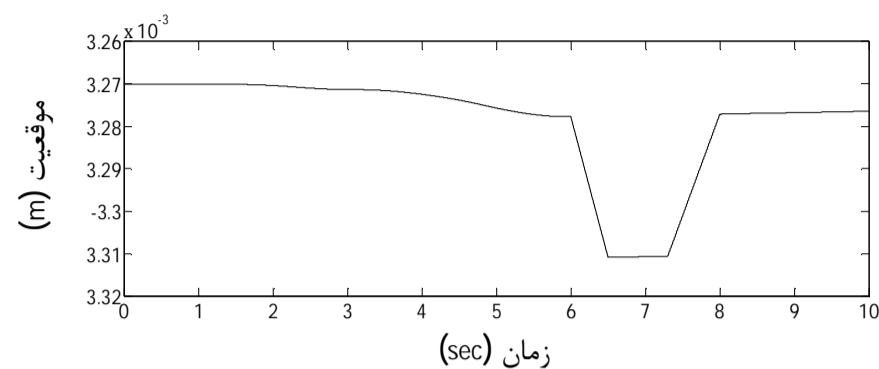


شکل 5 ولتاژ مفاصل ربات، الف) مفصل 1، ب) مفصل 2، ج) مفصل 3، د) مفصل 4، ه) مفصل 5

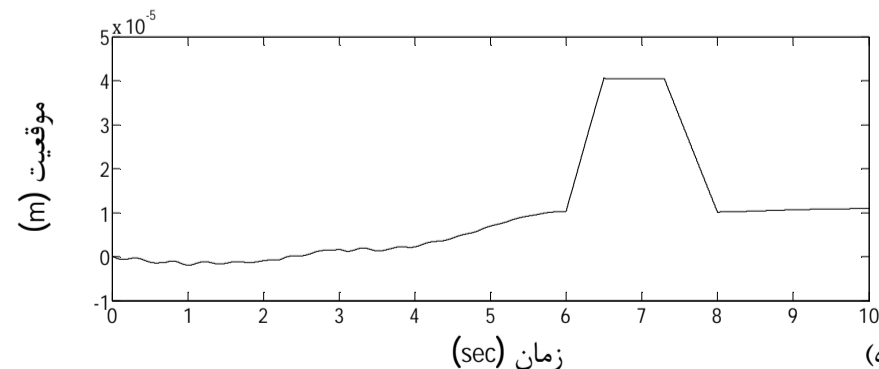
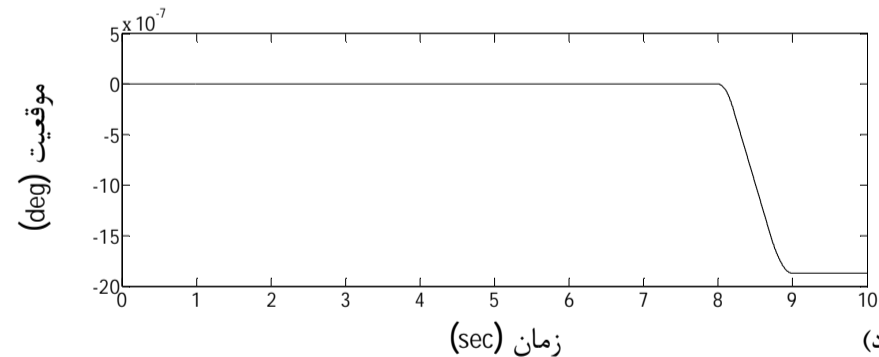
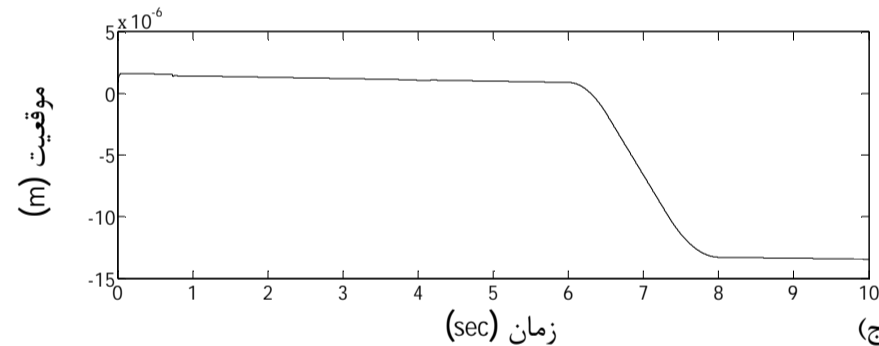
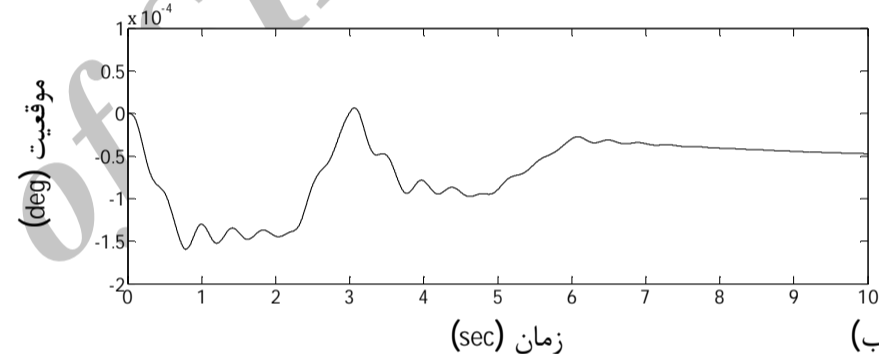
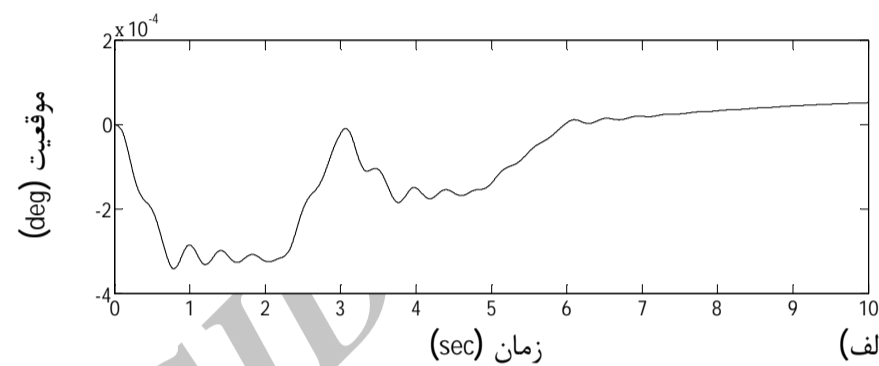
7- نتیجه گیری

در این مقاله، گرفتن ایمن جسم توسط یک ربات با استفاده از روش کنترل گام به عقب مورد بررسی قرار گرفت. در فرآیند جابجایی ایمن اجسام و با توجه به مانورهای ربات در طی حرکت امکان لغزش و افتادن جسم وجود دارد؛ لذا به منظور کنترل لغزش و ردیابی مسیرهای مطلوب در نظر گرفته شده از کنترل گام به عقب تطبیقی استفاده شد. ابتدا معادلات دینامیکی ربات مورد مطالعه شامل بازوی مکانیکی با 3 مفصل دورانی، 1 مفصل کشویی و پنجه فک موازی به همراه دینامیک محرک‌های الکتریکی برای گرفتن یک جسم، استخراج شد. سپس روش گام به عقب که یک تکنیک سیستماتیک بر پایه لیاپانوف است جهت طراحی سیستم کنترل پایدار برای سیستم غیرخطی مورد مطالعه به کار گرفته شد. از آنجایی که در عمل عدم قطعیت‌های مختلفی در سیستم وجود دارد، نیاز است که کنترل کننده طراحی شده قابلیت مقابله بر این عدم قطعیت‌ها را داشته باشد. بنابراین در این تحقیق، با استفاده از روش گام به عقب تطبیقی، یک کنترل کننده پایدار جهت کنترل

نتیجه گرفت که روش کنترل گام به عقب تطبیقی برای سیستم‌های غیرخطی‌ای که به فرم پس‌خورده صریح هستند، حتی در حضور عدم قطعیت‌ها دارای دقت بسیار خوبی است.



شکل 3 موقعیت مطلوب انگشت



شکل 4 خطای موقعیت مفاصل ربات، الف) مفصل 1، ب) مفصل 2، ج) مفصل 3، د) مفصل 4، ه) مفصل 5

گرفتن جسم و کنترل لغزش جسم، با توجه به این که روش گام به عقب تطبیقی برای اولین بار در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، مقدار اندک لغزش، دقت بالای این روش در کنترل لغزش جسم گرفته شده که تحت مانورهای ناشی از حرکت ربات قرار داشته است را به اثبات رساند. بنابراین با توجه به نتایج شبیه سازی می توان نتیجه گرفت که روش کنترل گام به عقب تطبیقی برای سیستم های غیرخطی ای که به فرم پس خورد صریح هستند، حتی در حضور عدم قطعیت ها دارای دقت بسیار خوبی است.

8- پیوست

مسیر مطلوب برای مفاصل یک تا چهار ربات مورد مطالعه در شکل شماره 7 نمایش داده شده است.

با تعریف بردار پارامترها مطابق جدول یک می توان معادلات دینامیکی ربات را به فرم پارامتری نوشت؛ لذا دینامیک ربات برحسب پارامترهای تعریف شده بدست آمده و در ادامه درایه های ماتریس های معادله (55) ارائه می شود. با توجه به معادله (55) درایه های ماتریس D که یک ماتریس 5×5 است به صورت زیر برحسب پارامترهای تعریف شده در جدول 1 به دست می آید.

$$D_{11} = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 + p_9 + p_7 q_5^2 - p_8 q_5 + 2p_{10} c_2 + p_{11} c_2 + p_{14} s_4 + 2p_{12} q_5 s_4 - p_{12} s_{2-4} - 2p_{13} q_5 s_{2-4}$$

$$D_{12} = p_2 + p_4 + p_6 + p_9 + p_7 q_5^2 - p_8 q_5 + p_{11} c_2 / 2 + p_{10} c_2 + p_{14} s_4 - 2p_{12} q_5 s_4 - p_{15} s_{2-4} / 2 + p_{13} q_5 s_{2-4}, D_{13} = 0$$

$$D_{14} = p_8 q_5 - p_9 - p_7 q_5^2 - p_{14} s_4 / 2 + p_{12} q_5 s_4 - p_{13} q_5 s_{2-4} + p_{15} s_{2-4} / 2 - p_{16}, D_{15} = -p_{12} c_2 - p_{13} c_{2-4}, D_{21} = p_2 + p_4 + p_6 + p_9 + p_7 q_5^2 - p_8 q_5 + p_{10} c_2 + p_{11} c_2 / 2 + p_{14} s_4 - 2p_{12} q_5 s_4 - p_{15} s_{2-4} + p_{13} q_5 s_{2-4},$$

$$D_2 = p_2 + p_4 + p_6 + p_9 + p_7 q_5^2 - p_8 q_5 - 2p_{12} q_5 s_4,$$

$$D_{23} = 0, D_{24} = p_8 q_5 - p_9 - p_7 q_5^2 - p_{14} s_4 / 2 + p_{12} q_5 s_4,$$

$$D_{15} = -p_{12} c_2, D_{31} = D_{32} = 0, D_{33} = p_{17},$$

$$D_{34} = D_{35} = 0, D_{41} = p_8 q_5 + p_9 - p_7 q_5^2 - p_{14} s_4 / 2 + p_{12} q_5 s_4 - p_{13} q_5 s_{2-4} + p_{15} s_{2-4} / 2 - p_{16}$$

$$D_{42} = -p_9 - p_7 q_5^2 + p_8 q_5 - p_{14} s_4 / 2 + p_{12} q_5 s_4 - p_{16}$$

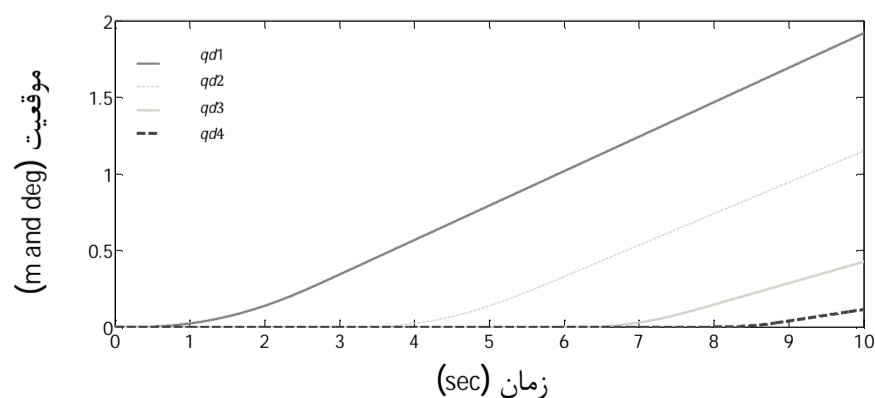
$$D_{43} = p_9 + p_7 q_5^2 - p_8 q_5 + p_{16}, D_{44} = D_{45} = 0, D_{51} = -p_{12} c_4 - p_{13} c_{2-4}, D_{52} = -p_{12} c_4, D_{53} = D_{54} = 0,$$

$$D_{55} = p_7,$$

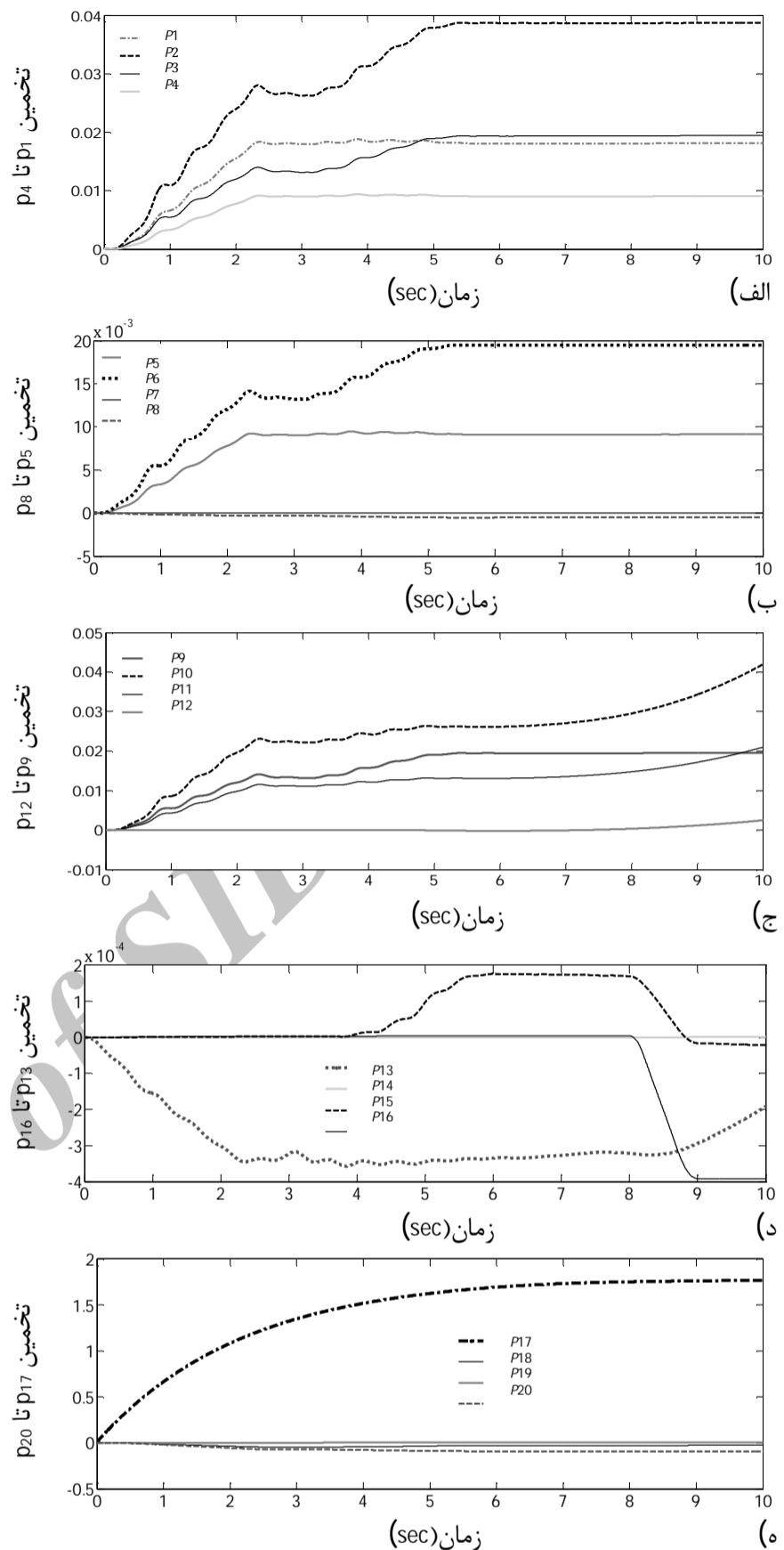
همچنین با توجه به معادله (55) درایه های ماتریس G که یک ماتریس 5×1 است به صورت زیر برحسب پارامترهای تعریف شده در جدول 1 به دست می آید:

$G_1 = G_2 = 0, G_3 = -g \times p_{17}, G_4 = G_5 = 0$
به همین ترتیب، با توجه به معادله (55) درایه های ماتریس C که یک ماتریس 5×5 است به صورت زیر برحسب پارامترهای تعریف شده در جدول 1 به دست می آید:

$$C_{11} = 0.25p_7 q_5 q_{d5} + 0.5p_{13} q_{d5} s_{2-4} - 0.5p_{12} q_{d5} s_4 + 0.5p_{13} q_5 q_{d2} c_{2-4} - 0.5p_{13} q_5 q_{d4} c_{2-4} - 0.5p_{11} q_{d2} s_2 - p_{10} q_{d2} s_2 - 0.5p_{12} q_5 q_{d4} c_4,$$



شکل 7 مسیر مطلوب رابطهای 1 تا 4



شکل 6 تخمین پارامترهای سیستم: (الف) p_1 تا p_4 ، (ب) p_5 تا p_8 ، (ج) p_9 تا p_{12} ، (د) p_{13} تا p_{16} ، (ه) p_{17} تا p_{20}

لغزش جسم و ردیابی مسیر در حضور نامعینی های پارامتری مثل جرم، اینرسی ربات و جرم جسم برای سیستم مورد مطالعه طراحی و پایداری آن بر مبنای تئوری لیاپانوف اثبات شد. با اعمال کنترل کننده گام به عقب تطبیقی فوق به سیستم مورد مطالعه، روش لازم جهت تخمین پارامترهای نامعلوم برای استفاده در کنترل کننده انجام شد. شبیه سازی سیستم با اعمال کنترل کننده پیشنهادی بر روی ربات مورد مطالعه انجام شد و نتایج نشان داد که روش گام به عقب تطبیقی به خوبی پارامترهای سیستم را تخمین زده و در حضور عدم قطعیت پارامتری ردیابی مسیر و کنترل لغزش جسم را به خوبی انجام می دهد. جهت اعتبارسنجی، نتایج تحقیق حاضر با نتایج مراجع مشابه دیگر مقایسه شد که با توجه به نتایج شبیه سازی در تحقیق حاضر و مقایسه آن با تحقیقات در مراجع فوق که از روش گام به عقب به منظور ردیابی مسیر ربات استفاده کرده اند مشاهده شد که ردیابی مسیر با دقت خوبی به انجام رسید. مقایسه فوق برای مبحث ردیابی مسیر انجام شد؛ اما در مبحث

نیروی اعمالی از پنجه به جسم در مختصات پنجه
 بردار عکس العمل نیروهای اعمالی از جسم به پنجه
 ماتریس مثبت معین و قطری اندوکتانس الکتریکی
 ماتریس مثبت معین ثابت و قطری مقاومت الکتریکی
 بردار $n \times 1$ جریان مفاصل
 ماتریس مثبت معین ثابت قطری از ضرایب محرک
 بردار $n \times 1$ ولتاژ ورودی آرمیچر
 ضریب تبدیل الکترومکانیکی بین جریان و گشتاور
 نیروی عمودی اعمالی از طرف انگشتان
 وزن جسم
 جرم جسم
 سختی معادل برای انعطاف پذیری سیستم
 موقعیت اولیه انگشت
 سرعت نسبی انگشتان نسبت به جسم

f $C_{12} = 0.25p_7q_5q_{d5} + 0.75p_{13}q_{d5}S_{2-4} - 0.5p_{12}q_{d5}S_4 +$
 $0.5p_{13}q_5q_{d1}c_{2-4} + 0.5p_{13}q_5q_{d2}c_{2-4} - 0.5p_{13}q_5q_{d4}c_{2-4} -$
 $0.5p_{11}q_{d1}S_2 - 0.5p_{11}q_{d2}S_2 - p_{10}q_{d1}S_2 - p_{10}q_{d1}S_2$
 L $-0.5p_{12}q_5q_{d4}c_4$, $C_{13} = 0$, $C_{14} = -0.25(p_7q_5q_{d5} +$
 R $3p_{13}q_{d5}S_{2-4} - 3p_{12}q_{d5}S_4 + 2p_{13}q_5q_{d1}c_{2-4} +$
 I $2p_{13}q_5q_{d2}c_{2-4} - 2p_{13}q_5q_{d4}c_{2-4} + 2p_{12}q_5q_{d1}c_4 +$
 $2p_{12}q_5q_{d2}c_4 - 2p_{12}q_5q_{d4}c_4)$, $C_{15} = 0.25(p_7q_5q_{d1} +$
 K_m $p_7q_5q_{d2} - p_7q_5q_{d4} + 2p_{12}q_{d1}S_{2-4} + 3p_{13}q_{d2}S_{2-4} -$
 V $3p_{13}q_{d4}S_{2-4} - 2p_{12}q_{d1}S_4 - 2p_{12}q_{d2}S_4 + 3p_{12}q_{d4}S_4)$
 K_r $C_{21} = 0.25p_7q_5q_{d5} - 0.25p_{13}q_{d5}S_{2-4} - 0.5p_{12}q_{d5}S_4 - 0.5$
 N $p_{13}q_5q_{d1}c_{2-4} - 0.5p_{11}q_{d1}S_2 - p_{10}q_{d1}S_2 - 0.5p_{12}q_5q_{d4}c_4$
 $C_{22} = -0.25(p_7q_5q_{d5} + 2p_{12}q_{d5}S_4 + 2p_{12}q_5q_{d4}c_4)$, $C_{23} = 0$
 $C_{24} = 0.25(p_7q_{d5} - 3p_{12}q_{d5}S_4 + 2p_{12}q_5q_{d1}c_4 +$
 W $2p_{12}q_5q_{d2}c_4 - 2p_{12}q_5q_{d4}c_4)$, $C_{25} = 0.25(p_7q_5q_{d4} -$
 m $p_7q_5q_{d2} - p_7q_5q_{d1} + p_{13}q_{d1}S_{2-4} + 2p_{12}q_{d1}S_4 +$
 K_f $2p_{12}q_{d2}S_4 - 3p_{12}q_{d4}S_4)$, $C_{31} = C_{32} = C_{33} = C_{34} = C_{35} = 0$
 q_{50} $C_{41} = 0.25(-p_7q_5q_{d5} + 3p_{13}q_{d5}S_{2-4} - p_{12}q_{d5}S_4 +$
 \hat{v} $2p_{13}q_5q_{d1}c_{2-4} + 2p_{12}q_5q_{d1}c_4 + 2p_{12}q_5q_{d2}c_4)$
 $C_{42} = -0.25(p_7q_5q_{d5} + p_{12}q_{d5}S_4 - 2p_{12}q_5q_{d1}c_4 -$
 $C_{43} = 0$, $C_{44} = 0.25p_7q_5q_{d5}$
 $C_{45} = 0.25(p_7q_5q_{d4} - p_7q_5q_{d2} - p_7q_5q_{d1} + p_{13}q_{d1}S_{2-4} -$
 $p_{12}q_{d1}S_4 + 2p_{12}q_{d2}S_4)$, $C_{51} = 0.25(p_7q_5q_{d4} - p_7q_5q_{d2} -$
 $p_7q_5q_{d1} - p_{13}q_{d1}S_{2-4} + p_{13}q_{d2}S_{2-4} - p_{13}q_{d4}S_{2-4} +$
 $2p_{12}q_{d1}S_4 + 2p_{12}q_{d2}S_4 + p_{12}q_{d4}S_4)$
 $C_{52} = 0.25(p_7q_5q_{d4} - p_7q_5q_{d2} - p_7q_5q_{d1} + p_{13}q_{d1}S_{2-4} +$
 $2p_{12}q_{d1}S_4 + 2p_{12}q_{d2}S_4 + p_{12}q_{d4}S_4)$, $C_{53} = 0$
 $C_{54} = 0.25(p_7q_5q_{d1} + p_7q_5q_{d2} - p_7q_5q_{d4} - p_{13}q_{d1}S_{2-4} +$
 $p_{12}q_{d1}S_4 + p_{12}q_{d2}S_4)$, $C_{55} = 0$,
 همچنین با توجه به معادله (55) درایه‌های ماتریس K که یک ماتریس
 5×5 است به صورت زیر بر حسب پارامترهای تعریف شده در جدول 1 به-
 دست می‌آید:

علائم یونانی

 ξ بردار حالت τ بردار تعمیم یافته گشتاور مفاصل

بالانویس‌ها

 D مطلوب

زیرنویس‌ها

obj جسم

Grip پنجه

 d مطلوب

10- مراجع

- [1] M. R. Tremblay, M. R. Cutkosky, Estimating friction using incipient slip sensing during a manipulation task, in *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Atlanta*, Vol. 1, pp. 429-434, 1993.
- [2] A. Mingrino, A. Bucci, R. Magni, P. Dario, Slippage control in hand prostheses by sensing grasping forces and sliding motion, in *Proceeding of IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems, Munich*, Vol.3, pp. 1803-1809, 1994.
- [3] M. M. Fateh, Variable Structure Slip Control for Grasping Objects, in *International Conference on Dynamical Systems and Control, Bucharest*, 2006.
- [4] J. K. Salisbury, B. Roth, Kinematic and Force Analysis of Articulated Mechanical Hands, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 105, No. 1, pp. 35-41, 1983.
- [5] S. Hadian Jazi, M. Keshmiri, A New approach on object slippage control in a cooperating manipulators system, in *International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Las Vegas, Nevada, USA*, 2007.
- [6] H. Ahmadi, M. J. Sadigh, Safe grasping in presence of multi phase friction, in *2008 10th Intl. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision, Hanoi, Vietnam*, 2008.
- [7] E. D. Engeberg, S. G. Meek, Adaptive sliding mode control for prosthetic hands to simultaneously prevent slip and minimize deformation of grasped objects, *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, Vol. 18, No. 1, pp. 376-385, 2013.
- [8] H. Ahmadi, H. Esmaeeli, M. M. Fateh, Slip compensation of grasped objects in robot gripper, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 151-162, 2015 (In Persian).
- [9] J. Zhou, C. Wen, *Adaptive Backstepping Control of Uncertain Systems*. Springer, 2008.
- [10] M. Krstić, I. Kanellakopoulos, P. Kokotović, *Nonlinear and adaptive control design*. Wiley, 1995.
- [11] K. J. Astrom, B. Wittenmark, *Adaptive Control*, Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
- [12] D. Nganga-Kouya, M. Saad, L. Lamarche, C. Khairallah, Backstepping Adaptive Position Control for Robotic Manipulators, *Proc. of ACC, Arlington*, pp. 636-640, 2001.
- [13] Q. Hu, L. Xu, A. Zhang, Adaptive Backstepping Trajectory Tracking Control of Robot Manipulator, *J Franklin Institute*, Vol.349, pp.1087-

که در روابط فوق F_x , F_y و F_z به ترتیب منته‌نیروهای وارده به جسم در جهات x_4 , y_4 و z_4 می‌باشد که ناشی از وزن جسم و شتاب وارد شده به جسم در حین مانور ربات بوده، q_{di} مسیر در نظر گرفته شده برای مفاصل و $\varphi = q_{d1} + q_{d2} - q_{d4}$ می‌باشد.
 همچنین به دلیل ایجاد اختصار، روابط مثلثاتی به صورت زیر خلاصه سازی شده است:

$$s_i = \sin(q_i), c_i = \cos(q_i)$$

$$s_{i-j} = \sin(q_i - q_j), c_{i-j} = \cos(q_i - q_j)$$

9- فهرست علائم

$q \in R^n$ بردار مختصات تعمیم یافته مفاصل
 $\dot{q} \in R^n$ بردار مختصات تعمیم یافته سرعت مفاصل
 $D(q)$ ماتریس اینرسی مثبت معین و قطری
 $C(q, \dot{q})$ ماتریس ناشی از نیروهای کوریولیس و گریز از مرکز
 $G(q)$ بردار نیروی ناشی از گرانش

- Vol. 4, No. 4, pp-91-110, 2011.
- [18] Y. Wei, J. Zhang, L. Hou, F. Jia, Q. Chang, Backstepping Adaptive Fuzzy Control for two-link robot manipulator, Vol. 10, Issue 1, No 2, pp-303-308, 2013.
- [19] C. Ishii, H. Hashimoto, R. H. Gavino, Robust Control of One DOF Grasping Type Master-Slave Manipulator Systems in Consideration of Actuator Dynamics and Uncertainty for Objects and Operator, *Conference on Decision and Control Maui*, pp. 4090-4095, December 2003.
- [20] H. Ahmadi, J. Sadigh, Safe Grasping and Manipulation of Delicate Object by a Two Fingers Dexterous Hand, *Journal of Control*, Vol. 4, No. 2, Summer 2010 (In Persian).
- [21] O. Harkegrad, *Flight Control Design Using Backstepping*, Ph.D Dissertation, Dept. of Elect. Eng, Linkopings Universitet, Linkoping, Sweden, 2001.
- 1105, 2012.
- [14] Y. Wei, L. Hou, Z. Sun, F. Jia, B. Li, Backstepping Adaptive Fuzzy Scheme for SCARA GRB400 Robot, *Telkomnika*, Vol. 11, No. 8, pp-4229-4237, 2013.
- [15] A. Lotfazar, M. Eghtesad and M. Mohseni, Integrator Backstepping Control of a 5 Dof Robot Manipulator With Cascaded Dynamics, *IEEE*, pp-1007-1012, 2003.
- [16] R. J. Wai, Design of Fuzzy-Neural-Network Inherited Backstepping Control for Robot Manipulator Including Actuator Dynamics, *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, Vol. 22, No. 4, pp-709-722, 2014.
- [17] F. Piltan, N. Sulaiman, A. Jalali, S. Siamak, Iman Nazari, Artificial Robust Control of Robot Arm: Design a Novel SISO Backstepping Adaptive Lyapunov Based Variable Structure Control, *Int J Control and Automation*,

Archive of SID