مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1394، دوره 15، شماره 10، ص‌ص 56-66

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

کنترل گام به‌عقب تطبیقی برای گرفتن ایمن یک جسم توسط پنجه ربات

حسین حسین پور کلاته[1]، 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 به‌عقب می‌پردازد. با توجه به مانورهای ربات در طی حرکت امکان لغزش و افتادن جسم وجود دارد؛ لذا به‌منظور 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 به‌عقب که یک تکنیک سیستماتیک بر پایه لیاپانوف است جهت طراحی این سیستم غیرخطی به‌کار 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 این‌رو، با استفاده از روش گام به‌عقب تطبیقی، یک کنترل کننده پایدار برای تخمین نامعینی‌های پارامتری برای سیستم مورد مطالعه طراحی می‌شود. آنالیز پایداری براساس 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 Lyaponov theory, is applied for this nonlinear system. Beacuse 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

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 می نماید، بایستی به طریقی مناسب و با اعمال حداقل نیرو برای اجتناب از 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 رخداده 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] برمبنای استفاده از ویژگی‌های سیستم حسگری در

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

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 به‌کار رفته برای کنترل لغزش، بعضی از محققین در طرح خود از یک کنترل کننده چند حالته استفاده نموده‌اند تا بتواند شرایط واقعی‌تر لغزش بین جسم و پنجه را با توجه به شرایط اصطکاکی هر فاز، شبیه‌سازی نمایند [۵،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 به‌منظور 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 برمبنای تئوری لیاپانوف و قضایای مربوطه به انجام رسانده‌اند. تئوری تابع لیاپانوف به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای کنترل غیرخطی و همچنین خطی شناخته می‌شود؛ در عین‌حال 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 باتوجه به پیچیدگی‌های زیاد در دینامیک سیستم‌های غیرخطی اهمیت و دشواری این کار مشخص می‌شود. یکی از روش‌های طراحی کنترل کننده برمبنای 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 به‌کار برده شده است [9-11]. روش گام به عقب یک روش طراحی کنترل سیستماتیک است که برای سیستم‌های غیرخطی به‌کار 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 کرستیک 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 برمبنای این روش، مشخصات تعقیب و تنظیم محلی یا کلی را تضمین می‌کند، یکی از مهم‌ترین مزایای روش گام به‌عقب 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 به‌کار رفته پایداری مجانبی 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 به‌عقب به‌منظور کنترل موقعیت ربات طراحی گردیده است. در این روش، چارچوب شبکه فازی- عصبی به تقلید از قانون کنترل گام به‌عقب 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 به‌عقب فازی تطبیقی برای ربات دو لینکی به‌منظور ردیابی مسیر در حضور عدم قطعیت پارامتری و اغتشاش ارزیابی شده و پایداری مجانبی آن به اثبات رسیده است. در حوزه کنترل ربات به‌منظور 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 به‌عقب 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 به‌عقب محقق می‌شود. دومین مورد استفاده از روش کنترل گام به‌عقب 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 به‌عقب و برمبنای 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

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

2- مدل‌سازی سیستم

در این قسمت مدل‌سازی برای سیستم مورد مطالعه انجام شده است. به‌جهت فرض گرفتن ایمن جسم در تحقیق حاضر، امکان سرخوردن و لغزش جسم براثر 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 گرفته‌شده 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 انعطاف‌پذیری در مفاصل توسط معادله (1) بیان می‌شود.

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

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

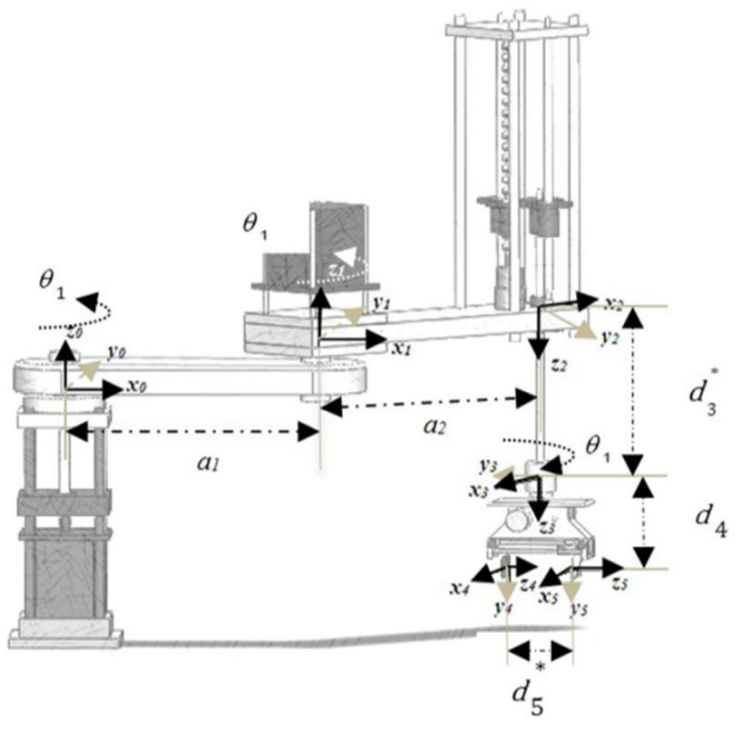
F: بردار عکس‌العمل نیروهای اعمالی از جسم به پنجه در مختصات $x_0y_0z_0$.

2-2- دینامیک محرک‌ها

دینامیک محرک‌ها که شامل موتورهای DC می‌باشند، به‌صورت 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]

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 به‌صورت 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 جای‌گذاری معادله (3) در (1)، معادله (4) بدست می‌آید:

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

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

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

جهت تبیین روش کنترل برمبنای گام به‌عقب 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:

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

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

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

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

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) به‌صورت رابطه (10) بدست می‌آید:

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

می‌توان معادلات (10) را به شکل کلی رابطه (11) نوشت:

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

که در معادله (11)، $\xi \epsilon R^{2n}$، $\xi_3 \varepsilon R^n$ و $V \varepsilon R^n$ 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].

1. اجسامی که توسط ربات گرفته می‌شوند مکعبی شکل هستند و گرفتن توسط انگشتان به‌صورت متقارن است.
2. فک‌ها همواره طوری جسم را مهار می‌کنند که مرکز جرم جسم در راستای مرکز هندسی سطح آن‌ها باشد.
3. ضریب اصطکاک بین جسم و انگشت‌ها معلوم و در دو طرف یکسان است.
4. توزیع نیروی اصطکاک در سطح فک یکنواخت فرض می‌شود.
5. جسم گرفته شده صلب است، اما تماس انگشت و جسم به‌صورت الاستیک خطی در نظر گرفته می‌شود. این خاصیت الاستیک می‌تواند مجموعه‌ای از انعطاف‌پذیری موجود در انگشت و یا سطح تماس باشد که نهایتاً به‌عنوان یک فنر معادل‌سازی شده است.
6. نیروی اصطکاکی و عمودی بین جسم و انگشت توسط حسگرهای لمسی تعبیه شده در انگشتان قابل اندازه‌گیری و یا محاسبه است.

با توجه به فرضیات فوق، دیاگرام آزاد جسم در دستگاه مختصات پنجه ربات در شکل 2 ترسیم می‌شود (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 $f = [f_{rx} + f_{lx} \;\; f_{ry} + f_{ly} \;\; N_r + N_l]^{\mathrm{T}}$ بردار نیروی اعمالی از طرف پنجه به جسم در مختصات پنجه است. شایان ذکر است N_r و N_l نیروی عمودی اعمالی از طرف انگشتان بر سمت چپ و راست، f_{lx} و f_{rx} نیروهای اصطکاکی در نقاط تماس از سمت چپ و راست و در راستای X_4 و f_{ly} و f_{ry} 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 می‌توان معادلات حرکت جسم را به‌صورت معادله (12) نمایش داد. شایان ذکر است که به‌دلیل سهولت در اندازه‌گیری مقدار لغزش رخداده برای جسم معادلات حرکت آن در امتداد محورهای پنجه (البته در مختصات مرجع) نوشته شده است.

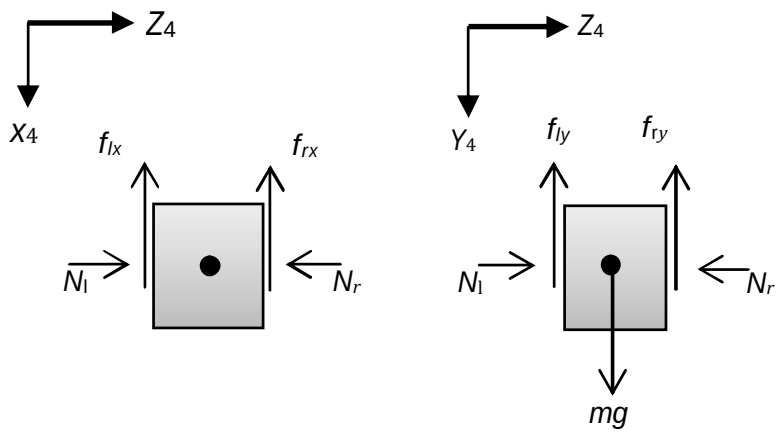
$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_{\mathrm{obj}} \\ \ddot{y}_{\mathrm{obj}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_{rx} - f_{lx} \\ -f_{ry} - f_{ly} + W \end{bmatrix} \qquad (12)$$

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

3- مدل‌سازی دینامیکی لغزش

بررسی حالت‌های مختلف لغزش جسم نیازمند بررسی رفتار دینامیکی آن می‌باشد. بنابر روابطی که در بخش مدل‌سازی جسم بیان شد، می‌توان حالت های مختلف نسبی را بین جسم و پنجه در نظر گرفت. بدین منظور تمامی نیروهای عکس‌العملی بین جسم و پنجه در نظر گرفته می‌شوند. لازم به توضیح است که مقدار نیروی عمودی بین جسم و گریپر به‌دلیل تقارن ($N = N_r = N_l$) با توجه معادله (13) محاسبه می‌شود و نحوه محاسبه نیروهای اصطکاکی در ادامه می‌آید.

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



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

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

با توجه به این‌که هدف، نگهداری جسم با اعمال حداقل نیروست و جسم در معرض مانورهای مختلف ربات قرار می‌گیرد، وضعیت‌های مختلف حرکتی بین جسم و انگشتان ایجاد می‌شود. این وضعیت‌ها شامل رهایی جسم، آستانه لغزش بین جسم و انگشتان، لغزش بین آن‌ها و درنهایت عدم لغزش بین جسم و انگشتان است که بسته به هرکدام 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 می‌شود. سپس برای محقق شدن گرفتن ایمن جسم، با توجه به روشی که در ادامه بیان شده است، مسیر مطلوب برای انگشت به‌دست آمده است.

4-1- روش گام به عقب

گام به عقب یک روش طراحی کنترل بازگشتی برمبنای تئوری لیاپانوف به‌صورت نظام‌مند می‌باشد. ریشه آن در روش خطی‌سازی پسخورد است که در سال 1980 ارائه شد [15]. در روش فوق روابط بازگشتی، قوانین کنترل بازخورد، توابع لیاپانوف، توابع ذخیره‌سازی و توابع پایدارسازی در یک روش سیستماتیک معرفی می‌شوند [21]. طراحی گام به عقب غیرخطی به شدت به روش خطی‌سازی پسخورد نزدیک و وابسته می‌باشد، با این تفاوت که روش خطی‌سازی پسخورد 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 و 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 نمود. این موضوع در سیستم‌های کنترلی در صنعت اهمیت 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 [15،20].

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

براساس [15]، برای اطمینان از پایداری مجانبی سیستم در روش گام به‌عقب، نیاز به در نظر گرفتن یک خروجی، تثبیت یک تابع ذخیره‌ساز و به‌دست آوردن تابع پایدارساز معتبر برای هر مرحله می‌باشد. 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 حلقه بسته با توجه به معادله (5) می‌باشد. با در نظر گرفتن خروجی به‌صورت معادله (14):

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

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

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

تابع ذخیره‌سازی به‌صورت معادله (16) در نظر گرفته می‌شود:

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

تابع پایدارساز نیز برابر رابطه (17) در نظر گرفته می‌شود:

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

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

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

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

$$\dot{W} = (\xi_1 - \xi_{1\mathrm{d}})^{\mathrm{T}}(\xi_2 - \xi_{2\mathrm{d}}) \quad (19)$$

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

با جای‌گذاری رابطه (19) و (20) در معادله (18) رابطه (21) به‌دست می‌آید:

$$\dot{V}(\xi, \xi_3) = (\xi_1 - \xi_{1\mathrm{d}})^{\mathrm{T}}(\xi_2 - \xi_{2\mathrm{d}}) + y^{\mathrm{T}}(\dot{\xi}_3 - \dot{\xi}_{3\mathrm{d}} - \frac{\delta\alpha_0(\xi)}{\delta\xi}\dot{\xi}) \quad (21)$$

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

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

با جای‌گذاری $\dot{\xi}$ 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، به‌دست می‌آید:

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

برای این‌که سیستم پایدار باشد، باید مشتق تابع لیاپانوف در رابطه (23)، منفی باشد؛ لذا اگر رابطه (24) برقرار باشد، پایداری مجانبی سیستم برقرار می‌شود:

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

با توجه به رابطه‌های (23) و (24)، می‌توان رابطه (25) را استنتاج نمود:

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

از طرفی با توجه به رابطه‌های (14) و (17)، رابطه (26) بدست می‌آید:

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

با جای‌گذاری رابطه (26) در (25)، رابطه (27) به‌دست می‌آید:

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

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

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

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) به‌صورت رابطه (30) پیشنهاد می‌گردد:

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

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

با فرض این‌که تمام پارامترها شناخته شده باشد و همچنین با داشتن موقعیت، سرعت و شتاب‌های مطلوب و همچنین جریان مطلوب (I_{d}) می‌توان معادله (5) را به‌صورت رابطه (31) بازنویسی نمود:

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

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

$$\xi_{3d} = K_r^{-1}\left[\hat{D}(\xi_1)\dot{\xi}_2^* + \hat{C}(\xi_1, \xi_2)\xi_2^* + \hat{G}(\xi_1) - J^{\mathrm{T}}\hat{F} - K_d\varepsilon\right] \quad (32)$$

که در رابطه فوق ξ_2^* و ε به‌صورت رابطه (33) و (34) تعریف می‌شوند:

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

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

در روابط فوق، ε متغیر کمکی برمبنای خطا و λ یک ماتریس $n \times n$ مثبت معین است. بردار خطای حالت‌های سیستم به‌صورت رابطه (35) تعریف می‌شود:

$$\tilde{\xi_2} = \xi_2 - \xi_{2\mathrm{d}}\ ,\tilde{\xi_1} = \xi_1 - \xi_{1\mathrm{d}}\ ,\tilde{\xi_3} = \xi_3 - \xi_{3\mathrm{d}} \quad (35)$$

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

با توجه به وجود نامعینی‌های پارامتری مثل جرم و اینرسی در ربات‌ها، تخمین این پارامترها به‌منظور کنترل سیستم امری ضروری می‌باشد. برای به‌دست 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 4-3-1 توضیح داده شده است.

$$D(\xi_1)\dot{\xi}_2^* + C(\xi_1, \xi_2)\xi_2^* + G(\xi_1) - J^{\mathrm{T}}F = Y(\xi_1, \xi_2, \xi_2^*, \dot{\xi}_2^*)p \quad (36)$$

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

4-3-1- تخمین پارامترها

با توجه به مدل دینامیکی (1)، تخمین پارامترها با روش تطبیقی و بر پایه‌ی استراتژی محاسبه جریان مطلوب بدست می‌آید، بنابراین جریان مطلوب را براساس پارامترهای نامعلوم سیستم می‌توان به شکل رابطه (37) نوشت:

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

که در رابطه (37)، $\hat{Y}p$ فرم پارامتری دینامیک سیستم بوده و با توجه به رابطه (38) به‌دست می‌آید،

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

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

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

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

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

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، به‌صورت رابطه (41) به‌دست می‌آید.

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

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

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

با جای‌گذاری رابطه (42) در (41)، معادله (43) حاصل می‌شود:

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

با جای‌گذاری ε از رابطه (38) و مشتق آن در (47)، رابطه (44) بدست می‌آید:

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

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

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

با استخراج $D(\xi_1)\dot{\xi}_2$ از معادله (45) و جای‌گذاری آن در رابطه (44)، رابطه (46) به‌دست می‌آید:

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

با ساده‌سازی رابطه (46)، رابطه (47) حاصل می‌شود:

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

با جای‌گذاری ξ_{3d} از رابطه (32) در (47) و مرتب‌سازی رابطه (48) به‌دست می‌آید:

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

که در رابطه (48) داریم:

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

رابطه (36) را در فرم خطای پارامتری می‌توان به‌صورت رابطه (49) بازنویسی نمود:

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

با در نظر گرفتن رابطه (49) می‌توان (48) را به‌صورت رابطه (50) نوشت:

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

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

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

لذا با توجه به رابطه (51) معادله (50) به‌صورت (52) تبدیل می‌شود.

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

رابطه تابع لیاپانوف (39) و مشتق آن (52) نشان می‌دهند که سیستم پایدار می‌باشد. لذا قانون تطبیق با استفاده از رابطه (55)، به‌صورت رابطه (53) بدست می‌آید:

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

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

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

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

که در (54)، $Y\epsilon R^{n\times r}$ ماتریسی از توابع شناخته شده بر حسب مختصات تعمیم یافته و مشتقات مراتب بالاتر آن‌ها و $p\epsilon R^r$ بردار r بعدی از پارامترهای نامعلوم ربات می‌باشد؛ 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}) می‌باشند که در جدول (1) ارائه شده است. مدل دینامیکی ربات اسکارا را به شکل ماتریسی، می‌توان به‌صورت رابطه (55) بیان نمود:

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

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

جدول 1 پارامترهای ربات

پارامترهای 10 تا 20	پارامترهای 1 تا 10
$p_{11} = a_1a_2m_2$	$p_1 = I_1$
$p_{12} = a_2m_5$	$p_2 = I_2 + I_3 + I_4 + I_5$
$p_{13} = a_1m_2$	$p_3 = a_1^2m_1$
$p_{14} = a_2m_5d_5$	$p_4 = a_2^2m_2$
$p_{15} = a_1m_5d_5$	$p_5 = a_1^2(m_2 + m_3 + m_4 + m_5)$
$p_{16} = I_4 + I_5$	$p_6 = a_2^2(m_3 + m_4 + m_5)$
$p_{17} = m_3 + m_4 + m_5$	$p_7 = m_5$
$p_{18} = a_1m_{\mathrm{obj}}$	$p_8 = m_5d_5$
$p_{19} = m_{\mathrm{obj}}$	$p_9 = m_5d_5^2$
$p_{20} = a_2m_{\mathrm{obj}}$	$p_{10} = a_1a_2(m_3 + m_4 + m_5)$

4-4- تعیین مسیر مطلوب برای حرکت انگشتان

مقدار مطلوب موقعیت انگشت جهت گرفتن ایمن جسم با توجه به‌شتاب اعمالی به جسم در اثر حرکت بازوها و وزن جسم محاسبه می‌شود. شتاب مطلوب حرکت جسم $a^{\mathrm{d}}_{\mathrm{obj}}$ در فاز عدم لغزش همان شتاب اعمالی به پنجه در زمانی است که مفصل‌های 1 تا 4 در موقعیت مطلوب خود قرار دارند و از معادلات دینامیکی ربات به‌دست می‌آید. مؤلفه‌های این شتاب $a^{d}_{\mathrm{obj}-x}$، $a^{d}_{\mathrm{obj}-y}$ و $a^{d}_{\mathrm{obj}-z}$ می‌باشند که تصویر شتاب‌های مطلق جسم به ترتیب در راستای x_4، y_4 و z_4 هستند (مطابق با رابطه 56).

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

حال به‌منظور 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)، به‌صورت روابط (57) و (58) حاصل می‌شود.

$$f_{\mathrm{d}-x} = m_{\mathrm{obj}} a^{\mathrm{d}}_{\mathrm{obj}-x} \qquad (57)$$

$$f_{\mathrm{d}-y} = m_{\mathrm{obj}} g + m_{\mathrm{obj}} a^{\mathrm{d}}_{\mathrm{obj}-y} \qquad (58)$$

که در روابط (57) و (58)، f_{d-x} و f_{d-y} به‌ترتیب 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 به‌صورت رابطه (59) است.

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

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) به‌دست می‌آید.

$$N_{\mathrm{d}} = \frac{f_{\mathrm{d}}}{\mu} \qquad (60)$$

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

$$N_{\mathrm{d}} = K_f (q^{\mathrm{d}}_5 - q_{5_0}) \qquad (61)$$

$$q^{\mathrm{d}}_5 = \frac{N_{\mathrm{d}}}{K_f} + q_{5_0} \qquad (62)$$

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 شبیه-سازی، یک ربات اسکارای 4 درجه آزادی به همراه یک درجه آزادی در پنجه با مفصل کشویی به‌کار برده شده است. ربات اسکارای مورد مطالعه شامل پنجه فک موازی با قابلیت حرکت انگشتان در طی مانور ربات، دارای 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 به‌دست 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 به‌خوبی 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 به‌کار 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. به‌طور خلاصه با توجه به نتایج شبیه‌سازی در تحقیق حاضر و مقایسه آن با تحقیقات در مراجع فوق که از روش گام به‌عقب 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 به‌عقب 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

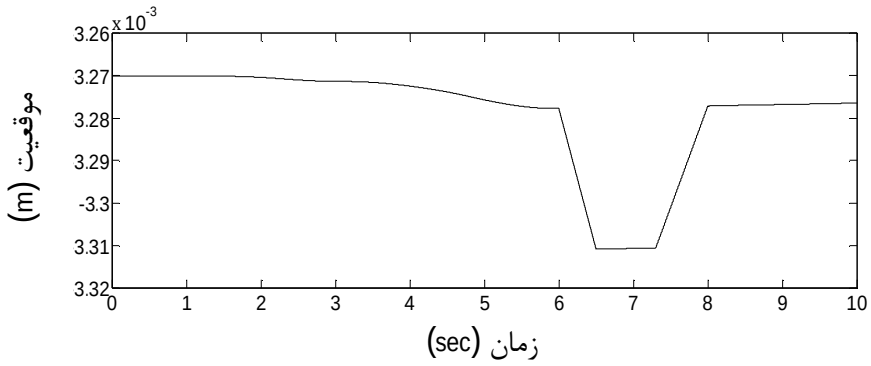
جدول 2 مشخصات ربات اسکارای مورد مطالعه

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	d_3 =متغیر
4	m_4 =0/02	d_4 =0/04
5	m_5 =0/2	d_5 =متغیر

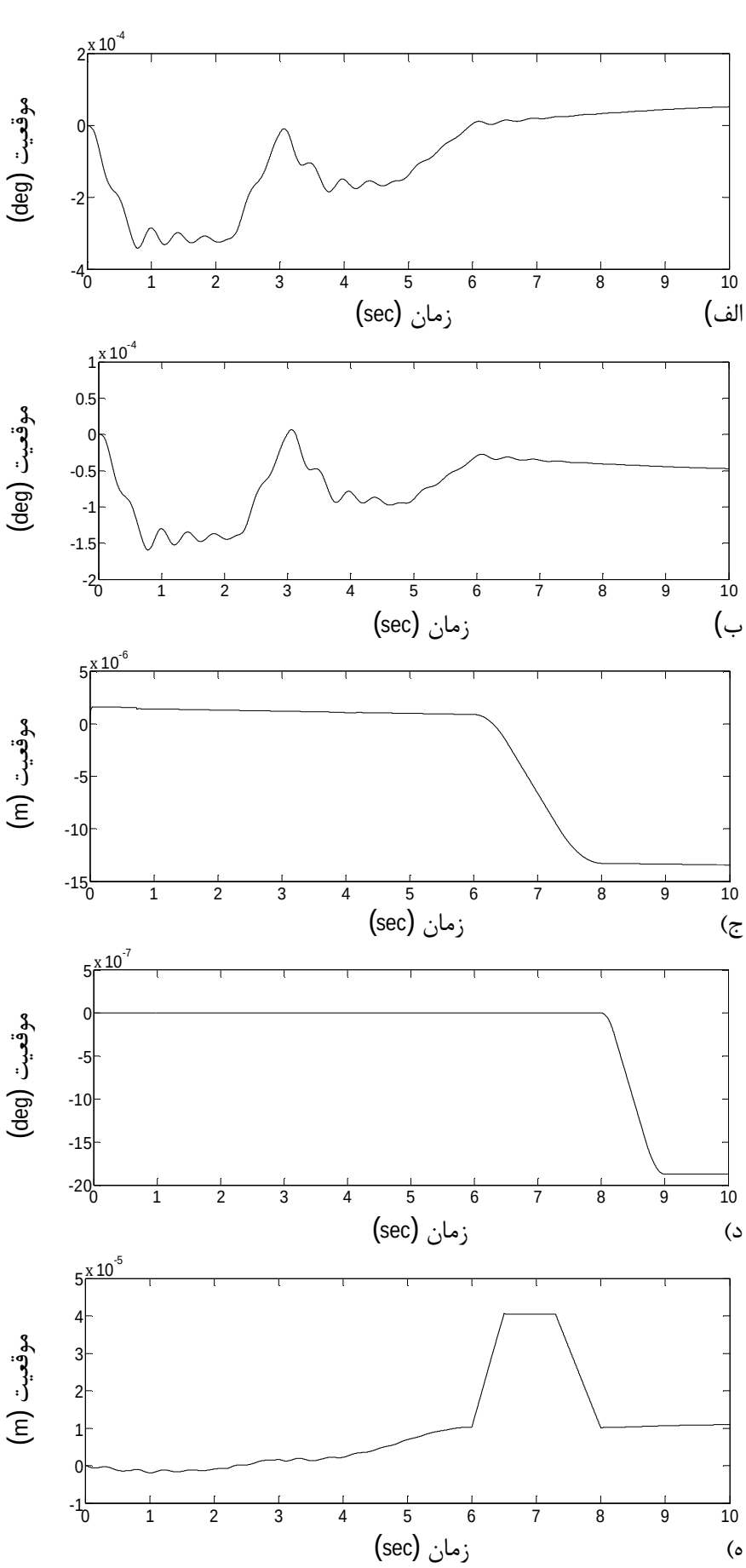
جدول 3 پارامترهای الکتریکی

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

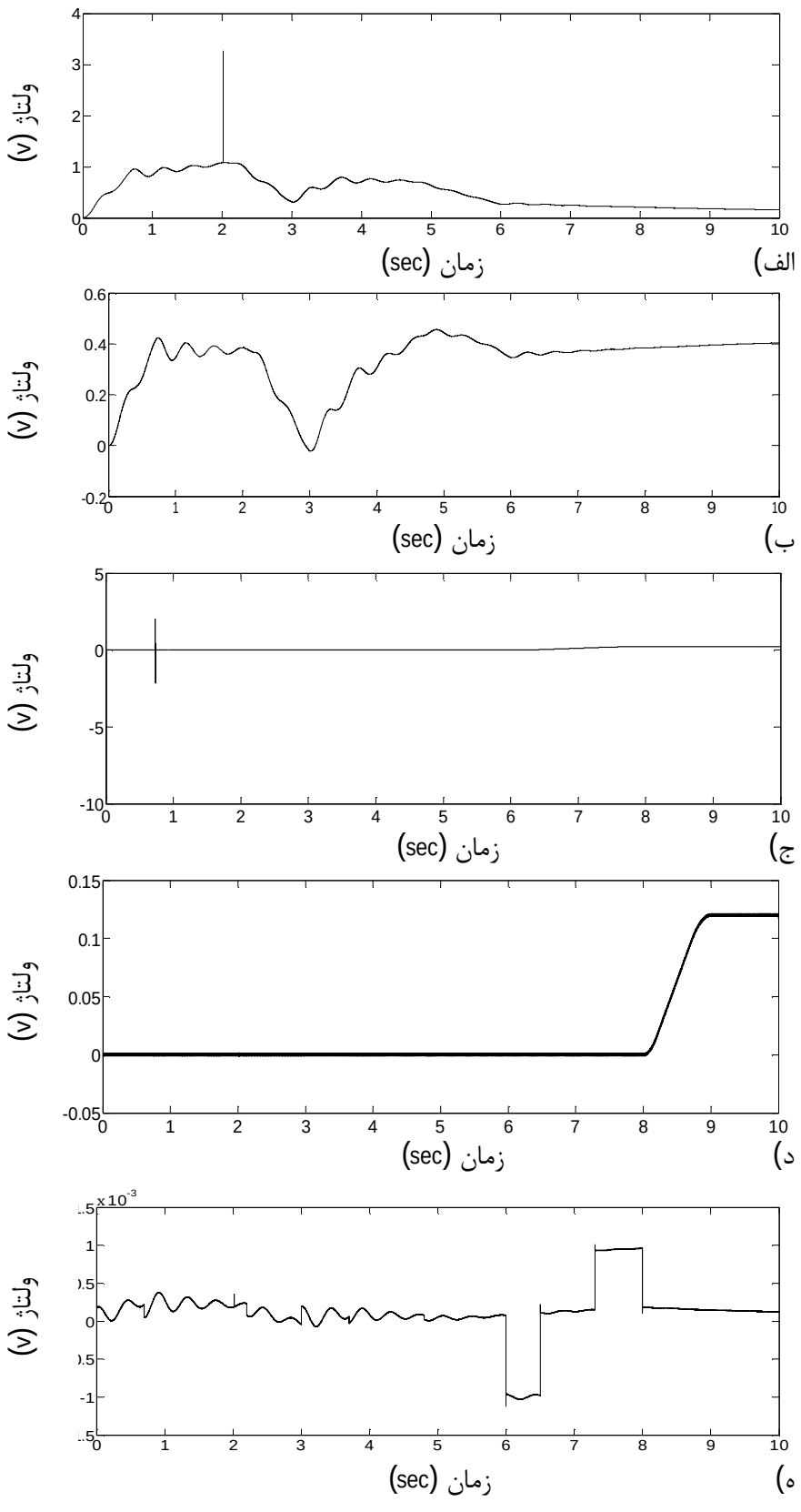
نتیجه گرفت که روش کنترل گام به عقب تطبیقی برای سیستم‌های غیرخطی‌ای که به فرم پسخورد صریح هستند، حتی در حضور عدم قطعیت‌ها دارای دقت بسیار خوبی است.



شکل 3 موقعیت مطلوب انگشت



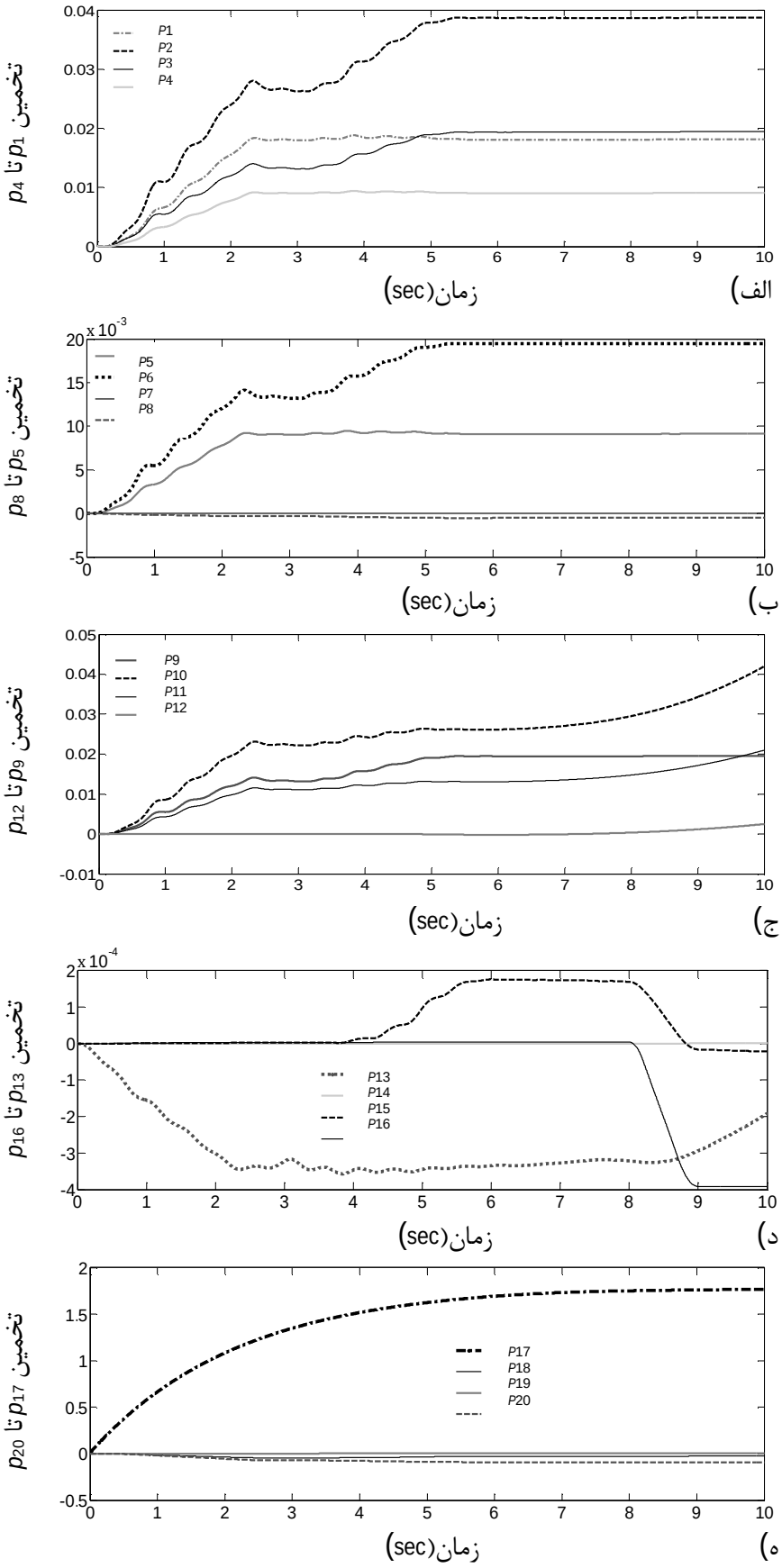
شکل 4 خطای موقعیت مفاصل ربات، الف) مفصل 1، ب) مفصل 2، ج) مفصل 3 د) مفصل 4، ه) مفصل 5



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 به‌عقب 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 به‌منظور 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 به‌عقب که یک تکنیک سیستماتیک بر پایه لیاپانوف است جهت طراحی سیستم کنترل پایدار برای سیستم غیرخطی مورد مطالعه به‌کار 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 به‌عقب تطبیقی، یک کنترل کننده پایدار جهت کنترل



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 نامعینی‌های پارامتری مثل جرم، اینرسی ربات و جرم جسم برای سیستم مورد مطالعه طراحی و پایداری آن برمبنای تئوری لیاپانوف اثبات شد. با اعمال کنترل کننده گام به‌عقب تطبیقی فوق به سیستم مورد مطالعه، روش لازم جهت تخمین پارامترهای نامعلوم برای استفاده در کنترل کننده انجام شد. شبیه‌سازی سیستم با اعمال کنترل کننده پیشنهادی بر روی ربات مورد مطالعه انجام شد و نتایج نشان داد که روش گام به‌عقب تطبیقی به‌خوبی پارامترهای سیستم را تخمین زده و در حضور عدم قطعیت پارامتری ردیابی مسیر و کنترل لغزش جسم را به خوبی انجام می‌دهد. جهت اعتبارسنجی، نتایج تحقیق حاضر با نتایج مراجع مشابه دیگر مقایسه شد که با توجه به نتایج شبیه‌سازی در تحقیق حاضر و مقایسه آن با تحقیقات در مراجع فوق که از روش گام به‌عقب به‌منظور ردیابی مسیر ربات استفاده کرده‌اند مشاهده شد که ردیابی مسیر با دقت خوبی به انجام رسید. مقایسه فوق برای مبحث ردیابی مسیر انجام شد؛ اما در مبحث گرفتن جسم و کنترل لغزش جسم، با توجه به این‌که روش گام به‌عقب تطبیقی برای اولین بار در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، مقدار اندک لغزش، دقت بالای این روش درکنترل لغزش جسم گرفته شده که تحت مانورهای ناشی از حرکت ربات قرار داشته است را به اثبات رساند. بنابراین با توجه به نتایج شبیه‌سازی می‌توان نتیجه گرفت که روش کنترل گام به عقب تطبیقی برای سیستم‌های غیرخطی‌ای که به فرم پسخورد صریح هستند، حتی در حضور عدم قطعیت‌ها 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 می‌توان معادلات دینامیکی ربات را به فرم پارامتری نوشت؛ لذا دینامیک ربات برحسب پارامترهای تعریف شده بدست آمده و در ادامه درایه‌های ماتریس‌های معادله (55) ارائه می‌شود. با توجه به معادله (55) درایه‌های ماتریس D که یک ماتریس 5×5 است به صورت زیر برحسب پارامترهای تعریف شده در جدول 1 به‌دست می‌آید.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

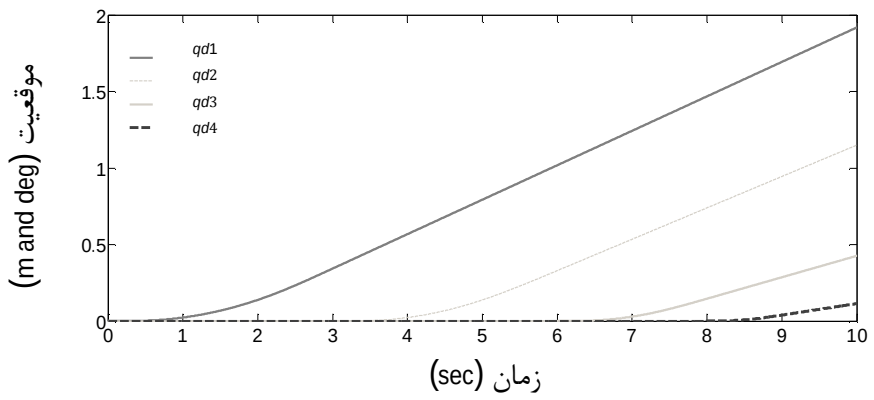
$$D_{55} = p_7 \; ,$$

همچنین با توجه به معادله (55) درایه‌های ماتریس G که یک ماتریس 5×1 است به‌صورت زیر برحسب پارامترهای تعریف شده در جدول 1 به‌دست می‌آید:

$$G_1 = G_2 = 0 \quad , G_3 = -g \times p_{17} \quad , G_4 = G_5 = 0$$

به همین ترتیب، با توجه به معادله (55) درایه‌های ماتریس C که یک ماتریس 5×5 است به‌صورت زیر برحسب پارامترهای تعریف شده در جدول 1 به‌دست می‌آید:

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



شکل 7 مسیر مطلوب رابط‌های 1 تا 4

$$C_{12} = 0.25p_7q_5q_{d5} + 0.75p_{13}q_{d5}s_{2-4} - 0.5p_{12}q_{d5}s_4 + 0.5p_{13}q_5q_{d1}c_{2-4} + 0.5p_{13}q_5q_{d2}c_{2-4} - 0.5p_{13}q_5q_{d4}c_{2-4} - -0.5p_{11}q_{d1}s_2 - 0.5p_{11}q_{d2}s_2 - p_{10}q_{d1}s_2 - p_{10}q_{d1}s_2 -0.5p_{12}q_5q_{d4}c_4 \ , C_{13} = 0, C_{14} = -0.25(p_7q_5q_{d5} + , 3p_{13}q_{d5}s_{2-4} - 3p_{12}q_{d5}s_4 + 2p_{13}q_5q_{d1}c_{2-4} + 2p_{13}q_5q_{d2}c_{2-4} - 2p_{13}q_5q_{d4}c_{2-4} + 2p_{12}q_5q_{d1}c_4 + 2p_{12}q_5q_{d2}c_4 - 2p_{12}q_5q_{d4}c_4) \ , C_{15} = 0.25(p_7q_5q_{d1} + p_7q_5q_{d2} - p_7q_5q_{d4} + 2p_{12}q_{d1}s_{2-4} + 3p_{13}q_{d2}s_{2-4} - 3p_{13}q_{d4}s_{2-4} - 2p_{12}q_{d1}s_4 - 2p_{12}q_{d2}s_4 + 3p_{12}q_{d4}s_4)$$

$$C_{21} = 0.25p_7q_5q_{d5} - 0.25p_{13}q_{d5}s_{2-4} - 0.5p_{12}q_{d5}s_4 - 0.5 p_{13}q_5q_{d1}c_{2-4} - 0.5p_{11}q_{d1}s_2 - p_{10}q_{d1}s_2 - 0.5p_{12}q_5q_{d4}c_4$$

$$C_{22} = -0.25(p_7q_5q_{d5} + 2p_{12}q_{d5}s_{4+}2p_{12}q_5q_{d4}c_4) \ , C_{23} = 0$$

$$C_{24} = 0.25(p_7q_{d5} - 3p_{12}q_{d5}s_4 + 2p_{12}q_5q_{d1}c_4 + 2p_{12}q_5q_{d2}c_4 - 2p_{12}q_5q_{d4}c_4) \ , C_{25} = 0.25(p_7q_5q_{d4} - p_7q_5q_{d2} - p_7q_5q_{d1} + p_{13}q_{d1}s_{2-4} + 2p_{12}q_{d1}s_4 + 2p_{12}q_{d2}s_4 - 3p_{12}q_{d4}s_4), C_{31} = C_{32} = C_{33} = C_{34} = C_{35} = 0$$

$$C_{41} = 0.25(-p_7q_5q_{d5} + 3p_{13}q_{d5}s_{2-4} - p_{12}q_{d5}s_4 + 2p_{13}q_5q_{d1}c_{2-4} + 2p_{12}q_5q_{d1}c_4 + 2p_{12}q_5q_{d2}c_4)$$

$$C_{42} = -0.25(p_7q_5q_{d5} + p_{12}q_{d5}s_4 - 2p_{12}q_5q_{d1}c_4 - 2p_{12}q_5q_{d2}c_4) , \ C_{43} = 0 \ , C_{44} = 0.25p_7q_5q_{d5}$$

$$C_{45} = 0.25(p_7q_5q_{d4} - p_7q_5q_{d2} - p_7q_5q_{d1} + p_{13}q_{d1}s_{2-4} - p_{12}q_{d1}s_4 + 2p_{12}q_{d2}s_4) \ , C_{51} = 0.25(p_7q_5q_{d4} - p_7q_5q_{d2} - p_7q_5q_{d1} - p_{13}q_{d1}s_{2-4} + p_{13}q_{d2}s_{2-4} - p_{13}q_{d4}s_{2-4} + 2p_{12}q_{d1}s_4 + 2p_{12}q_{d2}s_4 + p_{12}q_{d4}s_4)$$

$$C_{52} = 0.25(p_7q_5q_{d4} - p_7q_5q_{d2} - p_7q_5q_{d1} + p_{13}q_{d1}s_{2-4} + 2p_{12}q_{d1}s_4 + 2p_{12}q_{d2}s_4 + p_{12}q_{d4}s_4) \ , C_{53} = 0$$

$$C_{54} = 0.25(p_7q_5q_{d1} + p_7q_5q_{d2} - p_7q_5q_{d4} - p_{13}q_{d1}s_{2-4} + p_{12}q_{d1}s_4 + p_{12}q_{d2}s_4) \ , C_{55} = 0 \ ,$$

همچنین با توجه به معادله (55) درایه‌های ماتریس K که یک ماتریس 5×1 است به‌صورت زیر برحسب پارامترهای تعریف شده در جدول 1 به‌دست می‌آید:

$$K_1 = p_{18}((-F_xc_\varphi + F_zs_\varphi) s_1 - (-F_xs_\varphi + F_zc_\varphi)c_1) + p_{19}((-F_xc_\varphi + F_zs_\varphi)(-q_5 (c_4(s_1s_2 - c_1c_2) - s_4(c_1s_2 + s_1c_2))) + p_{20}((F_zs_\varphi - F_xc_\varphi) (-c_1s_{2-}s_1c_2) - (F_xs_\varphi + F_zc_\varphi)(s_1s_2 - c_1c_2)) \ ,$$

$$K_2 = p_{19}((-F_xc_\varphi + F_zs_\varphi)(-q_5(c_4(s_1s_2 - c_1c_2) - s_4(c_1s_2 + s_1c_2))) + p_{20}((F_zs_\varphi - F_xc_\varphi)(-c_1s_{2-}s_1c_2) - (F_xs_\varphi + F_zc_\varphi)(s_1s_2 - c_1c_2)), \ K_3 = F_yp_{19} \ ,$$

$$K_4 = p_{19}((-F_xs_\varphi + F_zc_\varphi)(-q_5(c_4s_1s_2 - c_1c_2) - s_4(c_1s_2 + s_1c_2)) - p_{19}((F_zs_\varphi - F_xc_\varphi)(c_4c_1s_2 + s_1c_2s_4) - s_4(s_1s_2 + c_1c_2)) \ ,$$

$$K_5 = p_{19}((-F_xs_\varphi + F_zc_\varphi)(-q_5(c_4(s_1s_2 - c_1c_2) - s_4(c_1s_2 + s_1c_2)) - p_{19}((F_zc_\varphi - F_xs_\varphi)(s_4(s_1s_2 - c_1c_2))$$

که در روابط فوق F_x ، F_y و F_z به ترتیب منتجه نیروهای 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 به‌صورت 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
f	نیروی اعمالی از پنجه به جسم در مختصات پنجه
F	بردار عکس‌العمل نیروهای اعمالی از جسم به پنجه
L	ماتریس مثبت معین و قطری اندوکتانس الکتریکی
R	ماتریس مثبت معین ثابت و قطری مقاومت الکتریکی
I	بردار $n \times 1$ جریان مفاصل
K_m	ماتریس مثبت معین ثابت قطری از ضرایب محرک
V	بردار $n \times 1$ ولتاژ ورودی آرمیچر
K_r	ضریب تبدیل الکترومکانیکی بین جریان و گشتاور
N	نیروی عمودی اعمالی از طرف انگشتان
W	وزن جسم
m	جرم جسم
K_f	سختی معادل برای انعطاف‌پذیری سیستم
q_{5_0}	موقعیت اولیه انگشت
$\hat{V}$	سرعت نسبی انگشتان نسبت به جسم

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–

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 Daynamics, *IEEE,* pp-1007-1012, 2003.
[16] R. J. Wai, Design of Fuzzy-Neural-Network Inherited Backstepping Control for Robot Manipulator Including Actuator Dynamics,*IEEE Trarns 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,* 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.