



جبران سازی لغزش رخ داده در گرفتن اجسام توسط پنجه ربات

حبیب احمدی^{1*}، هانیه اسماعیلی²، محمد مهدی فاتح³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مkatرونیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

3- استاد، مهندسی کنترل، دانشگاه شاهرود، شاهرود

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

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 13 شهریور 1393

پذیرش: 22 مهر 1393

ارائه در سایت: 09 آذر 1393

کلید واژگان:

کنترل لغزش

جبران لغزش

عمل گرفتن

جسم

پنجه ربات

عمل گرفتن در پنجه ربات هم در دست‌های مصنوعی و هم در ربات‌های صنعتی انجام می‌شود که در تمام آن‌ها مسئله لغزش به‌عنوان یک پدیده نامطلوب در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله، به‌منظور کنترل لغزش و تضمین رفتار حلقه بسته مطلوب، از کنترل گشتاور محاسبه‌شده استفاده شده است. با وجود این، مانورهای مختلف برای ردیابی مسیر در فضای کار توسط ربات، باعث ایجاد شتاب بر روی جسم گرفته‌شده خواهد شد و این تغییرات شتاب باعث لغزش جسم گرفته‌شده خواهد شد. لذا اعمال کنترل‌کننده به ربات، جهت ردیابی مسیر مطلوب، بر روی موقعیت جسم نسبت به پنجه اثر می‌گذارد. هرچند کنترل‌کننده گشتاور محاسبه‌شده برای تعقیب مسیر مطلوب بسیار خوب عمل می‌نماید، اما، با توجه به لغزشی که در حین عملیات گرفتن رخ می‌دهد، این مسیر مطلوب در راستای لغزش دچار تغییر می‌شود. لذا، در این مقاله، با ارائه تمهیدی برای اصلاح مسیر مطلوب در حین عمل گرفتن، نه‌تنها کنترل لغزش صورت می‌پذیرد، بلکه جبران مقدار لغزش رخ داده نیز انجام می‌شود تا بدین ترتیب جسم در موقعیت مناسب خود قرار داده شود. در این مقاله، جبران‌سازی لغزش رخ داده به‌صورت برخط توسط پنجه ربات ارائه شده است. با این رویکرد بهبود قابلیت پنجه ربات در جابه‌جایی ایمن اجسام در فضای کار و با توجه به موقعیت جسم نسبت به انگشتان ربات تضمین می‌شود.

Slip compensation of grasped objects in robot gripper

Habib Ahmadi^{1*}, Hanieh Esmaeeli², Mohamad Mehdi Fateh³

1- Department of Mechanical Engineering, University of Shahrood, Shahrood, Iran.

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

3- Department of Electrical and Robotic Engineering, University of Shahrood, Shahrood, Iran

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 04 September 2014
Accepted 14 October 2014
Available Online 30 November 2014

Keywords:
Slip Control
Slip Compensation
Grasping, Object
Robot Gripper

ABSTRACT

Grasping in robot gripper is an operation that is inevitably performed by prosthetic hands or industrial robots. Meanwhile, slipping of the grasped object is considered as an undesirable phenomenon in any kind of grasping. Here, the computed torque control is used in order to control slip and also guarantee the desired behavior of the closed loop system. Nevertheless, any acceleration changes of the robot's joints before completing the response time of the slip controller has a direct effect on the object position relative to the robot and causes slip phenomenon. Although the applied computed torque controller is suitable for tracking trajectory, the desired trajectory will be altered according to slip occurrence. This paper introduces a method to modify the desired trajectory during grasping an object. The modification is done according to the measured slip. These methods not only control the slip of the grasped object, but also compensate it. So the object could be handled and placed in its proper position in the task space. This approach guarantees the safe grasping and moving of objects according to object position relative to the gripper.

1- مقدمه

گرفتن قطعات صنعتی رخ می‌دهد این است که اجسام گرفته‌شده آزادانه می‌لغزند، می‌افتند و می‌شکنند. لغزش² در هنگام گرفتن بر اثر دلایل مختلفی همچون تغییرات در هندسه جسم، جرم، اینرسی و ضریب اصطکاک و یا ناشناخته بودن جسم به‌وجود می‌آید.

تحقیقات انجام‌شده در رابطه با مسئله لغزش سه مبحث کلی را در برمی‌گیرد: انتخاب پنجه مناسب برای گرفتن، شناسایی لغزش و کنترل لغزش. انتخاب پنجه مناسب با توجه به مسائل مختلفی چون هندسه جسم،

عمل گرفتن¹ عبارت است از مهار یک جسم توسط دست ربات به‌نحوی که امکان جابه‌جا کردن آن در یک مسیر مطلوب وجود داشته باشد. گرفتن جسم توسط پنجه ربات یکی از این موضوعاتی است که در کاربردهای گوناگون از جمله حمل جسم ظریف، گرفتن جسم بی‌قاعده یا نامنظم و سرهم‌بندی قطعات استفاده می‌شود. از جمله مشکلاتی که برای ناتوانان جسمی به‌هنگام استفاده از دست‌های مصنوعی مکانیکی و یا برای ربات‌های صنعتی به‌هنگام

2- Slip

1- Grasping

با محرک موتور جریان مستقیم⁵ 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 به درستی و بدون لغزش و یا صدمه دیدن جسم انجام دهد [13]. در ادامه روش‌های به کار رفته برای کنترل لغزش، بعضی از محققین در طرح خود از یک کنترل کننده چندحالتی استفاده نموده‌اند تا بتواند شرایط واقعی تر لغزش بین جسم و پنجه را با توجه به شرایط اصطکاکی هر فاز، شبیه سازی نمایند [14، 15]. 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 [16].

تحقیقات گذشته در زمینه گرفتن، روش‌هایی برای شناسایی و کنترل لغزش معرفی نموده‌اند، اما برای تغییر موقعیت ناشی از لغزش جسم، علاوه بر جلوگیری از لغزش، راهکاری لازم است که منجر به جبران لغزش رخ داده شود. تعابیر مختلفی از جبران لغزش شده است. در روشی، با استفاده از شناسایی ویژگی اصطکاکی سطح تماس، آستانه لغزش پیش‌بینی می‌شود و نیروهای اعمالی برای پیشگیری از لغزش تنظیم می‌شوند [17]. در مدل جیائوژینگ و همکارانش، یک پیش‌بینی کننده بلادرنگ لغزشی پیاده سازی شده است که نه تنها نیروهای فعال، بلکه تغییرات سرعت و شتاب و نیروهای آشوبی را نیز در نظر می‌گیرد و با کاربرد بینایی ماشین، برداشت مناسبی از وضعیت جسم گرفته شده به دست می‌آورد.

در تمام روش‌های فوق هدف گذاری روی توقف لغزش رخ داده است، در حالی که در فعالیت‌های مونتاژی و کارهایی که نیازمند دقت بالایی است، همچون جراحی با ربات، رخداد لغزش حتی برای چند میلی متر زیان آور است. از این رو، در تحقیق حاضر، مقدار جابه جایی جسم در اثر لغزش محاسبه می‌شود و روش نوینی برای جبران آن اعمال می‌شود. در این مقاله تمرکز بر روی ارائه روشی برای ثبت میزان لغزش رخ داده و اعمال تدابیر لازم برای کنترل و جبران آن است، به طوری که مسیر مطلوب مورد نظر جهت جابه جایی و گذاشتن جسم در موقعیت مناسب اصلاح شود.

در ادامه مطالب، بخش 2 مدل دینامیکی کل سیستم شامل ربات اسکارای 4 درجه آزادی به همراه یک درجه آزادی برای پنجه کشویی و جسم گرفته شده را ارائه می‌نماید. بخش 3 به مدل سازی دینامیکی لغزش می‌پردازد. بخش 4 کنترل ربات برای مهار لغزش را تشریح می‌کند. در بخش 5 روش نوینی برای کنترل، به منظور مهار و جبران سازی لغزش رخ داده، تشریح داده می‌شود. در بخش 6 نتایج شبیه سازی ارائه می‌شوند و در پایان، بخش 7 به نتیجه گیری می‌پردازد.

2- مدل سازی سیستم

در این قسمت مدل سازی سیستم مورد مطالعه قرار گرفته 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 جابه جایی جسم در آن ایجاد شود وجود دارد. لذا، سیستم از یک ربات اسکارا و جسمی که قرار است توسط پنجه این ربات گرفته شده و در شرایط ایمن جابه جا شود، تشکیل شده است. در ادامه دینامیک ربات و سپس دینامیک جسم ارائه شده است.

کاربرد ربات، سطح تماس با جسم و اصطکاک تماسی انجام می‌شود [1]. بعضی از محققین عملیات گرفتن را توسط یک دست چند انگشته برای یافتن یک پیگیربندی مناسب جهت ارضاء شرایط انحصار نیرو¹ برای اجسام دلخواه مورد توجه قرار داده‌اند [2] و بعضی دیگر با استفاده از روش‌های بهینه سازی به تنظیم پارامترهای طراحی مورد نیاز برای گرفتن اجسام پرداخته‌اند [3].

برای شناسایی و تشخیص جسم و همچنین قرار گرفتن دست ربات در موقعیت مناسب نسبت به جسم، از روش‌های برگرفته از رفتار انسانی مثل روش دیداری² و لمسی³ و یا از برنامه‌های از پیش تعیین شده (به صورت برخط و برون خط) جهت حرکت دست و انگشتان استفاده می‌شود. در زمینه شناسایی و ثبت لغزش، بعضی از محققین هدف خود را در طراحی حسگری برای شناسایی لغزش قرار داده‌اند. حسگر سرعت دست⁴ جزء اولین حسگرها برای استفاده در دست‌های مکانیکی بودند که باهدف جلوگیری خودکار از لغزش جسم گرفته شده طراحی شدند و به صورت تجاری درآمدند [4]. ای جی-ام هولوک و همکاران [5] لغزش را به چند مرحله تقسیم کردند و با معرفی ترکیبی از حسگرهای لمسی به صورت ماتریسی، لغزش را پس از وقوع شناسایی نمودند. اجزای اصلی این حسگر را یک لاستیک رسانا که مقاومت آن به نیروی به کار رفته در سطح وابسته است تشکیل می‌داد. در تحقیقی با استفاده از آشکارساز دمایی ساخته شده در ابعاد میکرو برای شناسایی شارش دما، حرارت همرفتی مرتبط با جابه جایی جسم گرفته شده حس می‌شود و هر افزایش شاری را نشانه لغزش می‌داند [6]. در تحقیقات دیگر در این زمینه حسگرهایی چون حسگر پیزوالکتریک و حسگر ردیابی نوری نیز برای شناسایی لغزش طراحی شد [7].

به دلیل صرف زمان طراحی و هزینه اضافی حسگرها، بعضی از محققین برای ثبت میزان لغزش از تغییرات پارامترهایی چون سرعت، شتاب و نرخ تغییرات نیروی مماسی استفاده کرده‌اند [8]. علاوه بر آن، افراد دیگری چون اریک دی انگبرگ و سنفورد جی میک [9] مستقیماً از نیروی مماسی و نیروی عمود بر سطح، هم در شناسایی و هم در کنترل لغزش استفاده کردند. تمرکز اصلی آن‌ها برای شناسایی لغزش جسم، عبور مشتق نیروی مماسی از فیلتر میان گذر و تقویت ارتعاشات روی داده در هنگام رخداد لغزش است.

از ابتدایی ترین راهکارهایی که برای پیشگیری و کنترل لغزش رخ داده در دست ربات انسان نما و یا صنعتی معرفی شده، راهبرد کنترل نیروست. مارک ترمبلی و همکارانش [10] در سال 1993، با استفاده از حسگر لمسی، لغزش را در مرحله اولیه شناسایی نموده و یک کنترل کننده ترکیبی نیرو-موقعیت به کار بردند که در راستای مماسی موقعیت و در راستای عمودی نیرو را کنترل می‌نماید. بعضی از سیستم‌ها نیز [11] بر مبنای استفاده از ویژگی‌های سیستم حسگری در شناسایی نیروها و کنترل لغزش طراحی شده‌اند. استفاده از کنترل لغزش بر اساس 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 [12]. او برای این منظور از یک کنترل کننده ترکیبی متشکل از کنترل کننده فازی و تناسی-انترگالی برای دست ربات دوانگشتی

1- Force closure
2- Visual
3- Tactile
4- Hand Speed Sensors

5- Direct Current

1-2- دینامیک ربات

از ربات اسکارا اغلب برای عملیات گرفتن و یا جابه‌جایی اجسام استفاده می‌شود. این ربات، بدون لحاظ درجه آزادی برای پنجه در نقطه انتهایی زنجیره، دارای 4 درجه آزادی است که شامل سه درجه مفصل لولایی و یک درجه مفصل کشویی مطابق شکل 1 است. سه درجه آزادی آن برای تعیین موقعیت مچ و پنجه و درجه آزادی چهارم برای هدایت پنجه در جهت موردنظر به‌کار می‌رود. موقعیت مفصل i ام با q_i نشان داده می‌شود. این موقعیت برای مفصل‌های لولایی برحسب رادیان و برای مفصل کشویی برحسب متر بیان می‌شود. در این مقاله جهت گرفتن اجسام یک پنجه فک موازی در نقطه نهایی ربات در نظر گرفته شده است. مفصل انگشت از نوع کشویی و دارای سطح صاف و مستطیلی شکل است. از مزایای این نوع پنجه این است که در ترکیب انگشتان موازی، نیرو بر روی سطح تماس توزیع می‌شود و احتمال پارگی یا ساییدگی جسم را کاهش می‌دهند.

به‌منظور تحلیل سینماتیکی ربات، روش استاندارد دناویت-هارتنبگ¹ [18] استفاده شده است. براساس روش فوق، دستگاه‌های مختصات مطابق با شکل 1 در نظر گرفته شده و پارامترهای متناظر آن در جدول 1 آمده است. با توجه به شکل 1، دستگاه مختصات $X_0Y_0Z_0$ عنوان دستگاه مرجع و دستگاه $X_4Y_4Z_4$ به عنوان دستگاه پنجه در نظر گرفته شده است.

با اعمال تبدیلات لازم، ماتریس انتقال همگن با استفاده از معادلات (1) و (2)، برای استفاده در سینماتیک مستقیم ربات به‌صورت ماتریس حاصل در رابطه (3) به‌دست می‌آید:

$$T_i^{i-1} = \text{Rot}(Z_{i-1}, \theta_i) \text{Trans}(Z_{i-1}, d_i) \text{Trans}(X_i, a_i) \text{Rot}(X_i, \alpha_i) \quad (1)$$

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & -\sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

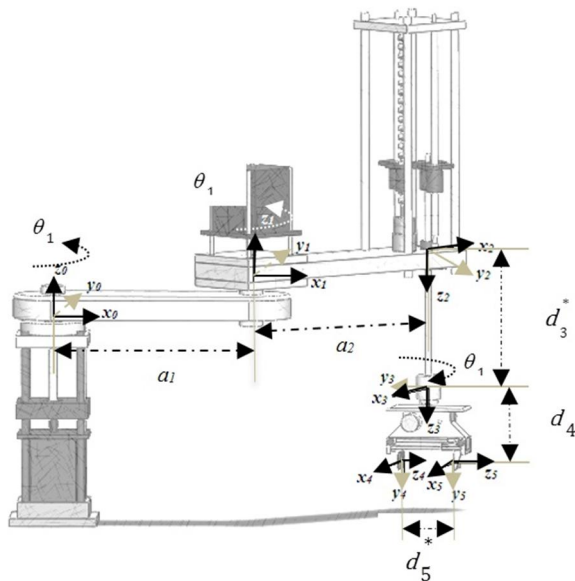
$$T = \begin{bmatrix} -C_4C_{12} - S_4S_{12} & 0 & C_4S_{12} - S_4C_{12} & C_1a_1 + a_5(C_4S_{12} - S_4C_{12}) + a_2C_{12} \\ -C_4S_{12} + S_4C_{12} & 0 & -C_4C_{12} - S_4S_{12} & S_1a_1 + a_5(-C_4C_{12} - S_4S_{12}) + a_2S_{12} \\ 0 & -1 & 0 & -d_4 - q_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در این معادلات، به‌دلیل ایجاد اختصار، روابط مثلثاتی به‌صورت زیر خلاصه‌سازی شده است:

$$S_i = \sin \theta_i, S_{i,j} = \sin(\theta_i + \theta_j),$$

$$C_i = \cos \theta_i, C_{i,j} = \cos(\theta_i + \theta_j)$$

برای جلوگیری از پیچیدگی‌های محاسباتی و نیز ساده‌سازی معادلات غیرخطی در به‌دست آوردن معادلات دینامیکی، از روش لاگرانژ² استفاده می‌شود.



شکل 1 طرح بازوی ماهر اسکارا به‌همراه پنجه فک موازی

جدول 1 مقداردهی پارامترهای دناویت-هارتنبگ

رابط شماره i	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	0	a_1	0	q_1^*
2	π	a_2	0	q_2^*
3	0	0	d_3^*	π
4	$\frac{\pi}{2}$	0	d_4	q_4^*
5	0	0	d_5^*	0

در روش لاگرانژ، کمیت‌های اسکالر انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل محاسبه شده و برحسب مختصات عمومی بیان می‌شوند. درنهایت، با استفاده از تابع لاگرانژ به‌صورت رابطه (4)، معادلات دینامیکی سیستم با استفاده از رابطه (5) محاسبه می‌شود:

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - U(q), \quad (4)$$

$$\tau = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} \quad (5)$$

که در روابط (4) و (5) داریم:

L تابع لاگرانژ

K انرژی جنبشی

U انرژی پتانسیل

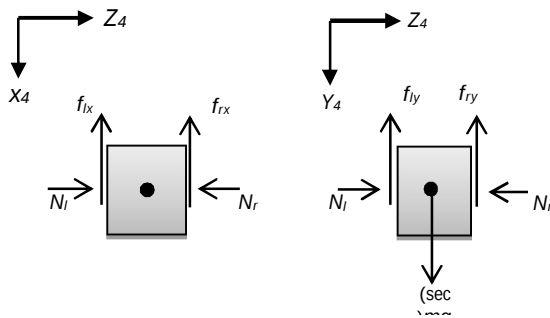
q بردار تعمیم‌یافته مختصات مفاصل

$\dot{q}$ بردار تعمیم‌یافته سرعت‌های مفاصل

τ بردار تعمیم‌یافته گشتاورها و نیروها

بنابراین، معادلات حرکت دینامیکی ربات n لینکی در تعامل با جسم با فرض عدم وجود انعطاف‌پذیری در مفاصل توسط معادله (6) بیان می‌شود.

1- Denavit- Hartenberg
2- Lagrange



شکل 2 دیاگرام آزاد جسم در دو صفحه $X_4 - Z_4$ و $Y_4 - Z_4$

امکان چرخش جسم در امتداد محورهای X_4 و Y_4 وجود ندارد. به بیانی دیگر، تقارن نیروهای فشاری و یکسان بودن ضریب اصطکاک در دو طرف جسم در صفحه $X_4 - Z_4$ باعث عدم چرخش حول محور Y_4 و در صفحه $Y_4 - Z_4$ باعث عدم چرخش حول محور X_4 می‌شود.

دو بازوی ابتدایی ربات اسکارا همواره در صفحه هم‌راستا با Z_4 حرکت می‌نمایند و حرکت چرخشی مفصل شماره 4 حول محور Y_4 است. از طرفی، با توجه به فرض گرفتن متقارن توسط پنجه و یکسان بودن ضریب اصطکاک در دو طرف و به شرط اینکه جسم طوری توسط فک‌ها گرفته شود که مرکز جرم دقیقاً در موقعیت وسط فک‌ها قرار داشته باشد، توزیع نیروهای اصطکاکی بین جسم و انگشت در طرفین جسم در صفحه $X_4 - Y_4$ به‌صورت متقارن و یکنواخت صورت می‌گیرد. بنابراین، نیروهای اصطکاکی، گشتاور یکدیگر را حول محور Z_4 خنثی می‌کنند. لذا گشتاوری حول محور Z_4 بر جسم اعمال نخواهد شد و همچنین مانورهای دیگر ربات حول محور Z_4 گشتاور ایجاد نخواهد کرد؛ بنابراین جسم در این امتداد نمی‌چرخد. از این‌رو لغزش جسم بین انگشتان تنها در امتداد محورهای X_4 و Y_4 خواهد بود. با توجه به مطالب فوق برای سیستم مورد مطالعه، معادلات حرکت جسم را می‌توان به‌صورت معادله (7) نمایش داد. شایان ذکر است که به‌دلیل سهولت در اندازه‌گیری مقدار لغزش رخ داده برای جسم معادلات حرکت آن در امتداد محورهای پنجه (البته در مختصات مرجع) نوشته شده است.

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{obj} \\ \dot{y}_{obj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_{lx} - f_{rx} \\ -f_{ly} - f_{ry} + W \end{bmatrix} \quad (7)$$

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- مدل سازی دینامیکی لغزش

بررسی حالت‌های مختلف لغزش جسم نیازمند بررسی رفتار دینامیکی آن است. بنابر روابطی که در بخش مدل‌سازی جسم بیان شد، می‌توان حالت‌های مختلف لغزش جسم را براساس مقدار نیروهای اعمالی بر آن و حرکت نسبی جسم نسبت به پنجه تحلیل کرد. بدین منظور از تمامی نیروهای عمودی اعمالی و اصطکاکی وارد به جسم استفاده می‌شود.

برای محاسبه نیروی عمودی به‌دلیل تقارن ($N = N_l = N_r$) معادله

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) - J^T F = \tau \quad (6)$$

که در این معادله $q \in \mathbb{R}^n$ بردار موقعیت مفاصل، $D(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ماتریس اینرسی ربات، جمله دوم بردار گشتاورهای کریولیس و مرکزگرا، $G(q) \in \mathbb{R}^n$ بردار گشتاورهای گرانشی، $\tau \in \mathbb{R}^n$ بردار گشتاورهای اعمالی به مفاصل ربات و F بردار عکس‌العمل نیروهای اعمالی از جسم به پنجه در مختصات $X_0 Y_0 Z_0$ هستند.

2-2- 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 [19]. در تحلیل و بررسی این مسئله فرض‌های ذیل برای سیستم مورد مطالعه در نظر گرفته شده است.

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 گرفته‌شده 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 تعبیه‌شده 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 $f = [f_{rx} + f_{lx}, f_{ry} + f_{ly}, N_r + N_l]^T$ 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_{ly} و f_{ry} نیروهای اصطکاکی در نقاط تماس بر سمت چپ و راست جسم در راستای محور Y_4 هستند.

در حالت کلی جسم در فضا شش درجه آزادی دارد، اما با توجه نوع سازوکاری که در این تحقیق برای گرفتن توسط دو فک موازی در پنجه ربات اسکارا در نظر گرفته شده است، یک درجه آزادی آن در امتداد محور Z_4 با مؤلفه حرکتی پنجه یکسان بوده و با توجه به فک موازی بودن انگشتان پنجه

(8) برقرار است:

$$N = k_f (q_5 - q_{5_0}) \quad (8)$$

در رابطه فوق k_f سختی معادل برای انعطاف پذیری سیستم مورد مطالعه بوده و q_{5_0} موقعیت اولیه انگشت است.

با توجه به اینکه هدف مسئله 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. لذا وضعیت های مختلف تماسی بین جسم و انگشتان را می توان به صورت زیر دسته بندی کرد.

3-1- لغزش در نقاط تماس

در صورت لغزش در نقاط تماس سرعت نسبی جسم نسبت به انگشتان مخالف صفر خواهد بود که این شرط به صورت رابطه (9) بیان می شود:

$$|\hat{V}| = |\hat{x}i + \hat{y}j| > 0 \quad (9)$$

که در این رابطه $\hat{V}$ سرعت نسبی انگشتان نسبت به جسم و $\hat{X} = \dot{X}_{grip} - \dot{X}_{obj}$ و $\hat{Y} = \dot{Y}_{grip} - \dot{Y}_{obj}$ به ترتیب مؤلفه های آن در راستای محور X_4 و Y_4 هستند. شایان ذکر است $\dot{X}_{grip}$ و $\dot{Y}_{grip}$ مؤلفه های سرعت پنجه در راستای محورهای X_4 و Y_4 هستند. شرط فوق به معنی وجود لغزش بین جسم و پنجه بوده و در نتیجه برآیند نیروهای اصطکاکی در هر سطح با استفاده از رابطه اصطکاک کولمبی یعنی $\mu_r N$ و $\mu_l N$ به دست می آید که در این روابط μ_r و μ_l به ترتیب ضریب اصطکاک سمت راست و چپ جسم است. حال، برای اینکه بتوان مؤلفه های نیروی اصطکاکی را در جهات X_4 و Y_4 به دست آورد، باید به این نکته توجه کرد که به علت وجود سرعت نسبی بین جسم و انگشتان، راستای نیروی اصطکاکی و سرعت نسبی در هر سمت هم ارز است؛ لذا می توان مؤلفه های نیروی اصطکاک را با توجه به راستای مؤلفه های سرعت نسبی به دست آورد. بنابراین، با توجه به اینکه $\hat{X} = \dot{X}_{grip} - \dot{X}_{obj}$ و $\hat{Y} = \dot{Y}_{grip} - \dot{Y}_{obj}$ معرف سرعت نسبی انگشتان نسبت به جسم در راستای Y_4 و X_4 هستند، می توان مؤلفه های نیروی اصطکاکی را با معادلات (10) نمایش داد.

$$\begin{aligned} f_{lx} &= \frac{-\hat{X}}{\sqrt{\hat{X}^2 + \hat{Y}^2}} \times |\mu_l N| \\ f_{ly} &= \frac{-\hat{Y}}{\sqrt{\hat{X}^2 + \hat{Y}^2}} \times |\mu_l N| \\ f_{rx} &= \frac{-\hat{X}}{\sqrt{\hat{X}^2 + \hat{Y}^2}} \times |\mu_r N| \\ f_{ry} &= \frac{-\hat{Y}}{\sqrt{\hat{X}^2 + \hat{Y}^2}} \times |\mu_r N| \end{aligned} \quad (10)$$

3-2- عدم لغزش

در حالتی که نیروی عمودی کافی جهت مهار جسم توسط انگشتان اعمال شود، شتاب جسم با شتاب پنجه برابر شده و در نتیجه حرکت انگشتان مستقیماً به جسم اعمال می شود. بنابراین، در این وضعیت دو قید، مطابق رابطه (11)، بر رفتار سیستم حاکم خواهد بود.

$$\begin{aligned} X_{obj} &= X_{grip} \\ Y_{obj} &= Y_{grip} \end{aligned} \quad (11)$$

در رابطه (11)، X_{grip} و X_{obj} تصویر موقعیت جسم و پنجه در راستای X_4 و Y_{grip} و Y_{obj} تصویر موقعیت جسم و پنجه ربات در راستای Y_4 است. لذا، با توجه به برقراری قیود فوق، می توان شتاب جسم را به دست آورده و با لحاظ فرض تقارن در سیستم، معادلات حرکت جسم را برای به دست آوردن نیروهای اصطکاکی به کار برد.

3-3- آستانه لغزش

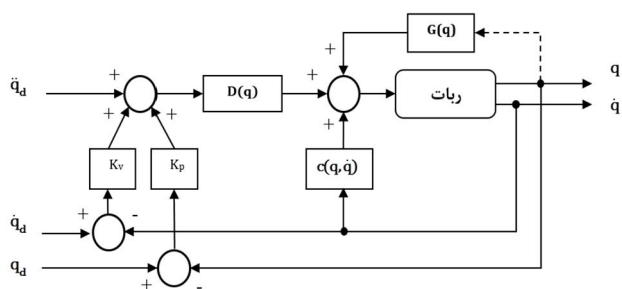
اگر شرط $|\hat{V}| = |\hat{x}i + \hat{y}j| \neq 0$ و $|\hat{V}| = |\hat{x}i + \hat{y}j| = 0$ برقرار باشد، علی رغم سرعت نسبی صفر بین جسم و پنجه، مجموع نیروهای اعمالی بر جسم از ظرفیت اصطکاکی در نقاط تماس بیشتر شده و با ایجاد یک شتاب نسبی، جسم را در آستانه لغزش قرار می دهد. در این وضعیت نیز رابطه اصطکاک کولمبی برای محاسبه نیروی اصطکاکی برقرار خواهد بود، با این تفاوت که روش تعیین جهت و راستای آن با توجه به اینکه سرعت نسبی صفر است از روی شتاب جسم نسبت به انگشتان به دست می آید. با توجه به اینکه اندازه برآیند نیروی اصطکاکی در هر سطح $\mu_r N$ و $\mu_l N$ است، می توان نیروهای اصطکاک f_{lx} ، f_{ly} ، f_{rx} و f_{ry} را با توجه به راستای شتاب نسبی به صورت رابطه (12) تعریف کرد:

$$\begin{aligned} f_{lx} &= \frac{\ddot{X}}{\sqrt{\ddot{X}^2 + \ddot{Y}^2}} \times |\mu_l N| \\ f_{ly} &= \frac{\ddot{Y}}{\sqrt{\ddot{X}^2 + \ddot{Y}^2}} \times |\mu_l N| \\ f_{rx} &= \frac{\ddot{X}}{\sqrt{\ddot{X}^2 + \ddot{Y}^2}} \times |\mu_r N| \\ f_{ry} &= \frac{\ddot{Y}}{\sqrt{\ddot{X}^2 + \ddot{Y}^2}} \times |\mu_r N| \end{aligned} \quad (12)$$

توضیح این نکته لازم است که فاز آستانه لغزش، مرز بین لغزش و عدم لغزش است؛ از این رو می توان آن را معادل با فاز عدم لغزش و یا لغزش فرض نمود. لذا هر دودسته معادلات در فازهای فوق برای فاز آستانه لغزش نیز صادق خواهند بود.

4- کنترل برای مهار لغزش

در این بخش روش کنترلی گشتاور محاسبه شده برای اهداف ردیابی مورد استفاده قرار می گیرد. برای محقق شدن این امر، با توجه به روشی که در ادامه بیان شده است، مسیر مطلوب برای انگشت با توجه شرایط مطلوب برای گرفتن ایمن جسم به دست آمده است.



شکل 3 بلوک-دیاگرام CTC برای بازوی ماهر

مطلوب سرعت و شتاب جسم نسبت به ربات صفر شود، لذا برای برقراری کنترل لغزش، نیروی گرفتن جسم تنها به موقعیت مطلوب پنجه ربات وابسته می‌شود. برای رسیدن به این هدف دو راهکار متفاوت وجود دارد. در راهکار اول، پس از شناسایی لغزش به کمک یکی از روش‌های شناسایی گفته‌شده در بخش (1)، لغزش از جنس نیرو یا شتاب شناسایی می‌شود و سپس، با قرار دادن یک کنترل کننده نیرو یا شتاب مناسب، موقعیت مطلوب پنجه با ورودی شتاب یا نیرو کنترل می‌شود. در راهکاری دیگر، می‌توان با توجه به مودهای مختلف لغزشی ارائه‌شده در قسمت قبل و استفاده از روابط مربوطه لغزش را شناسایی نمود و بین نیروی اعمالی و موقعیت مطلوب پنجه رابطه‌ای منطقی برقرار کرد. در روش پیشنهادی این مقاله راهکار دوم به کار برده شده است.

2-4- تعیین مسیر مطلوب برای حرکت انگشتان

مسیر مطلوب این ربات به گونه‌ای تعریف می‌شود که بتواند به خوبی گویای جبران رخداد لغزش در اثر جابه‌جا شدن جسم باشد. موقعیت مطلوب مفاصل 1 تا 4 به صورت دلخواه و با رعایت قیود عملکرد اعمال می‌شود، ولی مقدار مطلوب موقعیت انگشت با توجه به شتاب اعمالی به جسم در اثر حرکت بازوها و وزن جسم محاسبه می‌شود.

شتاب مطلوب حرکت جسم $\ddot{a}_{obj}^d$ 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 به دست می‌آید. مؤلفه‌های این شتاب $\ddot{a}_{obj,x}^d$ ، $\ddot{a}_{obj,y}^d$ و $\ddot{a}_{obj,z}^d$ می‌باشند که تصویر شتاب‌های مطلق جسم به ترتیب در راستای X_4 ، Y_4 و Z_4 هستند (مطابق با رابطه (16)).

$$\begin{aligned}\ddot{a}_{obj,x}^d &= \ddot{a}_{grip,x} \\ \ddot{a}_{obj,y}^d &= \ddot{a}_{grip,y} \\ \ddot{a}_{obj,z}^d &= \ddot{a}_{grip,z}\end{aligned}\quad (16)$$

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 (16) در معادله دینامیکی جسم، یعنی معادله (7)، به صورت روابط (17) و (18) حاصل می‌شود.

$$f_{d,x} = m_{obj} \ddot{a}_{obj,x}^d + \varepsilon \quad (17)$$

$$f_{d,y} = m_{obj} g + m_{obj} \ddot{a}_{obj,y}^d + \varepsilon \quad (18)$$

1-4- کنترل گشتاور محاسبه شده

دینامیک بازوی ماهر ربات شدیداً غیرخطی است و به همین دلیل طراحی کنترل کننده کارآمد برای آن مشکل است. روش‌های کنترل کلاسیک به خوبی شناخته شده است، اگرچه در حضور شرایط غیرخطی شدید، به خوبی عمل نمی‌کنند. از طرف دیگر روش‌های کنترل کننده‌های غیرخطی [20] بهتر جواب می‌دهند، اما طراحی و تحلیل‌های غیرخطی به شفافیت و سازگاری روش‌های خطی نیست.

یک روش شناخته شده برای بهبود رفتار بازوی ماهر برای اهداف ردیابی، روش کنترل گشتاور محاسبه شده است و از این پس برای رعایت اختصار CTC¹ نامیده می‌شود. در این روش، قانون کنترل، به منظور جبران جملات غیرخطی در روابط دینامیک ربات و تضمین رفتار حلقه بسته مطلوب، صریحاً براساس مدل به دست می‌آید. با استفاده از کنترل گشتاور محاسبه شده می‌توان به معادلات حلقه بسته خطی دست یافت که با انتخاب مناسب ضرایب، پایداری حل تضمین خواهد شد.

اگر مسیر مطلوب حرکت ربات با $q_d(t)$ نشان داده شود، آنگاه خطای ردیابی به صورت رابطه (13) تعریف می‌شود:

$$e(t) = q_d(t) - q(t) \quad (13)$$

قانون کنترل گشتاور محاسبه شده به صورت رابطه (14) است:

$$\tau = D(q) [\ddot{q}_d + K_v \dot{e} + K_p e] + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) - J^T F \quad (14)$$

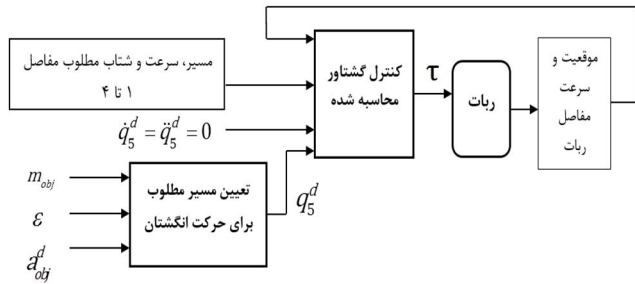
که در آن K_p و K_v به ترتیب ماتریس‌های متقارن مثبت هستند و با این تعریف پایداری سیستم حلقه بسته تضمین خواهد شد. خطای موقعیت مفصل ربات، $e(t) = q_d(t) - q(t)$ و خطای سرعت $\dot{e}(t) = \dot{q}_d(t) - \dot{q}(t)$ تعریف می‌شود. قانون کنترل (14) دربردارنده جمله $K_v \dot{e} + K_p e$ است که خود از نوع کنترل کننده تناسبی- مشتقی است؛ اما پس از ضرب این جمله در ماتریس اینرسی $D(q)$ ، بهره موقعیت و سرعت، دیگر ثابت نبوده که این خود، ماتریس بهره را به صورت مناسب در وضعیت‌های کشیدگی با مقدار بیشتر و در وضعیت‌های جمع شدگی با مقدار کمتر، تنظیم می‌نماید و مقدار این عبارت به خطای موقعیت بستگی می‌یابد. از این رو نمی‌توان آن را یک کنترل کننده خطی همچون تناسبی- مشتقی به حساب آورد، بلکه این کنترل کننده به طور مناسب ضرایب را تنظیم می‌نماید.

با جایگذاری قانون کنترل (14) در معادله دینامیکی ربات (6) رابطه دینامیک خطای کنترل (15) به دست می‌آید:

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = 0 \quad (15)$$

با توجه به معادله (15) و بنابر نظریه پایداری سیستم‌های خطی، با انتخاب K_p و K_v به عنوان ماتریس‌های متقارن مثبت، همگرایی خطای ردیابی به صفر تضمین می‌شود. بلوک-دیاگرام نشان دهنده CTC برای بازوی ماهر در شکل 3 نشان داده شده است.

برای گرفتن و مهار لغزش جسم توسط پنجه ربات لازم است نیروی مورد نیاز از طرف آن بر جسم اعمال شود. لذا، با توجه اینکه کنترل کننده CTC تابعی از موقعیت، سرعت و شتاب مطلوب مفاصل ربات است، می‌توان با وابسته کردن نیروی گرفتن جسم به این مقادیر مطلوب در پنجه ربات، هر لحظه لغزش را کنترل نمود. لازمه نداشتن لغزش این است که مقادیر



شکل 4 بلوک- دیاگرام کنترلی در جهت مهار لغزش

اصلاح مسیر حرکت برای جبران لغزش در امتدادهای فوق است. با توجه به امتداد محورهای پنجه نسبت به مختصات مرجع، جبران لغزش ایجاد شده در امتداد محور Y_4 را می‌توان با اصلاح مسیر مفصل کشویی 3 جبران نمود. همچنین، برای جبران لغزش رخ داده در امتداد محور X_4 بایستی مسیر مفصل 1 و 2 را طوری اصلاح نمود که این لغزش را در امتداد X_4 جبران نماید. در این خصوص لازم است که مقدار لغزش در امتداد X_4 را در مختصات مرجع بیان نمود و از طریق سینماتیک معکوس مقادیر لازم برای اصلاح مسیر مفصل 1 و 2 را به دست آورد. از طرف دیگر تغییر مسیر مطلوب مفصل 1 و 2 باعث تغییر جهت گیری نهایی مورد نظر در پنجه می‌شود. لذا، لازم است مسیر مطلوب مفصل چرخشی 4 نیز با توجه به تغییرات فوق به نحوی اصلاح شود که این انحراف از جهت گیری نهایی پنجه را جبران نماید.

6- شبیه سازی

در این بخش، برای بررسی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی و روش جبران سازی لغزش بیان شده در بخش 5، 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 و روش ارائه شده جهت جبران لغزش بررسی شود. در این شبیه سازی، براساس کاربرد و نیازهای فضای کار، یک ربات اسکارای 4 درجه آزادی با پیکره بندی R-R-P-R1 به همراه یک درجه آزادی در پنجه با مفصل کشویی به کار برده شده است. این ربات اسکارای توسعه یافته توسط پنجه فک موازی با قابلیت حرکت انگشتان در طی مانور ربات، دارای مشخصات نشان داده شده در جدول 2 است. همچنین، جسم گرفته شده، صلب و مکعب مستطیل شکل است که با انگشتان ربات تماس سطحی برقرار می‌کند و تماماً از ویژگی‌هایی که در بخش 2-2 عنوان شد پیروی می‌نماید.

6-1 نتایج شبیه سازی با اعمال کنترل کننده برای مهار لغزش

با توجه به اهداف شبیه سازی در کنترل و مهار لغزش، مسیر مطلوب برای مفصل 1 تا 4 ربات مطابق با شکل 1 از پیوست در نظر گرفته می‌شود. همچنین، موقعیت مطلوب انگشت (شکل 5) نیز برای کاربرد در کنترل کننده CTC مطابق با رابطه (14) تولید می‌شود. پس از اعمال کنترل کننده برای گرفتن جسم و مهار لغزش آن، مقدار خطای ردیابی مسیر برای مفصل 1 تا 5 محاسبه شده است و نتایج آن در شکل 6 آمده است.

که در روابط (17) و (18)، f_{d_y} و f_{d_x} 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 (19) است.

$$f_d = \sqrt{f_{d_x}^2 + f_{d_y}^2} \quad (19)$$

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 (20) به دست می‌آید.

$$N_d = \frac{f_d}{\mu} \quad (20)$$

همچنین، با توجه به رابطه (8) مقدار نیروی عمودی مطلوب انگشت به شکل رابطه (21) به دست می‌آید. حال می‌توان با استفاده از این رابطه و جایگذاری نیروی مطلوب، موقعیت مطلوب انگشت را محاسبه نمود.

$$N_d = K_f (q_5^d - q_{5_0}) \quad (21)$$

$$q_5^d = \frac{N_d}{K_f} + q_{5_0} \quad (22)$$

با توجه به آنچه در این بخش عنوان شد، دیاگرام کنترلی ربات برای کنترل لغزش به صورت شکل 4 طراحی می‌شود.

5- کنترل به منظور مهار و جبران لغزش به طور همزمان

5-1- مقدار لغزش

با استفاده از روش کنترلی بخش 4، شناسایی و کنترل لغزش انجام می‌شود؛ اما اعمال هرگونه تغییرات شتاب بر روی مفصل ربات به منظور ایجاد مانور مورد نیاز و تا زمان مهار لغزش جسم توسط کنترل کننده اعمالی، تغییرات موقعیت جسم را نسبت به پنجه به دنبال دارد. این تغییر موقعیت نسبی جسم به عنوان مقدار لغزش در نظر گرفته می‌شود.

قبل از اعمال روش مورد نظر برای جبران لغزش، به محاسبه مقدار لغزش جسم و موقعیت جدید پس از لغزش نیاز است تا بتوان با توجه به مقدار فوق تمهیدات لازم را جهت جبران آن لحاظ کرد. لذا مقدار لغزش جسم در انگشتان ربات در راستاهایی که لغزش صورت می‌گیرد با توجه به روابط (23) و (24) به دست می‌آید.

$$slip_x = X_{obj} - X_{grip} \quad (23)$$

$$slip_y = Y_{obj} - Y_{grip} \quad (24)$$

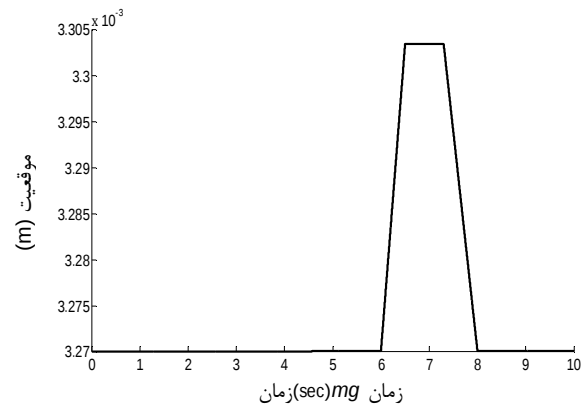
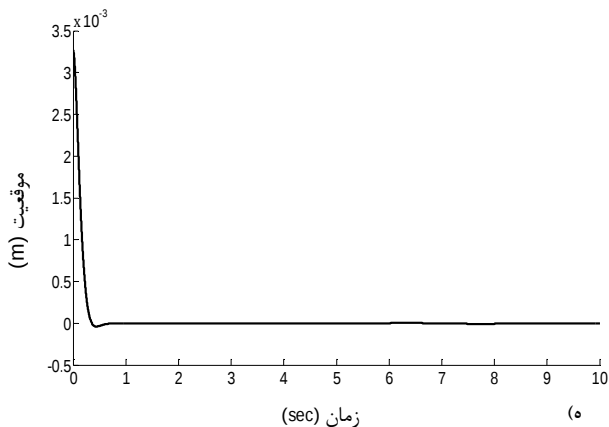
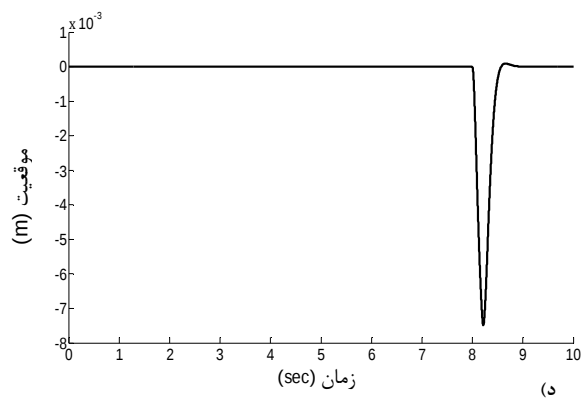
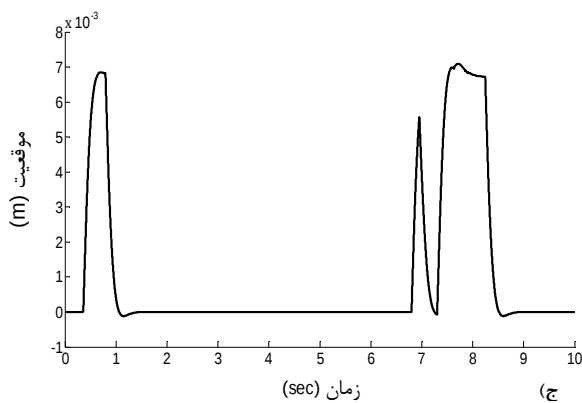
که در روابط فوق $slip_x$ و $slip_y$ به ترتیب مقادیر لغزش در راستای X_4 و Y_4 است.

5-2- جبران لغزش

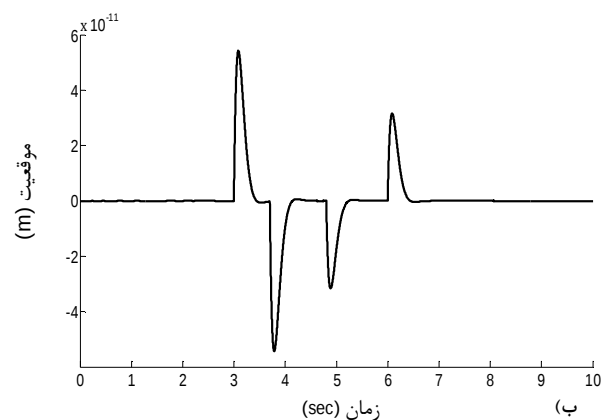
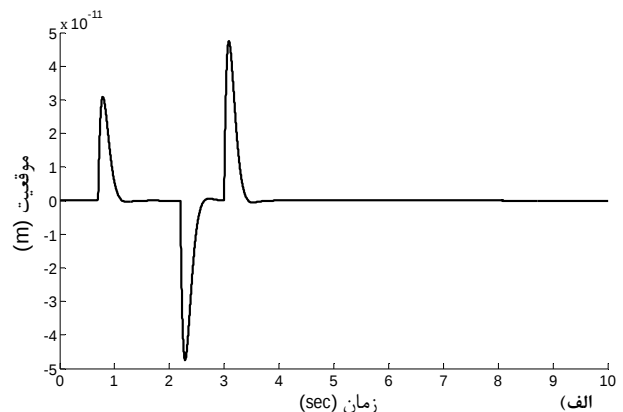
همان طور که در بخش 3 اشاره شد، لغزش جسم در امتدادهای X_4 و Y_4 رخ می‌دهد. راهکاری که در این مقاله برای جبران لغزش ارائه می‌شود

جدول 2 مشخصات ربات اسکارای طراحی شده

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



شکل 5 موقعیت مطلوب انگشت

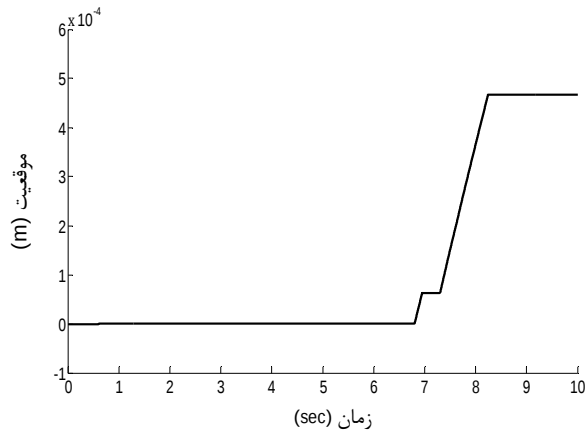


شکل 6 خطای موقعیت مفاصل ربات، الف) مفصل 1، ب) مفصل 2، ج) مفصل 3، د) مفصل 4، ه) مفصل 5

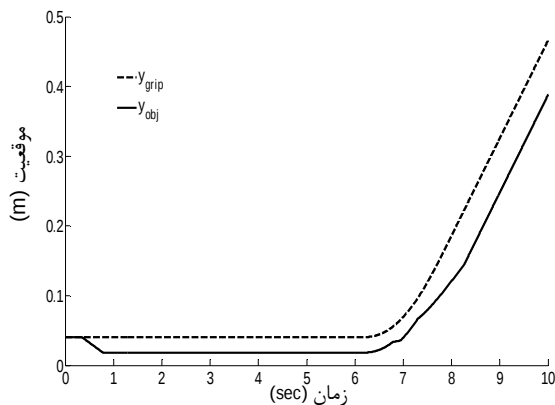
همان طور که در شکل 6 نشان داده شده، با اعمال کنترل کننده (14)، هر یک از بازوهای ربات در بازه زمانی حرکت 10 ثانیه ای خود مسیر مطلوب داده شده را به خوبی ردیابی می نماید.

به منظور کنترل سیستم مورد مطالعه، از کنترل کننده طراحی شده در شکل 4 استفاده شده است که در آن مقادیر K_p و K_v به ترتیب ماتریس های قطری با عناصر قطر اصلی 150 و 20 در نظر گرفته می شود. با توجه به نتایج مربوط به خطای ردیابی بازوی 5 که در شکل 5 ارائه شده است، مشاهده می شود که بعد از گذشت زمان تقریبی 1 ثانیه، ردیابی مسیر انگشت به خوبی انجام شده است. مقدار خطای ردیابی در 1 ثانیه اول نزدیک به 3/5 سانتی متر است و این مقدار خطا می تواند برای جسم در حین حرکت

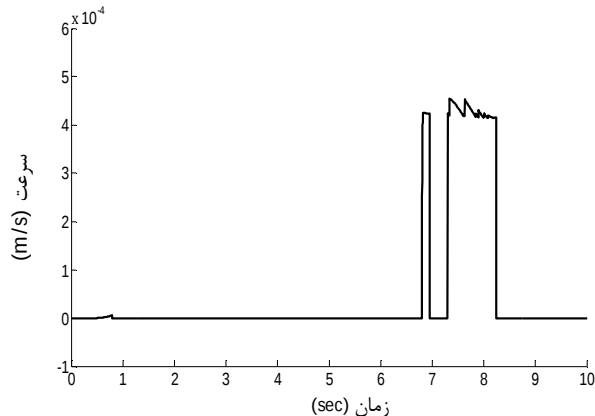
با توجه به مطالب فوق، می‌توان گفت مانور حرکتی برای ربات باعث لغزش جسم مطابق با شکل‌های 12 و 13 می‌شود. از مقایسه شکل‌های 12 و 13 مشاهده می‌شود که پس از مدت‌زمان 10 ثانیه از حرکت، جسم در هر دو راستای X_4 و Y_4 دچار لغزش شده است. مقدار لغزش در راستای X_4 بسیار ناچیز است، درحالی‌که لغزش جسم در راستای Y_4 به اندازه تقریبی 8 سانتی‌متر است و این مقدار با توجه به شرایط کاری در نظر گرفته شده ربات و ابعاد جسم و پنجه مقدار قابل توجهی است. لذا بایستی با تمهید مناسبی که در بخش 5 بیان شد، این مقدار لغزش را، همان‌طور که در قسمت بعدی نشان داده شده است، جبران نمود.



شکل 8 اختلاف موقعیت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای X_4



شکل 9 اختلاف موقعیت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای Y_4



شکل 10 اختلاف سرعت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای X_4

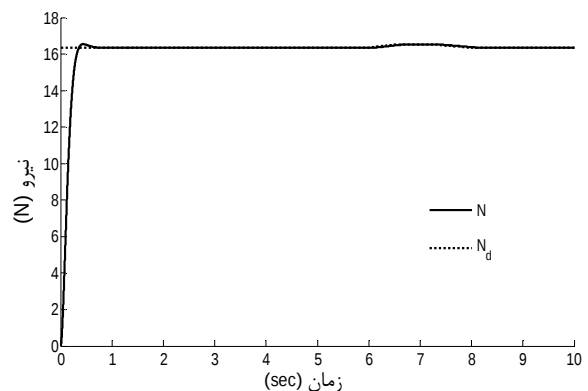
و یا در انتهای کار در زمان گذاشتن جسم توسط ربات صدماتی برای جسم، محل گذاشتن یا ربات در پیش داشته باشد.

به منظور بررسی وضعیت لغزش و بررسی مقدار نیروی عمودی جهت گرفتن، پس از اعمال کنترل کننده، نمودار آن در مقایسه با مقدار مطلوبش در شکل 7 ترسیم شده است.

همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود، مقدار نیروی N از زمان تماس با جسم افزایش می‌یابد تا پس از گذشت زمان تقریبی 1 ثانیه به مقدار مطلوب خود برای نگه داشتن و مهار لغزش جسم برسد. همچنین، در نقاطی که بیشترین مقدار شتاب از سمت ربات به جسم وارد می‌شود (بین بازه زمانی 6 تا 8 ثانیه)، نیروی N متناسب با مقدار مطلوب افزایش می‌یابد و از افتادن جسم در اثر لغزش جلوگیری می‌نماید.

با توجه به مباحثی که در بخش 4 توضیح داده شد، لغزش جسم در دو راستای X_4 و Y_4 ایجاد می‌شود. لذا، نمودار موقعیت جسم و انگشت ربات در دو راستای X_4 و Y_4 برای مقایسه و نشان دادن لغزش رخ داده در شکل 8 و 9 ترسیم شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشخص شده، مقادیر Y_{obj} و X_{obj} با گذشت زمان از مقادیر موقعیت انگشت در راستای X_4 و Y_4 تبعیت می‌کنند، با این تفاوت که خطای ردیابی موقعیت جسم از پنجه در راستای محور X_4 بسیار ناچیز است، در حالی که این اختلاف در راستای Y_4 غیر قابل چشم‌پوشی است.

سرعت‌های جسم و پنجه ربات در راستای X_4 و Y_4 به‌طور جداگانه در شکل‌های 10 و 11 با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌گونه که در شکل 10 مشاهده می‌شود، تغییرات سرعت در راستای X_4 بسیار ناچیز است و در این حالت سرعت جسم به خوبی از سرعت انگشت ربات تبعیت می‌کند. در حالی که مطابق با شکل 11، این اختلاف در راستای محور Y_4 همواره صفر نیست و در بعضی از لحظات سرعت جسم با سرعت پنجه برابری نمی‌کند که این خود بیان‌کننده لغزش جسم در این لحظات است. از مقایسه شکل 11 و 7 مشاهده می‌شود که الزاماً در زمان‌هایی که سرعت جسم از سرعت پنجه تبعیت نمی‌کند، نیروی عمودی جهت گرفتن افزایش می‌یابد تا از افتادن جسم جلوگیری نماید که این مسئله نشان می‌دهد کنترل کننده به کار رفته دارای قابلیت مناسب برای افزایش نیروی عمودی اعمالی بر جسم در زمان لغزش آن است. توضیح این نکته لازم است که نیروی عمودی بعد از حذف شتاب‌های اعمالی بر جسم بر اثر مانور ربات به مقدار حداقل خود کاهش می‌یابد تا از آسیب‌رسی به جسم جلوگیری نماید.



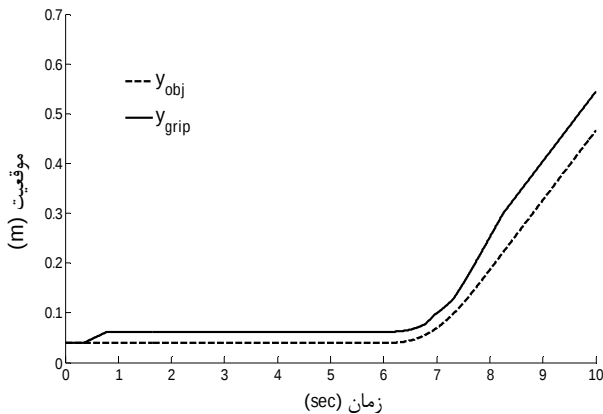
شکل 7 مقدار نیروی نرمال عمودی

این جبران سازی در شکل 14 و 15 نشان داده شده است. همان گونه که در شکل 14 آمده، پس از اعمال جبران ساز لغزش در راستای محور Y_4 ، موقعیت رابط 3 با توجه به موقعیت پنجه ربات تغییر می کند و دیگر مسیر مطلوب قدیمی خود را تعقیب نکرده، بلکه مسیر اصلاح شده را تعقیب خواهد نمود تا براساس این ردیابی جدید جسم در موقعیت مورد نظر قرار گیرد.

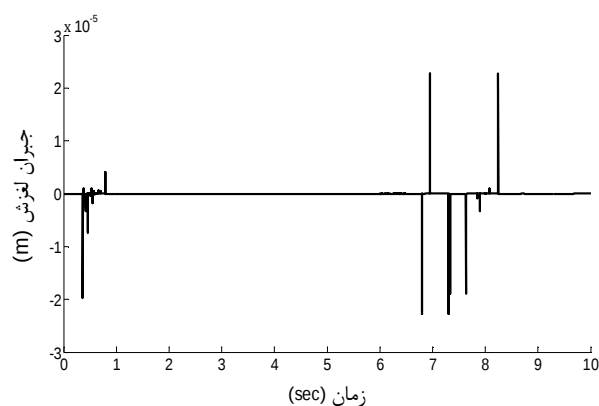
با توجه به شکل 14 و با وجود رخداد لغزش نمودار موقعیت جسم، مسیر مطلوب قدیمی مفصل کشویی 3 ربات، که جسم را در محل مناسب خود قرار می دهد، ردیابی کرده است. لذا، می توان گفت در این حالت لغزش رخ داده توسط کنترل کننده و با اصلاح مسیر مفصل کشویی 3 جبران شده است. شکل 15 نمودار لغزش جسم در راستای Y_4 و پس از اعمال جبران ساز نشان داده شده است. مشاهده می شود پس از هر بار رخداد لغزش، که در اثر مانور ربات ایجاد می شود، کنترل کننده با اصلاح مسیر بازوی سوم ربات و به صورت برخط لغزش را جبران نموده و به صفر می رساند. این وضعیت تا رویداد لغزش بعدی پایدار می ماند، به طوری که در لحظات پایانی مقدار لغزش کاملاً جبران شده است.

7- نتیجه گیری

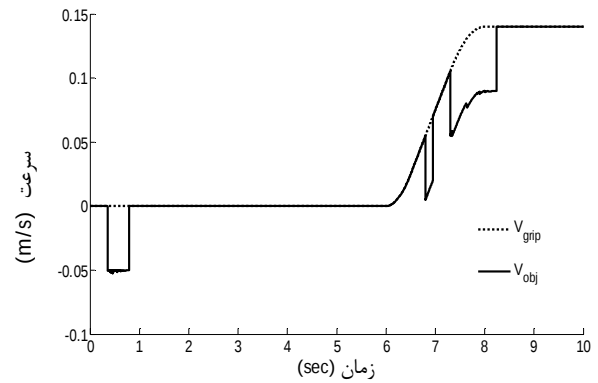
در این مقاله، لغزش رخ داده در جسم گرفته شده توسط پنجه ربات، کنترل شده و روشی جدید برای جبران سازی مقدار لغزش و تغییر موقعیت جسم نسبت به انگشتان ربات معرفی و پیاده سازی شده است. با توجه به ساختار ربات استفاده شده در این تحقیق برای گرفتن و جابه جایی جسم،



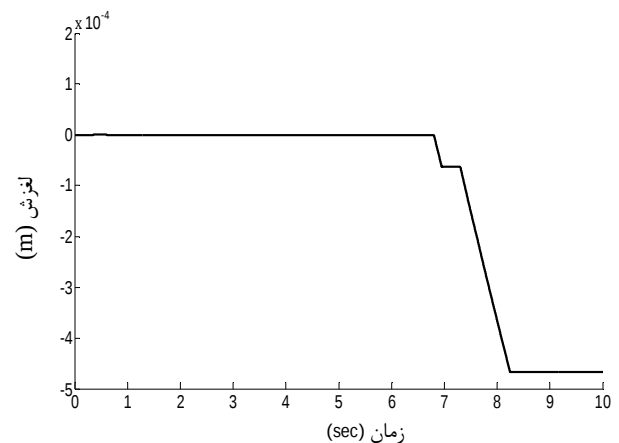
شکل 14 موقعیت جسم و پنجه نسبت به ربات با اعمال جبران ساز برخط



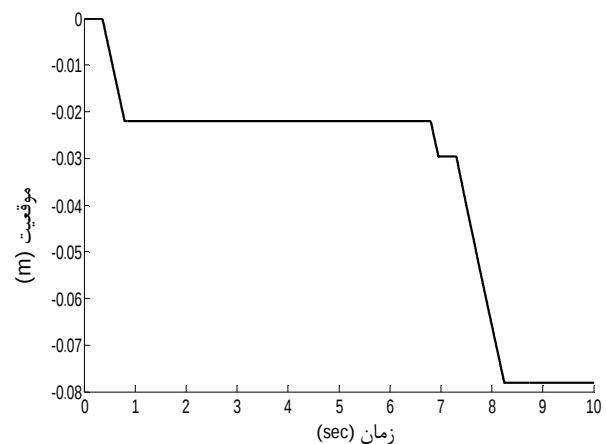
شکل 15 میزان جبران مقدار لغزش با اعمال جبران ساز برخط



شکل 11 اختلاف سرعت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای Y_4



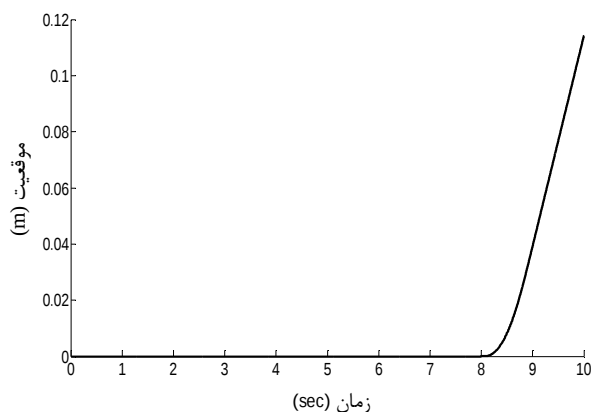
شکل 12 لغزش جسم نسبت به دستگاه پنجه ربات در راستای X_4



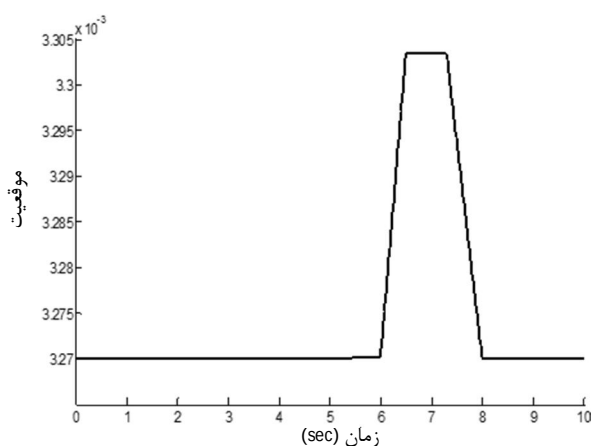
شکل 13 لغزش جسم نسبت به دستگاه پنجه ربات در راستای Y_4

2-6- نتایج شبیه سازی با اعمال کنترل کننده برای جبران لغزش

همان گونه که در بخش قبل نشان داده شد، میزان لغزش در راستای X_4 نسبت به لغزش در راستای Y_4 بسیار ناچیز است. لذا، با توجه به روش های جبران لغزش بیان شده در بخش 5-2، تنها لغزش رخ داده در راستای محور Y_4 جبران می شود، هرچند با راهکاری که در این بخش ارائه شد امکان جبران لغزش در جهت X_4 هم امکان پذیر است. بدین منظور، با مقایسه امتداد محورهای پنجه نسبت به مختصات مرجع، جبران لغزش ایجاد شده در امتداد محور Y_4 از طریق اصلاح مسیر مفصل کشویی 3 انجام می شود. نتایج



شکل 19 مسیر مطلوب رابط 4



شکل 20 مسیر مطلوب رابط 5

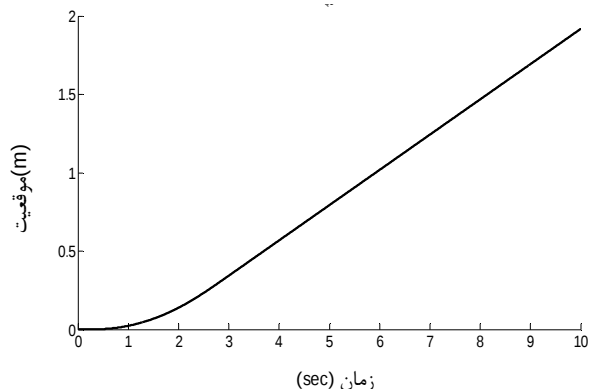
9- مراجع

- [1] G. J. Monkman, S. Hesse, R. Steinmann, H. Schunk, *ROBOT GRIPPERS*, First Edition, Germany: Wiley, 2007.
- [2] M. S. Lim, S. R. Oh, J. Son, B. J. You, K. B. Kim, A human-like real-time grasp synthesis method for humanoid robot hands, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 30, pp. 261–271, 2000.
- [3] A. Jamali, I. Gholaminezhad, Multi-objective optimum design of gripper mechanism using uniform diversity differential evolution, *Madares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 14, 1393. (In Persian)
- [4] S. Teshigawara, T. Tsutsumi, Y. Suzuki, M. Shimojo, High Speed and High Sensitivity Slip Sensor for Dexterous Grasping, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 24, No. 2, pp. 298–304, July 26, 2012.
- [5] E. G. M. Holweg, H. Hoeve, W. Jongkind, L. Marconi, C. Melchiorri, C. Bonivento, Slip detection by tactile sensors: algorithms and experimental results, in *Proceeding of the International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis; Minnesota, Vol. 4, pp. 3234–3239, 1996.
- [6] D. Accoto, M. T. Francomano, A. Benvenuto, C. Luccarelli, E. Guglielmelli, Optimization of a Thermal Slip Sensor using FEM and Dimensional analysis, *International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, The University of Tokyo, 2010.
- [7] S. Shirafuji, K. Hosoda, Detection and prevention of slip using sensors with different properties embedded in elastic artificial skin on the basis of previous experience, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 62, No. 1, pp. 46–52, 2014.
- [8] L. Roberts, G. Singhal, R. Kaliki, Slip detection and grip adjustment using optical tracking in prosthetic hands, in *Proceeding of 33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS*, Boston, Massachusetts USA, pp. 2929–2932, 2011.

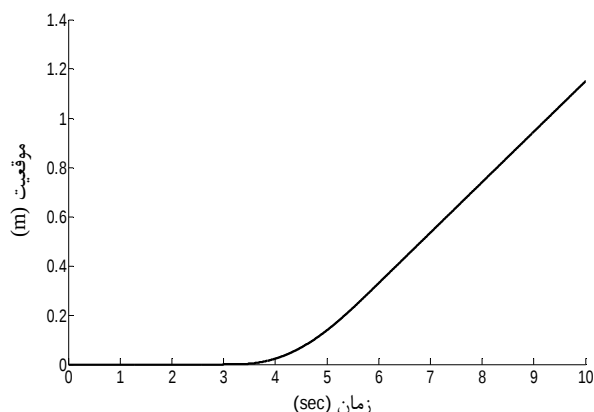
لغزش در راستای محوره‌های X_4 و Y_4 برای آن رخ می‌دهد. با اعمال روش کنترلی پیشنهادی جبران لغزش برخط انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی به خوبی اصلاح موقعیت بازوی سوم ربات به اندازه مقدار لغزش جسم را نشان می‌دهد که به موجب آن پس از اعمال جبران‌ساز، جسم در موقعیت نهایی مطلوب قرار داده می‌شود.

8- پیوست

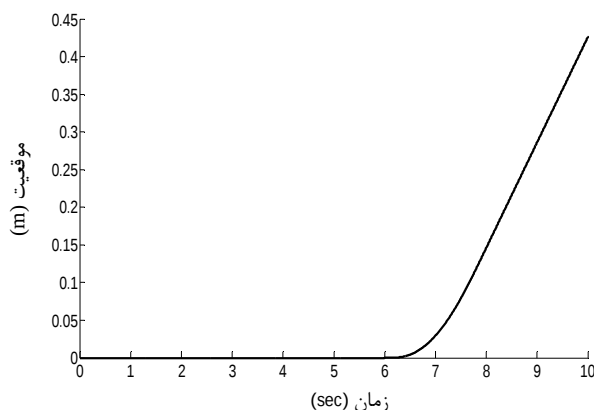
مسیرهای مطلوب بازوهای ربات در شکل‌های 16 تا 20 آورده است.



شکل 16 مسیر مطلوب رابط 1



شکل 17 مسیر مطلوب رابط 2



شکل 18 مسیر مطلوب رابط 3

- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] S. Xiaojing, L. Hongbin, J. Bimbo, K. Althoefer, L. D. Seneviratne, A novel dynamic slip prediction and compensation approach based on haptic surface exploration, in *Proceeding of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vilamoura, pp. 4511-4516, 2012.
- [18] M. W. Spong, S. Hutchinson, a. M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*, Second Edition, New York: Wiley, 2004.
- [19] H. Ahmadi, J. Sedigh, Safe grasping and manipulation of delicate object by a two fingers dexterous hand, *Control journal*, Vol. 4, No. 2, pp. 20-35, 2010. (In Persian)
- [20] J. A. T. Machado, Portugal, J. L. M. de Carvalho, A. M. S. Galhano, Analysis of robot dynamics and compensation using classical and computed torque techniques, *IEEE Transaction*, Vol. 36 No. 4, pp. 372 - 379, August 6, 2002.
- [9] E. D. Engeberg, S. G. Meek, Adaptive object slip prevention for prosthetic hands through proportional-derivative shear force feedback, in *Proceeding of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, France, 1940-1945, 2008.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] M. M. Fateh, Variable Structure Slip Control for Grasping Objects, in *International Conference on Dynamical Systems and Control*, Bucharest, 2006.
- [13] 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.
- [14] Sh. 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.