مجله کنترل
ISSN 2008-8345
جلد ۴، شماره ۲، تابستان ۱۳۸۹، صفحه ۳۵-۲۰

جابجایی اجسام ظریف دوبعدی بوسیله یک پنجه با دو انگشت سه‌بندی

حبیب احمدی[۱]، جعفر صدیق[۲]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان habibahmadif@gmail.com

[۲] استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، mjsadigh@cc.iut.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۸۹/۴/۲۷، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۸۹/۶/۱۵)

چکیده: گرفتن و جابجایی اجسام ظریف توسط ربات‌ها نیازمند الگوریتم کنترلی پیشرفته‌ای است تا موجب شود جسم با اعمال حداقل نیروی عمودی مهار شود. گرچه تا کنون الگوریتم‌های متعددی برای گرفتن اجسام توسط دست چند انگشتی ارائه شده‌است لیکن موضوع گرفتن اجسام ظریف و جابجایی آنها توسط انگشتان که نیازمند امکان کنترل موقعیت در راستای اعمال نیرو است موضوعی است که تا کنون راه حلی برای آن ارائه نشده‌است. به عبارت دیگر عمده الگوریتم‌های کنترل نیرو-موقعیت که تا کنون معرفی شده‌اند فضای کار را به دو زیر فضا تقسیم کرده و در یک زیرفضا موقعیت و در زیرفضای دیگر نیرو را کنترل می‌نمایند. این مقاله الگوریتم کنترلی جدیدی ارائه می‌نماید که برای نگهداری جسم با حداقل نیرو، تنها بر مبنای اندازه‌گیری نیروهای تماسی بین نوک انگشت و جسم جابجا شونده عمل می‌نماید. با توجه به ساختار کنترلر پیشنهادی و وابستگی آن به اطلاع از ضریب اصطکاک روش تخمین ضریب اصطکاک بر مبنای اندازه‌گیری صرف نیروهای تماسی ارائه شده‌است. کارائی کنترلر با ارائه شبیه‌سازی عددی بر اساس مدل دینامیکی کامل اصطکاک کولمبی در فازهای مختلف لغزش و عدم لغزش برای حرکت جسم توسط مچ و انگشتان مورد بررسی قرار گرفته‌است.

کلمات کلیدی: گرفتن ایمن، اصطکاک چندفازی، دست چندانگشته، جابجایی و کنترلر.

Safe Grasping and Manipulation of Delicate Object by a Two Fingers Dexterous Hand

Habib Ahmadi, Jafar Sadigh

Abstract: Safe grasping and handling delicate object with fingertips need a sophisticated control algorithm capable of position and force control in one direction. Most of position-force control algorithms proposed so far divide the work space of manipulators into two subspace and control position in one subspace and force in the other one. Meanwhile, for safe grasping purpose we should apply force at minimum necessary level which itself is not a known quantity during motion, so the desired value of normal force is not known forehand. This paper propose a new position-force algorithm and employ that to accomplish pinching and moving delicate object with two multi-link fingers. Performance issues and parameters robustness with respect to friction coefficient is also addressed. Several numerical examples are provided to show versatility of the proposed method.

Keywords: Safe Grasping, Multi-phase Friction, Dexterous Hand, Fine Manipulation and Controller.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.4.4]

۱- مقدمه

همزمان با توسعه و خودکارسازی سیستم‌های رباتیک، پدیده گرفتن اهمیت زیادی پیدا کرده و توجه بیشتری به آن معطوف شده است. گرفتن و نگهداری اجسام ظریفی چون لیوان آب توسط پنجه ربات، مفهوم گرفتن ایمن را روشن می‌سازد. برای این منظور، وقتی ربات جسم را گرفته و جابجا می‌نماید، بایستی به طریقی مناسب و با اعمال حداقل نیرو برای اجتناب از شکستگی و یا تغییر شکل جسم، از سر خوردن آن جلوگیری کرده و به‌طور پایدار آن را جابجا کند. بنابراین با توجه به مطالب فوق اگر مفهوم گرفتن ایمن را به معنی ممانعت از رها شدن جسم و در عین حال جلوگیری از صدمه رسیدن به آن در نظر بگیریم، مشخص می‌شود که جسم باید توسط ربات با حداقل نیروی فشاری ممکن گرفته شود و این موضوع به معنی امکان لغزش جسم در پاره‌ای از زمان‌ها در طی حرکت خواهد بود.

در دو دهه‌ی اخیر تحقیقات بسیاری در حوزه گرفتن و جابجایی اجسام با استفاده از سنسورهای لامسی انجام شده است. دو دسته از تحقیقات در این حوزه قابل ملاحظه می‌باشند، که مورد اول آن، شناسایی لغزش جسم و مورد دوم، کنترل نیرویی انگشتان است. تعدادی از محققین روی موضوع شناسایی لغزش مطالعه نموده‌اند [۱-۵]، غالب این محققین با استفاده از یک آرایه حسگر نیرویی که بوسیله یک لایه از ماده پیزوالکتریک پوشانده شده،جابجایی نسبی را محاسبه نموده و همچنین با اندازه‌گیری و محاسبه فرکانس دانسیته انرژی غالب برای نیروهای اندازه‌گیری شده، آستانه لغزش را مشخص می‌نمایند. مرور نتایج فوق مبین این است که در حال حاضر، اندازه‌گیری نیروهای تماسی و نیز کشف آستانه لغزش با دقت خوبی قابل انجام می‌باشد. هر چند در این حوزه هنوز مشکل ابعاد سنسورها برای استفاده در انگشتان ظریف خودنمایی می‌کند.

از سوی دیگر تعدادی از محققین نیز در مورد کنترل نیرو برای گرفتن مطالعه نموده‌اند که به عنوان مثال می‌توان به تحقیقات جازی و همکاران [۶]، ناکازاوا و همکاران [۷] ، لوپز و همکاران [۸] و آریموتو [۹] اشاره نمود. در غالب این تحقیقات هدف صرفا جلوگیری از لغزش بوده و کنترل نیروی عمودی در حداقل، مورد توجه نبوده‌است. برخی از محققین نیز تحقیقات خود را معطوف به حداقل‌سازی نیروی لازم برای عمل گرفتن نموده‌اند که از آن میان می‌توان به تحقیقات الگالاف [۱۰]، باس و همکاران [۱۱] لی و همکاران [۱۲] ، هاسگاوا و همکاران [۱۳]، ترینکل و همکاران [۱۴] و هان و همکاران [۱۵] اشاره نمود. غالب این تحقیقات متکی به روش بهینه‌سازی عددی بوده که برای پیاده‌سازی برخط مناسب به نظر نمی‌رسند. به علاوه در عمده این روش‌ها اطلاع از جرم و توزیع جرم نیز برای بکارگیری روش پیشنهادی یک الزام است.

تعدادی از محققین نیز به بررسی امکان تخمین ضریب اصطکاک در اجسام لغزنده پرداخته‌اند که از آن جمله می‌توان به کار ترمبلی و همکاران [۱۶] و مائنو [۱۷] اشاره نمود. روش‌های ارائه شده عمدتا متکی به اندازه‌گیری شتاب و یا سرعت نسبی بوده که اندازه‌گیری آنها کار ساده‌ای نخواهد بود. صدیق و احمدی [۱۸] و [۱۹] با ارائه الگوریتمی در این خصوص روش کنترل و تخمین ضریب اصطکاک را به گونه‌ای پیشنهاد کردند که تنها نیازمند اندازه‌گیری نیروی عمودی و اصطکاک است.

در برخی از کاربردهای رباتیک مثل مونتاژ، سنگ‌زنی و گرفتن اشیاء علاوه بر اینکه نیاز است ربات مسیر مطلوبی را طی نماید، لازم است نیروی مطلوبی را نیز به محیط وارد نماید. چنین کاربردهایی نیازمند یک الگوریتم کنترل همزمان نیرو موقعیت است. این موضوع اولین بار توسط ریبرت و اسپانگ [۲۰] مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه مک‌کالی‌مورچ و وانگ [۲۱] الگوریتم کنترلی را بر مبنای یک دسته معادلات کاهش مرتبه یافته بر مبنای حرکت مقید پنجه ربات ارائه نمودند. هوگان[۲۲] و اندرسون و اسپانگ[۲۳] تعاملات محیطی مختلف را تحت عنوان انواع امپدانس معرفی کرده و با توجه به نوع امپدانس محیطی، استراتژی متناسب کنترل نیرویی را معرفی نمودند. در سال‌های اخیر محققین دیگری [۲۷-۲۴] در خصوص الگوریتم‌های مختلف وفقی کنترل موقعیت نیرو تحقیق کرده‌اند. غالب تحقیقات مطرح در خصوص کنترل نیرو- موقعیت بر مبنای تقسیم فضای کار به دو زیرفضا و کنترل موقعیت در یکی و کنترل نیرو در دیگری طراحی شده‌اند و امکان کنترل همزمان نیرو و موقعیت در یک راستای واحد را ندارند.

بررسی دقیق‌تر مقالات نشان می‌دهد در بسیاری از موارد، محققین از فرض تک‌فازی یا به عبارتی مدل ساده شده اصطکاکی برای مدل-سازی بهره می‌گیرند. در پاره‌ای از موارد، استفاده از این مدل ساده شده اصطکاک باعث می‌شود کنترلرهای مبتنی بر اندازه‌گیری و بازخورد اطلاعات حرکت نسبی، توانایی خوبی در کاهش نیروی عمودی از خود نشان دهند. صدیق و احمدی[۱۸] و [۱۹] نشان دادند این نوع کنترلرها که با استفاده از مدل ساده اصطکاکی، قادر به ارائه نتایج مطلوبی بود با استفاده از مدل واقعی اصطکاک چندفازی نتایج مطلوبی را به دست نمی‌دهند. بطور مثال آنها نشان دادند که نتایج ارائه شده توسط گلاساس و آسپراگاتوس[۵] در خصوص کاهش نیروی عمودی به خاطر خطایی است که در اثر ساده‌سازی روی مدل اصطکاکی کولمب رخ داده است.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.4.4]

از سوی دیگر لغزش و سرعت نسبی بین جسم و گریپر در بسیاری از تحقیقات فوق به عنوان ورودی در نظر گرفته شده‌است که این کمیات به راحتی قابل اندازه‌گیری نیستند. صدیق و احمدی [۱۸] و [۱۹] با ارائه کنترلری که صرفا بر پایه بازخوردهای نیروی عمودی و اصطکاکی استوار است نتایج خوبی را در جلوگیری از لغزش و کاهش نیرو به حداقل مقدار ممکن در فرآیند گرفتن توسط یک گریپر دارای فک موازی ارائه نمودند. این الگوریتم نقش کلیدی در مطالعه حاضر ایفا نموده و به عنوان بخشی از الگوریتم کنترلی معرفی شده در این مقاله وظیفه تنظیم نیروی عمودی اعمالی از طریق نوک انگشت را به عهده دارد.

انگیزه اصلی تحقیق حاضر ارائه الگوریتم کنترلی است که به کمک آن بتوان یک جسم ظریف را مهار نموده و توسط نوک انگشتان جابجا نمود. نامعین بودن میزان نیروی عمودی لازم از یک سو و الزام کاهش آن به حداقل مطلوب از سوی دیگر و نیز لزوم کنترل نیرو در راستای جابجایی نوک انگشت دو چالش اصلی برای برآورده نمودن هدف تحقیق حاضر محسوب می‌شود. حل این مسئله مستلزم معرفی الگوریتم کنترلی است که دارای خواص زیر باشد:

قادر باشد نیروی مناسب را در هر راستای دلخواه به جسم اعمال نموده و در عین حال قابلیت کنترل جابجایی را نیز در تمامی امتدادها داشته باشد.

قادر به تامین نیروی عمودی لازم برای تامین اصطکاک کافی برای حفظ تعادل جسم باشد به نحوی که مقدار این نیروی عمودی همواره در حداقل ممکن حفظ شود.

خواسته اول از طریق معرفی یک کنترلر سه جزئی مدار بسته موقعیت- مدار باز نیرو که با یک جزء تنظیم‌کننده نیروی عمود بر سطح تقویت شده [۲۸] برآورده می‌شود. برای تامین خواسته دوم لازم است توجه کنیم که اولا برای حل این مسئله مقدار نیروی عمودی مطلوب نامشخص است و ثانیا مقدار نیروی اصطکاک نیز یک کمیت نامعلوم است و به این جهت استفاده از الگوریتم‌های معمول کنترل نیرو که لازمه آنها اطلاع از مقدار نیروی مطلوب است، در اینجا امکان‌پذیر نیست. با توجه به خواسته مسئله مبنی بر اعمال نیروی عمودی در حد کفایت برای تامین اصطکاک لازم و با الهام‌گیری از کنترلر معرفی شده توسط صدیق و احمدی [۲۹] کنترلری پیشنهاد شده که مقدار نیروی عمودی را در حداقل لازم برای جلوگیری از لغزش تامین می‌نماید. این کنترلر صرفا نیازمند اندازه‌گیری نیروی اصطکاکی و عمودی بین جسم و گریپر است که با توجه به مشکلات عملی اندازه‌گیری لغزش و سرعت نسبی بین جسم و انگشتان ربات مزیت مهمی محسوب می‌گردد. با توجه به وابستگی عملکرد کنترلر ارائه شده به ضریب اصطکاک، تخمین‌گر لازم برای محاسبه ضریب اصطکاک نیز بر مبنای اندازه‌گیری نیروهای تماسی ارائه شده‌است.

در ادامه، ابتدا مدل‌سازی دینامیکی برای یک زنجیره سری جهت جابجایی یک جسم روی سطح قائم انجام شده است. سپس، کنترلر مورد نیاز برای گرفتن ایمن جسم و جابجایی آن در یک مسیر مطلوب ارائه گردیده است. در بخش‌های بعدی نیز روش تخمین پارامترهای کنترلر، تخمین‌گر ضریب اصطکاک و در نهایت نتایج شبیه‌سازی جهت اثبات کارایی کنترلر ارائه شده‌اند.

۲- مدلسازی دینامیکی

مسئله مورد مطالعه در این مقاله تشکیل شده از یک دست دو انگشته مطابق شکل (a-۱) که قرار است جسمی را در حین حرکت مچ و پنجه بصورت ایمن نگه دارد، یعنی اینکه با اعمال حداقل نیروی عمودی جسم را در مسیر مورد نظر توسط پنجه حرکت دهد. انگشتان ربات دارای سه لینک بوده و دارای مفاصل چرخشی هستند. سیستم مشتمل بر زنجیره‌ها مطابق شکل (a-۱) در صفحه X-Y قرار داشته و جسم را در داخل صفحه و در راستای محور Y و یا X حمل می‌نمایند. علاوه‌براین مچ نیز می‌تواند جسم و زنجیره را در صفحه Y-Z جابجا نماید. لازم بذکر است که فرض می‌شود انگشتان و جسم از تقارن کامل برخوردار بوده و امتداد خط اثر نیروی عمودی انگشتان از مرکز جرم می‌گذرد[۱]. با توجه به فروض فوق جسم فقط دارای سه درجه آزادی انتقالی خواهد بود و امکان دوران نخواهد داشت.

علاوه براین در تحلیل و بررسی مسئله فرضهای ذیل برای سیستم فوق در نظر گرفته شده است:

سطح مقطع اجسام گرفته شده یکنواخت بوده به نحوی که در اثر لغزش سطح مقطع ناحیه گرفته شده تغییر نمی‌کند.

ضریب اصطکاک جسم و انگشت‌ها نامشخص اما محدوده آن معلوم است.

[۱] عبور خط اثر نیروی عمودی از مرکز جرم شرط گرفتن متعادل یک جسم در صفحه قائم به حساب می‌آید. این پدیده در رفتار انسان نیز در هنگام گرفتن اشیاء مشاهده می‌شود و اعمال آن معمولا از طریق آموزش و حدس نقطه مناسب گرفتن برای هر شیئی ممکن می‌گردد. البته در مورد اشیاء کوچک مثل یک خودکار که توسط نوک انگشتان گرفته می‌شود این شرط به سادگی ارضاء می‌شود.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.4.4]

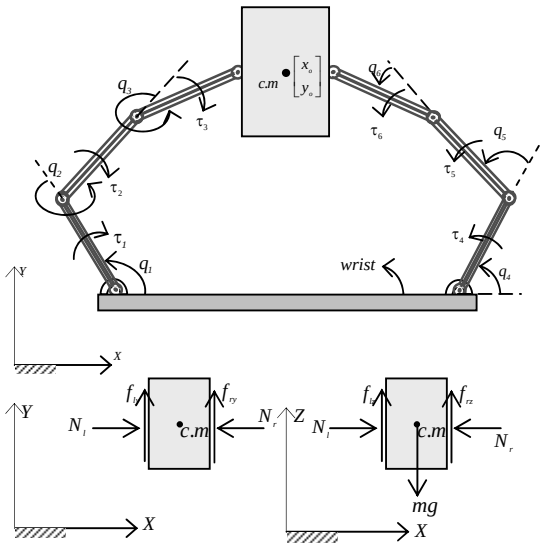
جسم گرفته شده صلب است اما تماس انگشت و جسم بصورت الاستیک خطی در نظر گرفته می‌شود. این خاصیت الاستیک می‌تواند مجموعه‌ای از انعطاف‌پذیری موجود در انگشت و یا سطح تماس باشد که نهایتا بعنوان یک فنر معادل‌سازی شده‌است.

نیروی اصطکاکی و عمودی بین جسم و انگشت توسط سنسورهای لامسی تعبیه شده در انگشتان قابل اندازه‌گیری و یا محاسبه است.

دوانگشت در صفحاتی موازی با صفحه X-Y حرکت نموده و راستای ثقلی در جهت محور Z می‌باشد.

حرکت مچ (بازو) حرکتی معلوم بوده و جزء درجات آزادی سیستم محسوب نمی‌شود.

ضریب اصطکاک بین جسم و نوک انگشتان در دو طرف یکسان است.



شکل(۱) شماتیک سیستم مورد مطالعه و دیاگرام آزاد جسم گرفته شده

با توجه به فرض‌های فوق و با استفاده از روش لاگرانژ می‌توان معادلات انگشت و جسم را برای مسئله تعریف شده بدست آورد. با توجه به اینکه انگشتان تنها در صفحه X-Y حرکت می‌کنند (صرف‌نظر از حرکت کلی که سیستم به واسطه حرکت مچ در راستای Z و Y دارد) سه درجه آزادی q_1، q_2 و q_3 را برای مفاصل انگشت سمت چپی و سه درجه آزادی q_4، q_5 و q_6 را برای مفاصل انگشت سمت راستی خواهیم داشت. معادله حرکت انگشتان به فرم کلی زیر قابل استخراج هستند [۳۰]:

$$\mathbf{M}_i\ddot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{h}_i = \boldsymbol{\tau}_i - \mathbf{J}_i^T\mathbf{F}_i \qquad ,i = l,r \qquad (۱)$$

که در معادله فوق l، r، $\mathbf{M}_i(3\times3)$ و $\mathbf{h}_i(3\times1)$ و $\mathbf{J}_i(3\times2)$ به ترتیب اندیس نشان‌دهنده انگشت سمت چپ، اندیس نشان‌دهنده انگشت سمت راست، ماتریس اینرسی، بردار ثقلی-سانتریفیوژ-کوریولیس و ماتریس ژاکوبین سرعت پنجه در راستای اعمال نیروهای عمود بر سطح و اصطکاک برای زنجیره‌های سمت راست و چپ می‌باشند. در ضمن $\boldsymbol{\tau}_l = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3]^T$ و $\boldsymbol{\tau}_r = [\tau_4 \quad \tau_5 \quad \tau_6]^T$ بردار گشتاور مفاصل، $\mathbf{q}_l = [q_1 \quad q_2 \quad q_3]^T$، $\mathbf{q}_r = [q_4 \quad q_5 \quad q_6]^T$، $\mathbf{F}_l = [N_l \quad f_{ly}]^T$ و $\mathbf{F}_r = [N_r \quad f_{ry}]^T$ بردارهایی در صفحه X-Y می‌باشند. لازم بذکر است N_l و N_r نیروی عمودی اعمالی بر جسم از طرف انگشتان چپ و راست و همچنین f_{ly} و f_{ry} نیروی اصطکاکی در نقاط تماس و در راستای Y هستند. در اینجا توجه به این نکته لازم است که علی‌رغم اعمال مولفه‌های نیروی اصطکاک در راستای Z به نوک انگشت، بدلیل انحصار حرکت انگشتان در صفحه X-Y مولفه Z نیروی اصطکاک در معادلات حرکت انگشت ظاهر نمی‌شود. در ضمن با توجه به فرض حرکت متقارن سیستم، تنها سه درجه آزادی x_o، y_o و z_o را برای جسم در نظر می‌گیریم، زیرا در این حالت با توجه به فرض‌های مسئله جسم فاقد چرخش در نظر گرفته شده‌است. بنابراین معادلات حرکت جسم را می‌توان بصورت زیر نمایش داد.

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{x}_o \\ \ddot{y}_o \\ \ddot{z}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_l - N_r \\ 2f_y \\ 2f_z - w \end{bmatrix} \qquad (۲)$$

که در معادله فوق f_z و f_y نشان‌دهنده مولفه نیروی اصطکاکی اعمالی بر هر یک از سطوح سمت چپ و راست جسم در راستای محورهای Z و Y هستند و w و m معرف وزن و جرم جسم هستند.

معادلات (۱) و (۲) شامل ۹ معادله و ۱۳ مجهول q_1، q_2، q_3، q_4، q_5، q_6، x_o، y_o، z_o، N_l، N_r، f_y، و f_z هستند. برای حل این معادلات با توجه به تعداد بیشتر مجهولات نیاز به معادلات دیگری است که در ادامه ارائه می‌شوند. لازم به ذکر است این معادلات تکمیلی، برای بدست آوردن پارامترهای نیرویی خواهند بود، لذا در ادامه ابتدا معادلاتی را برای بدست آوردن نیروی عمودی بدست آورده و سپس به تشریح روش بدست آوردن نیروهای اصطکاکی خواهیم پرداخت.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.4.4]

برای محاسبه نیروی عمودی با توجه به مطالب ارائه شده در مقدمه و نظر به فرض تقارن($N = N_l = N_r$) معادله زیر را برای محاسبه نیروی عمودی خواهیم داشت:

$$N_l = N_r = N = k_e \delta \qquad (۳)$$

در رابطه فوق k_e سختی معادل برای انعطاف پذیری سیستم مورد مطالعه بوده و δ که بیانگر میزان فشردگی انگشتان در فرآیند گرفتن است توسط رابطه زیر داده می‌شود:

$$\delta = x_r - x_l - b \qquad (۴)$$

در رابطه فوق b عرض جسم بوده و x_r و x_l موقعیت سینماتیکی پنجه چپ و راست را در وضعیتی که مانعی سر راه حرکت پنجه نباشد، نشان می‌دهند.

باتوجه به اینکه هدف مسئله نگهداری جسم با اعمال حداقل نیرو است و با توجه به اینکه جسم در معرض مانورهای مختلف پنجه و مچ قرار می‌گیرد وضعیت‌های مختلف حرکتی بین جسم و پنجه ایجاد می‌شود. این وضعیت‌ها شامل رهایی جسم، آستانه لغزش بین جسم و پنجه، لغزش بین آنها و در نهایت عدم لغزش بین جسم و پنجه می‌باشند. لازم بذکر است نیروی اصطکاکی ایجاد شده در هرکدام از این وضعیت‌ها متفاوت خواهد بود که در ادامه به نحوه بدست آوردن آنها اشاره می‌شود، لذا وضعیت‌های مختلف تماسی بین جسم و پنجه را می‌توان در دسته‌بندی‌های زیر لحاظ کرد:

الف) لغزش در نقاط تماس:

در صورت لغزش در نقاط تماس سرعت نسبی جسم نسبت به پنجه مخالف صفر خواهد بود که این شرط را می‌توان بصورت زیر بیان نمود:

$$\left|\mathbf{v}_r\right| = \left|\dot{y}_r \mathbf{i} + \dot{z}_r \mathbf{j}\right| > 0 \qquad (۵)$$

در رابطه فوق $\mathbf{v}_r$ سرعت نسبی انگشتان نسبت به جسم و $\dot{y}_r = \dot{y}_g - \dot{y}_o$ و $\dot{z}_r = \dot{z}_g - \dot{z}_o$ بترتیب مولفه‌های آن در راستای محور Y و Z می‌باشند. لازم بذکر است $\dot{y}_g$ و $\dot{z}_g$ مولفه‌های سرعت انگشتان در راستای Y و Z هستند. شرط فوق به‌معنی وجود لغزش بین جسم و گریپر بوده و در نتیجه برآیند نیروهای اصطکاکی در هر سطح با استفاده از رابطه اصطکاک کولمبی یعنی μN بدست می‌آید که در دو طرف جسم برابر خواهد بود. حال برای اینکه بتوان مولفه‌های نیروی اصطکاکی را در جهات Y و Z بدست آورد باید به این نکته توجه کرد که بعلت وجود سرعت نسبی بین جسم و انگشتان، راستای نیروی اصطکاکی و سرعت نسبی در هر سمت هم‌ارز می‌باشد، لذا می‌توان مولفه‌های نیروی اصطکاک را با توجه به راستای مولفه‌های سرعت نسبی بدست آورد. بنابراین با توجه به اینکه $\dot{y}_r = \dot{y}_g - \dot{y}_o$ و $\dot{z}_r = \dot{z}_g - \dot{z}_o$ معرف سرعت نسبی انگشتان نسبت به جسم در راستاهای Y و Z می‌باشند، می‌توان مولفه‌های نیروی اصطکاکی را با معادلات زیر نمایش داد.

$$f_y = -\dot{y}_r / \sqrt{\dot{y}_r^{\,2} + \dot{z}_r^{\,2}} \times \left|\mu N\right|$$
$$f_z = -\dot{z}_r / \sqrt{\dot{y}_r^{\,2} + \dot{z}_r^{\,2}} \times \left|\mu N\right| \qquad (۶)$$

لازم بذکر است معادلات فوق با فرض تقارن حرکت دو انگشت در دو طرف بدست آمده‌است.

ب) عدم لغزش:

در حالتی که نیروی عمودی کافی جهت مهار جسم توسط پنجه اعمال شود، شتاب جسم با شتاب انگشتان برابر شده و در نتیجه هر حرکت پنجه مستقیما به جسم اعمال می‌شود. بنابراین در این وضعیت دو قید زیر بر رفتار سیستم حاکم خواهد بود.

$$y_o = y_g$$
$$z_o = z_g \qquad (۷)$$

لذا با توجه به برقراری قیود فوق می‌توان شتاب جسم را بدست آورده و با لحاظ فرض تقارن در سیستم، معادلات حرکت جسم را برای بدست آوردن نیروهای اصطکاکی بکار برد.

ج) آستانه لغزش:

اگر شرط $\left|\mathbf{v}_r\right| = \left|\dot{y}_r \mathbf{i} + \dot{z}_r \mathbf{j}\right| = 0$ و $\left|\mathbf{a}_r\right| = \left|\ddot{y}_r \mathbf{i} + \ddot{z}_r \mathbf{j}\right| \neq 0$ برقرار باشد علی‌رغم سرعت نسبی صفر بین جسم و گریپر 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 می‌دهد. در این وضعیت نیز رابطه اصطکاک کولمبی برای محاسبه نیروی اصطکاکی برقرار خواهد بود با این تفاوت که جهت و راستای آن با توجه به اینکه سرعت نسبی صفر است تابعی از شتاب جسم نسبت به انگشتان خواهد بود. با توجه به اینکه اندازه برآیند نیروی اصطکاکی در هر سطح برابر μN است، می‌توان نیروهای اصطکاکی f_y و f_z را با توجه به راستای شتاب نسبی بصورت زیر تعریف کرد:

$$f_y = \ddot{y}_r / \sqrt{\ddot{y}_r^{\,2} + \ddot{z}_r^{\,2}} \times \left|\mu N\right|$$
$$f_z = \ddot{z}_r / \sqrt{\ddot{y}_r^{\,2} + \ddot{z}_r^{\,2}} \times \left|\mu N\right| \qquad (۸)$$

لازم به توضیح است، با توجه به اینکه فاز آستانه لغزش مرزی است بین فاز لغزش و عدم لغزش می‌توان این فاز را معادل با فاز عدم لغزش و یا لغزش فرض نمود، لذا هر دو دسته معادلات در فازهای فوق برای فاز آستانه لغزش نیز صادق خواهند بود. خلاصه مباحث فوق برای محاسبه نیروهای اصطکاکی در جدول(۱) آمده است. بنابراین با حل ۱۳

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.4.4]

معادله شامل روابط (۱)، (۲) و (۳) و یکی از دسته معادلات (۶)، (۷) و یا (۸) با لحاظ فرض تقارن، می‌توان ۱۳ مجهول q_1، q_2، q_3، q_4، q_5، q_6، x_o، y_o، z_o، N_l، N_r، f_y و f_z را بطور همزمان بدست آورد.

۳- کنترلر هیبرید موقعیت-نیرو

با توجه به اینکه در مسئله تعریف شده جابجایی اجسام ظریف مد نظر می‌باشد، بحث ایمنی جسم در برابر نیروهای اعمالی بر آن و همچنین جلوگیری از لغزش یا سقوط جسم مطرح می‌شود، لذا در

جدول(۱) بدست آوردن رابطه لازم جهت تکمیل معادلات حرکت با توجه به وضعیت‌های مختلف حرکتی

مود حرکت	شرایط تعویض بین مودهای حرکت	نیروی اصطکاک یا رابطه سینماتیکی مورد نیاز
لغزش	$\mathbf{v}_r = \dot{y}_r\mathbf{i} + \dot{z}_r\mathbf{j} \neq 0$	$f_y = -\dot{y}_r / \sqrt{\dot{y}_r^{\,2} + \dot{z}_r^{\,2}} \times \lvert\mu N\rvert$ $f_z = -\dot{z}_r / \sqrt{\dot{y}_r^{\,2} + \dot{z}_r^{\,2}} \times \lvert\mu N\rvert$
عدم لغزش	$\mathbf{v}_r = \dot{y}_r\mathbf{i} + \dot{z}_r\mathbf{j} = 0$ و $\mathbf{a}_r = \ddot{y}_r\mathbf{i} + \ddot{z}_r\mathbf{j} = 0$	$y_o = y_g$ $z_o = z_g$ $f_{ly} = f_{ry}$ $f_{lz} = f_{rz}$
آستانه لغزش	$\mathbf{v}_r = \dot{y}_r\mathbf{i} + \dot{z}_r\mathbf{j} = 0$ و $\mathbf{a}_r = \ddot{y}_r\mathbf{i} + \ddot{z}_r\mathbf{j} \neq 0$	$f_y = \ddot{y}_r / \sqrt{\ddot{y}_r^{\,2} + \ddot{z}_r^{\,2}} \times \lvert\mu N\rvert$ $f_z = \ddot{z}_r / \sqrt{\ddot{y}_r^{\,2} + \ddot{z}_r^{\,2}} \times \lvert\mu N\rvert$

گرفتن ایمن نیاز به الگوریتمی است که مقدار نیروی عمودی را به نحوی تنظیم نماید که اولا مانع لغزش شود و ثانیا مقدار آن از حد مشخصی تجاوز ننماید و در حالت دائم نیز به حداقل مجاز کاهش یابد، این بدین معنی است که ما با یک مسئله گرفتن و جابجایی مواجه هستیم که در آن مقدار نیروی عمودی را نمی‌دانیم، از طرفی اندازه‌گیری مقدار لغزش و سرعت نسبی بین جسم و گریپر کار آسانی نیست و بنابراین برای گرفتن از فیدبک نیرو در کنترلر استفاده می‌کنیم. لذا در این قسمت، کنترلری پیشنهاد شده که با استفاده از آن، امکان حرکت جسم توسط حرکت نوک انگشت و کاهش نیروی عمودی اعمالی بر آن محقق می‌شود. در این راستا کنترلری ترکیبی به شکل زیر برای سیستم مورد بررسی پیشنهاد می‌شود:

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_{\mathbf{P}} + \boldsymbol{\tau}_{\mathbf{F}} + \hat{\boldsymbol{\tau}} \qquad (۹)$$

ترم اول رابطه فوق که یک کنترلر مدار بسته موقعیت به روش گشتاور محاسبه‌شده است وظیفه کنترل انگشت برای تعقیب مسیر مطلوب را بعهده دارد و بصورت زیر تعریف می‌شود [۳۰]:

$$\boldsymbol{\tau}_{\mathbf{P}} = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}_{\mathbf{d}} + \mathbf{M}\mathbf{k}_{\mathbf{v}}\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{M}\mathbf{k}_{\mathbf{p}}\mathbf{e} + \mathbf{h}) \qquad (۱۰)$$

در این رابطه، $\mathbf{q}_{\mathbf{d}}$ نشان‌دهنده مسیر مطلوب انگشت بوده و $\mathbf{e} = \mathbf{q}_{\mathbf{d}} - \mathbf{q}$، $\mathbf{k}_{\mathbf{p}}$ و $\mathbf{k}_{\mathbf{v}}$ ماتریس‌های قطری ضرایب بهره تناسبی و مشتقی متناظر با متغیرهای مفاصل می‌باشند. ترم دوم رابطه (۹)، یک کنترلر مدار باز برای تامین نیروی عمودی و اصطکاکی در نوک انگشت بوده و بصورت زیر تعریف می‌شود:

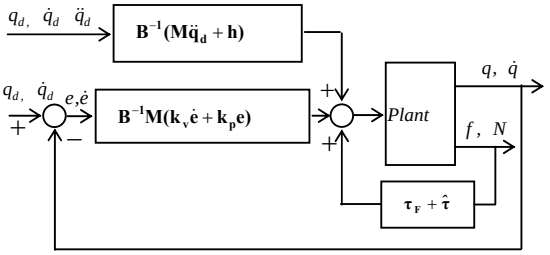
$$\boldsymbol{\tau}_{\mathbf{F}} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{J}^{\mathbf{T}}\mathbf{F} \qquad (۱۱)$$

ترم‌های اول و دوم معادله (۹) برای کنترلر حلقه بسته موقعیت و کنترلر مدار باز نیرو استفاده می‌شود، این بدان مفهوم است که اگر مقدار نیروی مورد نظر با مقدار بازخورد شده برابر نباشد، کنترلر فوق قادر به ایجاد نیروی لازم برای نگهداری جسم نخواهد بود، بنابراین لازم است مقدار نیروی مورد نیاز در اینحالت توسط عبارت دیگری در کنترلر فوق که تابعی از اختلاف نیروی مورد نیاز در پنجه نسبت به مقدار مورد نظر آن است تامین شود، لذا ترم سوم معادله (۹) با الهام‌گیری از کنترلر نیرو-پایه معرفی شده توسط صدیق-احمدی[۱۹] برای تنظیم نیروی عمودی، جهت همگرا شدن آن به نیروی عمودی مطلوب جهت نگهداری ایمن جسم بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{\boldsymbol{\tau}} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{J}_{\mathbf{1}}^{\mathbf{T}}k_h(N_0 - (N - k_\mu\lvert f\rvert/\mu)) \qquad (۱۲)$$

که در آن، $\mathbf{J}_{\mathbf{1}}^{\mathbf{T}}$ ستون اول ماتریس ژاکوبین $\mathbf{J}^{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix}\mathbf{J}_{\mathbf{1}}^{\mathbf{T}} & \mathbf{J}_{\mathbf{2}}^{\mathbf{T}}\end{bmatrix}$ می‌باشد. در رابطه فوق، پارامتر N_0 همواره تمایلی ثابت برای حرکت نوک انگشتان به سمت دیواره جسم جهت فشردن و افزایش نیرو به سطح آن را ایجاد می‌کند و این تمایل در صورتی‌که N بزرگتر از $k_\mu\lvert f\rvert/\mu$ باشد، کاهش می‌یابد و اگر کوچکتر از آن باشد، افزایش می‌یابد. ترم $\mathbf{B}^{-1}\mathbf{J}_{\mathbf{1}}^{\mathbf{T}}k_hN_0$ موجود در کنترلر تمایلی ثابت برای افزایش نیروی عمودی- حرکت انگشتان به سمت دیواره جسم- ایجاد می‌نماید در حالی که ترم دوم آن یعنی $\mathbf{B}^{-1}\mathbf{J}_{\mathbf{1}}^{\mathbf{T}}k_h(N - k_\mu\lvert f\rvert/\mu)$ مادامیکه نیروی عمودی بیشتر از مقدار مورد نیاز باشد تمایلی برای کاهش نیروی عمودی- دور شدن انگشتان از دیواره جسم- ایجاد می‌نماید و این عمل تا زمان ایجاد نیروی عمودی مورد نیاز برای نگهداری و جلوگیری از لغزش جسم ادامه خواهد یافت. شکل (۲) نمودار بلوکی کنترلر پیشنهادی را ارائه می‌نماید:

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.4.4]



شکل (۲) دیاگرام بلوکی کنترلر پیشنهادی

۴- بررسی تاثیر پارامترها بر عملکرد کنترلر

همان‌طور که در قسمت قبلی توضیح داده‌شد، کنترلر ارائه شده توسط رابطه (۹) از سه قسمت اصلی تشکیل شده‌است. قسمت اول آن، که توسط رابطه (۱۰) بیان شده‌است، وظیفه تعقیب مسیر را دارد، قسمت دوم آن یعنی رابطه (۱۱)، یک کنترلر مدار باز برای تامین نیروی عمودی و اصطکاک اندازه‌گیری شده در نوک انگشت می‌باشد و قسمت آخر کنترلر برای جبران اختلاف نیروی عمودی اندازه‌گیری شده نسبت به نیروی عمودی مطلوب می‌باشد. بنابراین رابطه قسمت سوم کنترلر را می‌توان بصورت زیر بازنویسی نمود:

$$\begin{aligned}\hat{\boldsymbol{\tau}} &= \mathbf{B}^{-1}\mathbf{J}_1^{\mathrm{T}} k_h(N_0-(N-k_\mu|f|/\mu)) \\ &= \mathbf{B}^{-1}\mathbf{J}_1^{\mathrm{T}}\tilde{N}\end{aligned} \qquad (۱۳)$$

که در رابطه فوق، $\tilde{N}$ بیانگر اختلاف نیروی عمودی اندازه‌گیری شده نسبت به نیروی مطلوب می‌باشد. طبیعی است که عملکرد این کنترلر در کاهش $\tilde{N}$ به صفر، یعنی میل دادن مقدار نیروی عمودی به حداقل نیروی لازم، تابع انتخاب مناسب پارامترهای کنترلر مدار بسته فوق یعنی k_h، N_0 و k_μ خواهد بود. پارامترهای مهم عملکردی این کنترلر را می‌توان شامل مقدار حداکثر نیروی عمودی ایجاد شده در فرآیند گرفتن، حداکثر فاصله لغزش جسم نسبت به انگشت در طی فرآیند لغزش و مقدار خطای ماندگار نیروی عمودی نسبت به نیروی مطلوب دانست. برای ارائه تخمین‌های مناسب در خصوص پارامترهای کنترلر فوق و نحوه تاثیرگذاری آنها بر عملکرد سیستم از تخمین‌های ارائه شده توسط صدیق و احمدی [۲۹] استفاده شده‌است. صدیق و احمدی [۲۹] برای گرفتن ایمن جسم توسط یک گریپر فک-موازی، کنترلری به صورت زیر برای کنترل نیروی عمودی اعمالی به جسم، N، معرفی نمودند:

$$\dot{N} = k_e(\nu - k_N(N-k_\mu|f|/\mu)) \qquad (۱۴)$$

رابطه (۱۴) را در یک بازه زمانی کوچک می‌توان بصورت زیر تقریب زد:

$$\tilde{N}/\Delta t = k_e(\nu - k_N(N-k_\mu|f|/\mu)) \qquad (۱۵)$$

که در رابطه فوق، Δt متوسط زمان فاصله دو اندازه‌گیری متوالی نیروی عمودی می‌باشد. با مقایسه دو معادله (۱۳) و (۱۵)، روابط زیر برای محاسبه پارامترهای کنترلر ارائه شده در این مقاله (رابطه ۱۳) بر حسب پارامترهای کنترلر ارائه شده توسط صدیق و احمدی (رابطه ۱۴) حاصل خواهد شد:

$$k_h = k_N k_e \Delta t \qquad (۱۶)$$

$$N_0 = \nu / k_N \qquad (۱۷)$$

بنابراین با توجه به روابط تخمین ارائه شده برای کنترلر (۱۴) توسط صدیق و احمدی و نیز با توجه به روابط (۱۶) و (۱۷) و در نظر گرفتن مقدار 0.001 به عنوان یک مقدار متوسط برای Δt معادلات زیر برای تخمین اولیه پارامترهای کنترلر پیشنهادی این مقاله بدست می‌آیند:

$$N_0 = ((k_\mu - 1)\bar{N})/((2\mu)(N_{pd}/\bar{N}-1)) \qquad (۱۸)$$

$$k_h = \sqrt{5}\times 0.001\bar{N}/(2\sqrt{s_d N_0}) \qquad (۱۹)$$

$$k_\mu = (N_{fd}-N_0)/\bar{N} \qquad (۲۰)$$

که در روابط فوق، $\bar{N}$ بیانگر می‌نیمم مقدار نیروی عمودی می‌باشد که می‌تواند با فرض ضریب اطمینان صفر جسم را در آستانه لغزش نگهداری نماید. همچنین در این روابط N_{pd}، s_d و N_{fd} بترتیب مقدار قله مطلوب برای نیروی عمودی، فاصله لغزش مطلوب و مقدار نیروی عمودی مطلوب در حالت پایدار حرکت و بدون شتاب است. اختلاف N_{fd} با $\bar{N}$ نشان‌دهنده حاشیه اطمینان نیروی عمودی است. جزئیات بیشتر در این خصوص در مرجع [۲۹] قابل تعقیب خواهد بود. لازم بذکر است که مقادیر پیشنهادی فوق تنها می‌توانند بعنوان مقادیر اولیه برای پارامترهای کنترلر مورد استفاده قرار گیرند. مقدار مناسب پارامترها می‌بایست با توجه به جهت گیری رفتار سیستم بر حسب تغییر پارامترها در حین عمل(و یا شبیه سازی) تصحیح گردد.

۵- تخمین‌گر ضریب اصطکاک

همانطور که از ساختار معادله (۱۲) مشخص است، کنترلر پیشنهادی تابعی از ضریب اصطکاک می‌باشد. ذکر این نکته لازم است که ضریب اصطکاک ذاتا مقداری است نامعلوم و از طریق آزمایش و با توجه به شرایط تعریف شده در محیط آزمایش بدست می‌آید. از طرفی تغییرات ضریب اصطکاک به لحاظ کاربردی در بعضی موارد از جمله مسائل سایشی و یا روانکاری و موارد مشابه، امری اجتناب‌ناپذیر

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.4.4]

می‌باشد. لازم به توضیح است که بررسی‌ها نشان داد کنترلر نسبت به تغییرات ضریب اصطکاک مقاوم نبوده و لذا برای داشتن عملکرد مطلوب، با الگوگیری از مقاله ارائه شده توسط صدیق و احمدی [۱۹]آنرا مجهز به الگوریتمی جهت تخمین مقدار صحیح ضریب اصطکاک می‌نمائیم. الگوریتمی که بدین منظور پیشنهاد می‌شود بر اساس خواص اصطکاک کولمبی پایه‌گذاری شده و با اندازه‌گیری نیروهای اصطکاکی و عمودی، ضریب اصطکاک را محاسبه می‌نماید. طراحی این تخمین‌گر بر پایه دو واقعیت زیر استوار است:

۱- مقدار ضریب اصطکاک یک حد بالایی برای نسبت اصطکاک به نیروی عمودی است یعنی $\mu \geq f / N$

۲- در شرایط لغزش (و یا آستانه لغزش) نسبت f / N مستقل از هرگونه تغییر در نیروی عمودی ثابت می‌ماند و این ثابت برابر ضریب اصطکاک دینامیکی دو سطح است.

بر اساس دو اصل فوق الگوریتم زیر برای تخمین ضریب اصطکاک پیشنهاد می‌شود.

قدم اول: مقدار ضریب اصطکاک را بر اساس بهترین اطلاع خود از سیستم انتخاب می‌کنیم(با توجه به جنس و شرایط سطوح).

قدم دوم: در هر مرحله اندازه‌گیری نیروهای تماسی، بهترین مقدار ارزیابی شده تا مرحله قبل یعنی $\hat{\mu}$ را با مقدار f_i / N_i مقایسه می‌کنیم. اگر مقدار f_i / N_i بزرگتر یا مساوی $\hat{\mu}$ است، مقدار $\hat{\mu}$ را با f_i / N_i به‌هنگام می‌کنیم در غیر این‌صورت مقدار f_i / N_i را با مقدار f_{i-1} / N_{i-1} مقایسه می‌کنیم، اگر این دو مقدار متفاوت هستند به این معنی است که سیستم در حالت عدم لغزش است و لذا تغییری در مقدار $\hat{\mu}$ نمی‌دهیم. اما اگر دو مقدار مذکور تفاوت ندارند، این‌را می‌توان به عنوان لغزش تلقی نموده و بنابراین مقدار $\hat{\mu}$ را با f_i / N_i به‌هنگام نمود. در اینجا ذکر دو نکته نیز لازم است.

۱- اگر مقدار N_i در یک مرحله اندازه‌گیری برابر صفر باشد اطلاعات این مرحله اندازه‌گیری را در تخمین ضریب اصطکاک استفاده نمی‌کنیم.

۲- در حالت خاص که $f_{i-1} / N_{i-1} = f_i / N_i$ باشد و واقعا جسم در حال لغزش نباشد تخمین‌گر فوق به اشتباه ضریب اصطکاک را با f_i / N_i که کوچکتر از مقدار واقعی ضریب اصطکاک است به‌هنگام می‌کند. این اشتباه موجب می‌شود که گریپر جسم را با نیروی اضافه‌تر از مقدار واقعی نگهدارد که با خواسته گرفتن ایمن یعنی گرفتن با حداقل نیروی ممکن متناقض است. لذا لازم است این به‌هنگام‌سازی با دقت بیشتری صورت گیرد. به این منظور لازم است مقدار N_i و N_{i-1} نیز مقایسه شوند و فقط اگر این دو مقدار متفاوت باشند مقدار $\hat{\mu}$ با f_i / N_i به‌هنگام‌سازی شود.

در الگوریتم فوق $\hat{\mu}$ بهترین مقدار ارزیابی صورت گرفته تا پایان مرحله iام اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. در واقع این مقدار در کنترلر مورد استفاده قرار می‌گیرد. از سوی دیگر $\hat{\mu}_i$ نشان‌دهنده بهترین ارزیابی ضریب اصطکاک در مرحله iام اندازه‌گیری است. منطق الگوریتم فوق این است که هرگاه لغزشی در سیستم رخ می‌دهد، سریعا ضریب اصطکاک را محاسبه و برای استفاده در کنترلر آماده می‌نماید، لازم بذکر است با توجه به اینکه کنترلر نیرویی ارائه شده نیروی اعمالی را در حداقل خود نگه می‌دارد، هرگاه ضریب اصطکاک در مرحله‌ای از حرکت بطور اتفاقی و بر اثر عوامل مختلف مثل روانکاری کاهش یابد، سیستم دچار لغزش شده و با توجه به منطق ارائه شده برای الگوریتم تخمین ضریب اصطکاک، مقدار جدید ضریب اصطکاک مورد محاسبه قرار گرفته و ضریب اصطکاک بکار رفته در کنترلر بر اساس آن اصلاح می‌شود. جزئیات بیشتر در این خصوص در مرجع [۱۹] قابل تعقیب خواهد بود.

۶- صحت سنجی عملکرد کنترلر

همانطور که در بخش مدل‌سازی دینامیکی مطرح شد سیستم مورد مطالعه بر اثر حرکت مچ، حرکتی کلی در صفحه Y-Z داشته و حرکت توسط انگشتان، زنجیره‌ای سه بندی، محدود به صفحه X-Y می‌باشد. جهت بررسی دقیق‌تر حرکت‌های مختلف متصور برای سیستم و همچنین بررسی عملکرد کنترلر در فرآیند گرفتن و جابجایی جسم، شبیه‌سازی برای حالت‌های زیر صورت پذیرفته است:

الف- گرفتن جسمی که تنها تحت تاثیر وزن خود شروع به حرکت می‌کند. لازم بذکر است این حرکت برای جسم در راستای Z بوده و انگشتان برای اعمال نیروی عمودی در صفحه‌ای به موازات صفحه X-Y حرکت خواهند کرد.

ب-گرفتن و جابجائی جسم در مسیر مطلوب (در امتداد Y داخل صفحه X-Y) توسط انگشتان. در این حالت لغزش جسم در دو راستای Y و Z اتفاق می‌افتد.

ج- گرفتن و جابجایی جسم در مسیر مطلوب (در امتداد X داخل صفحه X-Y) توسط انگشتان. در این حالت کنترلر باید نیروی عمودی اعمالی و جابجایی نوک پنجه را در راستای X بصورت همزمان کنترل کند.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.4.4]

د- گرفتن و جابجایی همزمان جسم در صفحه X-Y توسط انگشتان و در صفحه Y-Z توسط مچ. در این مسئله نیز حرکت انگشتان برای اعمال نیروی عمودی در صفحه‌ای به موازات صفحه X-Y خواهد بود و لغزش جسم مجددا در دو راستای Y و Z اتفاق می‌افتد.

لازم بذکر است که مقادیر پارامترها در شبیه‌سازی مطابق با جدول (۲) لحاظ شده و فرض براین است که انگشتان در لحظه شروع حرکت، فشردگی نداشته و در تماس با جسم قرار داشته باشند. در ادامه نتایج شبیه‌سازی برای چهار مسئله فوق ارائه شده‌است.

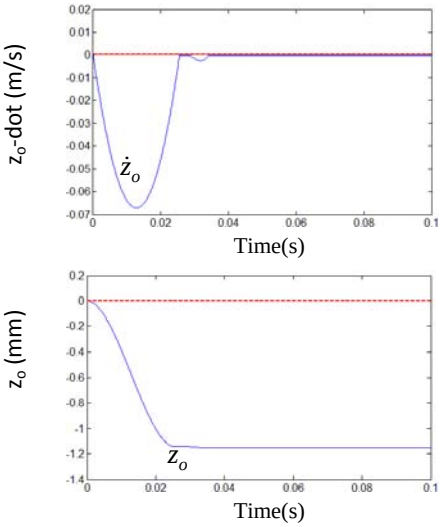
۶-۱ مهار لغزش جسم تحت تاثیر وزن

در بخش اول از شبیه‌سازی، عملکرد کنترلر در نگهداری جسمی

جدول(۲) مقادیر عددی پارامترهای مسئله مورد مطالعه

جرم جسم	$m = 1kg$
ممان اینرسی جرم	$I_o = 0.004kgm^2$
ضریب اصطکاک دو سطح	$\mu_{l,r} = 0.4$
جرم اعضای زنجیره	$m_i = 0.01kg \quad , \quad i = 1,2,3,4,5,6$
طول اعضا زنجیره	$l_i = 0.2m \quad i = 1,...,6$
ممان اینرسی اعضا	$I_i = 0.004kgm^2$ $i = 1,2,3,4,5,6$
عرض جسم	$b = 0.1m$
سختی معادل سیستم	$k_e = 10000N/m$
بهره تناسبی در کنترلر	$k_p = 10$
بهره مشتقی در کنترلر	$k_v = 1000$
ضریب اطمینان نیروی عمودی در کنترلر	$k_\mu = 1$
بهره نیرویی در کنترلر	$k_h = 8$
مقدار ثابت نیرویی در کنترلر	$N_0 = 1 \quad N$

که تحت تاثیر وزن خود در حال لغزش است مورد بررسی قرار می‌گیرد، نتایج مربوطه در شکل‌های(۳) تا (۵) ارائه شده‌است. همانطور که قبلا اشاره شد در این قسمت از شبیه‌سازی هیچ حرکت از پیش‌تعریف‌شده‌ای برای مچ و انگشتان در نظر گرفته نشده‌است، لذا در این حالت جسم تنها به خاطر اثر وزن خود در راستای Z حرکت کرده و هدف مورد نظر در اینجا جلوگیری از لغزش جسم بصورت ایمن می‌باشد. بدین منظور کنترلر بایستی انگشتان را به سمت جسم حرکت داده تا نیروی عمودی مناسب برای مهار لغزش جسم ایجاد شود. نتایج شکل (۳) مشخص می‌نماید که جسم در جهت Z و در ابتدای حرکت

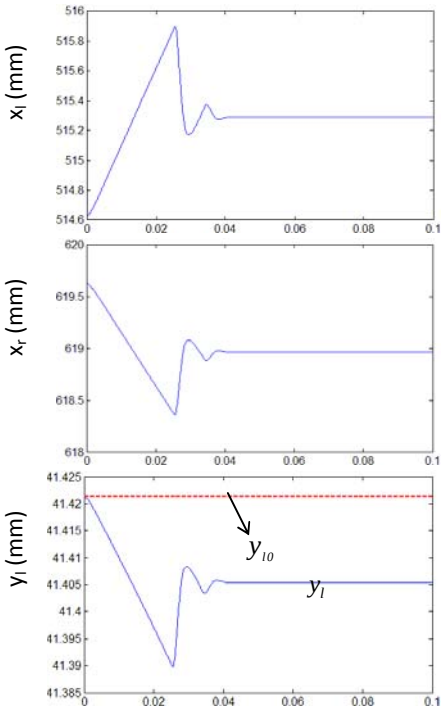


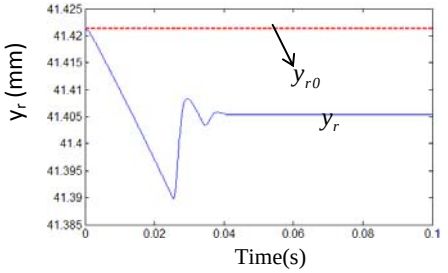
شکل(۳) سرعت و موقعیت مطلق مرکز جرم جسم در راستای شتاب ثقل

بخاطر اثر وزن جسم دچار لغزش شده‌است. لازم بذکر است این لغزش در حوالی $t = 0.05Sec$ به پایان رسیده و جسم توسط انگشتان مهار می‌شود. مقدار این لغزش مطابق شکل فوق حدود $1mm$ می‌باشد. بطور خلاصه نتایج شکل فوق نشان می‌دهند که کنترلر قادر به مهار جسم بوده و از ادامه لغزش آن جلوگیری می‌نماید. نکته قابل توجه در این مثال اعمال نیروی عمودی تا حدود دو برابر مقدار حداقل مورد نیاز در زمان لغزش است که می‌تواند در پاره‌ای موارد نامطلوب باشد. صدیق و احمدی [۲۹] ضمن بررسی کامل رابطه عملکرد این کنترلر با پارامترهای آن نشان می‌دهند که این مقدار حداکثر با کاهش مقدار k_μ کاهش می‌یابد که البته این امر با هزینه افزایش زمان و مقدار لغزش صورت می‌پذیرد. به عنوان نمونه در مثال ذکر شده در مرجع فوق کاهش سی درصدی k_μ موجب کاهش سی درصدی نیروی عمودی و افزایش صد درصدی زمان لغزش شده‌است. این موضوع نشان می‌دهد که مشابه حالت گرفتن توسط انگشتان انسان در صورت وجود مقاومت لازم در جسم گرفته شده می‌توان انگشت‌ها را با نیروی بیشتر و سریع‌تر بست و مانع از لغزش شد و بر عکس این فرآیند برای اجسام ظریف‌تر باید آهسته‌تر انجام شده که در نتیجه آن مقدار لغزش قبل از مهار جسم بیشتر خواهد شد.

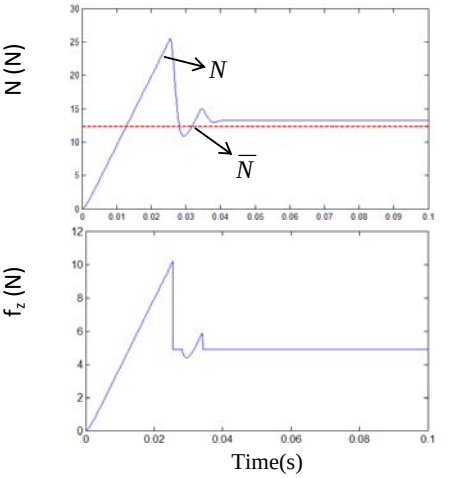
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.4.4]

نتایج شکل (۴) که موقعیت مجازی نوک انگشت را در شرایط عدم تماس با جسم نشان می‌دهند، مبین حرکت انگشتان به سمت جسم در جهت مهار لغزش است. حرکت انگشتان در جهت Y مطابق شکل فوق نشان می‌دهد که حرکت در این راستا به خوبی کنترل شده و مقدار آن نزدیک صفر است. از سوی دیگر تقارن در دو طرف نیز در طی حرکت بهم نخورده است. شکل (۵) نشان می‌دهد که پنجه توانسته نیروی عمودی و اصطکاکی مورد نظر را جهت نگهداری جسم تامین و آن را تا حداقل مورد نیاز کاهش دهد. لازم بذکر است خطای ماندگار نیروی عمودی نهایی نسبت به حداقل مورد نیاز آن که در شکل با منحنی خط چین نمایش داده شده‌است بخاطر وجود ترم N_0 در کنترلر معرفی‌شده می‌باشد. این موضوع به این دلیل است که ترم سوم کنترلر در وضعیت پایدار باعث می‌شود نیروی عمودی به‌سمت $N_0 + k_\mu |f|/\mu$ میل نماید که این موضوع خطای ماندگار N_0 را نسبت به حالت مطلوب نیروی عمودی یعنی $k_\mu |f|/\mu$ ایجاد خواهد نمود. البته ترم N_0 به نوعی نقش ضریب اطمینان را برای نیروی عمودی بازی می‌کند تا بتواند جسم را با نیرویی بالاتر از حد آستانه لغزش نگهداری نماید.





شکل(۴) موقعیت انگشتان در حرکت جسم تحت تاثیر وزن آن



شکل(۵) نیروهای تماسی در حرکت جسم تحت تاثیر وزن آن

گرچه موضوع اعمال نیروی عمودی لازم جهت مهار جسم قبلا توسط الگوریتم‌های دیگر به انجام رسیده و توسط سایر محققین گزارش شده لیکن موضوع کاهش نیروی عمودی پس از مهار کامل جسم که د ر اثر جزء سوم در رابطه کنترل به انجام می‌رسد سابقه کمتری دارد. صدیق و احمدی [۲۹] ضمن مقایسه نتایج الگوریتم‌های معمول با الگوریتم کاهش نیروی جزء سوم کنترلر، عدم موفقیت الگوریتم‌هایی که بر پایه بازخورد از سرعت و شتاب نسبی برای جلوگیری از لغزش پایه‌گذاری شده‌اند را در کاهش نیروی عمودی نشان داده‌اند.

۶-۲ مهار جسم و جابجایی آن توسط حرکت انگشتان در امتداد محور Y

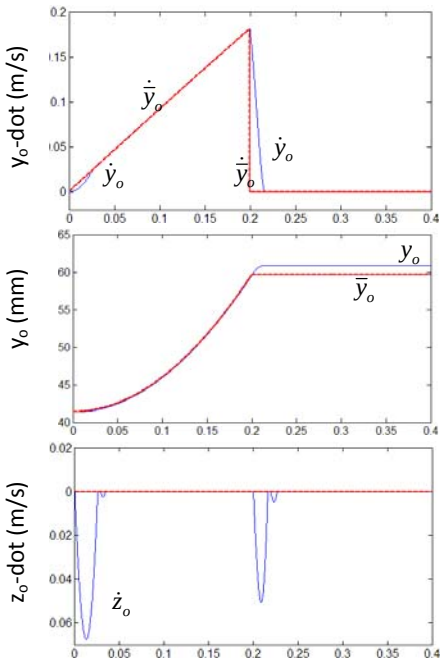
در این قسمت از شبیه‌سازی عملکرد کنترلر در گرفتن جسم برای جابجایی توسط انگشت در صفحه X-Y مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم بذکر است در اینجا فرض بر این است که مچ دارای مانور حرکتی نبوده و تنها اثر جابجایی توسط انگشت مورد بررسی قرار

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.4.4]

می‌گیرد. فرض می‌کنیم که انگشتان بخواهند جسم را در مسیر زیر حرکت دهد:

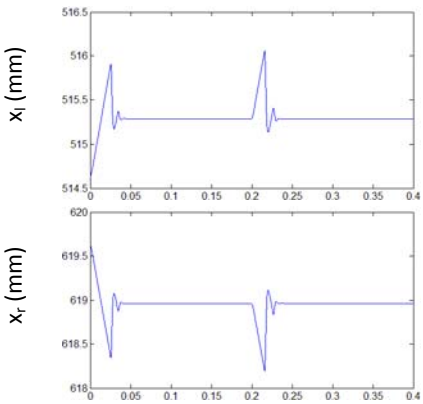
$$\bar{y}_o = \begin{cases} 0.4146 - 0.3732\cos(\pi t/2) & t < 0.2 \\ 0.0597 & t > 0.2 \end{cases} \quad (۲۱)$$
$$\bar{x}_o = 0.5671$$

در رابطه فوق $\bar{y}_o$ و $\bar{x}_o$ مسیر مطلوب را برای جابجایی جسم توسط انگشتان نشان می‌دهند، نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۶) تا (۹) ارائه شده‌است. شکل (۶) نشان می‌دهد که جسم در ابتدای حرکت در اثر جابجایی در جهت Y توسط انگشتان و همچنین صفر شدن سرعت مطلوب در $t = 0.2Sec$ دچار لغزش شده‌است، لازم بذکر است این لغزش با اعمال نیروی عمودی بر جسم مهار شده و مطابق شکل فوق سرعت انگشتان به خوبی توسط سرعت جسم تعقیب شده‌است. لازم بذکر است میزان لغزش جسم یا خطای تعقیب مسیر توسط جسم مطابق با شکل فوق حدود $1.5mm$ در انتهای مسیر می‌باشد. یادآوری این نکته ضروری است که وظیفه کنترلر پیشنهادی در این مقاله گرفتن و جابجایی جسم توسط انگشتان است و لذا این کنترلر قادر به جبران خطای ناشی از لغزش جسم نخواهد بود. هرچند این خطا را می‌توان به سادگی با افزودن یک ترم تنظیم‌گر[1] به کنترلر بازو جبران نمود. همچنین بررسی شکل فوق نشان می‌دهد که لغزش در راستای Y باعث ایجاد لغزشی در جهت Z نیز شده است. این موضوع به این دلیل است



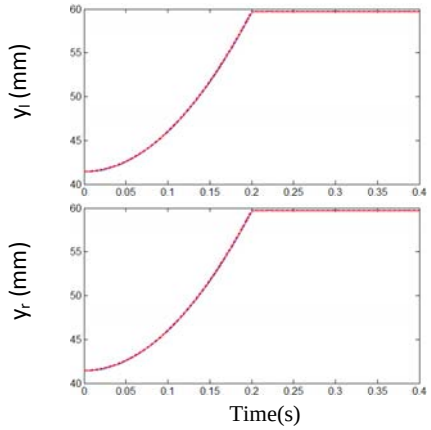
شکل(۶) موقعیت و سرعت جسم در مانور حرکت آن توسط انگشتان در امتداد محور Y (مقادیر مطلوب بصورت خط چین و مقادیر واقعی با خطوط پر نشان داده شده‌اند)

که راستای ثقلی در جهت Z بوده و زمانیکه جسم در راستای Y شروع به لغزش نمود بخاطر وجود شتاب ثقل در راستای Z نیز حرکت خواهد کرد، مطابق شکل فوق میزان این لغزش در جهت Z حدود $1.75mm$ در انتهای مسیر می‌باشد. نتایج شکل (۷) نشان می‌دهند که انگشتان چپ و راست برای ایجاد نیروی عمودی و مهار لغزش در راستای عمود بر سطح یعنی جهت X حرکت کرده و فشردگی لازم را در سیستم ایجاد نموده و مسیر مطلوب را در راستای Y تعقیب نموده‌اند، لازم بذکر است در شکل‌های فوق مسیر مطلوب و مسیر انگشتان تقریبا روی هم قرار گرفته‌اند. نتایج شکل (۸) تغییرات نیروی اصطکاکی را در راستای Y و Z نمایش می‌دهد، بررسی شکل فوق نشان می‌دهد که در انتهای مسیر نیروی اصطکاکی تنها در راستای Z مقدار دارد. دلیل این موضوع حذف شتاب‌های ناشی از مانور حرکتی در در راستای Y می‌باشد. نتایج شکل (۹) نیز نشان می‌دهد که بعد از مهار لغزش توسط انگشت نیروی عمودی تا حداقل مورد نیاز خود جهت نگهداری جسم

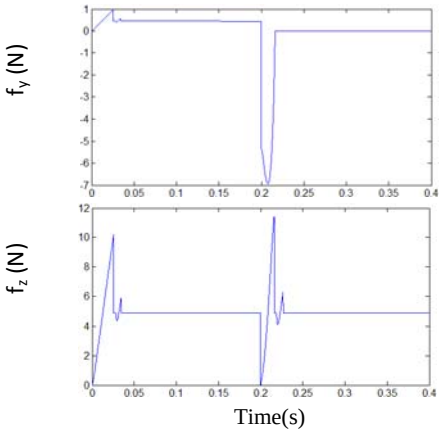


[1] reset

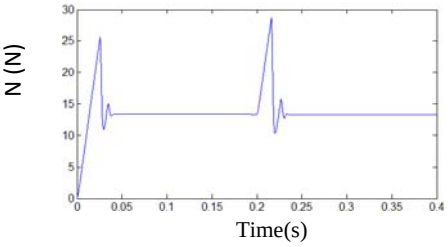
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.4.4]



شکل(۷) موقعیت نوک انگشتان چپ و راست در مانور حرکت جسم توسط انگشتان در امتداد محور Y



شکل(۸) نیروهای تماسی در مانور حرکت جسم توسط انگشتان در امتداد محور Y



شکل(۹) نیروی عمود بر سطح در مانور حرکت جسم توسط انگشتان در امتداد محور Y

کاهش یافته است. بنابراین بطور خلاصه و با توجه به نتایج این بخش می‌توان گفت که کنترلر توانسته است جسم را با اعمال حداقل نیروی عمودی لازم مهار کرده و حرکت مورد نظر را به انجام رساند

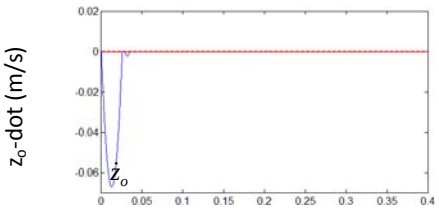
۳-۶ مهار جسم و جابجایی آن توسط حرکت انگشتان در امتداد محور X

در این قسمت عملکرد کنترلر برای مهار جسم و جابجایی آن توسط انگشت در صفحه X-Y در راستای محور X مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم بذکر است در اینجا فرض بر این است که مچ فاقد حرکت بوده و تنها اثر جابجایی توسط انگشتان مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مانور به طور خاص توانایی کنترلر پیشنهادی را در کنترل همزمان موقعیت و نیرو در راستای محور X به اثبات می‌رساند. لازم بذکر است که حرکت در جهت X یک حرکت شبه ساکن[1] فرض شده و یا به عبارتی از اثر شتاب در جهت X بر اختلاف نیروی عمودی دو طرف که می‌تواند موجب اختلاف نیروی اصطکاک شده و موجب دوران جسم گردد صرفنظر شده‌است. مسیر مطلوب حرکت جسم عبارت است از:

$$\bar{x}_o = \begin{cases} 0.6652 - 0.1\cos(\pi t/2) & t < 0.2 \\ 0.5701 & t > 0.2 \end{cases} \qquad (۲۲)$$

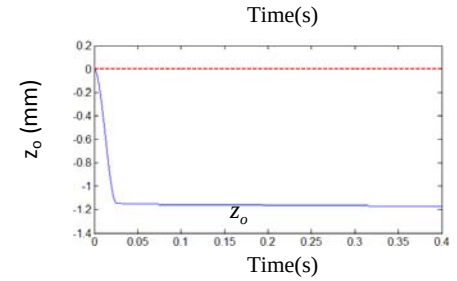
$$\bar{y}_o = 0.0414$$

در رابطه فوق $\bar{x}_o$ و $\bar{y}_o$ مسیر مطلوب برای جابجایی جسم توسط انگشتان را نشان می‌دهند، نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) ارائه شده‌است. شکل (۱۰) نشان می‌دهد که جسم در ابتدای حرکت تحت اثر وزن خود در جهت Z دچار لغزش شده‌است، لازم بذکر است این لغزش با اعمال نیروی عمودی بر جسم مهار شده و مطابق شکل فوق سرعت انگشت به خوبی توسط سرعت جسم تعقیب شده‌است. بررسی این شکل نشان می‌دهد که حرکت در راستای X باعث ایجاد لغزشی در جهت Z شده است. این موضوع به این دلیل است که راستای ثقلی در جهت Z بوده و زمانیکه جسم در راستای X شروع به حرکت می‌نماید، بخاطر وجود شتاب ثقل در راستای Z نیز حرکت خواهد کرد، میزان این لغزش در جهت Z حدود $1.2mm$ در انتهای مسیر می‌باشد. بررسی نتایج شکل (۱۱) نشان می‌دهد که بعد از مهار لغزش توسط انگشت نیروی عمودی تا حداقل مورد نیاز خود جهت نگهداری جسم کاهش یافته است و نیروی اصطکاکی مورد نظر را در راستای محور Z ایجاد نموده است.

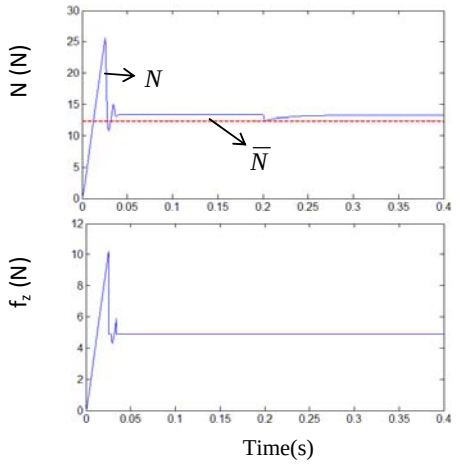


[1] quasi static

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.4.4]

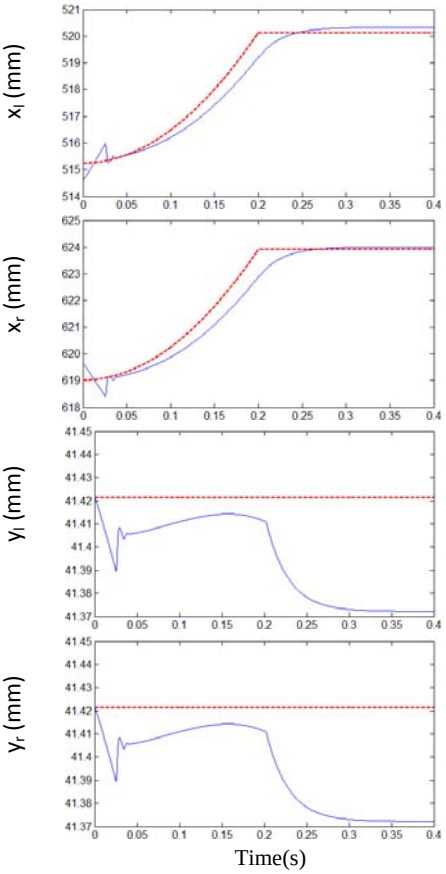


شکل(۱۰) موقعیت و سرعت جسم (در مانور حرکت آن توسط انگشتان در راستای محور X)



شکل(۱۱) نیروهای اصطکاکی (در مانور حرکت جسم توسط انگشتان در راستای محور X)

نتایج شکل (۱۲) نشان می‌دهند که انگشت چپ و راست برای ایجاد نیروی عمودی ومهار لغزش در راستای عمود بر سطح یعنی جهت X حرکت کرده و علاوه براینکه مسیر مورد نظر را در این راستا تعقیب می‌نمایند، فشردگی لازم را نیز در سیستم ایجاد می‌نمایند، اختلاف بین مسیر مطلوب و منحنی تعقیب معرف این فشردگی می‌باشد. نتایج این شکل نشان می‌دهد که انگشت با تقریب خوبی مسیر مطلوب را در راستای Y تعقیب نموده است. بنابراین بطور خلاصه و با توجه به نتایج این بخش می‌توان گفت که کنترلر توانسته است جسم را با اعمال حداقل نیروی عمودی لازم مهار کرده و آنرا در مسیر مورد نظر جابجا نماید. گرچه نتایج مشابه نتایج مثال‌های قبلی در سایر تحقیقات قابل مشاهده است لیکن نتایج این مثال که در قالب آن یک جسم گرفته شده در راستای عمود بر سطح تماس توسط حرکت انگشتان جابجا شود بدیع بوده و برای اولین بار گزارش شده‌است.



شکل(۱۲) موقعیت انگشت در مانور حرکت جسم توسط انگشتان در راستای محور X (مقادیر مطلوب بصورت خط چین و مقادیر واقعی با خطوط پر نشان داده شده‌اند)

۴-۶ مهار جسم و جابجایی آن توسط حرکت ترکیبی مچ و انگشتان

در این قسمت از شبیه‌سازی عملکرد کنترلر در نگهداری جسم در جابجایی توسط انگشت و همچنین جابجایی در اثر حرکت مچ مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم بذکر است معادلات مسیر در این قسمت معادل روابط مسیر ارائه شده در دو قسمت قبلی و معادله جدیدی در امتداد محور Z می‌باشد، لذا روابط زیر را برای مسیرهای مورد نظر در این قسمت خواهیم داشت:

$$\begin{cases} y_b = 0 & t < 0.09 \\ y_b = 5(t-0.09)^2 & 0.09 < t < 0.1 \\ y_b = 0.1(t-0.1) + 0.0005 & t > 0.1 \end{cases} \quad (۲۳)$$

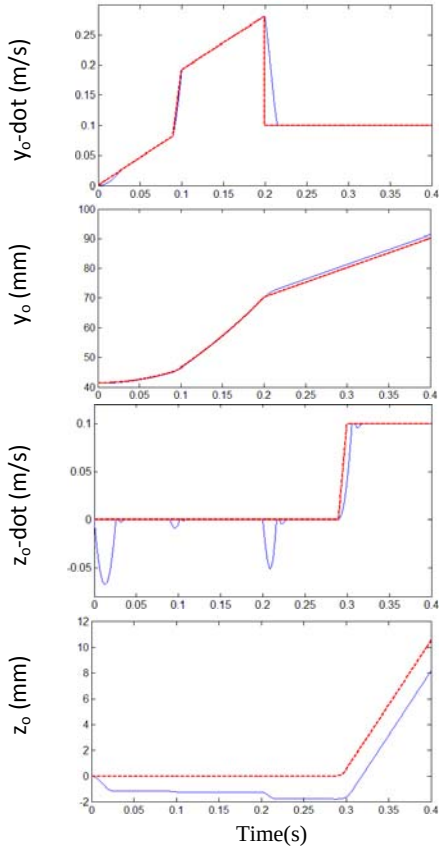
$$\bar{y}_o = \begin{cases} 0.4146 - 0.3732\ \cos(\pi t/2) & t < 0.2 \\ 0.0597 & t > 0.2 \end{cases} \quad (۲۴)$$

$$\bar{x}_o = 0.5671$$

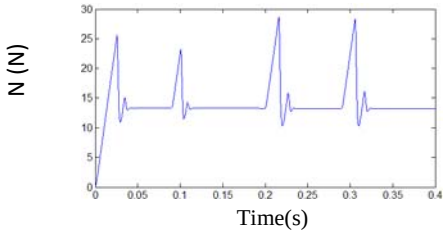
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.4.4]

$$(۲۵)\quad \begin{cases} z_b = 0 & t < 0.29 \\ z_b = 5(t-0.29)^2 & 0.29 < t < 0.3 \\ z_b = 0.1(t-0.3)+0.0005 & t > 0.3 \end{cases}$$

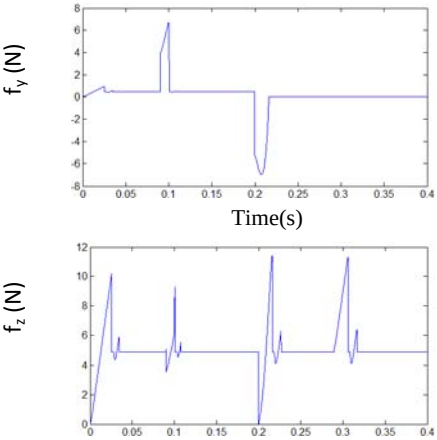
بنابراین با توجه به مسیرهای فوق که مسیر مطلوب برای جابجایی جسم است، نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های(۱۳) تا (۱۶) ارائه شده‌است. همانطور که در بالا اشاره شد مانور تعریف شده در این قسمت ترکیب مانورهای معرفی‌شده در دو قسمت قبلی است و با توجه به نتایج حاصله در آن قسمت‌ها می‌توان گفت که کنترلر بخوبی توانسته لغزش جسم را در اثر حرکت مچ و انگشت مهار و نیروی عمودی اعمالی بر سطح جسم را تا حداقل مورد نیاز کاهش دهد، بطور مشابه نتایج شبیه‌سازی در این قسمت هم نشان می‌دهند که لغزش جسم مطابق شکل (۱۳) مهار شده و نیروی عمودی مطابق شکل (۱۴) تا حداقل مورد نیاز آن کاهش یافته و نیروی اصطکاکی نیز جهت نگهداری و جابجایی جسم مطابق شکل (۱۵) ایجاد شده‌است.



شکل(۱۳) موقعیت و سرعت جسم در مانور ترکیبی آن توسط مچ و انگشتان (مقادیر مطلوب بصورت خط چین و مقادیر واقعی با خطوط پر نشان داده شده‌اند)

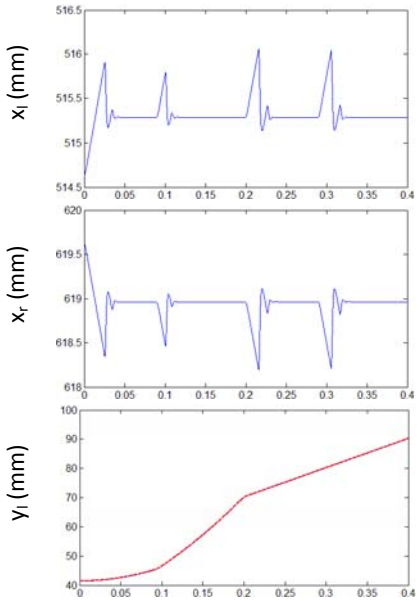


شکل(۱۴) نیروی عمود بر سطح در مانور ترکیبی جسم توسط مچ و انگشتان

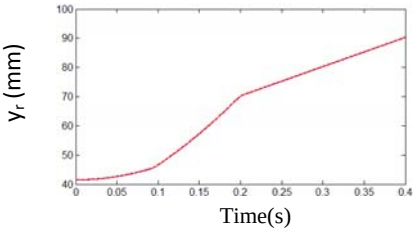


شکل(۱۵) نیروهای تماسی در مانور ترکیبی جسم توسط مچ و انگشتان

همچنین انگشت چپ و راست مطابق با شکل (۱۶) فشردگی لازم را در سیستم ایجاد نموده تا نیروی اصطکاکی و عمودی لازم ایجاد شود.



[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.4.4]



شکل(۱۶) موقعیت انگشتان در مانور ترکیبی جسم توسط مچ و انگشتان

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله مهار و جابجایی اجسام توسط دست چندانگشتی مورد توجه قرار گرفته و با توجه به اشکال الگوریتم‌های کنترلی نیرو- موقعیت قبلی در تقسیم فضای کار به دو زیر فضا و کنترل موقعیت و نیرو در هر زیر فضا بطور جداگانه در این مقاله الگوریتم کنترلی ارائه شده است که برای نگهداری جسم با حداقل نیرو، بجای بازخورد از حرکت نسبی که در عمل دشوار می‌باشد، تنها بر مبنای اندازه‌گیری نیروهای تماسی بین نوک انگشت و جسم جابجا شونده عمل نموده و امکان کنترل موقعیت در راستای اعمال نیرو را فراهم کرده‌است. کنترلر ارائه شده دارای ساختار ترکیبی بوده و نیرو و موقعیت را بصورت حلقه بسته و بطور همزمان کنترل می‌نماید. با توجه به وابستگی کنترلر به مقدار صحیح ضریب اصطکاک، یک روش تخمین ضریب اصطکاک بر مبنای اندازه‌گیری نیروهای تماسی پیشنهاد شده‌است. به منظور اطمینان از عملکرد کنترلر موضوع مهار و جابجایی جسم در طی حرکت وتغییر سرعت ناگهانی در راستاهای متعامد در صفحه انگشتان مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که کنترلر پیشنهادی علاوه بر موفقیت در مهار جسمی که توسط حرکت مچ جابجا می‌شود توانایی کنترل مناسب انگشتان برای مهار و جابجایی نوک انگشتی جسم را نیز داراست.

مراجع

[1] Shinoda, H. and Ando, S. A., 1996, “Tactile sensor with 5-D deformation sensing, in Proc. the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis”, MN, USA, vol. 1, pp. 7-12

[2] Jockush, J., Walter, J., and Ritter, H, 1997, “A tactile sensor system for a three-fingered robot manipulator”, in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, NM, USA, pp. 3080-6

[3] Holweg, E., Hoeve, H., Jongkind W.: L Marconi, C Melchiorri, and C. Bonivento., 1996, “Slip detection by tactile sensor: algorithms and experimental result”, in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, MN, USA, pp. 3234-9

[4] Trembly, M. R., Packard, W.J., and Cutkoscy, M.R., 1992, “Utilizing sensed incipient slip signals for grasp force control”, in Proc. Japan-USA Symposium on Flexible Automation, San Francisco, California pp: 1237-1243

[5] Glossas, NI. , and Aspragathos N.A, 2001, “Fuzzy logic grasp control using tactile sensors”, Mechatronics, vol. 11, pp.899-920

[6] Hadian, H., Keshmiri, M., and Sheikholeslam, F., 2008, “A new approach on object slippage control in a cooperating manipulators system”, Advanced Robotics, Vol. 22, No. 13-14 pp. 1559-1584(26)

[7] Nakazava, N., Kim, I., Inooka, H., and Ikeura, R., 2001, “Force control of a robot gripper based on human grasping schemes”, Control Engineering Practice, vol. 9, pp.735–742

[8] Lopez, J.A.D., Damper, R.I., Crowder, R.M., and Harris, C.J., 2004, “Adaptive neurofuzzy control of a robotic gripper with on-line machine learning”, Robotics and Autonomous Systems, vol. 48, pp: 93–110

[9] Arimoto, S., 2004, “Intelligent control of multi-fingered hands”, Annual Reviews in Control, vol. 28, pp.75–85

[10] Al-Gallaf, E.A., 2006, “Multi-fingered robot hand optimal task force distribution Neural inverse kinematics approach”, Robotics and Autonomous Systems, vol. 54, pp. 34–51

[11] Buss M., Hashimoto H., and Moore J.B., 1996, “Dexterous Hand Grasping Force Optimization”, IEEE Trans. on R.&A., Vol. 12(3), pp:406-418

[12] Li Z.X., Qin Z., Jiang S. and Han L., 1998, “coordinated Motion Generation and Real-Time Grasping Force Control for Multifingered Manipulation”, in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, pp:3631–3638

[13] Murakami K., Hasegawa T., “Novel Fingertip Equipped with Soft Skin and Hard Nail for Dexterous Multi-fingered Robotic Manipulation”, Fukuoka 812-8581 Japan.

[14] J. Trinkle, J.S Pang, S. Sudarsky, and G. Lo., 1994, “Complementarity Formulations and Existance of Solutions of Dynamic Multi-Rigid-Body Contact Problem with Coulomb Friction”

[15] Han L., Trinkle J. C., and Li Z. X., 2000, “Grasp Analysis as Linear Matrix Inequality Problems”,

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.4.4]

IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 16, No. 6

[16] Tremblay M.R., Cutkosky M.R., 1993, “Estimating Friction Using Incipient Slip a Manipulation Task”, in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Stanford University, Atlanta, GA, USA, vol.1, pp: 429 - 434

[17] Maeno T., Kawamura T., and Cheng S.C, 2004, “Friction Estimation by Pressing an Elastic Finger-Shaped Sensor against a Surface”, IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 20, No. 2, pp: 222-228

[18] Ahmadi H., and Sadigh M.J., 2008, “Safe Grasping in Presence of Multi Phase Friction”, in Proc. International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Hanoi, Vietnam, pp: 155-160

[19] Sadigh M.J., and Ahmadi H., H., 2009, “Robust Control Algorithm for Safe Grasping Based on Force Sensing”, in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Biomatics, Bangkok, Thailand, Page(s):1279 – 1284

[20] Raibert, M. and Craig, J., 1981, “Hybrid position/force control of manipulators”, ASME J. Dynamic Syst., Meas., Control, 102, 126–132, June.

[21] McClamroch, N. and Wang, D., Feedback stabilization and tracking of constrained robots, IEEE Transactions on Automatic Control, 33, 5, 419–426, May 1988.

[22] Hogan, N., 1987, “Stable execution of contact tasks using impedance control”, Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation, Raleigh, NC, 595–601, March.

[23] Anderson, R. and Spong, M., 1988, “Hybrid impedance control of robotic manipulators”, J. Robotics Automation, 4, 5, 549–556, Oct.

[24] Carelli, R. and Kelly, R., 1989, “Adaptive control of constrained robots modeled by singular system”, Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, 2635–2640, Dec.

[25] Jean, J.H. and Fu, L.-C., 1991, “Efficient adaptive hybrid control strategies for robots in constrained manipulators”, Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation, 1681–1686.

[26] Su, C.Y., Leung, T.P., and Zhou, Q.J., 1990, “Adaptive control of robot manipulators under constrained motion”, Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, 2650–2655, Dec.

[27] Arimoto, S., Naniwa, T., and Liu, Y.-H., 1995, “Model-based adaptive hybrid control of manipulators with geometric endpoint constraint”, Advanced Robotics, 9, 1, 67–80.

[۲۸] جعفر صدیق، حبیب احمدی، ۱۳۸۹، "جابجایی اجسام ظریف دو بعدی بوسیله یک ربات سری روی سطح به کمک اصطکاک"، کنفرانس کنترل، ابزار دقیق و اتوماسیون، ۶-۵ خردادماه، تهران، کد مقاله: ۱۰۲۶۷

[29] Sadigh M.J., and Ahmadi H., 2009, “Robust Control Algorithm for Safe Grasping Based on Measurement of Contact Forces”, Submitted to Mechanic & Aerospace Journal.

[30] Lewis, F.L., Abdallah, C.T., and Dawson, D.M., 2004, “Control of Robot Manipulators”, Macmillan, NewYork.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.4.4]