

جابجایی صفحه‌ای جسم توسط گیرش با چند انگشت یک دست متحرک ربات تحت قید غلتش ناب

سلمان احمدی، رامبد رستگاری*

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، پرند، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۳

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۶/۳۰

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۹/۱۲

کلمات کلیدی:

گرفتن دو انگشتی

پایداری

کنترل جسم

نوک انگشتان

کنترل امپدانس چندگانه

خلاصه: گرفتن جسم توسط انگشتان ربات با وجود قیود غلتش ناب از موضوعات تحت بررسی توسط محققین بسیاری می‌باشد. در مطالعات انجام پذیرفته تاکنون، بررسی اعمال قیود غلتش ناب با هدف رساندن جسم در وضعیت پایدار جدید مورد توجه بوده است. در این مقاله علاوه بر بررسی‌های معمول سینماتیک و دینامیک برای سیستم دو انگشت ربات و جسم نیم دایره بر روی یک دست متحرک ربات در صفحه، که نوک انگشت‌ها به صورت نیم کره و صلب فرض شده است، موضوع جابجایی جسم مطابق مسیر مشخص با حفظ پایداری دینامیکی آن نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا از کنترل امپدانس چندگانه برای اعمال کنترل با انجام اصلاحات مورد نیاز در آن بهره گرفته شده است. در روش کنترل امپدانس چندگانه سعی می‌شود با اعمال رفتارهای مطلوب بر کل اجزای سیستم از جمله پایه متحرک، انگشت‌ها و جسم، شرایط پایداری دینامیکی ارضا شود. تنظیم مناسب نیرو در این روش و این‌که این نیروها در مکان مناسب وارد شوند تا حد زیادی در به حداقل رساندن لغزش انگشت‌ها بر سطح جسم موثر می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام پذیرفته حاکی از کنترل، هدایت و همچنین پایداری مناسب جسم توسط مجموعه انگشتان و پایه متحرک خواهد بود.

۱- مقدمه

ترکیب خطی از ورودی‌های کنترلی ساده است استفاده کرده‌اند. گرفتن یک جسم با سطوح تخت و موازی به همراه دو انگشت ربات توسط اوزاوا و همکاران [۳] بررسی شده است که روش کنترلی به کار گرفته شده، از دسته کنترل‌های نیرو می‌باشد. در این کنترل‌ها نیازی به سینماتیک و وضعیت هندسی جسم نیست. اوزاوا و همکاران [۴] یک جسم دایروی شکل برای گیرش توسط انگشتان ربات را در نظر گرفتند. این گروه همچنین گرفتن جسم توسط سه انگشت یک ربات را بررسی کرده‌اند. در این پژوهش پارامترهای درگیر در مساله افزایش یافته است. با فرض این‌که بین نوک انگشتان و سطح جسم غلتش ناب وجود داشته باشد، کنترلر به کار رفته در این مقاله می‌تواند نیروهای مماسی را به خوبی تنظیم کند [۵]. آریموتو [۶] گرفتن جسم در صفحه قائم و با تاثیر نیروی وزن، و همچنین شکل جسم دوزنقه‌ای

امروزه کنترل جسم به وسیله دست ربات چند انگشتی از چالش‌های موجود در زمینه رباتیک است. لازم است اشاره شود که تقلید از دست انسان زمینه‌های متفاوتی از تحقیقات در این باره را شامل می‌شود. برخی مقالات که در سال‌های اخیر موضوع گرفتن^۱ و کنترل جسم در این وضعیت را بررسی کرده‌اند، به چالش‌های موجود در این حوزه پرداخته‌اند [۲۱]. چن و زریبی [۱]، یک دست ربات چند انگشتی بر مبنای آنالیز سینماتیکی و دینامیکی سیستم را در نظر گرفت که در آن شرایط غلتش و لغزش توامان بین نوک انگشتان و سطح جسم در نظر گرفته شد. دولگری و همکاران [۲] برای گرفتن جسم توسط دو انگشت از یک قانون کنترلی فیدبک که خود یک

1 Grasp

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: r.rastegari@rkiau.ac.ir



را نیز مورد بررسی قرار داده است. آریموتو [۷] همچنین یک نمونه گرفتن جسم در شرایط سه‌بعدی را مورد بررسی قرار داد که کنترلر با تنظیم نیروی مناسب روی جسم، منجر به پایداری مورد نیاز برای سیستم شده است. همچنین یوشیدا و همکاران [۸] موضوع گرفتن یک جسم توسط یک دست دو انگشتی را مورد بررسی قرار داده‌اند، که در آن یک طرف جسم به‌صورت انحنادار در نظر گرفته شده است؛ نتایج این مقاله حاکی از این است که کنترلر توانسته است پایداری را حفظ کند ولیکن تا حد زیادی به نیروی مورد نیاز برای این کار وابسته است یعنی این‌که اگر نیرو از حد مطلوب بیشتر شود، پایداری جسم به هم خواهد خورد و از دست ربات خارج می‌شود. آریموتو و یوشیدا [۹] از یک مفصل دو درجه آزادی برای یکی از انگشتان استفاده کردند. یودا و همکاران [۱۰] یک نمونه دست ساخته شده برای انجام گیرش ارایه دادند. این دست چهار انگشت دارد و در یک موسسه تحقیقاتی در ژاپن ساخته شده است. سونگ و همکاران [۱۱] از کنترلری استفاده کردند که می‌تواند با بهینه‌سازی زاویه نیروی اعمالی توسط انگشتان به سطح جسم پایداری را تضمین کند، منتها باید به این نکته اشاره شود که اگر در میزان سنجش و اندازه‌گیری خطاهایی که در تماس وجود دارند اشتباهی صورت گیرد، ممکن است کنترلر درست عمل نکند. گرفتن یک جسم چند وجهی توسط انگشتان یک ربات موضوعی است که دئود و همکاران [۱۲] درباره آن بحث کرده‌اند. در این مقاله درباره پایداری جسم، الگوریتم مناسبی توسط نویسندگان آن ارایه شده که می‌تواند پایداری را تضمین کند، وضعیت هندسی نوک انگشتان عمدتاً به صورت منحنی فرض شده است و می‌تواند به‌صورت کره یا حتی استوانه باشد. گراماتی‌کوپولو [۱۳] گرفتن یک جسم نیم دایره‌ای توسط دو انگشت یک ربات را مورد بررسی قرار داد و برای پایداری، از معیار لیپانوف استفاده کرد. کنترلر نیروی به‌کار رفته توانسته است با تنظیم مناسب نیرو موجب پایداری جسم شود. ون [۱۴] درباره پایداری‌سازی اکثر سیستم‌های دینامیکی بحث کرده است و روش‌هایی برای این منظور را مورد بررسی قرار داده است. رباتی که به عنوان یک خدمتکار می‌تواند در اختیار انسان قرار بگیرد موضوعی است که توسط سوو و همکاران [۱۵] به آن اشاره شده است. موسویان و پاپادوپولوس [۱۶] از روش کنترل امیدانس چندگانه به منظور گرفتن جسم توسط چند بازوی ربات همکار استفاده کرده است.

اکثر مقالاتی که به آن‌ها اشاره شده، به‌طور عمده از یک دست ثابت ربات برای گرفتن و جابجایی جسم استفاده کرده‌اند. موسویان و همکاران [۱۷] یک ربات متحرک که به‌طور آزادانه در فضا حرکت دارد، را مورد بررسی قرار داده‌اند. کالداس و همکاران [۱۸] جابجایی جسم گرفته شده توسط دست ثابت یک ربات را با اعمال رفتار امیدانسی بر روی جسم مورد بررسی قرار داده‌اند. در تحقیق انجام شده توسط سوموپولو و دوولگری [۱۹] دو دست ثابت ربات، وظیفه گرفتن و جابجایی جسم را در صفحه بر عهده دارند. احمدی و رستگاری [۲۰] روش کنترلی امیدانس چندگانه، بر روی یک دست ثابت را با در نظر گرفتن قید غلتش ناب مورد استفاده قرار داده‌اند.

در این مقاله هدف بررسی گرفتن و پایداری جسم توسط یک دست متحرک ربات با استفاده از الگوریتم کنترل امیدانس چندگانه^۱ جهت کنترل سیستم خواهد بود. در این مقاله ابتدا به نحوه استخراج مدل دینامیکی دست متحرک ربات دو انگشتی که جسمی را در صفحه تحت قیود غلتش ناب جابجا می‌کند، پرداخته خواهد شد. سپس با توجه به این‌که هدایت و جابجایی جسم توسط انگشتان و پایه متحرک موردنظر می‌باشد، به طراحی کنترل‌کننده‌ای پرداخته می‌شود که بتواند پایداری جسم را در حین جابجایی در مسیر موردنظر حفظ کند.

به منظور تشریح کامل‌تر تحقیق صورت گرفته بایستی اشاره شود که، در تحقیقاتی همچون [۱۷] و [۱۶] که از الگوریتم کنترل امیدانس چندگانه به عنوان روش کنترلی بهره برده شده است، نقاط تماس بین مجری نهایی و جسم نسبت به هم ثابت فرض شده، در حالی‌که در این مقاله فرض شده است که در کل فرآیند گیرش و جابجایی جسم توسط سیستم دست متحرک، نقاط تماس مجری‌های نهایی نسبت به جسم امکان جابجایی دارند. برای در نظر داشتن این فرض و امکان پیاده‌سازی آن در الگوریتم کنترلی امیدانس چندگانه، توسعه این قانون در بخش گیرش جسم محقق شده است.

نمونه یک دست انسان برای گرفتن یک جسم دلخواه در شکل ۱ نشان داده شده است. در انتها نتایج شبیه‌سازی‌های انجام پذیرفته در این پژوهش ارایه شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است، الگوریتم کنترلی مورد نظر از عهده پایداری و جابجایی سیستم در مسیر مطلوب توامان برآمده است.

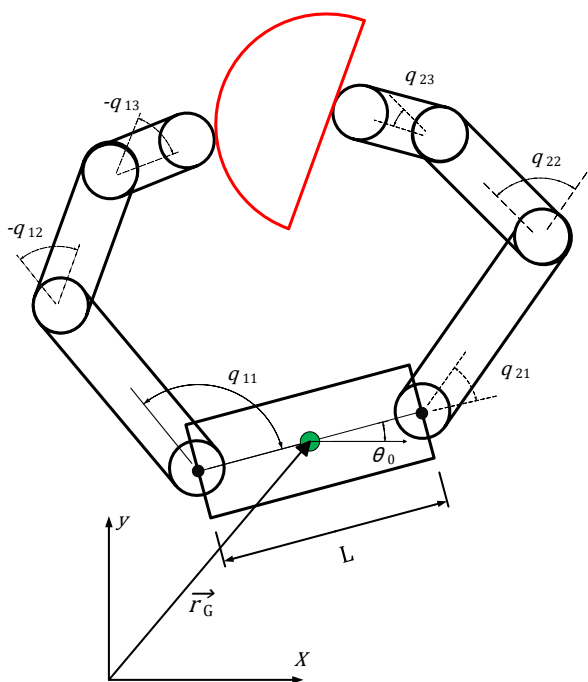


Fig. 2. The system dual fingers and object with moving base

شکل ۲: سیستم دو انگشت و جسم به همراه پایه متحرک

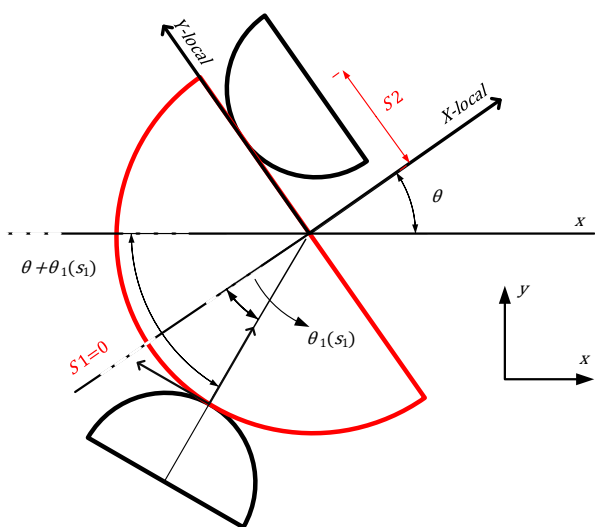


Fig. 3. Object and fingers tip

شکل ۳: جسم و نوک انگشتان

برای نمایش متغیرهای مربوط به جسم و شرایط گیرش آن توسط انگشتان و همچنین متغیرهای موردنیاز جهت استخراج قیود سینماتیکی، بهتر است از شکل ۳ استفاده شود، همچنین می‌تواند تحقیق انجام شده توسط احمدی و رستگاری [۲۰] مورد توجه قرار گیرد.

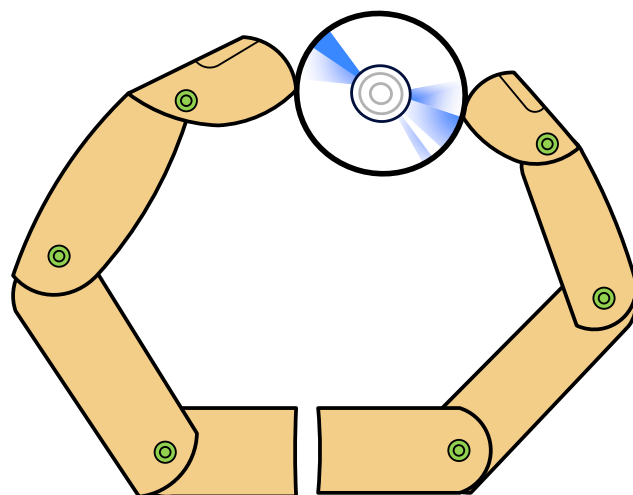


Fig. 1. Grasping object by a human hand

شکل ۱: گرفتن جسم توسط یک دست انسان

۲- مدل‌سازی سینماتیکی سیستم

در این بخش سینماتیک سیستم دست متحرک، در شرایط دوبعدی مورد بررسی قرار گرفته است. برای پایه متحرک سه درجه آزادی و هر کدام از انگشتان و جسم نیز سه درجه آزادی در نظر گرفته شده است. به هر حال هشت درجه آزادی برای توصیف کل سیستم کافی است. در بردار $[q_{i1} \ q_{i2} \ q_{i3}]^T$, $i=1,2$ زوایای مفصل هر کدام از انگشتان نشان داده شده است. به همین صورت در بردار $[q_{01} \ q_{02} \ q_{03}]^T$ متغیرهای انتقالی و دورانی پایه متحرک مشخص شده است.

برای جسم نیز بردار $[x, y, \theta]^T$ به عنوان متغیرهای توصیف‌کننده حرکت جسم در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، صفحه مستطیل شکل نشان‌دهنده پایه متحرک برای دست دو انگشتی ربات خواهد بود. جسم گرفته شده و نوک انگشتان دست متحرک ربات نیم‌کره و صلب فرض شده است، طبیعتاً با توجه به مدل‌سازی سیستم در صفحه تبدیل به نیم‌دایره خواهند شد.

بایستی اشاره شود با توجه به نحوه مدل‌سازی، پایه متحرک بدون محدودیت در صفحه حرکت خواهد کرد که این موضوع موجب می‌شود کل سیستم دست متحرک شامل دو انگشت-جسم آزادانه در صفحه جابجا شود. تماس بین نوک انگشتان و سطح جسم نقطه‌ای فرض شده است، کلیه متغیرهای مورد نیاز انگشتان در شکل ۲ مشخص می‌باشد.

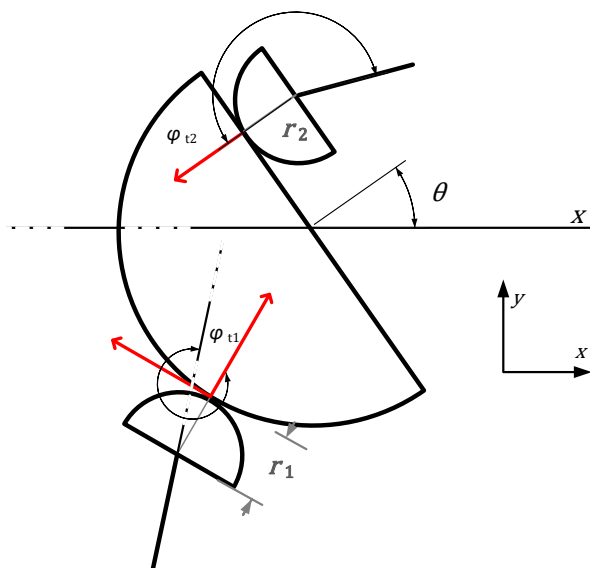


Fig. 4. The angle between the direction of the end link and the normal vector at the contact point.

شکل ۴: زاویه بین راستای لینک انتهایی و بردار نرمال در نقطه تماس

سمت راست با بردار نرمال نقطه تماس با سطح جسم می‌باشد، بسط این زاویه در رابطه (۶) آورده شده است، شکل ۴ نیز در نظر گرفته شود.

$$\varphi_{12}(t) = \pi - (q_{21}(t) + q_{22}(t) + q_{23}(t)) + \theta(t) \quad (6)$$

همان‌طور که در شکل ۴ مشخص شده است، راستای لینک انتهایی هر کدام از انگشت‌ها با بردار نرمال در نقطه تماس زوایای $\varphi_{11}(t)$ و $\varphi_{12}(t)$ را شامل می‌شود. بنابراین خواهیم داشت:

$$\varphi_{11}(t) = 2\pi - (q_{11}(t) + q_{12}(t) + q_{13}(t)) - (\theta + \theta_1(s_1)) \quad (7)$$

همچنین در رابطه (۱) مقدار $L(s_1)$ برابر با R شعاع جسم در نظر گرفته شده است، r_1 بیانگر شعاع نوک انگشتان می‌باشد که در شبیه‌سازی برابر با r_2 در نظر گرفته خواهد شد. در رابطه (۱)، x_{01} و y_{01} نشان‌دهنده موقعیت مجری نهایی^۱ سمت چپ در صفحه است. روابط (۸) و (۹) نیز مقادیر x_{02} و y_{02} آورده شده است.

به همین صورت در رابطه (۲) موقعیت مجری نهایی سمت راست

همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود، نوک انگشتان با سطح جسم نیم‌دایره‌ای در تماس هستند. بر اساس فرض غلتش ناب بین سطح جسم و انگشتان، قیود سینماتیکی لازم استخراج شده است. با توجه به این‌که به موجب هر قید غلتش ناب همزمان تماس دو سطح و عدم لغزش را شامل می‌شود، در مجموع چهار معادله مربوط به قیود سینماتیکی به دست خواهد آمد. دو قید در امتداد عمود مشترک سطوح تماس جسم و انگشتان به عنوان قیود نرمال، باعث حفظ نوک انگشتان بر روی جسم می‌شوند.

دو قید دیگر به فرض غلتش بدون لغزش نوک انگشتان بر سطح جسم مربوط می‌شوند. همان‌طور که به اثبات رسیده است، فرض غلتش ناب باعث می‌شود، سرعت نقطه تماس مشترک بین نوک انگشت و سطح جسم برابر باشد. در روابط (۱) و (۲) قیود موسوم به نرمال آورده شده است و در روابط (۳) و (۴) قیدهای مربوط به شرط غلتش ناب دیده می‌شود. برای توضیحات بیشتر روابط سینماتیکی قیود پیشنهاد می‌شود مراجع [۸ و ۲۰] مورد توجه قرار گیرد.

$$Q_1 = (x(t) - x_{01}) \cos(q(t) + q_1) + (y(t) - y_{01}) \sin(q(t) + q_1) - (r_1 + L(s_1)) = 0 \quad (1)$$

$$Q_2 = -(x(t) - x_{02}) \cos(\theta(t)) + (y_{02} - y(t)) \sin(\theta(t)) - r_2 = 0 \quad (2)$$

$$R_1 = (x(t) - x_{01}) \sin(\theta(t) + \theta_1) - (y(t) - y_{01}) \cos(\theta(t) + \theta_1) = 0 \quad (3)$$

$$R_2 = (x(t) - x_{02}) \sin(\theta(t)) + (y_{02} - y) \cos(\theta(t)) + r_2 \frac{d\varphi_{12}(t)}{dt} = 0 \quad (4)$$

در رابطه (۱) پارامتر s_1 بیانگر طول قوس منحنی جسم در طرف چپ می‌باشد. ارتباط این پارامتر با $\theta_1(s_1)$ در رابطه (۵) بیان شده است.

$$s_1 = R(\theta_1(s_1)) \quad (5)$$

در رابطه (۴) زاویه $\varphi_{12}(t)$ بیانگر راستای لینک انتهایی انگشت

با وجود دوازده متغیر حالت سیستم و این چهار نیرو درکل شانزده مجهول تشکیل خواهند شد که توسط دوازده معادله دینامیکی و چهار قید سینماتیکی بایستی حل شوند.

۳- مدل سازی دینامیکی سیستم

برای استخراج معادلات دینامیکی سیستم از فرمولاسیون لاگرانژ استفاده می‌شود، همان‌طور که در رابطه (۱۲) قابل مشاهده است کل انرژی جنبشی سیستم با k نشان داده، با توجه به این‌که مطالعه سیستم در یک صفحه افقی صورت گرفته است u به‌عنوان انرژی پتانسیل سیستم صفر خواهد شد.

$$L = K - U \quad (12)$$

در این مقاله از فرمت موجود در رابطه (۱۳) برای به‌دست آوردن معادلات دینامیکی سیستم استفاده شده است.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = u_i + \sum_{j=1}^m a_{ji} \lambda_j + \sum_{j=1}^m b_{ji} f_j, \quad i = (1-9) \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، ترم u_i توصیف کننده کار نیروهای خارجی سیستم که همان گشتاور تولید شده در مفاصل انگشتان و پایه متحرک است، λ_j و f_j نیز، به ترتیب بیانگر نیروهای مماسی و عمودی هستند؛ لازم به ذکر است این نیروها در محل تماس نوک انگشتان با سطح جسم تشکیل می‌شوند.

با توجه به رابطه (۱۳)، دوازده معادله دینامیکی حاصل از آن، فقط برای تشخیص موقعیت انگشت‌ها، جسم و پایه متحرک در صفحه کافی است. با توجه به این‌که تعیین نیروهای قیدی که در محل تماس بین نوک انگشتان و جسم تشکیل می‌شوند، حایز اهمیت است، از این جهت برای حل مجهول‌ها تعداد معادلات بیشتری مورد نیاز است. بدین منظور معادلات قیدی نیز به مجموع معادله‌های دینامیکی افزوده خواهند شد. برای تشکیل معادلات حرکت با استفاده از رابطه (۱۳) بایستی متغیرهای تعمیم‌یافته به‌صورت رابطه (۱۴) در نظر گرفته شود.

$$q = [q_{01}, q_{02}, q_{03}, q_{11}, q_{12}, q_{13}, q_{21}, q_{22}, q_{23}, x, y, \theta]_{12 \times 1}^T \quad (14)$$

توسط x_{02} و y_{02} نشان داده شده است، در روابط (۱۰) و (۱۱) بسط کامل x_{02} و y_{02} آورده شده است.

$$x_{01} = q_{01}(t) + \frac{L}{2} \cos(q_{03}(t) - p) + L_{11} \cos(q_{11} + q_{03}(t)) + \quad (8)$$

$$L_{12} \cos(q_{11}(t) + q_{12}(t) + q_{03}(t)) + L_{13} \cos(q_{11}(t) + q_{12}(t) + q_{13}(t) + q_{03}(t))$$

$$y_{01} = q_{02}(t) + \frac{L}{2} \sin(q_{03}(t) - \pi) + L_{11} \sin(q_{11} + q_{03}(t)) + L_{12} \sin(q_{11}(t) +$$

$$q_{12}(t) + q_{03}(t)) + L_{13} \sin(q_{11}(t) + q_{12}(t) + q_{13}(t) + q_{03}(t))$$

$$x_{02} = q_{01}(t) + \frac{L}{2} \cos(q_{03}(t) - \pi) + L \cos q_{03}(t) + L_{21} \cos(q_{21}(t) + q_{03}(t)) + \quad (10)$$

$$L_{22} \cos(q_{21}(t) + q_{22}(t) + q_{03}(t)) + L_{23} \cos(q_{21}(t) + q_{22}(t) + q_{23}(t) + q_{03}(t))$$

$$y_{02} = q_{02}(t) + \frac{L}{2} \sin(q_{03}(t) - \pi) + L \sin q_{03}(t) + L_{22} \sin(q_{21}(t) + q_{22}(t) + q_{03}(t)) + \quad (11)$$

$$L_{23} \sin(q_{21}(t) + q_{22}(t) + q_{23}(t) + q_{03}(t))$$

همان‌طور که در ابتدای این بخش هم اشاره شده است برای هرکدام از انگشتان، جسم و پایه متحرک در صفحه، سه درجه آزادی در نظر گرفته شده است، که جمعاً دوازده درجه آزادی را شامل می‌شود. اما با توجه به فرض غلتش ناب درجه‌های آزادی سیستم، به هشت درجه کاهش پیدا خواهد کرد. به واسطه دوازده معادله دینامیکی، وضعیت دوازده متغیر حالت سیستم قابل دستیابی است. لازم به ذکر است همه زوایای درگیر در مساله، پاد ساعتگرد و مثبت در نظر گرفته شده است.

در محل تماس هرکدام از نوک انگشتان و سطح جسم دو نیروی قیدی که یکی به‌صورت عمودی و دیگری به حالت مماسی هستند وجود دارد، بنابراین در مجموع چهار نیروی قیدی وجود خواهد داشت،

$$M_{obj} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{e} \end{Bmatrix} + C(q, \dot{q}) = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ \hat{o} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

روابط (۱۶) و (۱۷) به راحتی از معادله (۱۵) قابل استخراج خواهند بود. بنابراین در مجموع هفده معادله دینامیکی تشکیل می‌شود، که با حل آن‌ها وضعیت تمام پارامترهای درگیر در مساله مشخص خواهد شد. در رابطه (۱۵) از ابتدا معادله‌های مربوط به پایه متحرک، انگشتان و جسم آورده شده است، پس از آن معادله مربوط به پارامتر طول قوس و سپس معادلات مربوط به روابط قیدی در انتها قرار داده شده است.

۴- ارایه قانون کنترلی

در این مقاله به منظور حفظ پایداری دینامیکی جسم گرفته شده و همچنین جابجایی کل سیستم، از الگوریتم کنترل امیدانس چندگانه با اعمال اصلاحات لازم، به عنوان روش کنترلی استفاده شده است. توسط این کنترلر رفتار امیدانسی به‌طور همزمان بر روی جسم و بازوها و پایه متحرک اعمال می‌شود. در واقع کنترلر بایستی به‌طور مجزا بر روی اجزای سیستم اثر کند، ولیکن مزیت روش کنترلی امیدانس چندگانه در اعمال رفتار مطلوب بر کل سیستم خواهد بود. روش کنترل امیدانس برای اولین بار توسط هوگان مطرح شده است. در این روش سعی می‌شود با اعمال ارتباط دینامیکی بین نیرو و موقعیت، یک تعامل مطلوب بین رفتار واقعی و ایده‌آل، در سیستم مکانیکی برقرار شود [۲۱].

در طول سالیان اخیر از این روش با نگرش‌های مختلف استفاده شده است، به‌طور مثال سوموپولو و دوولگری [۱۹] رفتار امیدانسی را فقط بر روی جسم اعمال کرده‌اند. همانطور که اشاره شده، در این مقاله از روش کنترل امیدانس چندگانه با اصلاحات لازم استفاده شده است.

با توجه به این‌که فرمولاسیون روش کنترل امیدانس چندگانه از حجم بالایی برخوردار است [۱۶]، نمی‌توان در اینجا به تمام این روابط اشاره نمود، ولی برحسب نیاز به این فرمولاسیون اشاره خواهد شد. در این روش مسیرهای مطلوب برای اعمال بر روی اجزای سیستم توسط کاربر تعریف می‌شود، این مسیرها بایستی توسط کنترلر ردیابی شود. کنترل امیدانس چندگانه در اعمال نیروی بین نوک انگشت‌ها

با توجه به تعریف رابطه (۱۴)، اگر از معادلات قیدی اشاره شده در روابط (۱) تا (۴)، یک مرتبه نسبت به زمان مشتق گرفته شود، با استفاده از ضرایب سرعت ایجاد شده در آن به همراه ضریب سرعت پارامتر طول قوس \dot{s}_r ، فرم کلی $E\dot{q}$ ساخته می‌شود.

برای این منظور بایستی در ابتدا کمیت اسکالر لاگرانژین که در رابطه (۱۲) به آن اشاره شده است تعیین شود، سپس با انتخاب متغیرهای حالت اشاره شده در رابطه (۱۴) به راحتی سمت چپ رابطه (۱۳) تشکیل می‌شود. در سمت راست رابطه (۱۳) ترم a_{ji} از مشتق روابط قیدی (۳) و (۴) به‌دست خواهد آمد، همچنین b_{ji} نیز از روابط قیدی (۱) و (۲) حاصل خواهد شد، بنابراین با تکمیل رابطه (۱۳) معادلات حرکت به‌طور کامل تشکیل می‌شوند، در ضمن دسته‌بندی معادلات دینامیکی در قالب رابطه (۱۵) نشان داده شده است.

$$\left[\begin{array}{ccc|c} [H_1]_{9 \times 9} & [0]_{9 \times 4} & & \\ [0]_{3 \times 9} & [M_{obj}]_{3 \times 3} & [0]_{3 \times 1} & \\ \hline & [H_3]_{1 \times 13} & & [E]_{13 \times 4}^T \\ & [E]_{4 \times 13} & & [0]_{4 \times 4} \end{array} \right] \quad (15)$$

$$\begin{Bmatrix} \ddot{q}_0 \\ \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{x} \\ \ddot{s}_1 \\ F \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ \dot{E}\dot{q} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} T_{1 \times 1} \\ T_{2 \times 1} \\ T_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 1} \end{Bmatrix}_{17 \times 1}$$

در رابطه (۱۵)، ماتریس $[E]_{4 \times 13}$ نشان‌دهنده ضرایب بردار سرعت در روابط قیدی است. در واقع اگر از روابط قیدی نسبت به زمان مشتق گرفته شود، ضرایب سرعت متغیرهای حالت، ماتریس $[E]$ را تشکیل خواهند داد. همچنین $[H_1]$ بیانگر ماتریس جرمی پایه متحرک و بازوهای متصل به آن است، برای تعیین پارامتر طول قوس نیز بایستی معادله دینامیکی مربوط به آن در نظر گرفته شود، ماتریس $[H_3]$ بدین منظور به مجموعه معادلات اضافه شده است. در نهایت فرم کلی معادلات دینامیکی بدین صورت خواهند شد:

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i = T_i, \quad (i = 1-3) \quad (16)$$

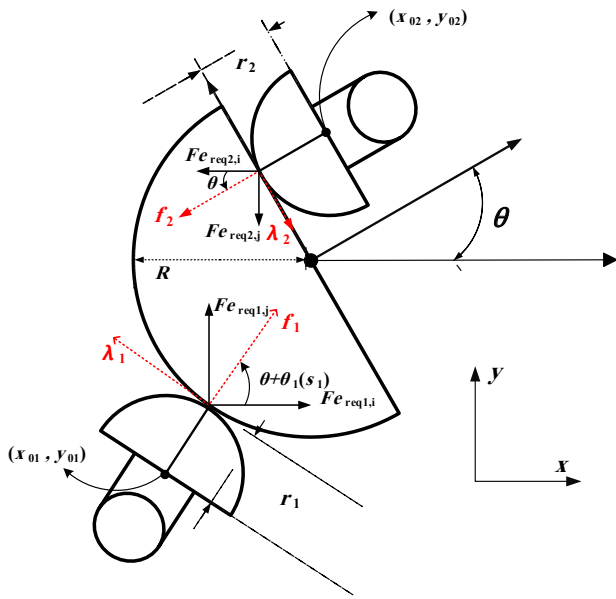


Fig. 5. Transmission of contact force to the center of the final actuator curvature.

شکل ۵: انتقال نیروی تماسی به مرکز انحناى مجرى نهایی

با توجه به رابطه (۲۰) و آنچه که توسط موسویان و همکاران، [۱۷] آمده است، واضح است که، یکی از شروط درست عمل کردن کنترلر تعیین مقدار دقیق برای \tilde{Q}_f خواهد بود، در این صورت این نیرو با \tilde{Q}_{react} موجود در رابطه (۱۹) خنثی می‌شود، در این صورت عملکرد صحیح کنترلر قابل انتظار است. بنابراین در این شرایط تعیین نیروهای $F_{e_{req}}$ از اهمیت فراوانی برخوردار است.

از این جهت در راستای به‌کارگیری سناریوهای مختلف، برای محاسبه دقیق نیروهای مذکور توسط کنترلر، بایستی نیروی $F_{e_{req}}$ به محل قرارگیری مجرى نهایی دو طرف انتقال پیدا کند، بدین منظور به شکل ۵ توجه شود.

با توجه به شکل ۵ ابتدا بایستی تصویر نیروهای $F_{e_{req}}$ در دو سمت در راستای نیروهای λ_j و f_j در نظر گرفته شود، سپس به نقاط مشخص شده (x_{01}, y_{01}) و (x_{02}, y_{02}) منتقل شوند. طبق اصل انتقال، گشتاور این نیروها محاسبه شده و در فرمولاسیون کنترلر جای گرفته است. قابل ذکر است در این شرایط برای مجرى نهایی، سه حرکت در صفحه در نظر گرفته شده است.

فرمول محاسبه $F_{e_{req}}$ با جزییات بیشتر توسط موسویان و پاپادوپولوس [۱۶] آورده شده است، با توجه به آن بایستی ماتریس گیرش در رابطه (۲۳) نیز به‌طور دقیق محاسبه شود. از آنجایی که این

و جسم بسیار هوشمندانه عمل می‌کند و نیرو را تا حد نیاز وارد خواهد کرد مانند این که سنسورهایی برای سنجش نیرو به‌کار گرفته شده باشد، این ویژگی در مواقعی که جسم شکننده باشد یا از میزان صلبیت متفاوتی برخوردار باشد بسیار حایز اهمیت است. پیشنهاد می‌شود به منظور تشریح بیشتر روابط زیر، مرجع [۱۶] مورد توجه قرار گرفته شود.

$$\tilde{H}(q)\ddot{x} + \tilde{C}(q, \dot{q}) = \tilde{Q} \quad (18)$$

در رابطه (۱۸) معادلات حرکت دینامیکی پایه متحرک و انگشتان، در فضای دکارتی نشان داده شده است، عبارت سمت راست تساوی بیانگر مجموع کار نیروهای تعمیم یافته خواهد بود، در رابطه (۱۸) خواهیم داشت:

$$\tilde{Q} = \tilde{Q}_{app} + \tilde{Q}_{react} \quad (19)$$

همچنین در رابطه (۱۹) خواهیم داشت:

$$\tilde{Q}_{app} = \tilde{Q}_m + \tilde{Q}_f \quad (20)$$

در عمل بایستی مقدار \tilde{Q}_f موجود در رابطه (۲۰) با \tilde{Q}_{react} خنثی بشود، همچنین وقتی خطاهای تعریف شده به سمت صفر میل کنند، در این شرایط می‌توان گفت کنترلر درست عمل کرده است. معادلات دینامیکی جسم صلب در فضای دکارتی بدین صورت نوشته می‌شود:

$$M\ddot{x} + F_{ii} = F_c + F_o + GF_e \quad (21)$$

همواره بایستی در نظر داشت که، فرمولاسیون کنترلر امپدانس در فضای دکارتی محاسبه می‌شود. سناریوهای مختلفی برای کنترلر به‌کار گرفته شده است، هر کدام از این سناریوها برای کنترلر ایده متفاوتی محسوب می‌شوند. در نهایت سعی شده است بهترین دیدگاه لحاظ شود. بدیهی است که در تماس بین نوک انگشت‌ها با سطح جسم نیروهایی به‌صورت عمل و عکس‌العمل وجود خواهند داشت تعیین وضعیت مطلوب برای این نیروها نیز در روند کنترلر بسیار حایز اهمیت است. در رابطه (۲۱) ترم F_e نشان‌دهنده همین نیروها خواهد بود و \tilde{Q}_f برابر است با:

$$\tilde{Q}_f = F_{e_{req}} \quad (22)$$

روابط (۲۸) به عنوان یکی از چندین مسیر مطلوب که مورد توجه بوده، برای اعمال بر روی جسم انتخاب شده است. همان طور که قبلاً نیز اشاره شده، تعیین محل دقیق نقطه تماس نوک انگشتان با سطح جسم نسبتاً امر دشواری است، از این رو توابع مطلوب برای انگشتان نسبت به مجری نهایی دو طرف تعیین شده است.

$$x_{des}^1 = x_{des}^{obj} - (R + r_1) \cos(\theta_{des}^{obj} + \theta_1^{des}) \quad (الف-۲۹)$$

$$y_{des}^1 = y_{des}^{obj} - (R + r_1) \sin(\theta_{des}^{obj} + \theta_1^{des}) \quad (ب-۲۹)$$

$$x_{des}^2 = x_{des}^{obj} + r_2 \cos(\dot{\theta}_{des}^{obj}) - s_2 \sin(\dot{\theta}_{des}^{obj}) \quad (ج-۲۹)$$

$$y_{des}^2 = y_{des}^{obj} + s_2 \cos(\dot{\theta}_{des}^{obj}) + r_2 \sin(\dot{\theta}_{des}^{obj}) \quad (د-۲۹)$$

همچنین برای پایه متحرک نیز، خواهیم داشت:

$$x_{des}^{base} = x_{des}^1 - 6.0939 \cos(68.919^\circ + \theta_{des}^{base}) \quad (الف-۳۰)$$

$$y_{des}^{base} = y_{des}^1 - 6.0939 \sin(68.919^\circ + \theta_{des}^{base}) \quad (ب-۳۰)$$

$$\dot{\theta}_{des}^{base} = 0 \quad (ج-۳۰)$$

در روابط (۲۹) و (۳۰)، به ترتیب مسیرهای مطلوب با اعمال اصلاحات لازم، برای انگشتان و پایه متحرک مشخص شده است، کنترلر به کار گرفته شده توانسته است به بهترین نحو از این مسیرهای پیشنهادی تبعیت کند و سیستم شکل ۲ به پایداری مورد نظر رسیده است.

در واقع همان طور که در روابط (۲۸) تا (۳۰) مشهود است، بایستی مسیرهای از پیش تعیین شده توسط سیستم دست متحرک ربات ردیابی شود؛ عمل به این مهم در حقیقت پایداری دینامیکی به همراه جابجایی مورد نظر را نیز برای سیستم، به همراه خواهد داشت. به منظور درک بهتر فرمولاسیون الگوریتم کنترلی، شکل ۶ در نظر گرفته شود.

بایستی توجه شود که مسیرهای مناسب دیگری نیز برای سیستم قابل تعریف است، در این صورت مسیری متفاوت برای انگشتان و پایه متحرک به منظور انتقال و جابجایی جسم در صفحه اتخاذ خواهد شد، این موضوع انعطاف پذیر بودن روش کنترل امیدانس چندگانه در برابر

ماتریس در تعیین مقدار صحیح نیروی مذکور نقش اساسی خواهد داشت، بنابراین در صحت رفتار کنترلی نیز بسیار حایز اهمیت خواهد بود.

$$G = \begin{bmatrix} c_{\dot{\theta}+\dot{\theta}_1} & -s_{\dot{\theta}+\dot{\theta}_1} & c_{\dot{\theta}} & -s_{\dot{\theta}} \\ s_{\dot{\theta}+\dot{\theta}_1} & c_{\dot{\theta}+\dot{\theta}_1} & s_{\dot{\theta}} & c_{\dot{\theta}} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & g_{34} \end{bmatrix}_{3 \times 4} \quad (۲۳)$$

در رابطه (۲۳) عبارت $S \equiv \sin$ و $c \equiv \cos$ می باشد، همچنین خواهیم داشت:

$$g_{31} = -(x - x_{o1}) \sin(\theta + \theta_1) - \quad (۲۴)$$

$$(y - y_{o1}) \cos(\theta + \theta_1)$$

$$g_{32} = -(x - x_{o1}) \cos(\theta + \theta_1) + \quad (۲۵)$$

$$(y - y_{o1}) \sin(\theta + \theta_1)$$

$$g_{33} = -(x - x_{o2}) \sin(\theta) - (y_{o2} - y) \cos(\theta) \quad (۲۶)$$

$$g_{34} = -(x - x_{o2}) \cos(\theta) + (y_{o2} - y) \sin(\theta) - r_2 \quad (۲۷)$$

با جایگذاری روابط (۸) و (۹) در روابط (۲۴) و (۲۵) و همچنین روابط (۱۰) و (۱۱) در روابط (۲۶) و (۲۷)، این فرمولها کامل خواهند شد. بدین ترتیب ماتریس گیرش برای محاسبه نیروهای کنترلی تکمیل می شود. تعیین مقادیر مطلوب در توابع خطا برای اجزای سیستم از جمله پایه متحرک، انگشتان و جسم در عملکرد صحیح کنترلر بسیار اهمیت دارد. پس از محاسبات کامل اجزای فرمولاسیون روش کنترلی امیدانس چندگانه، بایستی مسیرهای مطلوب^۱ برای پایه متحرک، مجری نهایی دو طرف و جسم تعریف شود، در این قسمت از کار بایستی مناسب ترین مسیر توسط طراح کنترلر برای اعمال بر روی سیستم انتخاب شود.

$$x_{des}^{obj} = 40 \left(1 - e^{-\frac{t}{b}} \right) + x(0) \quad (الف-۲۸)$$

$$y_{des}^{obj} = 6.9 \quad (ب-۲۸)$$

$$\dot{\theta}_{des}^{obj} = -0.5 \left(1 - e^{-\frac{t}{b}} \right) \quad (ج-۲۸)$$

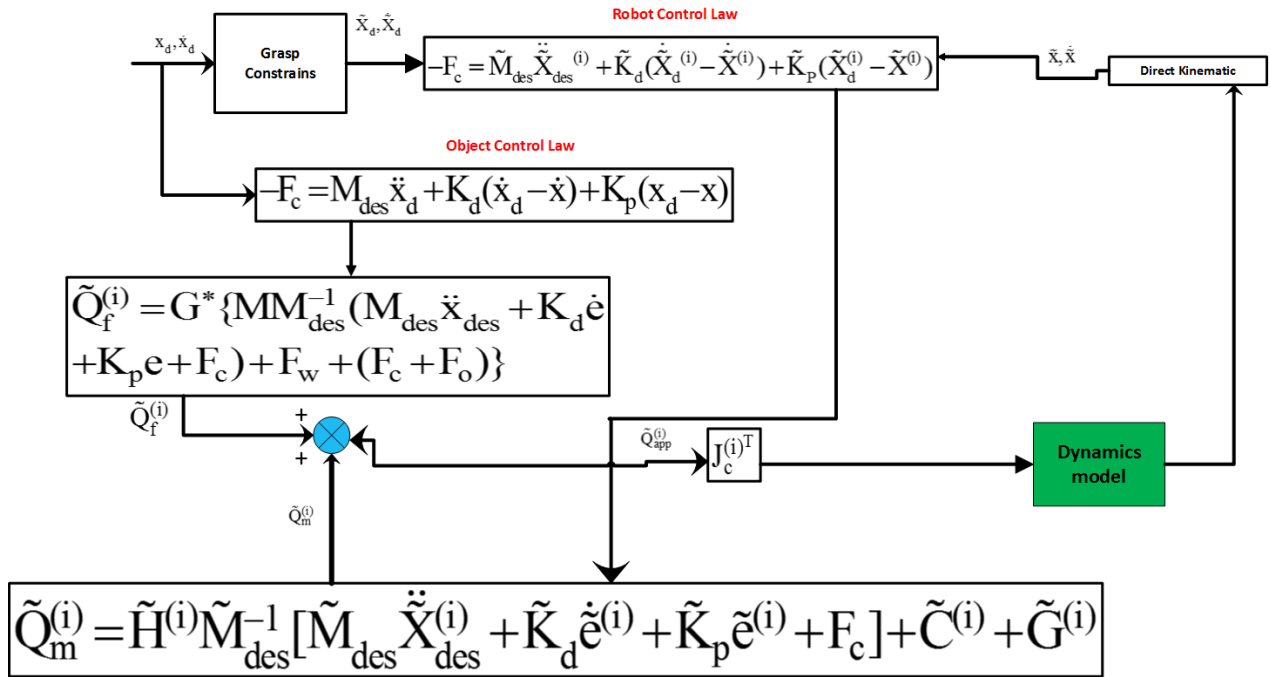


Fig. 6. Block of diagram of multiple impedance control algorithm.

شکل ۶: بلوک دیاگرام الگوریتم کنترلی امپدانس چندگانه

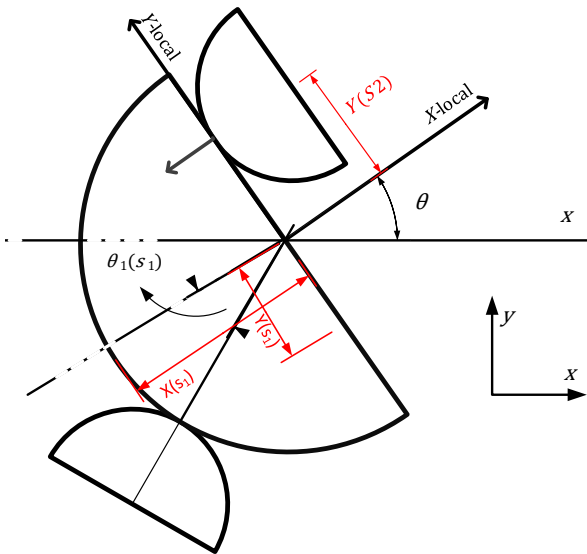


Fig. 7. Numerical simulation

شکل ۷: شبیه‌سازی عددی

اجزای سیستم را نشان خواهد داد. پیشنهاد می‌شود برای درک بیشتر این موضوع شکل ۱۹ در نظر گرفته شود.

۵- شبیه‌سازی عددی

در این قسمت نیاز است به برخی از روابط مهم در فرآیند شبیه‌سازی اشاره شود، از این رو پیشنهاد می‌شود شکل ۷ برای درک بهتر این روابط در نظر گرفته شود.

همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، مقادیر پارامترها، برحسب این‌که نقطه تماس بین نوک انگشت‌ها با سطح جسم کجا در نظر گرفته شود قابلیت تغییرپذیری خواهند داشت. به هر حال در این مقاله وضعیت نشان داده شده در شکل ۷ معیار کار قرار گرفته است. پیشنهاد می‌شود، پژوهش انجام شده [۱۶]، مورد توجه قرار گیرد.

$$X(s_1) = -R \cos(\theta_1(s_1)) \quad (31)$$

$$Y(s_1) = -R \sin(\theta_1(s_1)) \quad (32)$$

$$X(s_2) = 0, \quad Y(s_2) = s_2 \quad (33)$$

در رابطه (۳۱) خواهیم داشت، همچنین تحقیق صورت گرفته

[۲۰ و ۸]، بررسی شود.

$$\theta_1(s_1) = \arctan(x'(s_1)/Y'(s_1)) \quad (34)$$

در رابطه (۳۴) داریم:

$$x'(s_1) = \frac{dX(s_1)}{ds_1}, \quad Y'(s_1) = \frac{dY(s_1)}{ds_1} \quad (35)$$

در رابطه (۳۳) مقدار s_2 با توجه به این‌که سمت راست جسم

جدول ۳: پارامترهای کنترلی

Table 3. Parameters of control

| واحد | مقدار | ثابت ها |
|-----------------------|-------|------------------|
| [gr] | ۸۰ | M_{des} |
| [n.m.s] | ۰/۰۵ | K_p |
| [s ² / kg] | ۳۰ | k_d |
| [degree] | ۱۸۰ | $\theta_{1,des}$ |
| - | ۱۰۰ | b |

$$s_2(t) = s_2(0) + \left(1 - e^{-\frac{t}{b}}\right) \quad (36)$$

همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، سمت چپ جسم انحنای مشخصی دارد، به همین منظور از پارامتر طول قوس S_1 برای تعیین این انحنا استفاده می‌شود، کمیت سرعت این پارامتر می‌تواند به صورت رابطه (۳۷) نشان داده شود:

$$\frac{ds_i}{dt} = \frac{r_i}{1 + r_i \kappa_i(s_i)} (\dot{p}_i - \dot{\theta}), \quad i = 1, 2 \quad (37)$$

در رابطه (۳۷) خواهیم داشت، مرجع $[\lambda]$ مورد توجه قرار گیرد.

$$\hat{e}_i(s_i) = X''(s_i)Y'(s_i) - X'(s_i)Y''(s_i), \quad i = 1, 2 \quad (38)$$

در رابطه (۳۸) کمیت $\hat{e}_i(s_i)$ مقدار انحنا یا همان خمیدگی را مشخص می‌سازد، طبیعتاً این مقدار برای سمت راست جسم برابر با صفر خواهد بود. فراموش نشود که در رابطه (۳۵) $\sqrt{X'(s_1)^2 + Y'(s_1)^2} = 1$ خواهد بود. همچنین در رابطه (۳۷) خواهیم داشت:

$$p_1 = q_{11} + q_{12} + q_{13} + q_{03} \quad (39)$$

$$p_2 = q_{21} + q_{22} + q_{23} + q_{03} \quad (40)$$

برای شبیه‌سازی مدل فیزیکی نشان داده شده در شکل ۲ بایستی مقادیر ارایه شده در جدول ۱ در نظر گرفته شود، مقادیری که برای پارامترهای قابل تغییر در نظر گرفته شده است، وضعیت آن‌ها را در لحظه اول نشان می‌دهد. اما سایر پارامترها عملاً در طول فرایند

جدول ۱: مقادیر اولیه

Table 1. Initial values

| واحد | مقدار در لحظه اول | متغیرها |
|----------|-------------------|-------------|
| [cm] | ۲ | $q_{01}(0)$ |
| [cm] | ۱ | $q_0(2)$ |
| [degree] | ۰ | $q_0(3)$ |
| [degree] | ۱۴۱/۳۲ | $q_{11}(0)$ |
| [degree] | -۶۰/۵۲۱۶ | $q_{12}(0)$ |
| [degree] | -۷۰ | $q_{13}(0)$ |
| [degree] | ۴۱/۶۷ | $q_{21}(0)$ |
| [degree] | ۵۴ | $q_{22}(0)$ |
| [degree] | ۷۰ | $q_{23}(0)$ |
| [degree] | ۰ | $\theta(0)$ |
| [cm] | ۵/۵ | $y(0)$ |
| [cm] | ۱/۷۵۲ | $x(0)$ |
| [cm] | ۰ | $s_1(0)$ |
| [cm] | ۰/۶۸ | $s_2(0)$ |

جدول ۲: پارامترهای فیزیکی انگشتان و جسم

Table 2. Physical parameters of the fingers and object

| واحد | مقدار | پارامتر |
|-----------------------|-------|---------------------|
| [cm] | ۴ | $L_{11} = L_{21}$ |
| [cm] | ۳ | $L_{12} = L_{22}$ |
| [cm] | ۲ | $L_{13} = L_{23}$ |
| [gr] | ۴۵ | $m_{11} = m_{21}$ |
| [gr] | ۳۰ | $m_{12} = m_{22}$ |
| [gr] | ۱۵ | $m_{13} = m_{23}$ |
| [cm] | ۱ | $r_1 = r_2 = r$ |
| [cm] | ۴ | L |
| [gr] | ۸۰ | M_{object} |
| [gr] | ۳۰۰ | M_{base} |
| [gr.cm ²] | ۰/۶ | J_{object} |
| [gr.cm ²] | ۵۰۰ | J_{base} |
| [gr.cm ²] | ۶۰ | $I_{G11} = I_{G21}$ |
| [gr.cm ²] | ۲۲/۵۰ | $I_{G12} = I_{G22}$ |
| [gr.cm ²] | ۵ | $I_{G13} = I_{G23}$ |

تخت می‌باشد، معمولاً یک مقدار ثابت فرض می‌شود. با این حال تابع زیر برای پارامتر s_2 در فرآیند شبیه‌سازی انتخاب شده است.

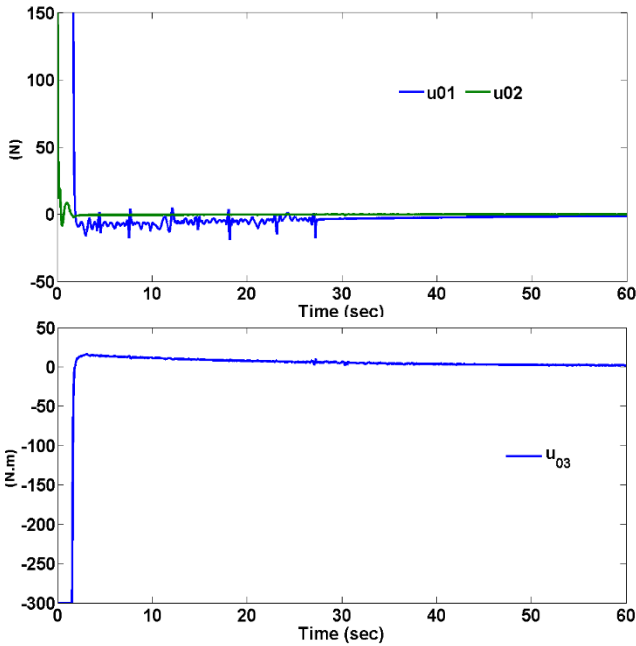


Fig. 8. Torque applied to the moving base.

شکل ۸: گشتاور ورودی به پایه متحرک

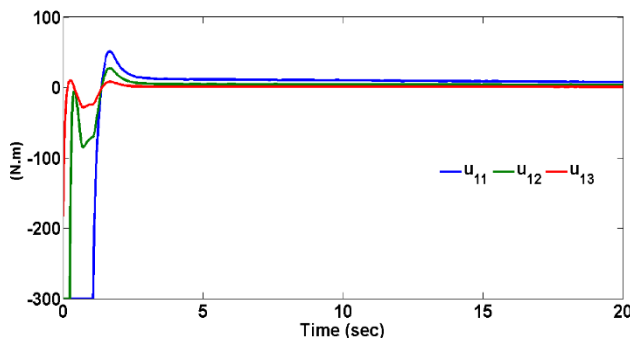


Fig. 9. Inlet torque applied to the left arm.

شکل ۹: گشتاور ورودی به بازوی سمت چپ

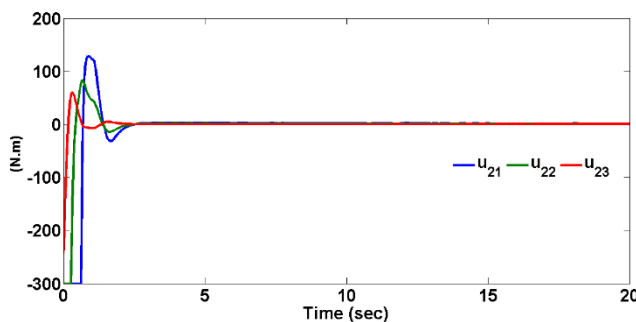


Fig. 10. Inlet torque applied to the right arm.

شکل ۱۰: گشتاور ورودی به بازوی سمت راست

شبیه‌سازی در واقع مقدار ثابت و مشخصی خواهند داشت، این پارامترها در جدول ۲ آورده شده است.

در جدول ۳ مقدار ثوابت کنترلی برای این شبیه‌سازی ارایه شده است و نشان داده خواهد شد که این مقادیر برای شبیه‌سازی مناسب‌ترند. بایستی در نظر داشت که این مقادیر بر اساس انتخاب‌های طراح کنترلر تعیین می‌شود، بنابراین ممکن است، مقادیر دیگر نیز پاسخ‌های مناسبی داشته باشند. به هر حال در این مقاله با این انتخاب جواب مناسب حاصل شده و فرآیند شبیه‌سازی انجام شده است. پیشنهاد می‌شود پژوهش انجام شده توسط یوشیدا و همکاران [۸] مورد توجه قرار گیرد.

بر اساس مقادیر نشان داده شده در جداول ۱ تا ۳ شبیه‌سازی انجام شده و نتایج این شبیه‌سازی در نمودارهای زیر آورده شده است. به منظور تعیین مقدار مناسب و جلوگیری از تجاوز بیش از حد گشتاور ورودی به سیستم شبیه‌سازی شده، از بلوک تابع اشباع در فرآیند شبیه‌سازی استفاده شده است. بر این اساس نمودارهای مرتبط با ورودی‌های کنترلی سیستم (تلاش کنترلی)، بر حسب زمان، در ادامه ارائه شده است.

نیروهای قیدی که در واقع در اثر تماس بین نوک انگشت‌ها با سطح جسم ایجاد می‌شوند، در کنترل سیستم دست متحرک از جمله جسم، نقش اساسی بازی خواهند کرد؛ البته توسط روش کنترل امیدانس چندگانه مطابق فرمولاسیون این نیروها به دقت محاسبه شده است، تغییرات این نیروها در شکل ۱۵ آورده شده است.

طبیعتاً هر اندازه که خطای اجزای سیستم، از جمله جسم به سمت صفر میل کند، نشان‌دهنده عدم اختلاف بین مقدار مطلوب تعیین شده و واقعی، توسط طراح کنترلر خواهد بود، بایستی توجه شود که، این موضوع نشان از عملکرد قابل قبول کنترلر خواهد داشت. در شکل ۱۶ گراف مربوط به توابع خطا نشان داده شده است.

وضعیت سیستم در لحظات مختلف قابل دستیابی است. مسیر مطلوبی که برای سیستم فرض شده است در رفتار آن کاملاً مشهود است، در حقیقت تبعیت از مسیر پیشنهادی به کنترلر، حاکی از عملکرد بی‌نقص کنترلر خواهد داشت. در شکل ۱۷ وضعیت سیستم در لحظه اول نشان داده شده است، پس از آن نیز لحظات بعدی نشان داده خواهد شد.

در شکل ۱۹ پایان فرآیند شبیه‌سازی نشان داده شده است. از

طریق دنبال نمودن مسیر حرکت سیستم، ارزیابی صحت و درستی

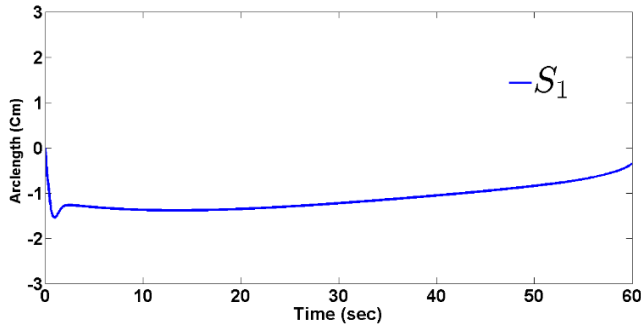


Fig. 13. Trajectory of arc length parameter

شکل ۱۳: پارامتر طول قوس

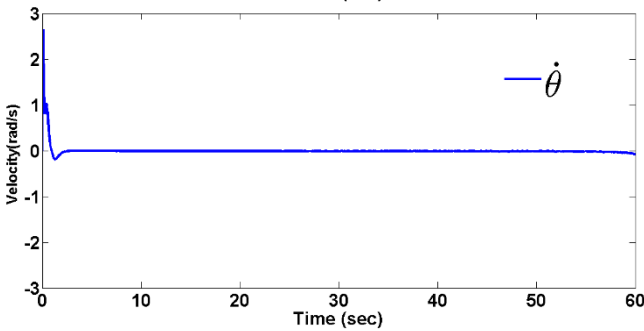
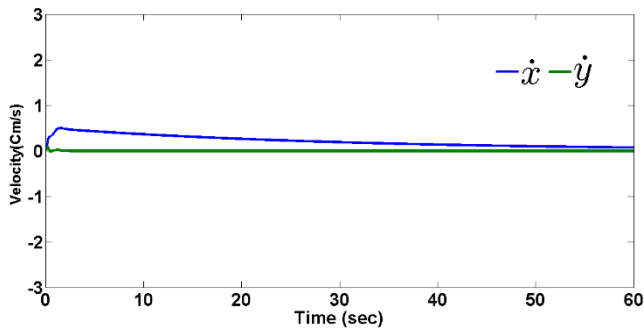


Fig. 14. Object translation and angular velocities

شکل ۱۴: سرعت‌های انتقالی و دورانی جسم.

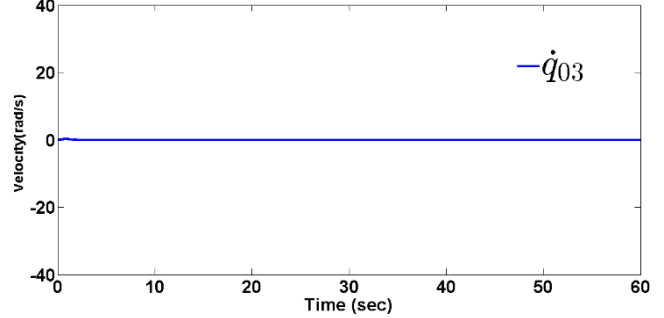
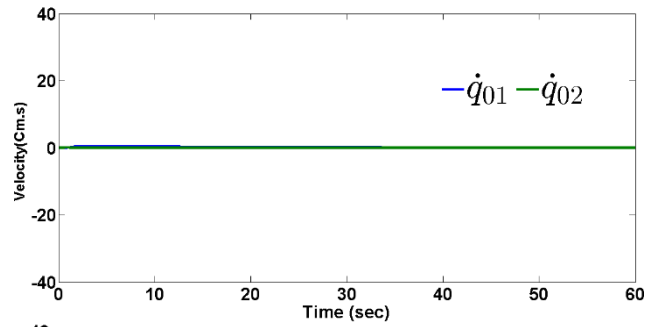


Fig. 11. Moving base translation and angular velocities

شکل ۱۱: سرعت‌های انتقالی و زاویه‌ای پایه متحرک.

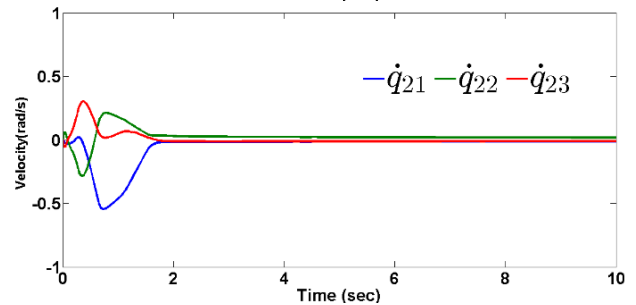
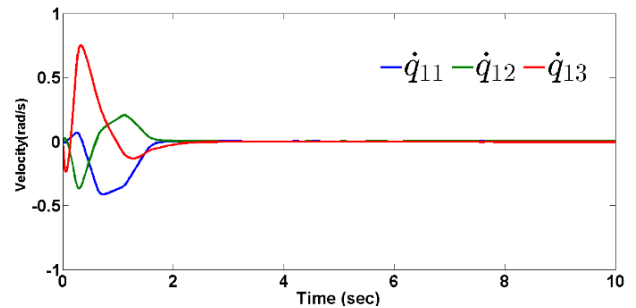


Fig. 12. Fingers joint angular velocities

شکل ۱۲: سرعت‌های زاویه‌ای مفاصل انگشتان

متحرک یک ربات در صفحه مورد بررسی قرار گرفته است. بعد از مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی سیستم با اعمال قیود عدم لغزش و حفظ نقاط تماس نوک انگشتان با جسم، به منظور پایداری دینامیکی به همراه جابجایی کل سیستم، از یک قانون کنترلی استفاده شده است.

در حقیقت در اکثر کارهای مشابه چند سال اخیر اجسامی برای گرفتن انتخاب شده است که از سطوح تخت برخوردار می‌باشند، ولیکن به‌طور عام محدودیتی در این موضوع وجود ندارد و انتخاب‌های متعددی برای جسم وجود خواهد داشت. همان‌طور که مشخص است جسم انتخاب شده در این تحقیق یک نیم‌دایره می‌باشد، طبیعتاً به‌دلیل انحنای موجود در جسم، گرفتن و پایداری قدری دشوارتر

فرضیات مساله به اثبات رسیده است.

با توجه به شکل ۱۹ دست متحرک آزادانه در صفحه جابجا شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله گرفتن و جابجایی جسم توسط دو انگشت دست

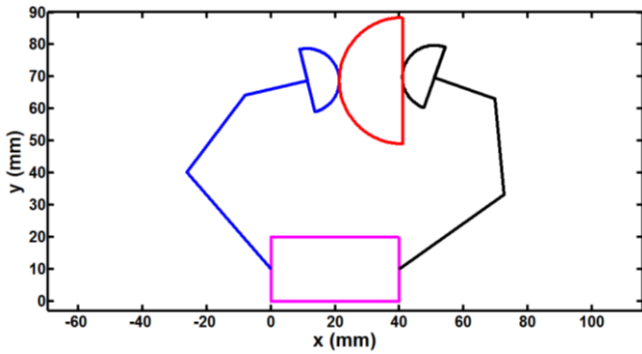


Fig. 17. System in initial pose

شکل ۷: وضعیت سیستم در لحظه اول

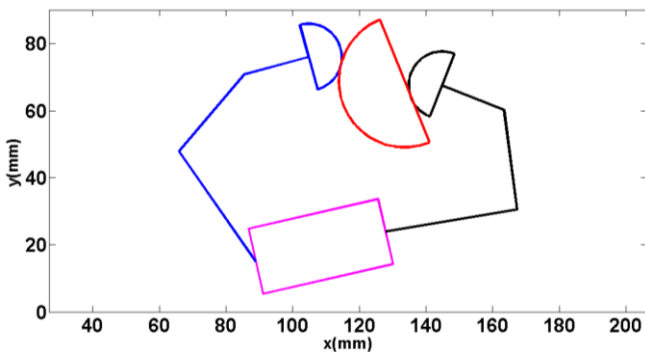


Fig. 18. System position after 30 Seconds

شکل ۱۸: وضعیت سیستم بعد از سی ثانیه

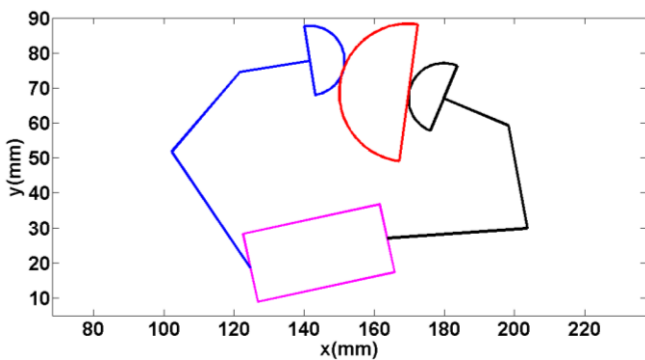


Fig. 19. System position end

شکل ۹: وضعیت انتهایی سیستم

در این روش مسیرهای پیشنهادی مناسب، به کنترلر داده می‌شود. همچنین بایستی اشاره شود که با توجه به فرضیات بخش مدل‌سازی سینماتیکی در گیرش جسم، استراتژی کنترل امپدانس چندگانه با توسعه و گسترش روبرو بوده است، که البته این موضوع برای نخستین بار است که در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است. همانطور که در نتایج شبیه‌سازی مشخص است، الگوریتم با اعمال

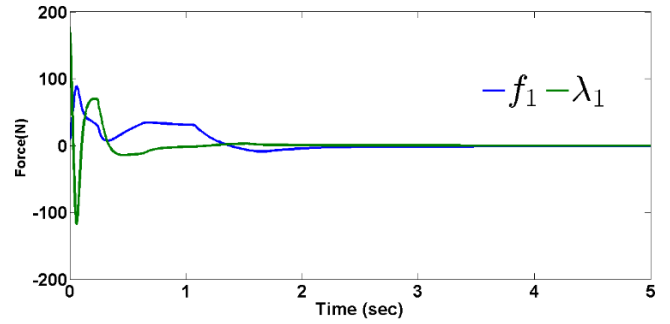


Fig. 15. Grasping force response

شکل ۱۵: نیروی ایجاد شده در تماس پروفیل انگشتان با سطح جسم

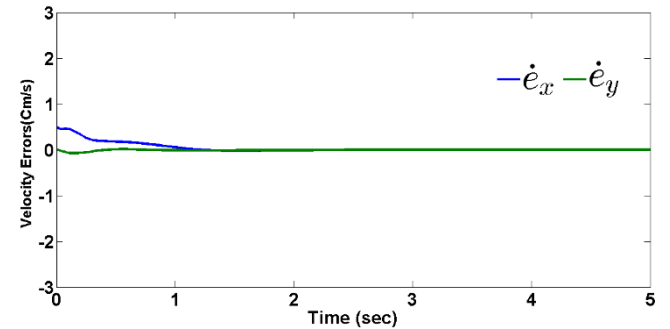
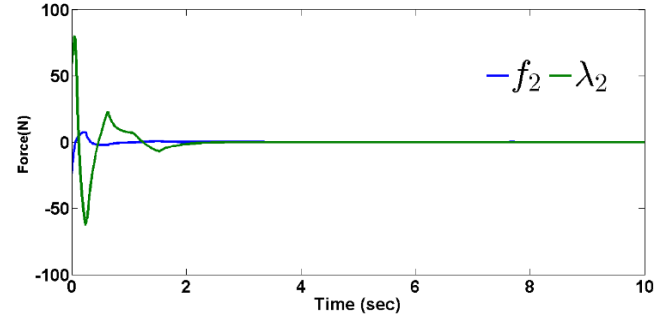
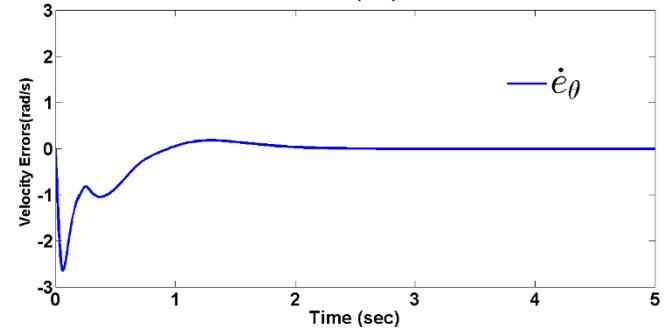


Fig. 16. Object velocity errors

شکل ۱۶: خطای سرعت جسم



می‌شود، همچنین به‌طور عمده در تحقیقات مرتبط با گرفتن جسم توسط ربات، از یک دست ثابت برای این امر استفاده شده، در حالی که در این مقاله از یک دست متحرک ربات بهره برده شده است. به منظور دستیابی به اهداف تحقیق، روش کنترل امپدانس چندگانه با اعمال اصلاحات لازم بر روی سیستم اجرا شده است.

1 (2011) 2-11.

- [10] J. Ueda, M. Kondo, T. Ogasawara, The multifingered NAIST hand system for robot in-hand manipulation, *Journal of Mechanism and Machine Theory*, 45(2) (2010) 224-238.
- [11] S.K. Song, J.B. Park, Y.H. Choi, Stable grasping control method of dual-fingered robot hands for force angle optimization and position regulation, *American Control Conference, IEEE*, (2011) 563-569.
- [12] N. Daoud, J.P. Gazeau, S. Zeghloul, M. Arsicault, A real-time strategy for dexterous manipulation: Fingertips motion planning, force sensing and grasp stability, *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 60(3) (2012) 377-386.
- [13] M. Grammatikopoulou, E. Psomopoulou, L. Droukas, Z. Doulgeri, A controller for stable grasping and desired finger shaping without contact sensing, *International Conference on Robotics and Automation, (ICRA/IEEE)*, (2014) 3662-3668.
- [14] S. Q. Wen, T. J. Wu, Computation for Maximum Stable Grasping in Dynamic Force Distribution, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 68(3-4) (2012) 225-243.
- [15] J. Seo, M. Yim, V. Kumar, Restraining Objects with Curved Effectors and Its Application to Whole-Arm Grasping, *International Symposium of Robotics Research (ISRR), Singapore*, (2013).
- [16] S.A.A. Moosavian, E. Papadopoulos, Multiple impedance control for object manipulation, *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IEEE/RSJ)* (1998) 461-466.
- [17] S.A. A. Moosavian, R. Rastegari, E. Papadopoulos, Multiple impedance control for space free-flying robots, *Journal of guidance, control, and dynamics*, 28(5) (2005) 939-947.
- [18] A. Caldas, A. Micaelli, M. Grossard, M. Makarov, P. Rodriguez-Ayerbe, D. Dumur, Object-level impedance control for dexterous manipulation with contact uncertainties using an LMI-based approach, *International Conference on Robotics and Automation (IEEE/ICRA)*, (2015) 3668-3674.

اصلاحات لازم، علاوه بر پایداری دینامیکی مطلوب، توانسته است سیستم دست متحرک ربات را بر اساس مسیرهای از پیش تعیین شده جایجا نماید و در عین حال نیروی لازم برای گرفتن جسم وارد شود.

مراجع

- [1] J. Chen, M. Zribi, Control of multifingered robot hands with rolling and sliding contacts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16(1) (2000) 71-77.
- [2] Z. Doulgeri, J. Fasoulas, S. Arimoto, Feedback control for object manipulation by a pair of soft tip fingers, *Journal of Robotica*, 20(01) (2002) 1-11.
- [3] R. Ozawa, S. Arimoto, S. Nakamura, J.-H. Bae, Control of an object with parallel surfaces by a pair of finger robots without object sensing, *IEEE Transactions on Robotics*, 21(5) (2005) 965-976.
- [4] R. Ozawa, S. Arimoto, P.T.A. Nguyen, M. Yoshida, J.-H. Bae, Manipulation of a circular object without object information, *International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE(IROS)*, (2005) 1832-1838.
- [5] R. Ozawa, J.-H. Bae, S. Arimoto, Multi-fingered dynamic blind grasping with tactile feedback in a horizontal plane, *International Conference on Robotics and Automation, IEEE (ICRA)*, (2006) 1006-1011.
- [6] S. Arimoto, A differential-geometric approach for 2D and 3D object grasping and manipulation, *Annual Reviews in Control*, 31(2) (2007) 189-209.
- [7] S. Arimoto, Control Theory of Multi-fingered Hands: A Modelling and Analytical-Mechanics Approach for Dexterity and Intelligence, *Springer Science & Business Media*, (2008).
- [8] M. Yoshida, S. Arimoto, K. Tahara, Pinching 2D object with arbitrary shape by two robot fingers under rolling constraints, *International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE(IROS)*, (2009) 1805-1810.
- [9] S. Arimoto, M. Yoshida, Modeling and control of three-dimensional grasping by a pair of robot fingers, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*,

- in horizontal plane, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, 16(11) (2017) 154-164.)in persian).
- [21] N. Hogan, Impedance control: An approach to manipulation, *American control conference, IEEE*, (1984) 304-313.
- [19] E. Psomopoulou, Z. Doulgeri, A human inspired stable object load transfer for robots in hand-over tasks, *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IEEE/IROS)*, (2015) 491-496.
- [20] S. Ahmadi, R. Rastegari, Grasping and control of moving object by dual fingers robot under rolling constraints

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

S. Ahmadi, R. Rastegari, Planar Object Manipulation with Multi Fingers Robot Located on a Moving Hand Under Rolling Grasp Constrains, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(2) (2021) 943-958.

DOI: [10.22060/mej.2019.16328.6334](https://doi.org/10.22060/mej.2019.16328.6334)



