



# گرفتن و کنترل جسم جابجا شونده توسط ربات دو انگشتی با قيود غلتش ناب در صفحه افقی

سلمان احمدی<sup>1</sup>، رامبد رستگاری<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، پرند  
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، پرند  
\* پرند، صندوق پستی 3761396361، r\_rastegari@piaou.ac.ir

## چکیده

گرفتن جسم توسط انگشتان ربات با وجود قيود غلتش ناب از موضوعات تحت بررسی توسط محققین بسیاری می‌باشد. در مطالعات انجام پذیرفته تا کنون، بررسی اعمال قيود 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 در یک صفحه افقی، 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 داده شده 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 انگشتها و جسم، شرایط پایداری دینامیکی ارضا شود، تنظیم مناسب نیرو در این روش و این که 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 انگشتان می‌باشد.

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 10 تیر 1395  
پذیرش: 20 شهریور 1395  
ارائه در سایت: 09 آبان 1395  
کلید واژگان:  
گرفتن دو انگشتی  
پایداری  
کنترل جسم  
نوک انگشتان  
کنترل امپدانس چندگانه

## Grasping and control of moving object by dual fingers robot under rolling constraints in horizontal plane

Salman Ahmadi, Rambod Rastegari\*

Department of Mechanical Engineering, Parand Branch Islamic Azad University, Parand, Iran  
\* P.O.B. 3761396361, Parand, Iran, r\_rastegari@piaou.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 30 June 2016  
Accepted 10 September 2016  
Available Online 30 October 2016

**Keywords:**  
Dual fingers Grasp  
Stability  
Object Manipulation  
Finger tips  
Multiple Impedance control

### ABSTRACT

Object grasping by robot fingers with purely rolling constraints is one of the most interesting issues under consideration by many researchers. In earlier studies, the main goal was the manipulation of object under purely rolling constraints to reach the final stable configuration. In this paper, in addition to deriving kinematic and dynamic equations of the system dual fingers robot and grasping semicircular object on the horizontal plane with rigid hemi spherical fingertips under pure rolling constrained, we investigate object manipulation on desired path maintaining dynamics stability. Modified multiple impedance control is used for object manipulation and robot fingers by considering the required reforms in this control law. In this method multiple impedance control is performed by applying the desired behavior of the entire system, including fingers and object, and dynamics stability condition is satisfied. In this way power adjustment and that these forces arrive in the right place largely effective in minimizing slip is the fingers on the surface object. The results of simulations show the eligible object manipulation and dynamics stability by robot fingers under pure rolling grasp.

### 1-مقدمه

انگشتان و سطح جسم مورد توجه قرار گرفته است. در [4] که توسط آقایان آریموتو و دولگری به چاپ رسیده است برای گرفتن جسم توسط دو انگشت از یک قانون کنترلی فیدبک که خود یک ترکیب خطی از ورودی‌های کنترلی ساده است استفاده شده است. در [5] گرفتن یک جسم با سطوح تخت و موازی را توسط دو انگشت ربات بررسی کرده‌اند که در آن از کنترلی استفاده شده است که از دسته کنترلهای نیرو هستند، در این کنترلهای نیازی به سینماتیک و وضعیت هندسی جسم وجود ندارند. در [6] یک جسم دایروی شکل برای گیرش توسط انگشتان ربات در نظر گرفته شده است. در [7] گرفتن جسم توسط سه انگشت یک ربات صورت گرفته است که

امروزه کنترل جسم بوسیله دست ربات چند انگشتی از چالش‌های موجود در زمینه رباتیک است. بایستی 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<sup>1</sup> و کنترل جسم در این وضعیت را بررسی کرده‌اند به چالش‌های موجود در این حوزه پرداخته‌اند، [1,2]. در [3] یک دست ربات چند انگشتی بر مبنای آنالیز سینماتیکی و دینامیکی سیستم در نظر گرفته شده است که در آن شرایط غلتش و لغزش توامان بین نوک

<sup>1</sup> Grasp

است، کنترل کننده از عهده پایداری و جابجایی در مسیر مطلوب توامان برآمده است.

## 2- مدل سازی سینماتیکی سیستم

در این بخش سینماتیک سیستم انگشت-جسم در شرایط دوبعدی مورد بررسی قرار می گیرد. برای هر کدام از انگشتان و جسم نیز سه درجه آزادی در نظر گرفته شده است. بردار  $[q_{i1} \ q_{i2} \ q_{i3}]^T, i = 1, 2$  زوایای مفصل هر کدام از انگشتان را نشان می دهد.

برای جسم نیز بردار  $[x, y, \theta]^T$  به عنوان متغیرهای توصیف کننده حرکت جسم در نظر گرفته شده اند. همان طور که در "شکل 1" دیده می شود از کمیت  $d$  برای تعیین فاصله بین پایه انگشتها استفاده شده است. اساس مدل سازی بر این بوده است که پایه انگشتها در طول فرآیند شبیه سازی ثابت باشد، مانند این که دست دو انگشتی ربات فاقد حرکت انتقالی خواهد بود.

از طرفی همان طور که در "شکل 1" نشان داده شده است تماس بین نوک انگشتان و سطح جسم به صورت نقطه ای فرض شده است. کلیه متغیرهای مورد نیاز انگشتان در "شکل 1" مشخص می باشد.

برای نمایش متغیرهای مربوط به جسم و شرایط گیرش آن توسط انگشتان و همچنین متغیرهای مورد نیاز جهت استخراج قيود سینماتیکی، بهتر است از "شکل 2" استفاده شود.

همان طور که در "شکل 2" دیده می شود نوک انگشتان با سطح جسم نیم دایره ای در تماس هستند. با در نظر گرفتن فرض غلتش ناب بین جسم و انگشتان می توان قيود سینماتیکی حاکم را به دست آورد. با توجه به این که هر قید غلتش ناب همزمان تماس دو سطح و عدم لغزش را در بر دارد، در مجموع می شود به چهار معادله قیدهای سینماتیکی دست یافت. دو قید در امتداد عمود مشترک سطوح تماس جسم و انگشتان، قيود نرمال، باعث حفظ نوک انگشتان بر روی جسم می شوند.

دو قید دیگر به فرض غلتش ناب نوک انگشتان بر سطح جسم مربوط می شوند. همان طور که به اثبات رسیده است، فرض غلتش ناب ایجاب می کند که سرعت نقطه تماس مشترک بین نوک انگشت و سطح جسم برابر باشد.

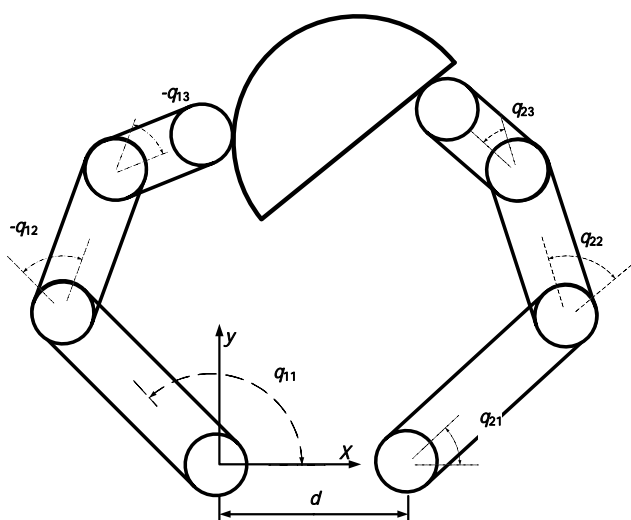


Fig. 1 The system dual finger and object

شکل 1 سیستم دو انگشت و جسم

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 می تواند نیروهای مماسی را خوب و مناسب تنظیم کند. در [8] گرفتن جسم در صفحه قائم و با تاثیر نیروی وزن، و همچنین شکل جسم دوزنقه ای مورد بررسی قرار گرفته است. از [9] می توان به عنوان یک نمونه گرفتن جسم در شرایط سه بعدی نام برد که کنترلر با تنظیم نیروی مناسب روی جسم، پایداری سیستم را تضمین می کند. در [10] آقایان آریموتو و همکارانشان گرفتن یک جسم را توسط یک دست دو انگشتی بررسی کرده اند که یک طرف جسم به صورت انحناء دار 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 را از حد مطلوب بیشتر کنیم پایداری جسم به هم می خورد و از دست ربات خارج می شود. در [11] از یک مفصل دو درجه آزادی به اصطلاح زینی شکل برای یکی از انگشتان استفاده شده است. در [12] یک نمونه دست ساخته شده برای انجام گیرش را مشاهده می کنیم. این دست چهار انگشت دارد و در یک موسسه تحقیقاتی در ژاپن ساخته شده است. در [13] از کنترلی استفاده شده است که می تواند با بهینه سازی زاویه نیروی اعمالی توسط انگشتان به سطح جسم پایداری را تضمین کند، منتها باید به این نکته اشاره نمود که اگر در میزان سنجش و اندازه گیری خطاهایی که در تماس وجود دارند اشتباهی بشود، ممکن است کنترلر درست عمل نکند. گرفتن یک جسم چند وجهی توسط انگشتان یک ربات موضوعی است که در [14] درباره آن بحث شده است. در این مقاله درباره پایداری جسم الگوریتم مناسبی توسط نویسندگان آن ارائه شده است که می تواند پایداری را تضمین کند، وضعیت هندسی نوک انگشتان عمدتاً به صورت منحنی فرض شده است و می تواند به صورت کره یا حتی استوانه باشد. در [15] که توسط محققین دانشگاه یونان صورت گرفته است گرفتن یک جسم نیم دایره توسط دو انگشت یک ربات بررسی شده است، برای پایداری از معیار لیپانوف نیز استفاده شده است. کنترلر نیروی به کار رفته توانسته است با تنظیم مناسب نیرو موجب پایداری جسم شود. در [16] درباره پایداری اکثر سیستم های دینامیکی بحث شده است و روش هایی برای این منظور مورد بررسی قرار گرفته است. رباتی که به عنوان یک ربات خدمتکار می تواند در اختیار انسان قرار بگیرد موضوعی است که در [17] به آن اشاره شده است، هنگامی که دست ربات جسمی را می گیرد و جابجا می کند ممکن است لغزش ایجاد شده بین جسم و انگشتان موجب عدم پایداری بشود، جبران و جلوگیری از این لغزش با استفاده از یک کنترل گشتاور به بهترین نحو ممکن در [18] بحث شده است، روش کنترل امپدانس چندگانه برای ربات های همکار متحرک به منظور انتقال جسم در یک محیط ناشناخته به کارگیری شده و نتایج مطلوب آن در [19] آورده شده است. در [20] از روش کنترل امپدانس چندگانه به منظور کنترل نیروهای داخلی در گرفتن جسم توسط چند بازوی ربات همکار متحرک استفاده شده است.

در این مقاله هدف تشریح کار گرفتن توسط ربات می باشد. در این مقاله ابتدا به نحوه استخراج مدل دینامیکی ربات دو انگشتی که جسمی را در صفحه تحت قيود غلتش ناب جابجا می کند، پرداخته خواهد شد. سپس با توجه به این که هدایت و جابجایی جسم توسط انگشتان مورد نظر می باشد، به طراحی کنترل کننده ای پرداخته می شود که بتواند پایداری جسم را در حین جابجایی در مسیر مورد نظر حفظ کند. در انتها نتایج شبیه سازی های انجام پذیرفته در این پژوهش ارائه خواهند گردید. همان طور که قابل مشاهده

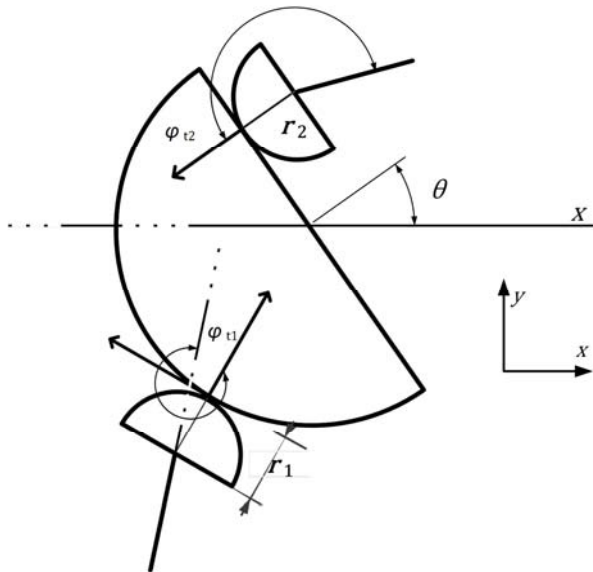


Fig.3 Location of other angular

شکل 3 وضعیت قرارگیری دیگر زوایا

$$x_{01} = L_{11} \cos q_{11}(t) + L_{12} \cos(q_{11}(t) + q_{12}(t)) + L_{13} \cos(q_{11}(t) + q_{12}(t) + q_{13}(t)) \quad (8)$$

$$y_{01} = L_{11} \sin(q_{11}(t)) + L_{12} \sin(q_{11}(t) + q_{12}(t)) + L_{13} \sin(q_{11}(t) + q_{12}(t) + q_{13}(t)) \quad (9)$$

$$x_{02} = d + L_{21} \cos q_{21}(t) + L_{22} \cos(q_{21}(t) + q_{22}(t)) + L_{23} \cos(q_{21}(t) + q_{22}(t) + q_{23}(t)) \quad (10)$$

$$y_{02} = L_{21} \sin(q_{21}(t)) + L_{22} \sin(q_{21}(t) + q_{22}(t)) + L_{23} \sin(q_{21}(t) + q_{22}(t) + q_{23}(t)) \quad (11)$$

همان‌طور که در ابتدای این بخش هم اشاره شده است برای هر کدام از انگشتان و جسم در صفحه سه درجه آزادی در نظر گرفته شده است، که جمعاً نه درجه آزادی می‌شود اما با توجه به فرض غلتش ناب درجه‌های آزادی سیستم ما به پنج درجه تقییل می‌یابد. نه معادله دینامیکی می‌توانیم به‌دست بیاوریم که وضعیت نه متغیر سیستم را مشخص می‌کند. لازم به ذکر است همه زوایای درگیر در مساله، پادساعت‌گرد و مثبت در نظر گرفته شده‌اند. در محل تماس هر کدام 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 دارد، با وجود نه متغیر سیستم و این چهار نیرو در کل سیزده مجهول تشکیل خواهند شد که توسط نه معادله دینامیکی و چهار قید سینماتیکی بایستی حل بشوند.

### 3- مدل‌سازی دینامیکی سیستم

برای استخراج معادلات دینامیکی سیستم از فرمولاسیون لاگرانژ استفاده می‌شود، همان‌طور که در فرمول (12) مشاهده می‌کنیم کل انرژی جنبشی سیستم با  $K$  نشان داده شده است، 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 (13) برای به‌دست آوردن معادلات دینامیکی سیستم استفاده شده است.

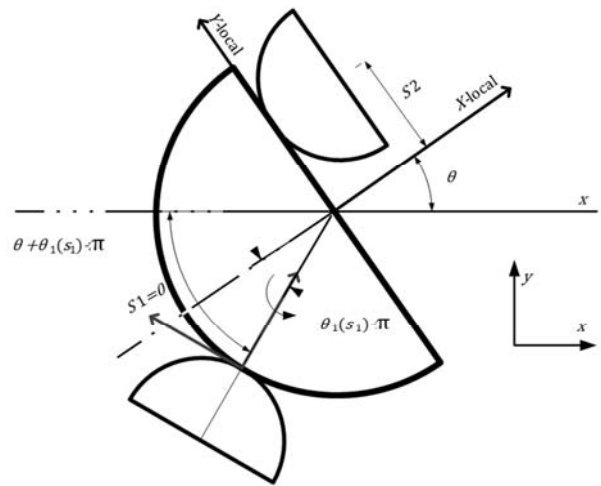


Fig.2 Object and finger tip

شکل 2 جسم و نوک انگشتان

در روابط (1) و (2) قیود موسوم به نرمال آورده شده است و در روابط (3) و (4) قیدهای مربوط به شرط غلتش ناب دیده می‌شود.

$$Q_1 = (x(t) - x_{01}) \cos(\theta(t) + \theta_1) + (y(t) - y_{01}) \sin(\theta(t) + \theta_1(s_1)) - (r_1 + L(s_1)) = 0 \quad (1)$$

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

$$R_1 = (x(t) - x_{01}) \sin(\theta(t) + \theta_1) - (y(t) - y_{01}) \cos(\theta(t) + \theta_1(s_1)) = 0 \quad (3)$$

$$R_2 = (x(t) - x_{02}) \sin(\theta(t)) + (y_{02} - y) \cos(\theta(t)) + r_2 \frac{d\varphi_{t2}(t)}{dt} = 0 \quad (4)$$

برای توضیحات بیشتر روابط سینماتیکی قیود می‌توان از مرجع [10] بهره برد. در رابطه (1) پارامتر  $s_1$  بیانگر طول قوس منحنی جسم در طرف چپ می‌باشد. ارتباط این پارامتر با  $\theta_1(s_1)$  در فرمول (5) بیان شده است.

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

در (4) زاویه  $\varphi_{t2}(t)$  بیانگر راستای لینک انتهایی انگشت سمت راست با بردار نرمال نقطه تماس با سطح جسم می‌باشد، بسط این زاویه در رابطه (6) آورده شده است، "شکل 3" نیز در نظر گرفته شود.

$$\varphi_{t2}(t) = \pi - (q_{21}(t) + q_{22}(t) + q_{23}(t)) + \theta(t) \quad (6)$$

همان‌طور که در "شکل 3" مشخص است راستای لینک انتهایی هر کدام از انگشت‌ها با بردار نرمال در نقطه تماس زاویه  $\varphi_{t1}(t)$  و  $\varphi_{t2}(t)$  را می‌سازد. به همین صورت رابطه (7) نیز در نظر گرفته شود.

$$\varphi_{t1}(t) = 2\pi - ((q_{11}(t) + q_{12}(t) + q_{13}(t)) - (\theta + \theta_1(s_1))) \quad (7)$$

همچنین در (1) مقدار  $L(s_1)$  برابر با  $R$  شعاع جسم در نظر گرفته شده است،  $r_1$  بیانگر شعاع نوک انگشت سمت چپ می‌باشد که در شبیه‌سازی برابر با  $r_2$  در نظر گرفته می‌شوند.

در رابطه (1)،  $x_{01}$  و  $y_{01}$  موقعیت مجری نهایی<sup>1</sup> سمت چپ را در صفحه نشان می‌دهد، روابط (8) و (9) مقدار  $x_{01}$  و  $y_{01}$  را نشان می‌دهند.

همچنین در رابطه (2)  $x_{02}$  و  $y_{02}$  موقعیت مجری نهایی سمت راست را نشان خواهند داد، فرمول‌های (10) و (11) بسط کامل  $x_{02}$  و  $y_{02}$  می‌باشند.

<sup>1</sup> Actuator

مورد استفاده قرار گرفته است، این روش از جمله کنترلرهای نیرو هستند که سعی دارند با تنظیم مناسب نیرو پایداری استاتیکی سیستم را تضمین کنند. این کنترلر معمولاً به هیچ‌گونه اطلاعات سینماتیکی راجع به جسم و همچنین به سنسورهایی که نیروی تماسی را هر لحظه گزارش کنند، نیاز ندارد. رابطه (18) این کنترلر را نشان می‌دهد.

$$u_i = -c_i \dot{q}_i + (-1)^i \frac{f_d}{r_1 + r_2} J_i^T(q_i) \begin{pmatrix} x_{01} - x_{02} \\ y_{01} - y_{02} \end{pmatrix} - r_i \hat{N}_i e_i, \quad i = 1, 2 \quad (18)$$

که در (18)

$$\hat{N}_i(t) = \gamma_i^{-1} r_i (p_i(t) - p_i(0)), \quad i = 1, 2 \quad (19)$$

در رابطه (18) ترم اول از سمت چپ نقش دمپینگ<sup>1</sup> را ایفا می‌کند، ترم دوم سعی می‌کند با تنظیم مناسب نیرو در مجری نهایی دو طرف باعث پایداری و تعادل در سیستم گردد، وجود ترم سوم نیز باعث می‌شود سیستم از وضعیت اولیه خود زیاد منحرف نشود.

این کنترلر بر روی سیستم مذکور اعمال شده است، که البته پایداری سیستم تضمین می‌شود منتها این کنترلر موجب جابجایی جسم نمی‌شود بلکه سعی دارد سرعت پارامترهای فیزیکی موجود در مساله را به صفر برساند و از این طریق پایداری استاتیکی سیستم را تضمین بکند. در طول اعمال این کنترلر، جسم گرفته شده بر روی انگشت‌های دست ربات غلت می‌خورد ولیکن جابجایی صورت نمی‌گیرد در واقع مانور سیستم در این وضعیت بسیار محدود می‌باشد. پیشنهاد می‌شود مقاله [15] مطالعه شود، اما انگیزه اصلی در این مقاله استفاده از روش کنترلی موسوم به امیدانس است. این کنترلر مکان-نیرو رفتار امیدانسی<sup>2</sup> را به طور همزمان بر روی جسم و بازوها اعمال می‌کند. در واقع کنترلر بایستی به طور مجزا بر روی جسم و انگشت‌ها اثر کند، ولیکن مزیت روش کنترلی امیدانس چندگانه در اعمال رفتار مطلوب بر کل سیستم خواهد بود.

با توجه به این‌که فرمولاسیون روش کنترل امیدانس از حجم بالایی برخوردار است، [20] نمی‌توانیم به تمام این روابط اشاره کنیم ولی برحسب نیاز به این فرمولاسیون اشاره خواهد شد.

کنترلر امیدانس در اعمال نیروی بین نوک انگشت‌ها و جسم بسیار هوشمندانه عمل می‌کند و نیرو را تا حد نیاز وارد خواهد کرد مانند این‌که سنسورهایی برای سنجش نیرو به کار گرفته شده باشد، این ویژگی در مواقعی که جسم شکننده باشد یا از میزان صلبیت متفاوتی برخوردار باشد بسیار حایز اهمیت است.

$$\bar{H}_{(i)}(q_{(i)}) \ddot{\bar{X}}_{(i)} + \bar{C}_{(i)}(q_{(i)}, \dot{q}_{(i)}) = \bar{Q}_{(i)} \quad (20)$$

رابطه (20) معادلات حرکت دینامیکی بازوها را در فضای دکارتی نشان می‌دهد، عبارت سمت راست تساوی بیانگر مجموع کار نیروهای تعمیم یافته خواهد بود، در رابطه (20) خواهیم داشت:

$$\bar{Q}_{(i)} = \bar{Q}_{\text{app}}^{(i)} + \bar{Q}_{\text{react}}^{(i)} \quad (21)$$

همچنین در فرمول (21) خواهیم داشت:

$$\bar{Q}_{\text{app}}^{(i)} = \bar{Q}_m^{(i)} + \bar{Q}_f^{(i)} \quad (22)$$

در عمل بایستی مقدار  $\bar{Q}_f^{(i)}$  موجود در رابطه (22) با  $\bar{Q}_{\text{react}}^{(i)}$  خنثی بشود، همچنین وقتی خطاهای تعریف شده به سمت صفر میل بکنند، در این شرایط

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

در رابطه (13) ترم  $u_i$  توصیف کننده کار نیروهای خارجی سیستم که همان گشتاور تولید شده در مفاصل انگشتان است،  $\lambda_j$  و  $f_j$  به ترتیب بیانگر نیروهای تماسی و عمودی هستند که در محل تماس نوک انگشتان با سطح جسم به وجود می‌آیند.

نه معادله دینامیکی حاصل از رابطه (13) تنها می‌توانند موقعیت انگشت‌ها و جسم را در صفحه مشخص کنند. با توجه به این‌که تعیین نیروهای قیدی که در تماس بین نوک انگشتان و جسم به وجود می‌آیند، حایز اهمیت است به تعداد معادلات بیشتری برای حل مجهول‌ها نیاز خواهیم داشت، از این رو معادلات قیدی نیز به مجموع معادله‌های دینامیکی افزوده خواهند شد. برای تشکیل معادلات حرکت با استفاده از فرمول (13) بایستی متغیرهای تعمیم یافته به صورت رابطه (14) در نظر گرفته شود.

$$q = [q_{11}, q_{12}, q_{13}, q_{21}, q_{22}, q_{23}, x, y, \theta]_{9 \times 1} \quad (14)$$

برای این منظور بایستی در ابتدا کمیت اسکالر لاگرانژین که در رابطه (12) به آن اشاره شده است تعیین شود، سپس با انتخاب متغیرهای حالت اشاره شده در رابطه (14) به راحتی سمت چپ فرمول (13) تشکیل می‌شود. در سمت راست فرمول (13) ترم  $a_{ji}$  از مشتق روابط قیدی (3) و (4) به دست خواهد آمد، همچنین  $b_{ji}$  نیز از روابط قیدی (1) و (2) حاصل خواهد شد، بنابراین با تکمیل فرمول (13) معادلات حرکت به طور کامل بدست خواهند آمد، در ضمن دسته بندی معادلات دینامیکی در قالب فرمول (14) بیان شده است.

$$\begin{bmatrix} [M_1] & [0]_{3 \times 3} & [0]_{3 \times 3} \\ [0]_{3 \times 3} & [M_2] & [0]_{3 \times 3} \\ [0]_{3 \times 3} & [0]_{3 \times 3} & [M_3] \end{bmatrix} [E]^T \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \\ \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ \dot{E} \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{13 \times 1} \\ T_{23 \times 1} \\ T_{33 \times 1} \\ 0_{5 \times 1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

در رابطه (15)، ماتریس  $[E]_{4 \times 10}$  ضرایب بردار سرعت در روابط قیدی می‌باشد. در واقع اگر از روابط قیدی نسبت به زمان مشتق گرفته شود، ضرایب سرعت متغیرهای حالت، ماتریس  $[E]$  را تشکیل خواهند داد. همچنین برای تعیین پارامتر طول قوس نیز بایستی معادله دینامیکی مربوط به آن در نظر گرفته شود، در فرم کلی معادلات دینامیکی بدین صورت می‌شوند:

$$M_i(q_i) \ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i) \dot{q}_i = T_i, \quad i = 1, 2 \quad (16)$$

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

روابط (16) و (17) به راحتی از معادله (15) قابل استخراج خواهند بود. بنابراین در مجموع چهارده معادله دینامیکی خواهیم داشت که با حل آن‌ها وضعیت تمام پارامترهای درگیر در مساله مشخص خواهند شد. در رابطه (15) از ابتدا معادله‌های مربوط به 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.

#### 4- کنترلر پیشنهادی

قبل از این‌که راجع به کنترلی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است صحبت شود، هدف بر آن بوده است درباره یک روش کنترلی که در سیستم "شکل 1" نیز به کار گرفته شده است توضیحاتی مختصر داده شود، در این صورت به نوآوری این مقاله در اعمال کنترلر بر روی سیستم موجود پی برده خواهد شد. این کنترلر از دسته کنترلرهایی است که در [15,10]

<sup>1</sup> Damping  
<sup>2</sup> MIC

فرمول محاسبه  $F_{e_{req}}^{(i)}$  در مرجع [20] آورده شده است، با توجه به آن بایستی ماتریس گیرش در رابطه (25) نیز به طور دقیق محاسبه شود. از آنجایی که این ماتریس در تعیین مقدار نیروی مذکور نقش دارد، بنابراین در صحت رفتار کنترلی نیز بسیار حایز اهمیت است.

$$G = \begin{bmatrix} -C_{\theta+\theta_1-\pi} & -S_{\theta+\theta_1-\pi} & C_{\theta} & -S_{\theta} \\ -S_{\theta+\theta_1-\pi} & C_{\theta+\theta_1-\pi} & S_{\theta} & C_{\theta} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & g_{34} \end{bmatrix}_{3 \times 4} \quad (25)$$

در فرمول (25) عبارت  $s \equiv \sin$  و  $c \equiv \cos$  خواهد بود، همچنین خواهیم داشت:

$$g_{31} = (x - x_{01}) \sin(\theta + \theta_1) - (y - y_{01}) \cos(\theta + \theta_1) \quad (26)$$

$$g_{32} = (x - x_{01}) \cos(\theta + \theta_1) + (y - y_{01}) \sin(\theta + \theta_1) \quad (27)$$

$$g_{33} = -(x - x_{02}) \sin(\theta) - (y_{02} - y) \cos(\theta) \quad (28)$$

$$g_{34} = -(x - x_{02}) \cos(\theta) + (y_{02} - y) \sin(\theta) - r_2 \quad (29)$$

با جایگذاری روابط (8) و (9) در فرمول‌های (26) و (27) و همچنین روابط (10) و (11) در (28) و (29)، این فرمول‌ها کامل خواهند شد.

بدین ترتیب ماتریس گیرش برای محاسبه نیروهای کنترلی تکمیل خواهد شد. تعیین مقادیر مطلوب در توابع خطا برای جسم و انگشت‌ها در درست عمل کردن کنترل بسیار اهمیت دارد. پس از محاسبات کامل اجزای فرمولاسیون روش کنترلی امیدانس، بایستی مسیرهای مطلوب<sup>1</sup> برای مجری نهایی و جسم تعریف شود، در این قسمت از کار بایستی مناسب‌ترین مسیر توسط طراح کنترل برای سیستم تعریف بشود.

$$x_{des}^{obj} = 4 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + x(0) \quad (30-الف)$$

$$y_{des}^{obj} = cte. \quad (30-ب)$$

$$\theta_{des}^{obj} = -0.5 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (30-ج)$$

روابط (30) به عنوان یکی از چندین مسیر مطلوب که مدنظر ما بوده است، برای اعمال بر روی جسم انتخاب شده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شده است، تعیین محل دقیق نقطه تماس نوک انگشتان با سطح جسم نسبتاً امر دشواری است، از اینرو توابع مطلوب برای انگشتان نسبت به مجری نهایی طرفین معین گردیده است.

$$x_{des}^1 = x_{des}^{obj} + (R + r_1) \cos(\theta_{des}^{obj} + \theta_1^{des}) \quad (31-الف)$$

$$y_{des}^1 = y_{des}^{obj} + (R + r_1) \sin(\theta_{des}^{obj} + \theta_1^{des}) \quad (31-ب)$$

$$x_{des}^2 = x_{des}^{obj} + r_2 \cos(\theta_{des}^{obj}) - s_2 \sin(\theta_{des}^{obj}) \quad (31-ج)$$

$$y_{des}^2 = y_{des}^{obj} + s_2 \cos(\theta_{des}^{obj}) + r_2 \sin(\theta_{des}^{obj}) \quad (31-د)$$

روابط (31) مسیر مطلوب را برای انگشت‌ها ردیابی می‌کنند، کنترل به کار گرفته شده توانسته است، این مسیر را دنبال کند و سیستم "شکل 1" را به پایداری موردنظر برساند. در واقع همان‌طور که در روابط (30) و (31) مشهود است، سیستم دوانگشت-جسم بایستی بتواند مسیرهای از پیش تعیین شده را طی کند و عمل به این مهم در حقیقت پایداری دینامیکی را نیز به همراه خواهد داشت. همان‌طور که واضح است می‌شود مسیرهای مناسب دیگری نیز برای سیستم تعریف کرد و انگشت‌ها در آن شرایط مسیری دیگر را برای انتقال جسم انتخاب خواهند کرد، این موضوعات حاکی از انعطاف‌پذیر بودن روش کنترل امیدانس چندگانه نیز خواهد داشت. در این باره "شکل 14" نیز در نظر گرفته شود.

می‌توان گفت کنترل درست عمل کرده است.

معادلات دینامیکی جسم در فضای دکارتی نیز به صورت رابطه (23) خواهد بود:

$$M\ddot{X} + F_{\omega} = F_c + F_o + GF_e \quad (23)$$

همواره بایستی توجه داشته باشیم که فرمولاسیون کنترل امیدانس در فضای دکارتی محاسبه می‌شود. سناریوهای مختلفی برای کنترل به کار گرفته شده است، هر کدام از این سناریوها برای کنترل ایده متفاوتی محسوب می‌شوند. در نهایت سعی شده است بهترین دیدگاه لحاظ شود.

همان‌طور که می‌دانیم در تماس بین نوک انگشت‌ها با سطح جسم نیروهایی به صورت عمل و عکس العمل وجود دارند، تعیین وضعیت مطلوب برای این نیروها نیز در روند کنترل بسیار حایز اهمیت است. در فرمول (23) ترم  $F_e$  نشان دهنده همین نیروها خواهد بود.  $\bar{Q}_f^{(i)}$  برابر است با:

$$\bar{Q}_f^{(i)} = F_{e_{req}}^{(i)} \quad (24)$$

با توجه به فرمول (21) و آنچه که در [20] آمده است همان‌طور که قبلاً هم اشاره شده است، یکی از شروط درست عمل کردن کنترل این است که مقدار  $\bar{Q}_f^{(i)}$  دقیق محاسبه شود، در این صورت این نیرو با  $\bar{Q}_{react}^{(i)}$  موجود در رابطه (21) خنثی می‌شود، در این صورت می‌توان گفت کنترل در عمل به وظایف خود عمل کرده است. بنابراین در این شرایط تعیین نیروهای  $F_{e_{req}}^{(i)}$  بسیار حایز اهمیت خواهد بود.

از این جهت در راستای به‌کارگیری سناریوهای مختلف، در ابتدا نیروهای مذکور در نقطه تماس بین نوک انگشت‌ها با جسم در نظر گرفته شده است، که البته نتیجه مناسبی در بر نداشت، بنابراین نیروهای  $F_{e_{req}}^{(i)}$  به نوک مجری نهایی انتقال پیدا کرده است، "شکل 4" در نظر گرفته شود.

با توجه به "شکل 4" نیروهای  $F_{e_{req}}^{(i)}$  در دو سمت ابتدا بایستی در راستای نیروهای  $r_j$  و  $f_j$  تصویر بشوند و بعد به نقاط مشخص شده  $(x_{01}, y_{01})$  و  $(x_{02}, y_{02})$  منتقل بشوند. طبق اصل انتقال، گشتاور این نیروها محاسبه شده و در فرمولاسیون کنترل جای گرفته است. همچنین در این شرایط برای مجری نهایی سه حرکت در صفحه در نظر گرفته می‌شود.

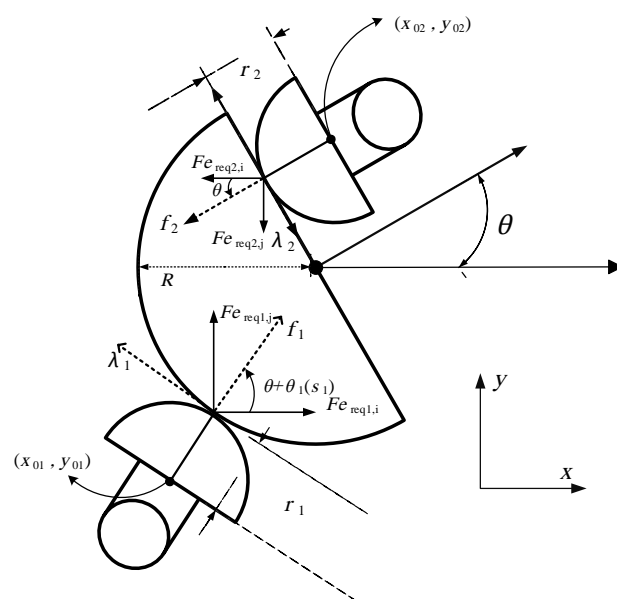


Fig 4. Translation of contact force

شکل 4 انتقال نیرو تماسی

<sup>1</sup> Desire

## 5- شبیه‌سازی عددی

در این قسمت نیاز است به برخی از روابط مهم در فرآیند شبیه‌سازی اشاره شود، از این رو پیشنهاد می‌شود "شکل 5" برای درک بهتر این روابط در نظر گرفته شود.

همان‌طور که در "شکل 5" مشخص است، مقادیر پارامترها می‌توانند برحسب این‌که نقطه تماس بین نوک انگشت‌ها با سطح جسم کجا در نظر گرفته شود تغییر پیدا کنند، ولیکن به هر حال در این مقاله وضعیت نشان داده شده در "شکل 5" معیار کار قرار گرفته است.

$$X(s_1) = R * \cos(\theta_1(s_1) - \pi) \quad (32)$$

$$Y(s_1) = R * \sin(\theta_1(s_1) - \pi) \quad (33)$$

$$X(s_2) = 0, Y(s_2) = s_2 \quad (34)$$

در فرمول (32) خواهیم داشت:

$$\theta_1(s_1) = \arctan(\dot{X}(s_1)/\dot{Y}(s_1)) \quad (35)$$

در رابطه (35):

$$\dot{X}(s_1) = \frac{dX(s_1)}{ds_1}, \dot{Y}(s_1) = dY(s_1)/ds_1 \quad (36)$$

در رابطه (34) مقدار  $s_2$  با توجه به این‌که سمت راست جسم تخت می‌باشد، معمولاً یک مقدار ثابت فرض می‌شود. سمت چپ جسم به‌صورت منحنی انتخاب شده است، از پارامتر طول قوس  $s_1$  برای تعیین این انحنا استفاده شده است، کمیت سرعت این پارامتر می‌تواند به‌صورت فرمول (37) بیان بشود:

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

در رابطه (37) خواهیم داشت:

$$\kappa_i(s_i) = X''(s_i)Y'(s_i) - X'(s_i)Y''(s_i), i = 1, 2 \quad (38)$$

در (38) کمیت  $\kappa_i(s_i)$  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 (36)  $\sqrt{X'(s_i)^2 + Y'(s_i)^2} = 1$  خواهد بود.

همچنین در فرمول (37) خواهیم داشت:

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

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

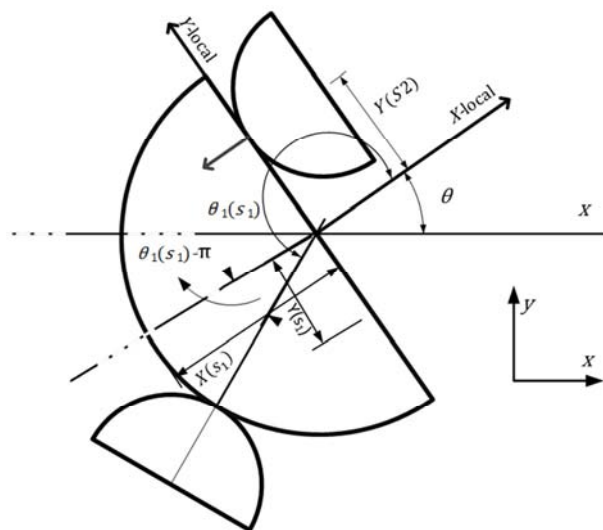


Fig 5. Numerical Simulation

شکل 5 شبیه‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی مدل فیزیکی نشان داده شده در "شکل 1" بایستی مقادیر ارایه شده در جدول 1 در نظر گرفته شود، مقادیری که برای پارامترهای قابل تغییر در نظر گرفته شده است وضعیت آن‌ها در لحظه اول را نشان می‌دهد اما سایر پارامترها عملاً در طول فرآیند شبیه‌سازی در واقع مقدار ثابت و مشخصی را دارند، این پارامترها در جدول 2 آورده شده‌اند.

در جدول 3 مقدار ثوابت کنترلی برای این شبیه‌سازی ارایه شده است و نشان خواهیم داد که این مقادیر برای شبیه‌سازی مناسب‌ترینند.

بایستی در نظر داشت که این مقادیر براساس انتخاب‌های طراح کنترل تعیین می‌گردد، بنابراین انتخاب‌های بی‌شماری می‌تواند وجود داشته باشد.

به‌رحال با این مقادیر جواب مناسب حاصل شده، گرچه مقادیر دیگری نیز توانسته بودند خواسته‌های ما را برآورده سازند.

براساس مقادیر نشان داده شده در جدول 1 تا 3 شبیه‌سازی انجام شده و نتایج این شبیه‌سازی در نمودارهای زیر آورده شده است.

جدول 1 مقادیر اولیه

Table 1 Initial values

مقدار در لحظه اول	متغیرها
146.5335 [degree]	$q_{11}(0)$
-60.5216 [degree]	$q_{12}(0)$
-70 [degree]	$q_{13}(0)$
41.67 [degree]	$q_{21}(0)$
54 [degree]	$q_{22}(0)$
70 [degree]	$q_{23}(0)$
0 [degree]	$\theta(0)$
5.5 [cm]	$y(0)$
1.752 [cm]	$x(0)$
0 [cm]	$s_1(0)$
0.68 [cm]	$s_2(0)$

جدول 2 پارامترهای فیزیکی انگشتان و جسم

Table 2 Physical Parameters OF the Fingers and Object

مقدار	پارامتر
4 [cm]	$L_{11}=L_{21}$
3 [cm]	$L_{12}=L_{22}$
2 [cm]	$L_{13}=L_{23}$
45 [gr]	$m_{11}=m_{21}$
30 [gr]	$m_{12}=m_{22}$
15 [gr]	$m_{13}=m_{23}$
1 [cm]	$r_1=r_2=r$
2 [cm]	$d$
80 [gr]	$M$
0.6 [gr.cm <sup>2</sup> ]	$J$
60 [gr.cm <sup>2</sup> ]	$IG_{11}=IG_{21}$
22.50[gr.cm <sup>2</sup> ]	$IG_{12}=IG_{22}$
5 [gr.cm <sup>2</sup> ]	$IG_{13}=IG_{23}$

جدول 3 پارامترهای کنترلی

Table 3 Parameters of Control

مقدار	ثابت‌ها
80 [gr]	$M_{des}$
20 [n m s]	$K_p$
100 [s <sup>2</sup> /kg]	$K_d$
180 [degree]	$\theta_{1,des}$
100	$b$

خواهند کرد، البته روش کنترل امپدانس به خوبی این نیروها را محاسبه کرده است، تغییرات این نیروها در "شکل 9" آورده شده است.

طبیعتاً هر اندازه که خطای جسم به سمت صفر میل کند، نشان دهنده این است که مقدار مطلوب تعیین شده توسط طراح کنترلر به اندازه واقعی بسیار نزدیک است و این نشان از عملکرد مناسب کنترلر دارد. در "شکل 10" گراف مربوط به توابع خطا اشاره خواهد شد.

وضعیت سیستم در لحظات مختلف قابل رصد کردن است. مسیر مطلوبی که برای سیستم فرض شده است در رفتار سیستم کاملاً مشهود است، در حقیقت تبعیت از مسیر پیشنهادی به کنترلر، حاکی از عملکرد بی نقص کنترلر دارد. در "شکل 11" وضعیت سیستم در لحظه اول نشان داده است، پس از آن نیز لحظات بعدی نشان داده خواهد شد. این نتایج در واقع پایان

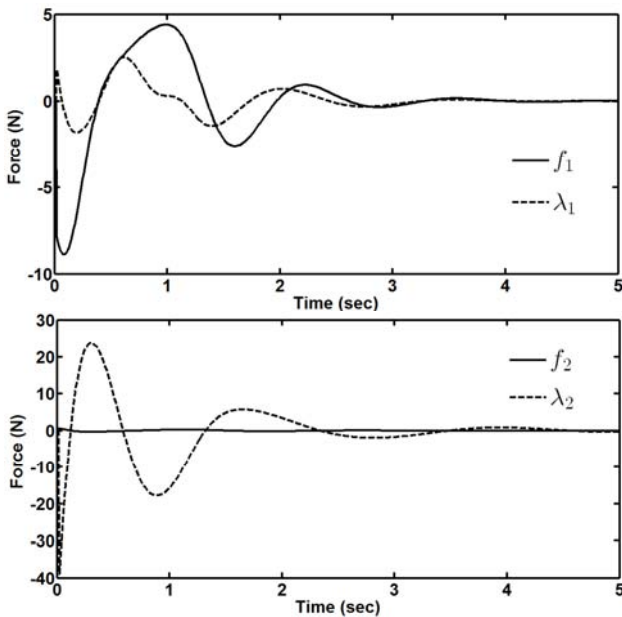


Fig9. Grasping force response

شکل 9 نیروی گرسپ

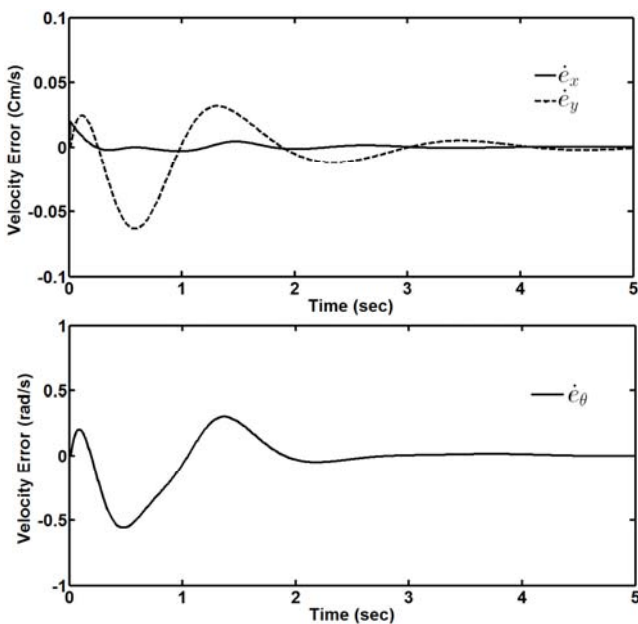


Fig10. Error object velocities

شکل 10 خطای سرعت‌های جسم

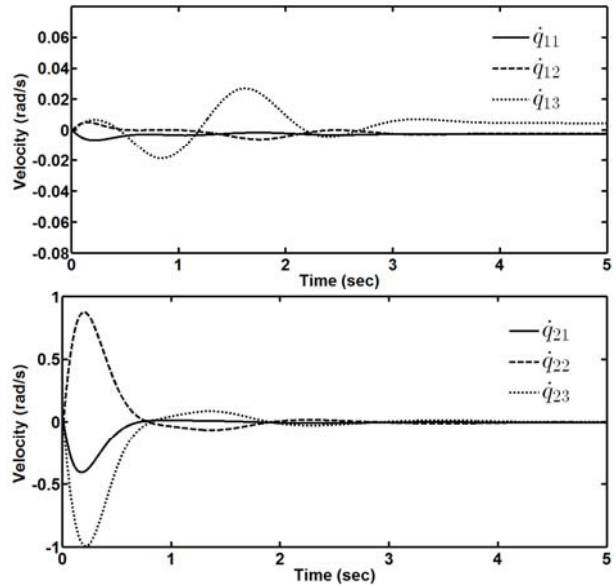


Fig6. Joint angular velocities

شکل 6 سرعت‌های زاویه‌ای مفاصل

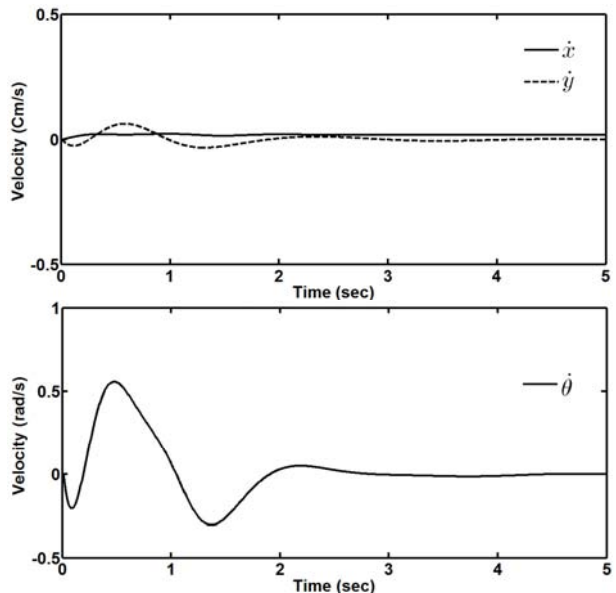


Fig7. Object translational and angular velocities

شکل 7 سرعت‌های انتقالی و زاویه‌ای جسم

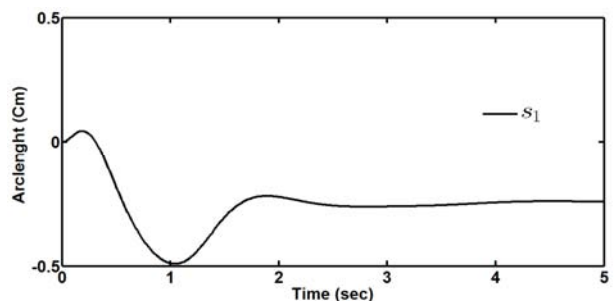


Fig 8. Trajectory of arc length parameter  $s_1$

شکل 8 پارامتر طول قوس  $s_1$

نیروهای قیدی که در اثر تماس بین نوک انگشت‌ها با سطح جسم به وجود می‌آیند، در کنترلر جسم و سیستم به طور کلی نقش اساسی بازی



## 6- نتیجه گیری

در این مقاله گرفتن جسم توسط دو انگشت دست یک ربات در صفحه مورد بررسی قرار گرفته است. بعد از مدل سازی سینماتیک و دینامیکی سیستم تصمیم گرفته شد که موضوع پایداری و کنترل جسم لحاظ شود.

در حقیقت در اکثر کارهای مشابه چند سال اخیر اجسامی را برای گرفتن انتخاب کرده اند که از سطوح تخت برخوردار می باشند، ولیکن به طور عام محدودیتی در این موضوع وجود ندارد و می توان هندسه متفاوتی برای جسم در نظر گرفت، همان طور که پیداست جسم به کار گرفته شده در این تحقیق یک نیم دایره می باشد که در یک سمت انحنا دارد و سمت دیگر، تخت می باشد. طبیعتاً به دلیل انحنای موجود در جسم گرفتن و پایداری قدری دشوارتر می شود، ولیکن روش کنترلی امپدانس به خوبی کار کنترل و حفظ پایداری جسم را انجام داده است.

پس این نتیجه حاصل می شود که کنترلر امپدانس علاوه بر حفظ تعادل جسم، می تواند آن را به خوبی بر اساس مسیرهای از پیش تعیین شده جابجا کرده و در عین حال نیروی لازم را بر جسم وارد کند.

## 7- مراجع

- [1] H. Maekawa, K. Tanie, K. Komoriya, Tactile sensor based manipulation of an unknown object by a multifingered hand with rolling contact, *Robotics and Automation, IEEE International Conference on*, pp. 743-750, 1995.
- [2] C.-C. Cheah, H.-Y. Han, S. Kawamura, S. Arimoto, Grasping and position control for multi-fingered robot hands with uncertain Jacobian matrices, *Robotics and Automation, IEEE International Conference on*, pp. 2403-2408, 1998.
- [3] J. Chen, M. Zribi, Control of multifingered robot hands with rolling and sliding contacts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, No. 1, pp. 71-77, 2000.
- [4] Z. Dougeri, J. Fasoulas, S. Arimoto, Feedback control for object manipulation by a pair of soft tip fingers, *Robotica*, Vol. 20, pp. 1-11, 2002.
- [5] 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, *Robotics, IEEE Transactions on*, Vol. 21, No. 5, pp. 965-976, 2005.
- [6] R. Ozawa, S. Arimoto, P. T. A. Nguyen, M. Yoshida, and J.-H. Bae, Manipulation of a circular object without object information, *Intelligent Robots and Systems, 2005. (IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 1832-1838, 2005.
- [7] R. Ozawa, J.-H. Bae, S. Arimoto, Multi-fingered dynamic blind grasping with tactile feedback in a horizontal plane, *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International*, pp. 1006-1011, 2006.
- [8] S. Arimoto, A differential-geometric approach for 2D and 3D object grasping and manipulation, *Annual Reviews in Control*, Vol. 31, No. 2, pp. 189-209, 2007.
- [9] S. Arimoto, *Control Theory of Multi-fingered Hands: A Modelling and Analytical-Mechanics Approach for Dexterity and Intelligence*: Springer Science & Business Media, 2008.
- [10] M. Yoshida, S. Arimoto, K. Tahara, Pinching 2D object with arbitrary shape by two robot fingers under rolling constraints, *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 1805-1810, 2009.
- [11] 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*, Vol. 1, No. 1, pp. 2-11, 2011.
- [12] J. Ueda, M. Kondo, T. Ogasawara, The multifingered NAIST hand system for robot in-hand manipulation, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 45, No. 2, pp. 224-238, 2010.
- [13] 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 (ACC), 2011*, pp. 563-569, 2011.

کار شبیه سازی را نشان می دهد و صحت و درستی مساله مورد تحقیق را به اثبات می رساند، از این رو بسیار می تواند جذاب باشد.

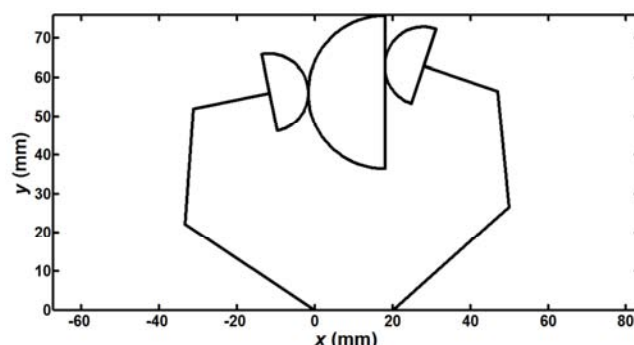


Fig11. System in Initial pose

شکل 11 وضعیت سیستم در لحظه اول

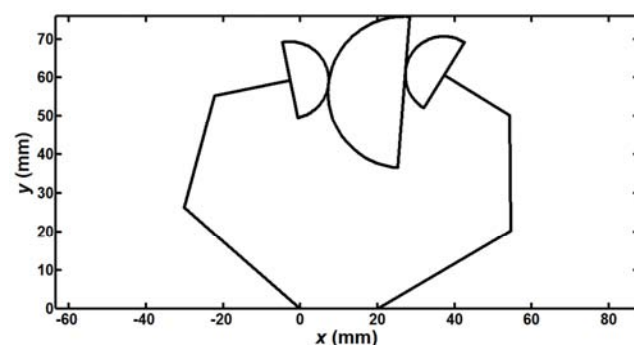


Fig12. After 40 Seconds

شکل 12 بعد از 40 ثانیه

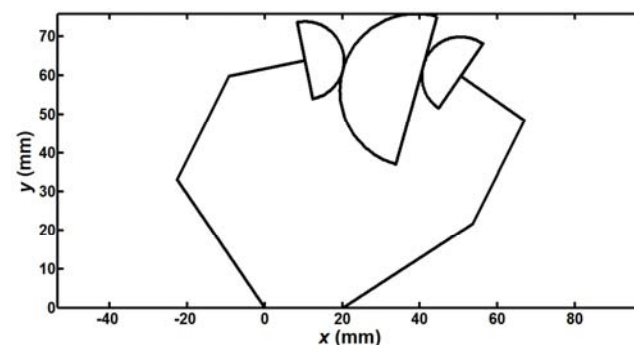


Fig13. End pose

شکل 13 وضعیت انتهایی

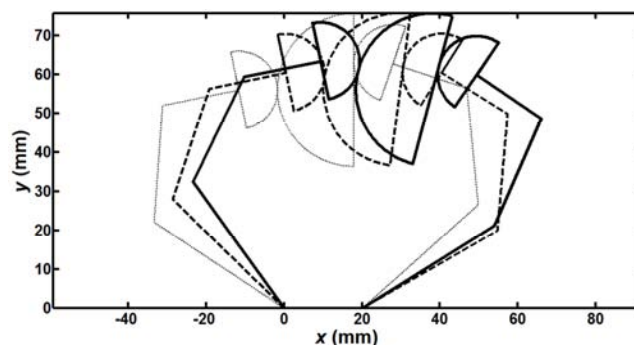


Fig 14. Trajectory of system

شکل 14 مسیر حرکت سیستم



- International Symposium of Robotics Research (ISRR), Singapore, 2013.*
- [18] Habib Ahmadi, Hanieh Esmaeeli, M. M. Fateh, Slip compensation of grasped objects in robot gripper, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 151-162, 2014. (in Persian فارسی)
- [19] Ali Ghaffari, Alireza Khodayari, Designing a control algorithm based on semi-active suspension system for formation control of mobile robots transporting an object, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 33-42, 2015. (in Persian فارسی)
- [20] S. A. A. Moosavian, E. Papadopoulos, Multiple impedance control for object manipulation, in *Intelligent Robots and Systems, 1998. Proceedings., 1998 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 461-466, 1998.
- [14] N. Daoud, J. P. Gazeau, S. Zeghloul, M. Arsicault, A real-time strategy for dexterous manipulation: Fingertips motion planning, force sensing and grasp stability, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 60, No. 3, pp. 377-386, 2012.
- [15] M. Grammatikopoulou, E. Psomopoulou, L. Droukas, Z. Doulgeri, A controller for stable grasping and desired finger shaping without contact sensing, *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, pp. 3662-3668, 2014.
- [16] S.-Q. Wen, T.-J. Wu, Computation for Maximum Stable Grasping in Dynamic Force Distribution, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 68, No. 3, pp. 225-243, 2012.
- [17] J. Seo, M. Yim, V. Kumar, Restraining Objects with Curved Effectors and Its Application to Whole-Arm Grasping, in *for*