مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1396، دوره 17، شماره 7، ص‌ص 9-19

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی و کنترل امپدانس گیرش یک شیء الاستیک کروی بوسیله انگشتان نرم

سیدحمیدرضاحیدری[1]، برهان بیگ‌زاده[2*]، محمد ریاحی[3]

1- دانشجو کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
* تهران، صندوق پستی 16765163، b_beigzadeh@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 16 اسفند 1395
پذیرش: 05 خرداد 1396
ارائه در سایت: 16 تیر 1396

کلید واژگان:
گیرش
انگشتان با نوک نرم
توپ همگن الاستیک
کنترل امپدانس
پایداری

چکیده

از جمله ویژگی‌های انگشتان انسان نرم بودن نوک انگشتان است که در مسئله‌ی گیرش به ویژه گیرش یک شیء همگن الاستیک منجر به برقراری غلتش ناب می‌شود و این به خودی خود گیرشی پایدار را به همراه خواهد داشت. در این راستا این مقاله فرآیند گیرش یک شیء نرم نظیر یک توپ کروی همگن الاستیک توسط یک جفت انگشتان موازی با نوک نرم نیم‌کره‌ای را مورد بررسی قرار می‌دهد. در این مقاله پس از مدل کردن سیستم و استخراج معادلات سینماتیکی و دینامیکی آن، روش کنترلی امپدانس بر پایه‌ی کنترل موقعیت برای کنترل این سیستم در نظرگرفته می‌شود. به منظور پیاده‌سازی کنترلر و اعتبارسنجی آن، مدلی از این سیستم در نرم‌افزار آدامز شبیه‌سازی می‌شود. این نرم‌افزار نیز پس از تعامل با نرم‌افزار سیمولینک به‌عنوان بخشی از سیستم کنترلی قرار می‌گیرد و مسئله‌ی گیرش به‌صورت به هنگام شبیه‌سازی و کنترل می‌شود. نتایج حاصل از پیاده‌سازی نشان از توانایی این کنترلر در ردگیری مناسب انگشتان رباتیکی تا قبل از گیرش و تضمین پایداری گیرش به هنگام گیرش یک توپ همگن الاستیک دارد.

Simulation and impedance control of the grasping of a spherical, elastic object with soft contact surfaces

Seyed Hamid Reza Heidary, Borhan Beigzadeh*, Mohammad Riahi

Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 16765163, Tehran, Iran, b_beigzadeh@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 March 2017
Accepted 26 May 2017
Available Online 07 July 2017

Keywords:
Grasping, Fingers with soft-tips
Isotropic
Elastic object
Impedance control
Stability

ABSTRACT

Soft- tips in human fingers play a great role in object grasping; especially when talking about isotropic and elastic matters. In other words, stability of a typical grasp is exceedingly dependent on contact conditions. Pure rolling (without slippage) is a kind of contact constraint which is greatly tied with this feature; we have focused on modelling this type of contact in this paper where the problem of grasping an elastic sphere-formed ball by a pair of soft-tip parallel fingers is presented. First, by modeling objects as a mass-spring system, dynamical and kinematical equations of motion are derived. Then, a position-based impedance control is developed. In order to implement and validate the suggested controller, a pair of soft-tip fingers, holding an elastic ball, is simulated in MSC ADAMS. This software begets a control block in the Simulink software as a plant of the control system. Thus, the process of grasping under the effect of controller can be simulated in a real time manner. The result of the simulation shows the ability of controller in appropriate tracking fingers until contact with ball is made. Moreover, the simulation results show the stability of the grasping process.

1- مقدمه

منیپولیشن[1] دست رباتیک، تعامل آن با محیط و گیرش[2] اجسام گوناگون از موضوع‌هایی هستند که در چند دهه‌ی اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. در اکثر تحقیقات انجام شده، انگشتان رباتیکی و همچنین شیء گیرش شده صلب در نظر گرفته شده‌اند. در چنین تعاملی مدل‌های گوناگونی برای نیروی عمودی وارد بر جسم و نیروی اصطکاک بین دوجسم ارائه شده‌اند. در تمامی این مدل‌ها تماس بین دو جسم نقطه‌ای و نیروی اصطکاک تابعی از نیروی عمودی می‌باشد [1-3]. روش‌های کنترلی متنوعی جهت رسیدن به گیرشی پایدار با در نظر گرفتن قیود غلتشی ناب و تماسی صلب-صلب ارائه شده اند [5,4].

از دیگر موارد مطالعه شده در گیرش یک شیء می‌شود به فرض انعطاف‌پذیر بودن دست رباتیک اشاره کرد. نرم بودن دست رباتیک در هنگام تعامل با محیط نه تنها از آسیب‌های احتمالی به آن جلوگیری می‌کند بلکه مانع از اسیب‌های غیرپیش‌بینی شده به خودش نیز می‌شود. همچنین، در نظر گرفتن دستی رباتیک با نوک انگشتان نرم در رسیدن به گیرشی پایدار بسیار

[1] Manipulation
[2] Grasping

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

S. H. R. Heidary, B. Beigzadeh, M. Riahi, Simulation and impedance control of the grasping of a spherical, elastic object with soft contact surfaces, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 09-19, 2017 (in Persian)

حائز اهمیت است و منیپولیشن امنی را در جابه‌جایی امن شیء نتیجه می‌دهد. مدل‌هایی سازگار با تئوری پلاستیسیته[1] برای انگشتان نرم در گیرش یک شیء ارائه شده‌اند [6]. مطالعه‌هایی بر روی حرکت غلتشی ناب بوسیله‌ی انگشتان نرم در [8,7] انجام شده‌اند. کنترل‌هایی مجزا با در نظر گرفتن قیود غلتشی ناب برای کنترل نیروهای عمودی و مماسی طراحی شده‌اند [9]. گیرش یک شکل مکعب شکل توسط دو انگشت سه درجه آزادی با انگشتان نرم با در نظر گرفتن نیروی گرانشی و همچنین بدون اثرات آن مطالعه شده و نتایج حاصل از آن معیاری را برای بررسی کیفیت گیرش ارائه داده است [10].

به غیر از دو حالت ممکن درگیرش اشیاء که در پاراگراف‌های اخیر توضیح داده شده‌اند گیرش یک شیء نرم توسط انگشتان صلب یکی دیگر از حالت‌های مهم گیرش می‌باشد. اگرچه تحقیقات بسیار اندکی در این نوع از گیرش صورت گرفته است، با این وجود این نوع گیرش با توجه به نوع تعاملش با اشیاء انعطاف‌پذیر می‌تواند کاربرد وسیعی را در حوزه‌های مختلف صنعتی، جراحی و ... داشته باشد. شناسایی سیستم حرکتی یک جسم انعطاف‌پذیر با تعداد درجات آزادی بی‌نهایت چالش بزرگی در مطالعه‌ی این نوع گیرش می‌باشد. در [11] مروری بر کارهای صورت گرفته در این زمینه انجام شده است. در مطالعه‌ی رفتار دینامیکی شیء انعطاف‌پذیر، مدل‌هایی از سیستم جرم و فنر برای شیء الاستیک در نظر گرفته شده‌اند [13,12]. مدل های مبتنی بر جرم و فنر، سیستم‌های سازگار با مدل‌های ریاضی هستند که ساختار دینامیکی آن‌ها به خوبی قابل تشخیص می‌باشند و در مواردی که تغییر شکل زیاد است به طور ویژه در سیستم‌های به هنگام[2] بسیار مناسب هستند. همچنین، علاوه بر در نظر گرفتن سیستم جرم و فنر برای جسم انعطاف پذیر، روش‌هایی براساس اجزای محدود[3] در شناسایی رفتار دینامیکی این سیستم‌ها به کار رفته‌اند [15,14]. این روش‌ها در مقایسه با روش‌های مبتنی بر جرم و فنر دارای دقت بیشتری هستند ولی با توجه به محاسبات پیچیده عددی در شبیه سازی‌های به هنگام کاربردی نیستند.

با وجود این‌که در استخراج معادلات دینامیکی سیستم در نظر گرفتن ویژگی‌های تماس نظیر نرم و صلب بودن اجسام بسیار حائز اهمیت هستند و منجر به رسیدن به نتیجه‌ای دقیقتر در شبیه‌سازی سیستم می‌گردند، انتخاب روش کنترلی مناسب نیز به همان نسبت برای رسیدن به این هدف موثر است. روش کنترل امپدانس[4] در میان روش‌های کنترلی به‌کار رفته در منیپولیشن دست رباتیک و مسئله‌ی گیرش از مرتبه‌ی خاصی برخوردار می‌باشد. از این روش برای کنترل ربات منیپولاتور بر مبنای امپدانس داخلی و خارجی سیستم استفاده شده است [16]. همچنین، کنترلر امپدانسی بر روی ربات جوش‌کار با بهره گیری از کنترل موقعیت منیپولاتور طراحی و پیاده‌سازی شده است [17].

در این مقاله برای اولین بار با هدف شبیه‌سازی مسئله‌ی گیرش اشیاء نرم (برای مثال گیرش یک زرد آلو، خمیر یا اسفنج) توسط انگشتانی با نوک نرم ، سعی بر مشابه سازی شرایط گیرش درست به مانند گیرش یک شیء نرم توسط دستان انسان شده‌است. در واقع در تمام مطالعات پیشین هیچ کاری بر روی این نوع گیرش که در آن تماس بین دو جسم نرم-نرم باشد انجام نشده است. به دلیل دینامیک غیرخطی و ناشناخته اجسام نرم کنترل مستقیم گشتاور مفاصل کاری سخت و دشوار می‌باشد. از این در این مقاله از روش کنترل امپدانس بر پایه‌ی کنترل موقعیت برای بررسی و کنترل مسئله‌ی گیرش استفاده شده است. همچنین، جسم مورد گیرش در این مقاله برخلاف کارهای قبلی که در آن‌ها اجسام دارای سطوح تخت بودند دارای انحناء می‌باشد. استفاده از سطوح تخت به جهت رسیدن آسان گیرش به پایداری و تضمین آن بود. در این مقاله استفاده از توپ که یک جسم دارای انحناء است با وجود آن‌که کار گیرش پایدار و حفظ آن را دشوارتر می‌کند، در مطالعه‌ی فرآیند گیرش اجسام با هندسه‌ی متفاوت موثر و مفید می‌باشد. به این منظور مدلی از گیرش توپی نرم به‌وسیله‌ی یک جفت انگشتان موازی ارائه شده است که در آن نوک انگشتان نیمکره‌ای و نرم هستند و توسط یک کابل (به عنوان تاندون‌های دست انسان) رانده می‌شوند. این مقاله، نخست به نحوه‌ی استخراج معادلات دینامیکی انگشتان رباتیک به هنگام گیرش یک توپ نرم می‌پردازد. در گام بعد پس از ارائه‌ی روش‌های کنترل نیرو آشکارا و مجازی از روش کنترل امپدانس بر پایه‌ی کنترل موقعیت که یک نوع روش کنترل ترکیبی کنترل نیرو و موقعیت محسوب می‌شود برای کنترل این سیستم استفاده می‌کند. برای بررسی صحت این مطالعه شبیه‌سازی از انگشتان موازی نرم و توپ الاستیک در نرم‌افزار آدامز[5] ارائه می‌شود. در مرحله‌ی نهایی نیز با طراحی و پیاده سازی کنترلر امپدانس در محیط سیملینک[6] و لینک کردن این نرم‌افزار با نرم‌افزار آدامز نتایج حاصل از آن ارائه داده شده و مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند.

2- سینماتیک دست رباتیک

یک دست رباتیک با انگشتان سه درجه آزادی که نوک هریک از این انگشتان با یک ماده‌ی همگن الاستیک نیمکره‌ای پوشانده شده را در نظر بگیرید. در این دست از کابل غیر الاستیک برای راندن هر یک از انگشتان به وسیله‌ی سرو موتورهای به‌کار رفته در بازوی دست رباتیک استفاده شده است. به کارگیری کابل به منظور هم‌سایز کردن دست رباتیک با دست یک انسان بالغ و کنترل دست از راه دور می‌باشد. همچنین، از فنرهای پیچشی برای ایجاد امپدانس داخلی و سختی[7] مفاصل انگشتان رباتیکی استفاده شده است. "شکل 1" تصویری جانبی یک انگشت را نشان می‌دهد که مطابق با آن k_{i1}، k_{i2} و k_{i3} فنرهای پیچشی به کار رفته در انگشت i ام، q_{i1}، q_{i2} و q_{i3} مفاصل مربوط به انگشت i ام و T_i نیروی وارده به کابل در جهت محور Y می‌باشند. می‌خواهیم سینماتیک این انگشتان را در حال گیرش یک توپ

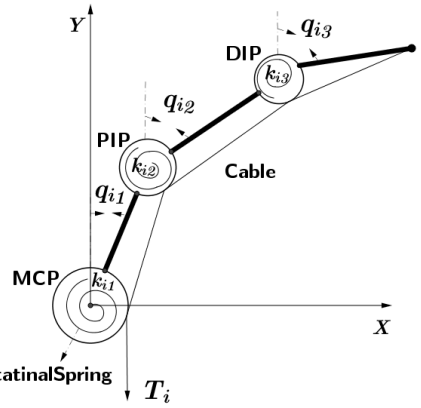

Fig. 1 Lateral view of a finger.

شکل 1 نمای جانبی از یک انگشت

[1] plasticity theory
[2] Real time
[3] Finite element
[4] Impedance Control
[5] Adams
[6] Simulink
[7] Stiffness

تشکیل شده از مواد همسان گرد الاستیک بررسی کنیم. برای ساده‌تر شدن معادلات و حل کردن آن در فضای دوبعدی از دست رباتیکی با یک جفت انگشتان موازی و مشابه استفاده شده است. علاوه بر این طراحی به گونه‌ای است که مرکز توپ از صفحه‌ی حرکتی دو انگشت رباتیکی عبور می‌کند و این موضوع باعث مقید کردن حرکت توپ در این صفحه در هنگام گیرش خواهد شد. در نتیجه تحلیل در فضای دو بعدی انجام می‌شود.

همان‌طور که در "شکل 2" نشان داده شده است، بردار $[q_{i1}, q_{i2}, q_{i3}]^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^3 \ \ i = 1,2$ زاویه‌ی مفاصل هر کدام از انگشتان را برای توصیف حرکت آنان در هر لحظه به ترتیب برای انگشتان راست و چپ نشان می‌دهد. $\varphi_i \in \mathbb{R}$ زاویه‌ی بین بردار نیروی عمودی انگشتان در هر لحظه از گیرش و تصویر آن بر راستای لینک آخر هر انگشت دست می‌باشد. بردار موقعیت مرکز توپ الاستیک نسبت به مبدا مرجع $P = [X, Y, \theta]^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^3$ نام‌گذاری شده است که در آن $\bar{P} = [X, Y]^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^2$ بیان کننده فاصله‌ی مبدا جسم از مبدا و θ نشان دهنده‌ی زاویه مختصات جسم نسبت به مبداء می‌باشد. همانند "شکل 2" $L_{ij} \ j = 1,2,3 \ i = 1,2$ بیان کننده طول لینک‌ها می‌باشد که اندیس اول مربوط به شماره‌ی انگشت و اندیس دوم زاویه مفصلی مربوطه را بیان می‌کند. فاصله بین دو انگشت با کمیت L بیان شده است. $r \in \mathbb{R}$ و $R \in \mathbb{R}$ به ترتیب شعاع نمیکره نوک انگشتان و شعاع توپ الاستیک می‌باشند. به‌علاوه، $C_i = [X_i, Y_i]^{\mathrm{T}}$ و $C_{\mathrm{OM}} = [X, Y]^{\mathrm{T}}$ به ترتیب مراکز نوک انگشتان الاستیک و توپ می‌باشند. ماکزیمم تغییر شکل شعاعی نوک انگشت و جسم الاستیک در هنگام تعامل دو جسم نرم با یکدیگر $\delta = \delta_i(\delta_i, \bar{P}) \in \mathbb{R}$ تعریف شده و همان طور که در شکل "شکل 3" نشان داده شده از مجموع تغییر شکل توپ (δ_{B}) و تغییر شکل انگشت ($\delta_{F_i} \ \ i = 1,2$) به‌دست می‌آید و می‌توان آن را به‌صورت زیر تعریف کرد [18]:

$$\delta_i = (\bar{R} + (-1)^i(\ [(x - x_i) \quad (y - y_i)] \begin{bmatrix} \mathrm{c}(\alpha_i) \\ -\mathrm{s}(\alpha_i) \end{bmatrix})), \tag{1}$$

در معادله‌ی (1) پارامترهای $\mathrm{s}(\alpha_i) = \sin(\alpha_i) \in \mathbb{R}$ ،$\bar{R} = r_i + R \in \mathbb{R}$ $\mathrm{c}(\alpha_i) = \cos(\alpha_i) \in \mathbb{R}$ و α_i زاویه‌ی بین راستای افق با نیروی عمود بر سطح به هنگام گیرش می‌باشند. α_i بیان کننده کیفیت گیرش است و به

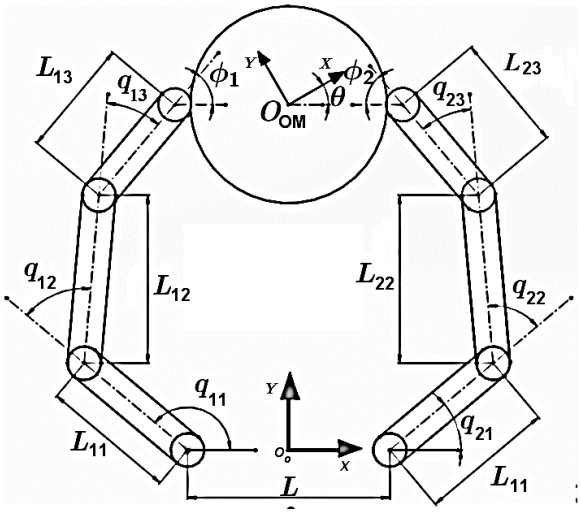

Fig. 2 dual robotic fingers grasping a ball, where O_o is a fixed coordinate frame.

شکل 2 یک جفت انگشت رباتیکی در حال گیرش توپ، O_o مختصات مرجع و ثابت می‌باشد.

صورت زیر قابل تعریف می‌باشد [8,7]:

$$\alpha_i = \alpha_i(q_i, \bar{p}) = \tan^{-1}(-\frac{y - y_i}{x - x_i}) \in \mathbb{R}, \tag{2}$$

در این تعامل که هر دو جسم انعطاف‌پذیر می‌باشند محل تماس انگشت و توپ دیگر یک نقطه نیست و شامل دو سطح فرو رفته در هم می‌باشد. به جهت بررسی این موضوع هندسه‌ی توپ الاستیک و نوک نرم نیمکره‌ای انگشت به شکل مثلثی[1] مشبندی شده و این تعامل مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است [19]. در واقع در حالت تماس دو سطح الاستیک ممکن است چند سطح مثلثی مش‌زده شده باهم در تماس قرار گیرند. برای این‌که بفهمیم مقدار نفوذ این سطوح درهم چقدر است ابتدا باید به دنبال راهی برای تشخیص تماس دو سطح باشیم. فاصله‌ی مراکز انگشت و توپ می‌تواند راه حلی برای تشخیص تماس بین این دو جسم باشد که به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$h_i = \begin{cases} 0 & h_i < \bar{R} \\ \delta_i & h_i \geq \bar{R} \end{cases}, \tag{3}$$

که در رابطه‌ی فوق h_i فاصله‌ی مراکز دوجسم نرم (فاصله‌ی $C_i = [X_i, Y_i]^{\mathrm{T}}$ تا$C_{\mathrm{OM}} = [X, Y]^{\mathrm{T}}$)، δ_i تغییر شکل شعاعی و $\bar{R} = r_i + R \in \mathbb{R}$ می‌باشند.

از دیگر مشخصه‌های مهمی که در مسئله‌ی گیرش یک شیء بوسیله‌ی انگشتان رباتیکی وجود دارد نیروی تماسی عمودی وارد شده دو جسم بر یکدیگر می‌باشد. مدل‌های مختلفی برای این نیرو باتوجه به نوع تماس در نظر گرفته شده‌اند [20-22]. هانت[2] و همکارانش نیروی عمودی وارد شده بر دو جسم (F_{N}) را به شکل زیر تعریف کرده‌اند [23]:

$$F_{\mathrm{N}} = K_{\mathrm{contact}}\delta^n + B_{\mathrm{contact}}\delta^p\dot{\delta}^q, \tag{4}$$

که در معادله‌ی (4) K_{contact}، B_{contact} به ترتیب ضرایب سختی و دمپر[3] و $\dot{\delta}$،δ به ترتیب تغییر شکل شعاعی (یا همان مقدار نفوذ) و سرعت نسبی تغییر شکل شعاعی می‌باشند. ضرایب n, p, q قابل تنظیم هستند و در تماس اجسام با جنس متفاوت دارای مقادیر ویژه‌ای می‌باشند. در [23] هانت و همکارانش ضرایب n, p, q را برای برخورد بین دو جسم الاستیک خطی به ترتیب 1، 1 و 0.66 در نظر گرفته‌اند.

با فرض غلتش ناب در گیرش شیء نرم توسط انگشتان می‌توان معادله‌ی قیود سینماتیکی را به‌دست آورد. هنگامی که دو جسم در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند با توجه به هندسه‌ی موجود می‌شود رابطه‌ی سرعت زاویه‌ای لغزشی بین انگشتان $(\dot{\varphi}_i)$ و شیء $(\dot{\theta})$ را نسبت به مختصات مرجع به

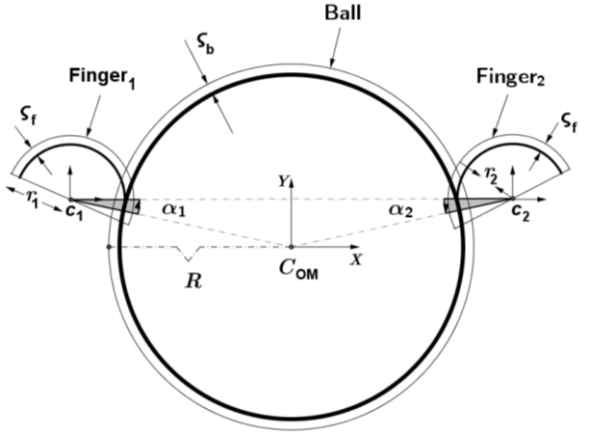

Fig. 3 kinematic contacts between dual fingers and a ball.

شکل 3 سینماتیک تماس بین یک جفت انگشت و توپ

[1] Triangle Mesh
[2] K. H. Hunt
[3] Damping

صورت زیر بیان کرد [24]:

$$(-1)^i R\dot{\theta} = -r_i\dot{\varphi}_i, \quad (5)$$

معادله (5) را می‌شود به صورت زیر نوشت:

$$\dot{\vartheta}_{r_i} = (-1)^i R\frac{d\theta}{dt} + r_i\frac{d\varphi_i}{dt} = 0 \quad (i = 1,2), \quad (6)$$

به‌طوری‌که در معادله‌ی (6) پارامترهای $\dot{\vartheta}_{r_i} = \dot{\vartheta}_{r_i}(q_i, p)$ و $\varphi_i = \varphi_i(q_i, \bar{p}) = \pi - (-1)^i\alpha - q_i{}^{\mathrm{T}}e_i \epsilon \mathbb{R}$ و $e_i = [1 \quad 1 \quad 1]^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^3$ برای $i = 1,2$ است. در [25] نشان داده شده ترم $\dot{\vartheta}_{r_i}$ انتگرال‌پذیر است و قید هلونومیک ϑ_{r_i} را می‌توان با انتگرال گرفتن به‌صورت زیر به‌دست می‌آورد:

$$\vartheta_{r_i} = (-1)^i R\theta + r_i\varphi + c_i = 0, \quad (7)$$

که در معادله فوق $\vartheta_{r_i} = \vartheta_{r_i}(q_i, p)$ و $c_i \in \mathbb{R}$ ثابت انتگرال می‌باشد.

هر کدام از انگشتان این دست رباتیک و جسم گیرش شده با فرض حرکت در صفحه دارای سه درجه آزادی هستند. چهار نیروی قیدی عمودی و مماسی نیز در محل تماس انگشت دست رباتیک با شیء وجود دارد. پس در مجموع سیزده متغیر داریم که با چهار معادله‌ی قیدی غلتش ناب و نه معادله استخراج شده از انگشتان و توپ الاستیک بایستی حل بشوند.

3- دینامیک دست رباتیک

استخراج معادلات دینامیکی انگشتان رباتیک با نوک انگشتان انعطاف‌پذیر و شیء الاستیک در حالت کلی به‌دلیل درجات آزادی بی‌نهایت پیچیده خواهد بود، ولی با برخی از ساده‌سازی‌ها می‌شود این معادلات را استخراج نمود. در حالت کلی فرمولاسیون لاگرانژین یک شیء انعطاف‌پذیر به‌صورت زیر قابل تعریف است [26]:

$$m\frac{d^2p(\varphi_{ijk},t)}{dt^2} + \mu\frac{dp(\varphi_{ijk},t)}{dt} + \frac{\partial E}{\partial p(\varphi_{ijk},t)} = f_{\mathrm{p}}(t), \quad (8)$$

که در معادله فوق $p(\varphi_{ijk},t)$ موقعیت ذره φ_{ijk} در لحظه t، m جرم هر ذره، μ ضریب دمپینگ، $\partial E/\partial p(\varphi_{ijk},t)$ نیروی الاستیک اجسام (انرژی پتانسیل کشسانی اجسام) و $f_{\mathrm{p}}(t)$ نیروی وارد شده به هر ذره در لحظه t می‌باشد. در نظر گرفتن این فرمولاسیون لاگرانژین دینامیکی برای اجسام انعطاف‌پذیر در کنار فرمولاسیون لاگرانژین اجسام صلب سیستم نیازمند حل‌های عددی پیچیده می‌باشند. از دیگر روش‌هایی که برای جابه جایی‌های بسیار بزرگ هم خوب عمل می‌کند در نظر گرفتن سیستم فنر و دمپر به صورت موازی برای تغییر شکل الاستیک و همچنین سیستم فنر و دمپر به صورت سری برای تغییر شکل پلاستیک می‌باشند که به ترتیب توسط آقایان ویجت و مکسول در "شکل 4" نشاند داده شده‌اند[27]. بنابراین، مطابق با "شکل 5"تغییر شکل سر نرم انگشتان و توپ الاستیک را می‌توان تحت سیستم فنر و دمپر موازی مدل کرد. در نتیجه در هنگام تماس دو شیء دو سیستم مدل شده بر مبنای فنر و دمپر موازی با هم ادغام شده و سیستم فنر و دمپر جدیدی را تشکیل می‌دهند که روابط بین سختی فنر و ضریب

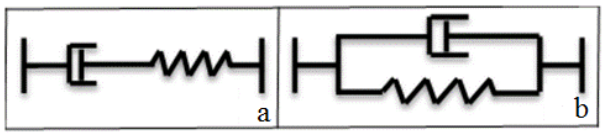

Fig. 4 a) Voigt model for Elastic deformation, b) Maxwell model for plastic deformation

شکل 4 الف)مدل ویجت[1] برای تغییر شکل الاستیک ب)مدل مکسول[2] برای تغییر شکل پلاستیک

[1] Voigt
[2] Maxwell

دمپینگ این سیستم در بخش سینماتیک برای نیروی عمودی بین دو جسم کروی توضیح داده شده است.

برای استخراج معادلات دینامیکی این سیستم از فرمولاسیون لاگرانژ استفاده می‌شود که تابع لاگرانژین به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$L = K - P, \quad (9)$$

که در معادله (9) K انرژی جنبشی کل سیستم و P انرژی پتانسیل کل می‌باشد. با فرض انجام معادلات در صفحه و فرض نیروی جاذبه در راستای عمود بر این صفحه P مربوط به نیروی جاذبه صفر است و P فقط شامل انرژی پتانسیل کشسانی فنرهای پیچشی مفاصل و انرژی پتانسیل الاستیک حاصل از تعامل نوک‌انگشت و توپ خواهد بود.

انرژی جنبشی $K = K(q,\dot{v}) \in \mathbb{R}$ برابر است با:

$$K(q,\dot{v}) = \sum_{i=1,2}^{2} K_i + K_{\mathrm{o}}, \quad (10)$$

که در آن $q = [q_1{}^{\mathrm{T}} \quad q_2{}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^6$ و $\dot{v} = [\dot{q}^{\mathrm{T}} \quad \dot{p}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^9$ هستند. $K_i = \frac{1}{2}\dot{q}_i{}^{\mathrm{T}}H_i(q_i)\dot{q}_i \in \mathbb{R}$ انرژی جنبشی هر انگشت می‌باشد که در آن $H_i(q_i) \in \mathbb{R}^{3\times3}$ ماتریس مثبت معین اینرسی انگشتان است. $K_{\mathrm{o}} = \frac{1}{2}\dot{p}^{\mathrm{T}}H_{\mathrm{o}}\dot{p}$ انرژی جنبشی کره است که در آن $H_{\mathrm{o}} = \mathrm{diag}(m,m,I) \in \mathbb{R}^{3\times3}$ ماتریس مثبت معین اینرسی شیء است و کمیت های m, I به ترتیب جرم و اینرسی شیء می‌باشند.

انرژی پتانسیل $P(\bar{v}) \in \mathbb{R}$ سیستم برابر است با:

$$P(\bar{v}) = \sum_{i=1}^{2} P_{E_i}(\delta_i) + \sum_{i=1}^{2} P_{E_i}(q_i), \quad (11)$$

که در آن $P_{E_i}(q_i)$ و $P_{E_i}(\delta_i)$ به ترتیب انرژی الاستیک ذخیره شده در هنگام گیرش شی به‌وسیله‌ی انگشتان و انرژی کشسانی فنرهای پیچشی تعبیه شده در مفاصل می‌باشند و از روابط زیر قابل تعریف هستند.

- انرژی پتانسیل نوک انگشتان و شیء

$$[P_{\mathrm{E}}(\delta)]_0^t = \int_0^t F_{\mathrm{N}}(\delta)\frac{d}{dt}\delta dt = P_{\mathrm{E}}(\delta) - p_{\mathrm{E_o}}, \quad (12)$$

که $p_{\mathrm{E_o}} = p_{\mathrm{E}}(\delta_i(q_i(0),\bar{p}(0)))$ انرژی کشسانی اولیه هنگام نفوذ می‌باشد.

- انرژی کشسانی فنرهای پیچشی

$$P_{\mathrm{E_i}}(q_i) = \frac{1}{2}k_1q_1{}^2 + \frac{1}{2}k_2(q_2 - q_1)^2 + \frac{1}{2}k_3(q_3 - q_2)^2, \quad (13)$$

که در رابط فوق کمیت‌های k, q به ترتیب سختی فنر و زاویه مفاصل انگشتان می‌باشند و فنرهای پیچشی خطی فرض شده‌اند.

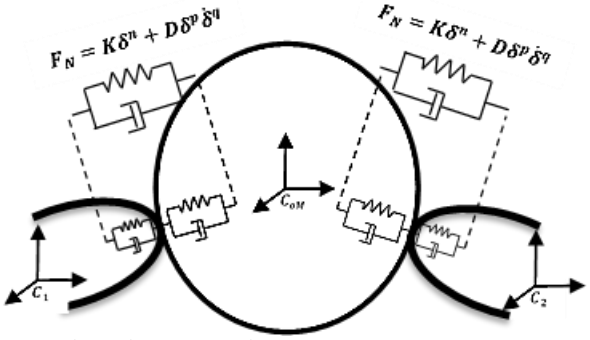

Fig. 5 soft-tips fingers and soft ball is modeled as a spring and a damper according to Voigt and Hunt nonlinear models

شکل 5 سرانگشتان نرم و توپ نرم به شکل یک سیستم فنر و دمپر مطابق با مدل‌های غیرخطی هانت و ویجت مدل شده‌اند.

انرژی نیروهای قیدی که کار انجام شده توسط آنان صفر است (مانند نیروهای مماسی در لحظه تماس دو شیء) برابر است با:

$$S_{\mathrm{T}} = \sum_{i=1,2}^{2} \varphi_{r_i}(q_i, p)\lambda_i = {\varphi_r}^{\mathrm{T}}\lambda, \tag{14}$$

که در معادله بالا $\lambda = [\lambda_1 \quad \lambda_2]^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^2$ ضرایب معادله لاگرانژ و ${\varphi_r}^{\mathrm{T}} = [\varphi_{r_1} \quad \varphi_{r_2}]^{\mathrm{T}} = 0$ خواهد بود.

با این تعاریف معادلات لاگرانژین به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial}{\partial \dot{v}}L\right] - \frac{\partial}{\partial v}L - \frac{\partial}{\partial v}{\varphi_r}^{\mathrm{T}}\lambda = u, \tag{15}$$

که در معادله فوق u بردار گشتاور ورودی به سیستم می‌باشد.

معادلات کلی سیستم به شکل زیر خواهد شد:

- معادلات انگشتان رباتیکی

$$\begin{aligned} H_i(q_i)\ddot{q} + C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + B_i(q_i) \\ = \tau_i + (-1)^i F_{\mathrm{N}} {J_i}^{\mathrm{T}}(q_i)\begin{bmatrix} \mathrm{c}(\alpha_i) \\ -\mathrm{s}(\alpha_i) \end{bmatrix} \\ + r_i\left({J_i}^{\mathrm{T}}(q_i){D_i}^{-1}\begin{bmatrix} \mathrm{s}(\alpha_i) \\ \mathrm{c}(\alpha_i) \end{bmatrix} - e_i\right)\lambda_i, \end{aligned} \tag{16}$$

که در معادله‌ی (16) $H_i(q_i)$، $B_i(q_i)$ و $C_i(q_i, \dot{q}_i)$ به ترتیب ترم‌های اینرسی، کوریولیس و کشسانی مربوط به فنرهای پیچشی می‌باشند. ترم دوم سمت راست معادله بیان کننده گشتاور تولیدی توسط نیروهای عمودی و ترم‌های سوم سمت راست معادله بیان کننده گشتاور تولیدی نیروهای تماسی می‌باشند.

- معادلات شیء همگن الاستیک

$$\begin{aligned} H_o\ddot{p} - \sum_{\mathrm{i}=1,2}^{2}(-1)^i F_{\mathrm{N}}\begin{bmatrix} \mathrm{c}(\alpha_i) \\ -\mathrm{s}(\alpha_i) \\ 0 \end{bmatrix} \\ = \sum_{i=1,2}^{2}((-1)^{\mathrm{i}} R\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} - r_i {D_i}^{-1}\begin{bmatrix} \mathrm{s}(\alpha_i) \\ \mathrm{c}(\alpha_i) \\ 0 \end{bmatrix})\lambda_i, \end{aligned} \tag{17}$$

که در آن α_i در محدوده زیر تعریف می‌شود.

$$-\frac{\pi}{2} \le \alpha_i \le \frac{\pi}{2} \tag{18}$$

در معادله‌ی (17) D_i فاصله‌ی مرکز نیمکره‌ای انگشت i ام تا مرکز توپ در لحظه‌ی گیرش می‌باشد و از روابط زیر قابل تعریف است:

$$\begin{aligned} \cos(\alpha_i) &= -(-1)^i \frac{x - x_i}{D_i}, \\ \sin(\alpha_i) &= -(-1)^i \frac{y - y_i}{D_i}, \end{aligned} \tag{19}$$

در معادله‌ی (17) چون هر انگشت دست رباتیک توسط یک سرو موتور و کابل رانده می‌شود گشتاو ورودی به انگشت (τ_i) باید به نوعی به گشتاور موتور (τ_m) مربوط شود. در ادامه به توضیح چنین رابطه‌ای پرداخته شده است. طول کابل همان‌طور که در "شکل 6" نشان داده شده برابراست با:

$$h(\theta) = \sum_{i=1}^{4} l_i + \sum_{i=1}^{3} r_i q_i, \tag{20}$$

که در آن $h(\theta)$ طول کابل، l_i فواصل که در طول کشش ثابت و r_i شعاع پولی‌های مفصل‌های q_i می‌باشند. به‌دلیل برابری کار انجام شده توسط جابه‌جایی کابل‌ها و گشتاور ورودی انگشتان با صرف‌نظر از نیروهای اتلافی داریم [28,20]:

$$\tau_i = \frac{\partial h(\theta)}{\partial \theta}F, \tag{21}$$

در معادله‌ی (21) F نیروی کابل و $\partial h(\theta)/\partial\theta$ نرخ جابه جایی کابل می‌باشد. با استفاده از یک سرو موتور برای راندن کابل رابطه‌ی گشتاور موتور τ_{m} و نیروی کابل F برابر است با:

$$\tau_{\mathrm{m}} = \frac{\pi\theta a}{180}F, \tag{22}$$

که در معادله (22) θ زاویه‌ی سرو موتور (معمولا بین صفر تا 180 درجه)، a شعاع روتور موتور با فرض متصل بودن کابل برروی محیط آن و F نیروی کابل می‌باشد. با جای‌گذاری معادله (22) در معادله‌ی (21) و محاسبه‌ی $\partial h(\theta)/\partial\theta$ داریم:

$$\tau_i = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix}\frac{180\tau_{\mathrm{m}}}{\pi\theta a} \tag{23}$$

در معادله (23) r_1، r_2 و r_3 شعاع‌های پولی‌های انگشت می‌باشند و بقیه پارامترها به مانند معادله‌ی (22) تعریف خواهد شد.

همان‌طور که در بخش سینماتیک اشاره شد در کل 13 معادله و 13 مجهول به‌دست می‌آید و به همین دلیل تمام پارامترها قابل محاسبه است.

4- سیستم کنترلی دست رباتیک

قبل از بحث راجع به کنترلر پیشنهادی در این مقاله هدف آن است که در مورد یک روش کنترلی صحبت شود. همان‌گونه که در ابتدای مقاله ذکر شد، یکی از روش‌های پر کاربرد به ویژه در صنعت برای کنترل پنجه‌ی رباتیک روش کنترل امپدانس می‌باشد که در ادامه به اجمال در مورد این سیستم کنترلی توضیح مختصری خواهیم داد. در این صورت می‌توان به نوآوری این مقاله در اعمال کنترلر طراحی شده بر سیستم موجود پی‌برد.

به طورکلی روش‌های کنترل نیرو را می‌شود به دو دسته‌ی کنترل نیروی آشکارا[1] و کنترل نیروی مجازی[2] تقسیم‌بندی کرد. در روش کنترل نیروی آشکارا از اختلاف بین نیروی تماسی یا گشتاور ایجاد شده در تعامل پنجه‌ی رباتیک با محیط و مقدار مطلوب نیرو سیگنالی به کنترلر نیرویی فرستاده می‌شود. این سیگنال به جهت رسیدن به مقدار نیرو مورد نظر گیرش مسیری مطلوب را برای ربات تولید می‌کند. "شکل 7" نشان دهنده نمونه‌ی ساده‌ای از این روش کنترلی می‌باشد. دسترسی کامل به دینامیک ربات به ویژه در کاربردهای عملی مقدور نیست از این رو کنترل مستقیم گشتاور اعمال شده بر مفاصل انگشتان کاری دشوار می‌باشد و این به معنی مناسب نبودن استفاده از روش کنترل آشکارا در چنین ربات‌هایی است. در روش کنترل نیروی مجازی مقدار نیروی مطلوب به طور مستقیم به مانند روش کنترل آشکارا محاسبه نمی‌شود. در حقیقت در این روش با استفاده از نیروهای اندازه‌گیری شده‌ی حاصل از تعامل ربات با محیط یک سیستم فنر و دمپر خطی و یا غیرخطی برای این نیروها در نظر گرفته می‌شود و به جای کنترل مستقیم نیرو، موقعیت و یا سرعت ربات کنترل خواهد شد. این روش خود نیز به چند دسته کنترل سختی، کنترل دمپینگ و کنترل امپدانس تقسیم بندی می‌شود که تشریح کامل آن‌ها در [29] انجام شده است. در "شکل 8" کنترل امپدانس از روش‌های کنترل نیرو مجازی نشان داده شده است. از آن‌جایی که

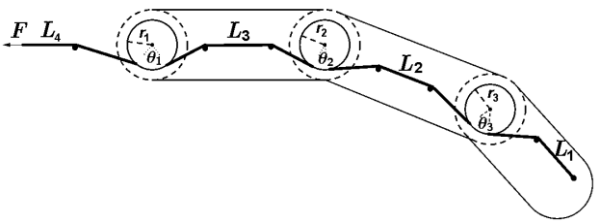

Fig. 6 cable and pulley system for driven fingers

شکل 6 سیستم کابل و پولی برای انگشتان رانده شده

[1] explicit force control
[2] implicit force control

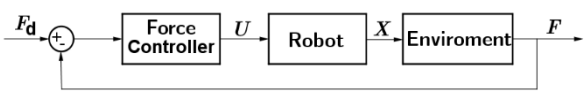

Fig. 7 General scheme of explicit force control

شکل 7 دیاگرام عمومی کنترل نیرو آشکارا

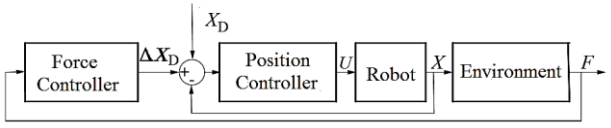

Fig. 8 General scheme of explicit force control

شکل 8 دیاگرام عمومی کنترل نیرو مجازی

نوآوری و هدف این مقاله کنترل و شبیه‌سازی تعامل بین دو جسم نرم می‌باشد و نرم بودن اجسام دلیلی بر دینامیک غیر خطی ناشناخته‌ی آن‌ها در واقعیت است، به جای کنترل مستقیم گشتاور که در روش کنترل نیروی آشکارا کاربردی است در این مقاله از یک سیستم ترکیبی کنترل نیرو و موقعیت استفاده شده است.

از جمله نوآوری‌های دیگر این سیستم آن است که فیدبک گرفتن نیرو توسط هیچ سنسور نیرویی نمی‌باشد و این نیرو با استفاده از روابط گفته شده و فیدبک گرفتن از مقدار نفوذ و سرعت نسبی نفوذ دو جسم در یکدیگر تخمین زده می‌شود و کنترل غیرمسقیم نیرو توسط کنترلر امپدانس پایداری استاتیکی سیستم را ضمانت می‌کند. در حقیقت این مقاله با استفاده از روش ترکیبی توانسته است تنها با فیدبک گرفتن از موقعیت و سرعت انگشتان و شیء که هر دو نرم هستند و همچنین تنها با کنترل موقعیت سیستم مقدار نیروی گیرش را در یک مقدار نزدیک به مقدار مطلوب نگه دارد. در "شکل 9" سیستم کنترلی ترکیبی کنترل نیرو و موقعیت نشان داده شده است. در این کنترلر نیازی به فیدبک گرفتن نیرو توسط هیچ سنسور نیرویی نمی‌باشد و این نیرو با استفاده از روابط گفته شده و فیدبک گرفتن از مقدار نفوذ و سرعت نسبی نفوذ دو جسم در یکدیگر تخمین زده می‌شود و کنترل غیرمسقیم نیرو توسط کنترلر امپدانس پایداری استاتیکی سیستم را ضمانت می‌کند. همان‌طور که در "شکل 9" نشان داده شده است سیستم کنترلی شامل ماژول کنترلی، کنترلر امپدانس، کنترلر PID برای کنترل موقعیت نوک انگشتان و همچنین ماژول ارتباط دهنده مقدار جابه‌جایی نوک انگشت نسبت به موقعیت سرو موتور می‌باشد. ورودی سیستم امپدانسی اختلاف نیروی مطلوب F_{d} و همچنین نیروی تخمین زده شده از لحظه‌ی تماس بین دو جسم F_{e} می‌باشد. خروجی این سیستم هم به عنوان یک متغیر جابه‌جایی X_{f} که اختلاف بین موقعیت سیستم امپدانس و مقدار مطلوب است می‌باشد. مجموع مقادیر X_{f} و X_{d} سیگنالی تولید می‌کند که اختلاف این سیگنال و مقدار فیدبک گرفته شده از موقعیت شیء سیگنال خطا برای ورودی کنترلر PID است. خروجی کنترلر موقعیت پس از کم شدن از مقدار موقعیت شیء مقادیر را به عنوان ورودی برای تولید زاویه‌ی مطلوب سرو موتور توسط تابع ارتباط دهنده در هر لحظه محاسبه می‌کند. ماژول کنترلی که توسط نرم‌افزار آدامز ساخته می‌شود، در واقع ارتباط دهنده بین دو نرم‌افزار سیملینک متلب و آدامز می‌باشد. در حقیقت پس از شبیه‌سازی‌های حاصله در نرم‌افزار آدامز، ماژول ساخته شده توسط این نرم‌افزار همان سیستم کنترلی در محیط سیملینک به حساب می‌آید که باید با اعمال روش کنترلی و کنترلر مناسب بر روی آن کنترل شود. هر یک از انگشتان دست که به طو ر موازی و مشابه طراحی شده‌اند توسط یک سرو موتور به‌طور مجزا رانده می‌شوند. رابطه‌ی

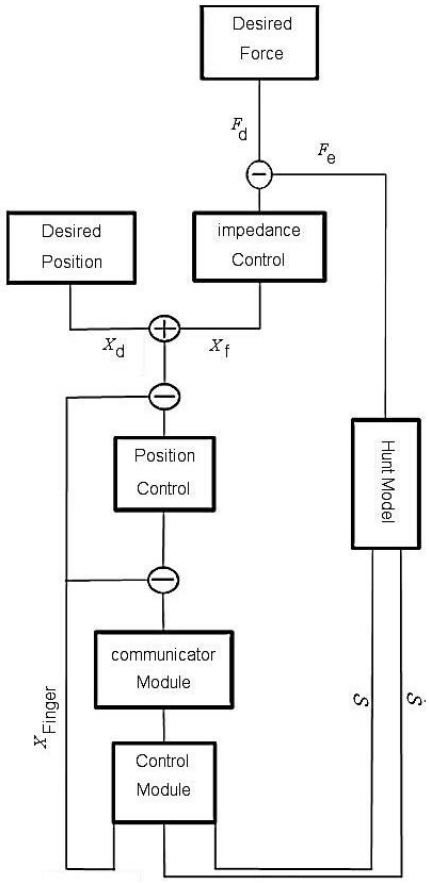

Fig. 9 the diagram of Control System in Simulink

شکل 9 دیاگرام سیستم کنترلی در سیمولینک

دینامیکی انگشتان در فضای دکارتی برابراست با:

$$\tau_i = \varepsilon(m_i\ddot{x}_i + b_i\dot{x}_i + k_i x_i) \qquad (i = 1,2), \tag{24}$$

که در معادله‌ی (24) τ_{i} گشتاور اعمال شده به‌وسیله‌ی موتور به انگشت i ام، m_i جرم معادل انگشت i ام ، b_i ضریب اصکاک ویسکوز یا ضریب دمپینگ انگشت i ام ، k_i ضریب اصطکاک الاستیک انگشت i ام و ε ضریب تبدیل از فضای مفصلی به فضای دکارتی می‌باشند.

در این مقاله با فرض این‌که موتور بتواند تمام نیازهای کنترلی را برآورده سازد و تمامی شرایط اولیه برای این سیستم صفر در نظر گرفته شود، تابع تبدیل برای این سیستم برابر است با:

$$G_i(s) = \frac{1}{\varepsilon(m_i s^2 + b_i s + k_i)} \qquad (i = 1,2), \tag{25}$$

که در معادله‌ی (25) $G_i(s)$ تابع تبدیل برای انگشت i ام می‌باشد. سایر ضرایب در معادله‌ی (25) به مانند معادله‌ی (24) تعریف می‌شوند. با نادیده گرفتن اثرات حاصل از گیرش ضربه‌ای و در نظر گرفتن گیرش شبه استاتیک[1] می‌شود از نقش ترم‌های مربوط به شتاب و سرعت شیء در مقابل ترم‌های مربوط به موقعیت شیء در مسئله‌ی تغییر شکل شیء صرف‌نظر کرد. با این فرض مدل مکانیکی شیء تحت تاثیر نیروهای گیرشی را می‌شود به صورت زیر تشریح کرد:

$$-f_i(k) \approx -f_{\mathrm{r}}(k) + k_0{}^{*}\, e_i\,(k), \tag{26}$$

$$e_i\,(k) = x_{\mathrm{ir}}(k) - x_{\mathrm{r}}(k), \tag{27}$$

به طوریکه در معادله‌ی (26) k_0 ماتریس سختی شیء، $f_{\mathrm{d}}(\mathrm{k})$ مقدار نیروی مرجع و $f_{\mathrm{i}}(\mathrm{k})$ مقدار نیروی واقعی وارد شده از طرف انگشت بر روی شیء می‌باشد. در معادله‌ی (26) وقتی در مرتبه‌ی k نمونه برداری

[1] quasi-static

$e_i(k)=0$ شد مقدار نیروی واقعی و مرجع برابر شده است و مطلوب کنترلی حاصل خواهد شد. مطابق با معادله (27) بیان کننده $e_i(k)$ تغییر شکل شیء در جهت x می‌باشد. در معادله‌ی (27) x_{ir} و x_{r} به ترتیب موقعیت واقعی شیء و موقعیت مرجع می‌باشند.

مفهوم کنترل امپدانس در واقع بدین منظور تلقی می‌شود که به جای نیرو تعاملی وارد شده از طرف محیط به ربات یک سیستم فنر و دمپر برای آن نیرو در نظر گرفته شود که این رابطه همان معادله امپدانسی سیستم است [32-30]. در این مقاله معادله‌ی امپدانسی سیستم خطی و به‌صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$M_{\mathrm{d}}\left(\ddot{X}_i-\ddot{X}_{\mathrm{d}}\right)+B_{\mathrm{d}}\left(\dot{X}_i-\dot{X}_{\mathrm{d}}\right)+K_{\mathrm{d}}\left(X_i-X_{\mathrm{d}}\right)=F_{\mathrm{d}}-F_{\mathrm{e}}, \quad (28)$$

که $F_{\mathrm{d}}, F_{\mathrm{e}}$ به ترتیب نیروی تماسی و مقدار مطلوب نیرو می‌باشند. در معادله‌ی (28) X_i، $\dot{X}_i$ و $\ddot{X}_i$ به ترتیب موقعیت، سرعت و شتاب واقعی نوک انگشتان و X_{d}، $\dot{X}_{\mathrm{d}}$ و $\ddot{X}_{\mathrm{d}}$ به ترتیب موقعیت، سرعت و شتاب مطلوب می‌باشند. تابع تبدیل این سیستم امپدانسی برابر است با:

$$X_{\mathrm{f}}(s)=\frac{F_{\mathrm{d}}(s)-F_{\mathrm{e}}(s)}{M_{\mathrm{d}}s^2+B_{\mathrm{d}}s+K_{\mathrm{d}}} \qquad (i=1,2), \quad (29)$$

که در معادله‌ی (29) $X_{\mathrm{f}}(s)$ اصلاح کننده‌ی موقعیت برای نگه داشتن نیروی گیرش در مقدار مطلوب می‌باشد. چون M_{d}، B_{d} و K_{d} اعداد حقیقی هستند می‌توان معادله‌ی امپدانسی رو فیلتر پایین گذر رسته دو فرض نمود که در آن تمامی این پارامترها متغیر با زمان و قابل تنظیم هستند. انتخاب M_{d} بزرگ باعث برخورد شدید با محیط، انتخاب B_{d} بزرگ دلیلی بر داشتن سیستمی بدون ارتعاش با پاسخ زمانی طولانی و انتخاب K_{d} بزرگ منجر به ردگیری بهتر می‌شود . بهتر است این پارامترها به گونه‌ای طراحی شوند که سیستم در حالت میرایی بحرانی[1] یا فوق میرایی[2]قرار گیرد [33].

در طراحی سیستم کنترلی در نظر گرفته شده در این مقاله فیدبک گرفتن از موقعیت شیء به منظور استفاده از یک بازیابنده موقعیت[3] است که معمولا در سیستم به هنگام که نیاز به ورودی کنترلی دقیق دارند در نظر گرفته می‌شود.

دستور موقعیت بازیابنده (X_{id}) شامل موقعیت مرجع انگشتان، موقعیت اصلاح شده از کنترل امپدانس و اطلاعات موقعیت راجع به تغییر شکل شیء می‌باشد. X_{id} به صورت زیر تعریف می‌شود [33].

$$X_{\mathrm{id}}(k)=X_{\mathrm{ir}}(k)+X_{\mathrm{f}}(s)(k) \qquad (i=1,2), \quad (30)$$

که در معادله‌ی (30) $X_{\mathrm{id}}(k)$ بازیاینده‌ی موقعیت انگشت i ام، $X_{\mathrm{ir}}(k)$ موقعیت مرجع، $X_{\mathrm{f}}(s)$ مقدار موقعیت خروجی سیستم امپدانس و k شماره نمونه برداری سیستم کنترلی می‌باشد.

در حالی که انگشتان شیء را در مکان موردنظر گیرش کنند مقدار $X_{\mathrm{f}}(s)$صفر خواهد بود و در نتیجه داریم:

$$X_{id}(k)=X_{ir}(k) \qquad (i=1,2), \quad (31)$$

همان طور که در پیش گفته شد برای کنترل موقعیت در حلقه داخلی سیستم کنترلی از کنترلر PID که رایج ترین کنترلر در صنعت است استفاده کردیم و قانون کنترلی آن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\tau_i(k)=k_{i\mathrm{D}}\dot{\mathrm{err}}_i(k)+k_{i\mathrm{P}}\,\mathrm{err}_i+k_{i\mathrm{I}}\int \mathrm{err}_i\,dt \qquad (i=1,2), \quad (32)$$

که در معادله (32) ضرایب $k_{i\mathrm{D}}$، $k_{i\mathrm{P}}$ و $k_{i\mathrm{I}}$ به ترتیب ضرایب دیفرانسیلی، تناسبی و انتگرالی کنترل می‌باشند. err_i بیان کننده خطای ورودی به کنترلر و از معادله‌ی زیر بدست خواهد آمد:

$$err_i=X_{\mathrm{id}}(k)-X_{\mathrm{OBJ}} \qquad (i=1,2), \quad (33)$$

که در معادله (33) $X_{id}(k)$ و X_{OBJ} به ترتیب موقعیت باز یابنده و اطلاعات موقعیت تغییر شکل شیء می‌باشد.

5- شبیه‌سازی دست رباتیک

پس از طراحی سیستم انگشتان در نرم‌افزار سالیدورکز[4] برای شبیه‌سازی دینامیکی باید این سیستم طراحی شده را وارد نرم‌افزار آدامز کرد. از آن‌جایی که هدف این مقاله مطالعه بر روی گیرشی است که از تعامل دو جسم نرم بدست آمده است و امکان طراحی اجزای انعطاف پذیر در نرم افزار سالیدورکز وجود ندارد برای ایجاد اجزاء نرم باید از قسمت انعطاف‌پذیر نرم‌افزار آدامز و یا از دیگر نرم افزارهای اجزاء محدود نظیر نرم‌افزار کامسول[5] استفاده شود. پس از وارد کردن تمامی اجزای سیستم به نرم‌افزار آدامز و مونتاژ کردن آن‌ها، سیستم انگشتان و توپ برای کنترل و شبیه‌سازی این نوع گیرش مهیا قرار می‌گیرند. با اعمال روش کنترل امپدانس که در بخش پیش توضیح داده شد در نرم‌افزار سیملینک و لینک کردن این نرم‌افزار با نرم‌افزار آدامز ما توانستیم مسئله‌ی تعامل دو جسم نرم در حال گیرش را به صورت به هنگام شبیه‌سازی و کنترل کنیم. در زیر در مورد مقادیر به‌کار رفته و نتایج حاصل از آن بحث خواهد شد. به‌منظور انعطاف‌پذیر در نظر گرفتن نوک انگشتان و همچنین توپ، توپی به شعاع 30 میلی‌متر باپوسته‌ای به ضخامت 10 میلی‌متر دارای 1374 گره و همچنین یک نیم‌کره با فرض نیمکره‌ای بودن نوک انگشتان با شعاع 7.6 میلی‌متر با پوسته‌ای به شعاع 2 میلی‌متر دارای 356 گره به روش مثلثی در نرم‌افزار آدامز مش‌بندی شد. همان‌طور که می‌دانیم مش‌بندی یکی از تکنیک‌های اجزاء محدود است و عواملی زیادی را برای آن باید در نظر گرفت. نوع اجزاء (صلب یا پوسته)، شکل اجزاء (چندوجهی و ...)، شکل لبه‌ها (منحنی، مستقیم و مخلوط)، نرخ رشد، جنس اجزاء و پارامترهای دیگر از جمله این عوامل هستند و انتخاب هرچه دقیق‌تر آن‌ها منجر به رسیدن به نتیجه‌ای نزدیک به واقعیت خواهد شد. در جدول [1] لیستی از پارامترهای انتخاب شده برای مش‌بندی توپ و در جدول [2] لیستی از آن‌ها برای نوک انگشتان ارائه شده است.

به‌منظور شبیه‌سازی امپدانس داخلی دست از یک سیستم کابل غیرالاستیک متصل به نوک انگشتان و فنرهای پیچشی به سختی 100 نیوتن

جدول 1 پارامترهای مش‌بندی شیء

Table 1 mesh parameterization of the object

پارامترهای فیزیکی	مقادیر ثابت	واحد
نوع اجزاء	پوسته	-
شکل اجزاء	مثلثی	-
رسته اجزاء	درجه دوم	-
شکل لبه‌ها	مخلوط	-
سایز اجزاء	23	mm
حداقل سایز اجزاء	5	mm
نرخ رشد	1.5	-
ضخامت پوسته	2	mm
زاویه هر جزء	45	degree
چگالی جسم	1.127	gr/cm^2
ضریب پوآسون	0.29	-
مدول الاستیسیته	0.0044	MPa

[1] critically damping
[2] over dampin
[3] Revised position
[4] SolidWorks
[5] Comsol

بر متر برای شبیه‌سازی سختی مفاصل استفاده شده است. پارامترهای فیزیکی، مقادیر اولیه و پارامترهای کنترلی شبیه‌سازی در جداول [3-5] آورده شده‌اند.

جدول 2 پارامترهای مش‌بندی انگشت

Table 2 mesh parameterization of the finger

پارامترهای فیزیکی	مقادیر ثابت	واحد
نوع اجزاء	پوسته	-
شکل اجزاء	مثلثی	-
رسته اجزاء	درجه دوم	-
شکل لبه‌ها	مخلوط	-
سایز اجزاء	2	mm
حداقل سایز اجزاء	0.6	mm
نرخ رشد	1.2	-
ضخامت پوسته	2	mm
زاویه هر جزء	45	degree
چگالی جسم	1.127	gr/cm^2
ضریب پوآسون	0.49	-
مدول الاستیسیته	1	MPa

جدول 3 پارامترهای فیزیکی انگشتان رباتیکی و شیء

Table 3 Physical Parameters of the robotics Fingers and Object

پارامترهای فیزیکی	مقادیر ثابت	واحد
L_{11}=L_{21}	25.91	mm
L_{12}=L_{22}	38.89	mm
L_{13}=L_{23}	32.54	mm
m_{11}=m_{21}	9.83	gr
m_{12}=m_{22}	16.41	gr
m_{13}=m_{23}	11.2	gr
r_1=r_2=r	7.6	mm
I_{11}=I_{21}	335.3	gr.mm^2
I_{12}=I_{22}	874.0	gr.mm^2
I_{13}=I_{23}	6528.0	gr.mm^2
R	30	mm
k_{13}=k_{12}=k_{11}	100	N/m
K_{23}=k_{22}=k_{21}	100	N/m
M_{ball}	135.71	gr

جدول 4 مقادیر اولیه

Table 4 Initial values

پارامترهای فیزیکی	مقادیر ثابت	واحد
q_{11}	25.91	degree
q_{12}	38.89	degree
q_{13}	32.54	degree
q_{21}	9.83	degree
q_{22}	16.41	degree
q_{23}	11.2	degree
θ	7.6	degree
x	335.3	mm
y	135.71	mm

جدول 5 پارامترهای کنترلی، نیروی تماسی و مقدار جابه جایی مطلوب

Table 5 The parameters of Control, Desired Contact Force and displacement

پارامترهای فیزیکی	مقادیر ثابت	واحد
M_d	2	-
B_d	1000	-
K_d	2000	-
p	0.97	-
I	0.00002	-
d	0.0000001	-
F_d	2.5	N
X_d	36.8	mm
$K_{contact}$	500	N/m
$B_{contact}$	4	N*s/m

$K_{contact}$ و $B_{contact}$ ضرایب سختی و دمپر معادله‌ی (4) می‌باشند که مقادیر آن‌ها در جدول [5] آورده شده‌اند. طریقه‌ی مجاسبه‌ی این پارامترها در [22] و [34] آورده شده و به صورت زیر می‌باشد.

$$K_{\text{contact}} = \frac{4}{3(\sigma_i + \sigma_o)} \sqrt{\frac{R_i R_o}{R_i + R_o}} \quad (i = 1,2), \tag{34}$$

که در معادله‌ی (34) R_i و R_o به ترتیب شعاع انگشت و شیء و پارامتر $\sigma_l \ \ (l = i, o)$ مربوط به جنس مواد می‌باشد که به صورت زیر قابل تعریف است.

$$\sigma_l = \frac{1 - v_l^2}{E_l} \quad (i = 1,2), \tag{35}$$

که در معادله‌ی (35) v_l و E_l به ترتیب ضرایب پوآسون و مدول الاستیسیته می‌باشند. محاسبه‌ی $B_{contact}$ به صورت $B_{contact} < 0.01K_{contact}$ باید در نظر گرفته شود.

براساس مقادیر موجود در جداول، شبیه‌سازی انجام شده و نتایج حاصل از آن در نمودارهای زیر ارائه شده است.

"شکل 10" بیان کننده‌ی سرعت نسبی نوک انگشت نسبت به توپ می‌باشد. همان‌طور که در گراف"شکل 10" نیز مشخص است مقدار اولیه‌ی سرعت نسبی برابر با 58- میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد. در ابتدا و قبل از این‌که گیرش اتفاق بیفتد شیء الاستیک در حالت سکون قرار دارد. در نتیجه مقدار نسبی سرعت صرفا مخصوص به نوک انگستان خواهد بود. همچنین در این گراف تا قبل از گیرش شیب نمودار به طور صعودی است و مقدار سرعت به سمت صفر می‌رود و این موضوع به جهت این است که فاصله‌ی مراکز نیمکره‌ای نوک انگشت و مرکز توپ در حال کم شدن می‌باشد و چون سرعت مشتق از جابه‌جایی است در نتیجه این مقدار به تدریج کم شده تا این‌که تماس بین نوک انگشت و توپ رخ دهد. پارامترهای کنترلر به‌گونه‌ای تنظیم شده‌اند که درلحظه‌ی برخورد دو جسم سرعت نسبی بسیار کم و نزدیک به صفر باشد. درست هنگامی که دو جسم با هم بر خورد کردند به دلیل ماهیت غیر خطی توپ همگن الاستیک و نوک نرم انگشتان یک اغتشاشی در سیستم رخ می‌دهد. در واقع پس از این برخورد بین این دو جسم که در زمان 1.45 ثانیه رخ داده است اگر کنترلر نتواند این اغتشاشات را دمپ کند آن‌ها رشد کرده و در نهایت موجب ایجاد لغزش بین انگشت و شیء شده و توپ گیرش شده از انگشتان جدا می‌گردد. در نتیجه کنترلر باید بتواند پایداری گیرش را در هنگام برخورد اولیه تضمین کرده و اغتشاشات حاصله را دمپ نماید. در برخورد اولیه نیروی اعمال شده به حدی نیست که باعث تغییر شکل الاستیک دو جسم شود اما فرآیند گیرش اتفاق افتاده است. هر چه مقدار نفوذ پس از این مرحله افزایش یابد نیروی تماسی اعمال شده بر اجسام نیز افزایش می‌یابد تا این‌که سر انجام مرحله‌ی دوم اغتشاشات روی می‌دهد. در واقع توپ و نوک انگشتان در مقابل تغییر شکل مقاومت اولیه‌ای از خود نشان می‌دهند و تا وقتی نیروی اعمال شده به آن‌ها به حد مطلوبی نرسد تغییر شکل رخ نخواهد داد. در مرحله‌ی دوم، توپ الاستیک و نوک انگشتان نرم دیگر نمی‌توانند در مقابل نیروی اعمال شده مقاومت نمایند و با توجه به سختی ذاتیشان تسلیم شده و دچار تغییر شکل الاستیک در زمان 3.6 ثانیه می‌شوند. در این‌جا نیز کنترلر به خوبی توانسته است اغتشاشات حاصله را از بین برده و سرعت نسبی بین دو جسم را نزدیک به صفر نگه دارد. در واقع هنگامی که جسم توسط انگشتان گرفته شد

پارامترهای کنترلر به نحوی تنظیم شده‌اند که فرآیند تا حد امکان شبه استاتیک باشد.

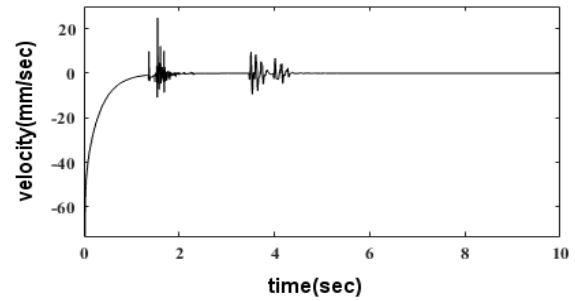

Fig. 10 Penetrate Velocity

شکل 10 سرعت نفوذ

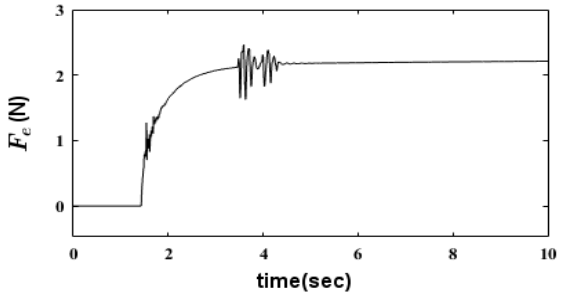

Fig. 11 Contact Force

شکل 11 نیروی تماسی

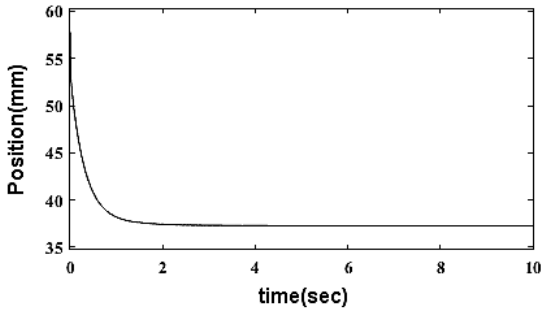

Fig. 12 The position of First Fingertip

شکل 12 موقعیت نوک انگشت اول

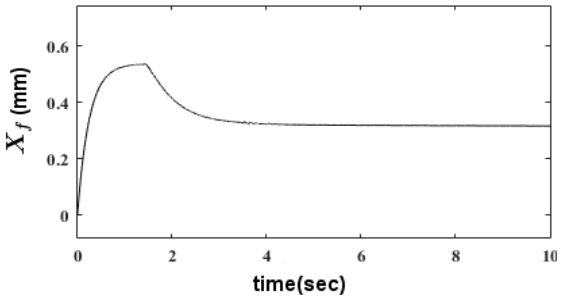

Fig. 13 Output of Impedance Control

شکل 13 خروجی امپدانس کنترل

در بخش سینماتیک در معادله‌ی (4) نحوه‌ی محاسبه‌ی غیرمستقیم نیرو عمودی در هنگام گیرش با فیدبک گرفتن از مقدار نفوذ و سرعت نسبی نفوذ دو جسم در یکدیگر بیان شد. همچنین، در معادله‌ی (3) راه حلی برای تشخیص بر خورد انگشت و توپ الاستیک ارائه داده شد. الگوریتم کلی برای محاسبه‌ی نیرو عمودی با استفاده از معادله های (3) و (4) به صورت زیر تعریف می‌شود:

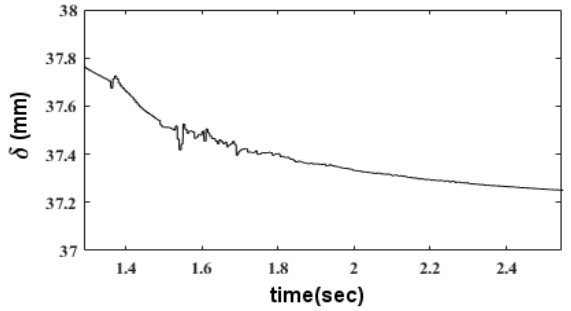

Fig. 14 Penetrate

شکل 14 نفوذ

$$F_{\mathrm{N}} = \begin{cases} 0 & h < 37.6 \\ 500\delta^{0.66} + 4\delta\dot{\delta} & h \geq 37.6 \end{cases}, \qquad (36)$$

که در معادله‌ی (36) h فاصله‌ی مراکز نوک نیم‌کره‌ای انگشت و توپ، δ مقدار نفوذ و $\dot{\delta}$ نرخ نفوذ می‌باشند. عدد 37.6 در این معادله مجموع شعاع توپ و نوک نیم‌کره‌ای انگشت می‌باشد. در واقع در هر بار فیدبک‌گیری سیستم چک می‌کند که آیا h به مقدار 37.6 رسیده است و با توجه به آن نیروی عمودی را مطابق با فرمول (36) محاسبه می‌کند. در "شکل 11" که نشان‌دهنده‌ی نیروی عمودی تماسی بین انگشت نرم و توپ الاستیک می‌باشد الگوریتم بیان شده در معادله‌ی (36) کاملا مشهود است. تا قبل از این‌که برخورد در زمان 1.45 ثانیه رخ بدهد فاصله‌ی مراکز توپ و نوک نرم انگشت کمتر از 37.6 است در نتیجه نیروی عمودی صفر می‌باشد. پس از برخورد نیروی عمودی افزایش یافته اما همچنان اجسام در مقابل تغییر شکل مقاومت می‌کنند تا این‌که در زمان 3.6 ثانیه تغییر شکل شروع می‌شود. در زمان شروع تغییر شکل کنترلر نوسانات را کنترل کرده و به‌دلیل ماهیت غیرخطی نیروهای عمودی و انتخاب ضرایب کنترلر نمودار با شیبی بسیار کم به سمت مقدار مطلوب می‌رود.

"شکل 12" نمودار موقعیت سر انگشتان را نشان می‌دهد که همان‌طور که در شکل مشخص است انگشتان تا قبل از رسیدن به توپ در کمتر از یک ثانیه به نزدیکی توپ رسیده و پس از آن با شیب ملایم به جسم برخورد و در آن تا عمق مطلوب نفوذ می‌کند. این شکل نمایانگر توانایی کنترلر در ردگیری مناسب نوک انگشتان تا قبل از گیرش توپ و تضمین پایداری به جهت انجام فرآیند گیرش به شکل شبه استاتیک است.

باتوجه به پارامترهای انتخاب شده برای معادله‌ی امپدانسی بسامد طبیعی سیستم 31.62 رادیان بر ثانیه و نسبت میرایی 7.9 خواهد شد. در نتیجه سیستم امپدانسی در وضعیت فوق میرایی قرار گرفته است. در "شکل 13" خروجی سیستم امپدانسی نشان داده شده است. همان‌طور که در این

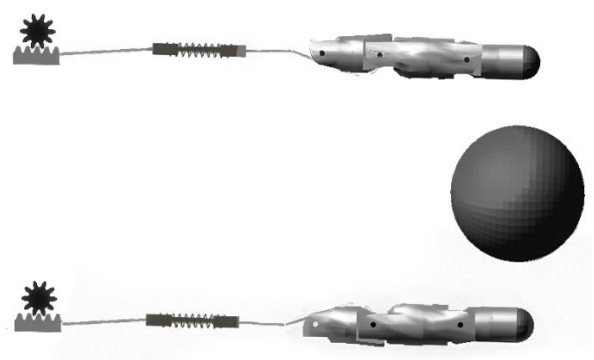

Fig. 15 System in initial condition

شکل 15 سیستم در وضعیت اولیه

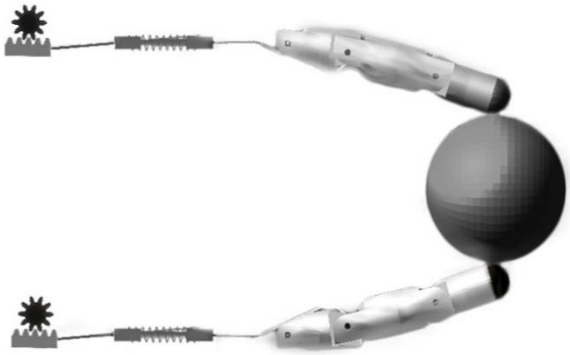

Fig. 16 Ocurring grasping

شکل 16 رخ دادن گیرش

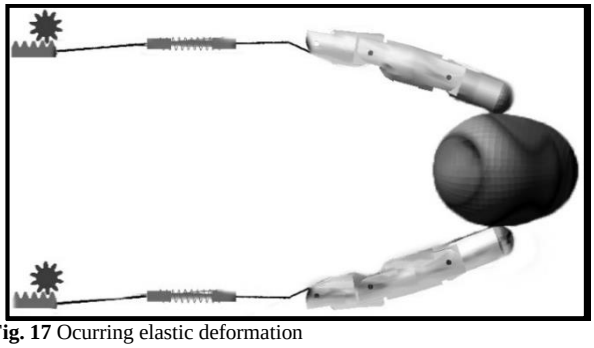

Fig. 17 Ocurring elastic deformation

شکل 17 رخ دادن تغییر شکل الاستیک

شکل مشهود است گراف خروجی این سیستم تا قبل از رسیدن به لحظه‌ی برخورد و گرفتن فیدبک نیروی تماسی با شیبی تند افزایش یافته تا بتواند به مسئله‌ی ردگیری کمک کند. پس از برخورد و رخ دادن گیرش از مقدار ورودی اولیه‌ی سیستم امپدانسی که همان مقدار نیروی مطلوب 3 نیوتن بود کاسته شده و این به خودی خود نتیجه‌ای بر کاسته شدن پاسخ زمانی این سیستم و در نهایت میل کردن این پاسخ به صفر دارد.

"شکل 14" نشان‌دهنده‌ی برخورد اولیه‌ی دو جسم در زمان 1.45 ثانیه است و همان طور که مشخص است پس از برخورد اولیه کنترلر توانسته اغتشاشات حاصل از اثرات نیروی ضربه‌ای اولیه‌ی انگشت بر روی شیء را به خوبی دمپ و مقدار نفوذ را با شیب ملایم به سمت مقدار مطلوب سوق دهد.

"شکل 15" نشان دهنده وضعیت اولیه‌ی انگشتان و شیء شبیه سازی شده در نرم‌افزار آدامز می‌باشد. در زمانی کمتر از 1.5 ثانیه همان گونه که در نمودار "شکل 12" مشخص است انگشتان با ردگیری مناسب به توپ رسیده و گیرش روی می‌دهد. این موضوع در "شکل 16" نشان داده شده است. پس از رخ دادن گیرش نیروی اعمالی از سوی انگشتان به شیء در یک فرآیند شبه استاتیک به تدریج افزایش یافته تا این‌که جسم تسلیم شده و تغییر شکل در اجسام همانند "شکل 17" اتفاق می‌افتد. نکته‌ای که باید در "شکل 17" به آن توجه شود آن است که با این‌که هم انگشت و هم شیء تغییر شکل داشتند ولی همان‌گونه که در شکل مشهود است تغییر شکل توپ بسیار بیشتر از تغییر شکل انگشت می‌باشد. دلیل این موضوع را می‌توان سه عامل دانست. عامل اول که مهمترین عامل می‌باشد مربوط به انتخاب جنس مواد نرم در حال تعامل می‌باشد. همان‌طور که در جدول 1 و 2 مقادیر مربوط به جنس شیء و انگشت آمده توپ انتخاب شده بسیار نرم‌تر از نوک نرم انگشت است پس به طور طبیعی توپ دچار تغییر شکل بیشتری می‌شود. دلیل دوم برای این اتفاق اینست که ما در شبیه سازیمان به تقلید از انگشت انسان که دارای یک لایه‌ی نازکی از بافت چربی بر روی استخوان است یک پوسته‌ای نازک به ضخامت 2 میلی‌متر را مش زده‌ایم. همچنین، آخرین عامل مربوط به آن است که در این مقاله برای جلوگیری از حل‌های عددی پیچیده در شبیه‌سازی آنلاین فقط نوک انگشتان را نرم در نظر گرفتیم. در نتیجه در اطراف مکانی که بدنه‌ی صلب به انعطاف‌پذیر متصل می‌شود تغییر شکل کمتری داریم.

6- نتیجه گیری

در این مقاله مسئله‌ی گیرش یک توپ الاستیک همگن با یک جفت انگشتان موازی نرم مورد بررسی قرار گرفته است. نوآوری این مقاله این موضوع می‌باشد که برای اولین بار برخلاف کارهای قبلی که در آن‌ها تماس بین اجسام صلب-صلب یا صلب- نرم در نظر گرفته شده، در این مقاله رویکرد تماسی بین دو جسم نرم-نرم در نظر گرفته شده است. همچنین، بر خلاف اکثر کارها که جهت سهولت در رسیدن به پایداری از اجسام تخت استفاده کرده‌اند، در این مقاله از یک توپ همگن الاستیک به‌دلیل داشتن انحناء در هندسه‌اش استفاده شده است. در این راستا این مقاله علاوه بر بررسی مدل دینامیکی و سینماتیکی انگشتان نرم و توپ الاستیک، نیروهای موجود بین اجسام نرم را نیز بررسی می‌کند. در مرحله‌ی بعد مدلی از این سیستم در نرم‌افزار آدامز شبیه‌سازی می‌شود. در گام بعد برای کنترل این سیستم شبیه‌سازی شده نرم‌افزار آدامز با نرم‌افزار سیملینک متلب لینک می‌شود. به جهت ماهیت غیرخطی اجسام نرم در حال تعامل، کنترل گشتاور و یا نیرو تبادلی به‌طور مستقیم کاری بسیار دشوار می‌باشد. از این رو برای کنترل این سیستم غیرخطی باید از روش‌های کنترل نیرو مجازی استفاده شود. از این‌رو یک سیستم ترکیبی کنترل نیرو و موقعیت بر روی سیستم انگشتان و توپ پیاده‌سازی شد. نتایج حاصل از این پیاده سازی در زیر لیست شده است.

- سیستم امپدانسی که مانند یک فیلتر پایین گذر رسته‌ی دو عمل می‌کند قادر به حذف نویزهای تصادفی نیروی گیرشی وارده از سوی انگشتان به شیء می‌باشد بدون این‌که تاثیر بر روی کنترلر موقعیت به‌کار رفته در حلقه داخلی سیستم کنترلی بگذارد.
- فیلتر امپدانسی قادر است نسبت به تغییرات به وجود آمده در موقعیت مرجع خود را تنظیم کرده و با توجه به انحراف از مقدار مطلوب نیرو موقعیت موردنیاز اصلاحی را جبران کند.
- این سیستم کنترلی ترکیبی با توجه به این‌که از هیچ سنسور نیرویی اطلاعاتی را دریافت نمی‌کند قادر به ایجاد گیرشی دقیق به‌وسیله‌ی انگشتان می‌باشد و از این جهت یک سیستم کنترلی مقاوم و تطبیقی در میان روش‌های کنترلی امپدانس به شمار می‌آید.
- نتایج حاصل از پیاده‌سازی عملی این کنترلر ترکیبی نشان از ردگیری سریع تا قبل از گیرش توپ و کنترل همزمان نیرو و موقعیت بعد از گیرش دارد.

این نتایج نشان‌دهنده‌ی کنترل موفق سیستم شبیه‌سازی شده است و صحت و درستی مسئله‌ی مورد تحقیق را به اثبات می‌رساند.

7- مراجع

[1] J. K. Salisbury, B. Roth, Kinematic and Force Analysis of Articulated Mechanical Hands, *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 105, No. 1, pp. 35-41, 1983.

[2] A. B. Cole, J. E. Hauser, S. S. Sastry, Kinematics and control of multifingered hands with rolling contact, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 34, No. 4, pp. 398-404, 1989.

[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] S. Ahmadi, R. Rastegari, Grasping and control of moving object by dual fingers robot under rolling constraints in horizontal plane, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 154-164, 2016. (In Persian فارسی)
[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, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No. 5, pp. 965-976, 2005.
[6] R. Kolbert, N. Chavan-Dafle, A. Rodriguez, Experimental Validation of Contact Dynamicsfor In-Hand Manipulation, arXiv preprint arXiv:1702.07252, 2017.
[7] R. Ozawa, S. Arimoto, P. T. A. Nguyen, M. Yoshida, J. H. Bae, Manipulation of a circular object in a horizontal plane by two finger robots, *Proceedings of The Robotics and Biomimetics Conference*, ROBIO, pp. 517-522, 2004.
[8] P. T. A. Nguyen, R. Ozawa, S. Arimoto, Manipulation of a circular object by a pair of multi-DOF robotic fingers, *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, pp. 5669-5674, 2006.
[9] S. Arimoto, P. T. A. Nguyen, H. Y. Han, Z. Doulgeri, Dynamics and control of a set of dual fingers with soft tips, *Robotica*, Vol. 18, No. 01, pp. 71-80, 2000.
[10] Y. Morio, S. Arimoto, J. Bae, Blind grasp and manipulation of a rigid object by a pair of robot fingers with soft tips, *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, pp. 4707-4714, IEEE, 2007.
[11] F. Khalil, P. Payeur, Robotic interaction with deformable objects under vision and tactile guidance-a review, *Robotic and Sensors Environments, 2007 ROSE 2007, International Workshop on*, pp. 1-6: IEEE, 2007.
[12] P. E. Hammer, M. S. Sacks, J. Pedro, R. D. Howe, Mass-spring model for simulation of heart valve tissue mechanical behavior, *Annals of Biomedical Engineering*, Vol. 39, No. 6, pp. 1668-1679, 2011.
[13] O. Jarrousse, *Modified Mass-Spring System for Physically Based Deformation Modeling*, KIT Scientific Publishing, pp. 876-879, 2014.
[14] S. Garg, A. Dutta, Grasping and manipulation of deformable objects based on internal force requirements, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 3, No. 2, pp. 18, 2006.
[15] L. Han, J. Hipwell, Z. Taylor, C. Tanner, S. Ourselin, D. J. Hawkes, Fast deformation simulation of breasts using GPU-based dynamic explicit finite element method, *International Workshop on Digital Mammography*, pp. 728-735, Springer, 2010.
[16] J. Huang, Y. Sano, R. Hori, T. Hori, T. Yabuta, Method of grasping control by computing internal and external impedances for two robot fingers, and its application to admittance control of a robot hand-arm system, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 12, No. 8, pp. 115, 2015.
[17] M. S. Erden, A. Billard, End-point impedance measurements at human hand during interactive manual welding with robot, *Proceeding of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Hong Kong, pp. 126-133, 2014.
[18] R. García-Rodríguez, M. Villalva-Lucio, V. Parra-Vega, Dexterous dynamic optimal grasping of a circular object with pose regulation using redundant robotic soft-fingertips, *Proceedings of the International Conference on Robots and Systems*, Hamburg, Germany, pp. 6231-6237, 2015.
[19] L. Zaidi, B. C. Bouzgarrou, L. Sabourin, Y. Mezouar, Interaction modeling in the grasping and manipulation of 3D deformable objects, *Proceeding of the International Conference on Advanced Robotics*, Istanbul, Turkey, pp. 504-509, 2015.
[20] R. M. Murray, Z. Li, S. S. Sastry, S. S. Sastry, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC press, pp. 211-264, 1994.
[21] B. Siciliano, O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*, pp. 671-700, Springer, 2016.
[22] P. Flores, M. Machado, M. T. Silva, J. M. Martins, On the continuous contact force models for soft materials in multibody dynamics, *Multibody System Dynamics*, Vol. 25, No. 3, pp. 357-375, 2011.
[23] K. H. Hunt, F. R. E. Crossley, Coefficient of Restitution Interpreted as Damping in Vibroimpact, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 42, No. 2, pp. 440-445, 1975.
[24] R. García-Rodríguez, V. Segovia-Palacios, V. Parra-Vega, M. Villalva-Lucio, Dynamic optimal grasping of a circular object with gravity using robotic soft-fingertips, *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, Vol. 26, No. 2, pp. 309-323, 2016.
[25] A. Marigo, A. Bicchi, Rolling bodies with regular surface: Controllability theory and applications, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 45, No. 9, pp. 1586-1599, 2000.
[26] A. M. Howard, G. A. Bekey, Recursive learning for deformable object manipulation, *Proceeding of the International Conference on Advanced Robotics*, Monterey, USA, pp. 939-944, 1997.
[27] T. Senoo, M. Koike, K. Murakami, M. Ishikawa, Impedance control design based on plastic deformation for a robotic arm, *IEEE Robotics And Automation Letters*, Vol. 2, No. 1, pp. 209-216, 2017.
[28] R. Ozawa, K. Hashirii, Y. Yoshimura, M. Moriya, H. Kobayashi, Design and control of a three-fingered tendon-driven robotic hand with active and passive tendons, *Autonomous Robots*, Vol. 36, No. 1-2, pp. 67-78, 2014.
[29] A. Winkler, J. Suchý, Implicit force control of a position controlled robot–a comparison with explicit algorithms, *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*, Vol. 9, No. 6, pp. 1454-1460, 2015.
[30] X. Kong, H. Zhao, B. W. Li, K. Ba, Analysis of position-based impedance control method and the composition of system dynamic compliance, *Proceeding of the International Conference on Aircraft Utility Systems*, Beijing, China pp. 454-459, 2016.
[31] Y. Karayiannidis, L. Droukas, Z. Doulgeri, Operational space robot control for motion performance and safe interaction under Unintentional Contacts, *Control Conference (Ecc)*, 2016 European, pp. 407-412: IEEE, 2016.
[32] M. Pelletier, M. Doyon, On the implementation and performance of impedance control on position controlled robots, *Robotics and Automation, Proceedings 1994 IEEE International Conference on*, pp. 1228-1233: IEEE, 1994.
[33] H. Sadjadian, H. D. Taghirad, Impedance control of the hydraulic shoulder A 3-DOF parallel manipulator, *Robotics and Biomimetics, ROBIO'06, IEEE International Conference on*, pp. 526-531: IEEE, 2006.
[34] J. Giesbers, *Contact Mechanics in MSC ADAMS*, Bachelor Thesis, University of Tewnte, 2012.