مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1395، دوره 16، شماره 5، ص‌ص 241-250

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

طراحی و ساخت پنجه رباتیک برای گرفتن موفق اجسام مختلف در محیط‌های با ساختار نامعین

حمیدرضا حیدری[1*]، میلاد جعفری پوریا[2]، شهریار شریفی[3]، محمودرضا کرمی[4]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر
2- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر
3- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر
4- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر
* ملایر، صندوق پستی 61446-65719، hr.heidari@malayeru.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 12 اسفند 1394
پذیرش: 01 اردیبهشت 1395
ارائه در سایت: 03 خرداد 1395

کلید واژگان:
پنجه رباتیک
تطبیق پذیری مکانیکی
وفق‌پذیری
محیط‌های ناشناخته

چکیده

عمل گرفتن در محیط‌های ناشناخته یکی از چالش برانگیزترین مسائل رایج در علم رباتیک است. نامشخص بودن ویژگی‌های اصلی جسم هدف و محیط اطرافش؛ باعث استفاده از دست‌های پیچیده با سنسورهای دقیق و دشوار برای کنترل می‌شود. به همین منظور در این تحقیق تلاش شده که ترکیب ساختار سینماتیکی یک انگشت سه-بندی و یک انگشت دوبندی ساده، برای طراحی و ساخت یک پنجه رباتیک مورد بررسی قرار گرفته شود. در ابتدا چالش‌های مرتبط با عمل گرفتن بوسیله طراحی دقیق مکانیکی پنجه تجزیه و تحلیل شده است. سپس به طراحی و ساخت نمونه پنجه دو انگشتی با ترکیب یک انگشت سه‌بندی شبیه به انگشت اشاره دست انسان و یک انگشت دوبندی مشابه انگشت شست دست انسان پرداخته می‌شود. در ادامه عملکرد این دست برای گرفتن اجسام با اشکال مختلف آزمایش و بررسی می‌شود. از نتایج استنباط می‌شود که حتی با داشتن دو انگشت و طراحی ساده و بدون نیاز به کنترل پیچیده؛ می‌توان اجسام مختلفی را به‌طور موفق گرفت. همچنین بااین نزدیکی به ساختار سینماتیک انگشتان دست انسان و در مقایسه با تحقیقات قبلی نشان داده می‌شود که ترکیب انگشتان سه‌بندی - دوبندی نسبت به پنجه متقارن دوبندی - دوبندی کارایی بهتری برای گرفتن موفق اجسام بزرگ خواهد داشت.

Design and fabrication of robotic gripper for successfully grasping various objects in unstructured environments

Hamidreza Heidari*, Milad Jafary Pouria, Shahriar Sharifi, Mahmoudreza Karami

Department of Mechanical Engineering, Malayer University, Malayer,Iran
*P.O.B. 65719-61446, Malayer, Iran, hr.heidari@malayeru.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 March 2016
Accepted 20 April 2016
Available Online 23 May 2016

Keywords:
Gripper
Mechanical Compliance
Under-Actuated
Unstructured Environments

ABSTRACT

Grasping in unstructured environments is one of the most challenging issues currently facing robotics. The inherent uncertainty about the properties of the target object and its surroundings compels the use of robot hands, which typically involve complex hands, require elaborate sensor suites, and are difficult to control. For this purpose, in this paper combining the kinematic structure of a three and two links finger for design and fabrication of robotic gripper will be evaluated. First, the challenges associated with grasping by careful mechanical design of gripper are analyzed. Then, the design and fabrication of a sample gripper by combining a three-links finger similar to the human index finger and a two-links finger similar to the thumb are described. In the following, the performance of this hand for grasping various objects will be examined. The results show that with two fingers and simple design, without the need for the complex control, c various objects can be grasped successfully. Also, the results demonstrate that compared with the previous researches and by proximity to the kinematic structure of the human hand fingers, by combining two with three link fingers this gripper will have a better performance than the previous symmetric gripper for successfully grasping large objects.

1- مقدمه

یکی از مهم‌ترین چالش‌های علم رباتیک؛ عمل گرفتن و جابجایی اجسام درمحیط‌های ناشناخته[1]می‌باشد [1]؛ بویژه زمانیکه خواص جسم نامشخص و خطا افزایش می‌یابد. این موضوع پنجه ربات را برای کنترل نیروی‌های تماسی و یک گرفتن موفق دچار مشکل می‌کند. یک رویکرد برای برخورد با این چالش، تطبیق‌پذیری[2]پنجه ربات است که اغلب در زمینه کنترل فعال مطرح

[1] Unstructured

[2] Compliance

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
H. R. Heidari, M. Jafary Pouria, Sh. Sharifi, M. R. Karami, Design and fabrication of robotic gripper for successfully grasping various objects in unstructured environments, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 241-250, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-13]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.1.2]

می‌شود و نیازمند استفاده‌از سنسورهای سرعت/موقعیت و گشتاور/نیرو در مفصل ربات است که در تعداد زیادی از مطالعات استفاده شده است [2-7]. این رویکرد در نقطه مقابل تطبیق‌پذیری مکانیکی غیر فعال[1] می‌باشد که در مفصل‌های ربات از خاصیت فنری استفاده می‌شود و نیازی به کنترل فعال مفصل‌ها نمی‌باشد. کنترل غیر فعال باعث ایجاد خمش‌های بالا در مفصل‌ها شده و منجر به پایین آمدن نیروهای تماسی خواهد شد. بنابراین در نخستین فاز از مرحله گرفتن و در ضربه‌های ناخواسته، مقدار خسارت‌ها و اغتشاشات پایین می‌آید [8-13]. برخی دست‌ها شامل تعداد کمتری محرک نسبت به تعداد درجات آزادی هستند. در این رویکرد، از انگشتان وفق‌پذیر در طراحی مفاصل غیرفعال، همراه با سیستم انتقال و توزیع گشتاور به مفاصل بعدی استفاده می‌کنند. از مزایای مکانیزم وفق‌پذیر می‌توان به کنترل راحت‌تر، تامین درجات آزادی بیشتر با تعداد محدودی محرک، سبک‌تر و ساده‌تر بودن، تنوع مکانیزم‌های به کار رفته برای انتقال نیرو و گشتاور به هر بند و هزینه‌های کمتر آن اشاره نمود. به عنوان مثال، در برخی دست‌ها با استفاده از متصل کردن مفصل‌ها به یکدیگر توسط تاندون‌ها تعداد محرک‌ها نسبت به تعداد درجات آزادی کاهش می‌یابد. عنوان مکانیزم با تعداد درجات آزادی بیشتراز محرک‌ها[2]، مکانیزم وفق‌پذیر نامیده می‌شود که در بسیاری از تحقیقات اخیر از آن استفاده شده [15,14,3,2] و در این پژوهش نیز از این نوع مکانیزم استفاده شده است.

فهمیدن اینکه ساختار سینماتیک دست رباتیک چگونه می‌تواند به منظور استفاده در طراحی پنجه ربات برای بهبود عملکرد آن بویژه در محیط‌های ناشناخته و یا برای گرفتن اجسام با ویژگی‌های مختلف استفاده شود در تعداد کمی از مطالعات بررسی شده است. در این تحقیق رویکردی برای ساختار سینماتیک پنجه رباتیک به منظور بهبود عملکرد آن پیشنهاد می‌شود. به همین منظور ساختار هندسی دست انسان مورد بررسی قرارگرفت، زیرا دست انسان ویژگی‌هایی دارد که با الهام گرفتن از آن‌ها می‌توان عملکرد دست‌های رباتیک را بهبود بخشید. در این پژوهش، به ساخت و ارزیابی یک پنجه دو انگشتی پرداخته می‌شود که بیشترین شباهت را به دست انسان داشته باشد. این پنجه ترکیبی از یک انگشت دوبندی با اندازه لینک‌های برابر به عنوان شست و با استفاده از نتایج بدست آمده از مطالعات قبلی [2,1] و یک انگشت سه‌بندی به عنوان انگشت اشاره و با استفاده از نتایج بهینه‌سازی ساختار انگشت سه‌بندی که در این تحقیق محاسبه شده، ساخته می‌شود.

هدف از این پژوهش، مرتفع ساختن چالش‌های ذکر شده‌ی عمل گرفتن در محیط‌های ناشناخته روزمره توسط یک طراحی دقیق مکانیکی و نیز نزدیک بودن طرح به ساختار انگشت دست انسان می‌باشد. برای این مهم، مطالعه بهینه‌سازی طراحی ساختار سینماتیکی و تطبیق‌پذیری انگشت مورد نظر انجام شده و همچنین تاثیر پارامترهای فوق بر روی خطای مجاز در موقعیت‌یابی ربات، در حالی که نیروی تماسی بین انگشت و جسم در کمترین مقدار باشد مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این تحقیق، به طور خلاصه می‌توان اهداف، اهمیت و کاربرد پژوهش حاضر را در چند مورد زیر خلاصه نمود.

1. رفع موانع موجود در گرفتن اجسام در محیط‌های نامنظم با درصد پایینی از خطای موقعیت‌یابی ربات.
2. کاهش صدمات وارد شده به انگشتان و جسم طی فاز اول گرفتن با استفاده از خمش بالای مفاصل انگشتان [16].
3. استفاده از کنترل بسیار ساده بدون نیاز به حسگرهای گران قیمت و پیچدگی‌های ساختاری.
4. سبک بودن، با دوام بودن، ارزان بودن و کنترل راحت دست.
5. بهبود نتایج بدست آمده در تحقیقات قبلی با تغییر در ساختار فیزیکی انگشتان و بهینه سازی ساختار آنها.
6. نزدیک بودن طرح دست ساخته شده با ساختار انگشت اشاره و شست دست انسان به منظور بهبود عملکرد دست.

2- طراحی مدل پنجه

در این پژوهش با ترکیب یک انگشت دوبندی-سه‌بندی یک پنجه دو انگشتی در نظر گرفته شده که این پنجه رباتیک با مشابهت به انگشت شست و اشاره دست انسان ساخته شده است. طول بندهای انگشت دوبندی یکسان با طول بندهای انگشت شست و طول بندهای انگشت سه‌بندی برابر با طول بندهای انگشت اشاره دست انسان می‌باشد. دلایل این مشابهت برای لینک‌ها برابر شدن میزان بازشدگی پنجه رباتیک با بازشدگی پنجه دست انسان و قرار داشتن نوک هر دو انگشت در حالت بازشدگی کامل در امتداد یک خط افقی است. همچنین از آنجا که در این پژوهش سعی بر آن شده است که دست طراحی شده بیشترین شباهت را به انگشتان و دست انسان داشته باشد، لذا متناسب بودن اندازه‌های فیزیکی دست مورد نظر بسیار اهمیت دارد. دست انسان در حالت باز شدگی کامل حدود 17 سانتیمتر عرض خواهد داشت. این اندازه فاصله بین نوک انگشت شست تا نوک انگشت اشاره می‌باشد.

در طرح حاضر، برای داشتن اندازه بازشدگی حدود 17 سانتیمتر ذکر شده، لازم است که انگشتان به یک قسمت ثابت به عنوان کف دست اتصال یابند (شکل 1). این قسمت علاوه بر اینکه نقش کف دست را ایفا می‌کند، محلی برای اتصال مفصل‌های داخلی دو انگشت و نیز هدایت تاندون‌های دو انگشت را فراهم می‌آورد.

علاوه بر این، سوراخ‌هایی سراسری در قسمت بالایی هر یک از لینک‌ها ایجاد شده‌اند که محل عبور تاندون‌های انگشتان می‌باشد. همچنین فاصله این سوراخ‌ها که محل قرارگیری تاندون انگشتان می‌باشد تا مرکز مفاصل نیز اهمیت خاصی برای طراحی دارد. این فاصله در واقع بازوی گشتاور اعمال شده به بندهای انگشتان می‌باشد. این فاصله در شکل 2 نشان داده شده است.

در داخل کف دست نیز یک باریکه برای عبور تاندون‌ها از داخل آن و اتصال به محرک‌ها ایجاد شده است. در داخل این باریکه و قسمت بالای کف دست، دو محل برای قرار گرفتن پین‌های هادی در نظر گرفته شده است. وظیفه این دو پین، هدایت تاندون‌هایی است که از لینک‌ها خارج شده و به

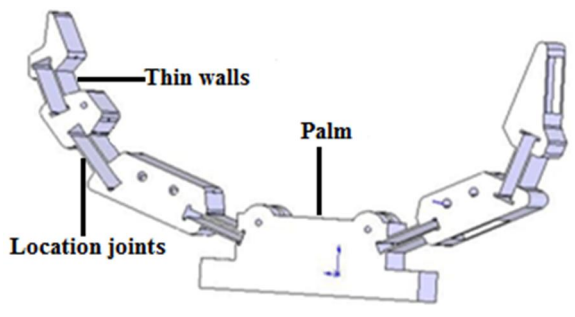

Fig. 1 The schematic of fingers and palms

شکل 1 شماتیکی از انگشتان و کف دست

[1] Passive Mechanical Compliance
[2] Underactuated

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-13]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.1.2]

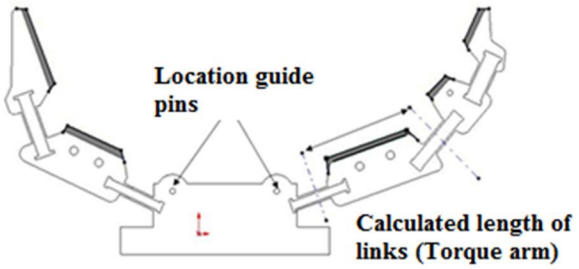

Fig. 2 Location guide pins and torque arm

شکل 2 محل قرارگیری پین‌های هادی و فاصله بازوی گشتاور

سمت موتور ادامه دارند.

برای حرکت مفاصل، لینک‌ها و کاهش تعداد درجات آزادی هم از سیستم تاندون استفاده شده است. در نهایت جهت ایجاد کشش مورد نیاز در تاندون‌ها و حرکت انگشتان از دو موتور (عملگر) ساده استفاده شده است.

مدل‌سازی انگشت دوبندی از پژوهش‌های انجام گرفته توسط دالر و همکاران اقتباس شده است [1-3] و مدل‌سازی سه‌بندی نیز در پژوهش حاضر طراحی و بهینه‌سازی شده است.

قدم اول تعریف پارامترهای متغیر در ساختار دست و نیز تعیین تابع هدف برای طراحی می‌باشد. متغیرهای طراحی در جدول 1 آمده‌اند. توابع هدف در این طراحی، بیشینه موقعیت جسم نسبت به خط مرکزی دست (x_c، که باید ماکزیمم شود) و نیز میانگین نیروی بیشینه‌ای که به جسم در طی مرحله اول گرفتن وارد می‌شود (که باید مینیمم شود) می‌باشند. در اینجا آنالیز با یک انگشت سه‌بندی که سه مفصل یک درجه آزادی دارد، آغاز خواهد شد. فرض بر این است که لینک‌ها صلب بوده و هرمفصل شامل یک فنر خطی غیرفعال است که به صورت سری با محرک قرار می‌گیرد.

3- تحلیل و فرآیند عمل گرفتن

فرض بر این است که اطلاعات اولیه در مورد جسم هدف و محل قرارگیری آن به طور نسبی در اختیار باشد (از طریق حسگرها و بینایی). در این حالت بازوی ربات یا وسیله نقلیه به سمت جلو حرکت کرده تا جایی که دست به موقعیت جسم مورد نظر برده شود. با تطبیق‌پذیری غیرفعال، انگشتان در اثر نیروی تماسی به عقب خم می‌شوند و حرکت رو به جلوی بازو تا زمانی که انگشت یک تماس دو نقطه‌ای برقرار کند، ادامه پیدا می‌کند.

جهت داشتن یک گرفتن موفق، نیاز است که دور تا دور جسم کاملا مهار شده، به طوری که جسم به طور طبیعی توسط انگشتان، صرف نظر از نیروی تماسی و اصطکاک گرفته و نگهداری شود [17]. برای یک چنین گرفتن ساده‌ای این موضوع معادل این است که سه یا چهار نقطه تماسی دور تا دور جسم را بگیرد به طوری که بیش از 180 درجه دور جسم احاطه شود، پس در یک گیرنده دو انگشتی ساده و متقارن، یک انگشت بایستی دو نقطه تماس داشته باشد که ملاک قضاوت گرفتن موفق باشد.

برای سادگی آنالیز و شبیه سازی، اثر اینرسی را ناچیز فرض کرده و نیز شرایط شبه استاتیک در نظر گرفته می‌شود. همچنین سرعت گرفتن پنجه به صورت یکنواخت و آرام است تا از ایجاد ضربه به جسم هدف جلوگیری و بصورت صحیح گرفته شود [1-3]. سطح مقطع جسم نیز دایروی فرض شده است. علاوه بر این، فرض شده است که جسم به اندازه کافی سنگین است که در اثر نیروی انگشتان، جابجایی و چرخش نداشته باشد. اولین مرحله در عمل گرفتن، برخورد انگشتان با جسم می‌باشد. طی این روند، سه حالت مختلف برای تماس جسم با انگشت، در نظر گرفته خواهد شد.

3-1- حالت اول: تماس اولیه جسم روی نوک بند خارجی

پس از برخورد جسم با نوک لینک خارجی (شکل 3) و در حضور اصطکاک، اگر با حرکت ربات؛ جسم به سمت داخل (یعنی حرکت به سمت تماس با لینک خارجی) پیش رود پس از اندکی لغزش، جسم روی لینک خارجی قرار می‌گیرد. معمولا در این حالت گرفتن موفق رخ نخواهد داد.

3-2- حالت دوم: تماس اولیه روی بند خارجی

همان طور که در شکل 4 نشان داده شده در این حالت جسم در برخورد اولیه روی لینک خارجی قرار می‌گیرد. در این حالت ربات بایستی حرکت رو به جلو خود را ادامه داده که باعث لغزش و غلتش جسم روی لینک سه شده تا زمانی که جسم با لینک دوم تماس حاصل نماید. در این حالت نقطه دوم تماس برقرار می‌گردد، حرکت رو به جلوی روبات متوقف شده و عملگر فعال می‌شود و جسم به صورت موفق گرفته خواهد شد. (البته ممکن است قبل از اینکه دو نقطه تماسی ایجاد شود، یعنی قبل از برخورد با لینک دوم، لینک‌ها به عقب برگشته و با سطح ربات برخورد کنند و در نتیجه عمل گرفتن موفق صورت نگیرد و جسم رها گردد. شکل 5 قسمت C).

جهت گرفتن پایدار، بایستی انگشتان، جسم هدف را بطور کامل پوشش دهند و این نیازمند آن است که ابتدا روی یکی از انگشت‌ها دو نقطه تماسی حاصل شود تا حرکت رو به جلوی ربات متوقف شده و موتور بوسیله کشش تاندون‌ها انگشتان را جمع کند (حالت (A) شکل 5). همچنین در حالت (C) شکل 5 مشخص است اگر جسم در محدوده مناسب گرفتن قرار نداشته باشد گشتاور نیروی وارده از طرف جسم به لینک، باعث خمش بیش از حد مفاصل شده و لینک‌ها به سمت عقب رانده شده و جسم رها می‌شود.

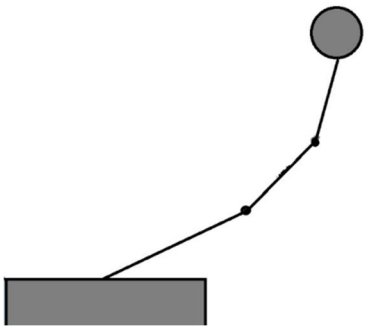

Fig. 3 The contact of object at the tip of distal link

شکل 3 تماس جسم با نوک لینک خارجی

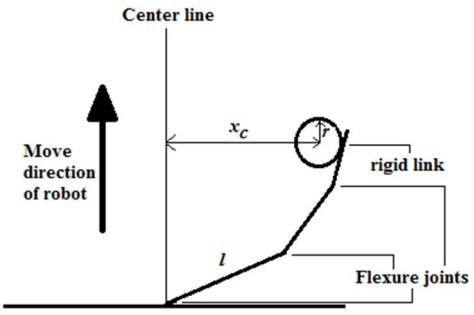

Fig. 4 The contact of object on the distal link

شکل 4 تماس جسم روی لینک خارجی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-13]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.1.2]

3-3- حالت سوم: تماس اولیه روی لینک میانی یا داخلی

ساده‌ترین و بهترین حالتی است که می‌تواند اتفاق بیافتد. در این حالت جسم در لحظه برخورد و تماس اولیه، مستقیما با لینک یک یا دو برخورد کرده و حرکت رو به جلو ربات متوقف می‌شود. سپس لینک بیرونی بلافاصله توسط محرک، حرکت کرده و به سمت تماس با جسم آورده خواهد شد و دو نقطه تماس مورد نظر ایجاد می‌گردد (شکل 6).

4- معادلات حاکم بر عملکرد انگشت سه‌بندی

حالت‌های مختلف ذکرشده را جز حالت اول (تماس با نوک لینک خارجی) که احتمال موفقیت پایینی دارد و حالت اخیر که موفقیت آمیز در نظر گرفته خواهد شد، با استفاده از سینماتیک انگشت شکل 7 و روابط هندسی ساده میان جسم و انگشت می‌توان بررسی نمود.

4-1- حالت اول: تماس روی لینک خارجی

تماس اولیه روی بند سوم (بند خارجی) مختصات نقطه اولیه تماسی را به صورت زیر نتیجه خواهد داد. این مختصات نقطه‌ای است که طی فاز اولیه گرفتن جسم با لینک خارجی (لینک سوم) برقرار کرده است.

$$\begin{aligned} x_0 &= r\sin(\varphi_1+\varphi_2+\varphi_3)+x_c \\ y_0 &= l_1\sin\varphi_1+l_2\sin\varphi_2+(x_0-l_1\cos\varphi_1 \\ &\quad -l_2\cos\varphi_2)\tan(\varphi_1+\varphi_2+\varphi_3) \end{aligned} \quad (1)$$

پس از تماس اولیه و حرکت رو به جلو ربات و لغزش و غلتش جسم روی لینک سوم، مختصات نقطه تماسی تغییر یافته که با استفاده از هندسه جسم و انگشت به صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{aligned} x_3 &= r\sin(\varphi_1+\varphi_2+\varphi_3+\theta_1+\theta_2+\theta_3)+x_c \\ y_3 &= y_0-y+r\cos(\varphi_1+\varphi_2+\varphi_3) \\ &\quad -r\cos(\varphi_1+\varphi_2+\varphi_3+\theta_1+\theta_2+\theta_3) \end{aligned} \quad (2)$$

مختصات نقطه تماسی پس از لغزش جسم روی لینک سوم را همچنین با استفاده از سینماتیک مستقیم می‌توان به صورت رابطه (3) محاسبه نمود.

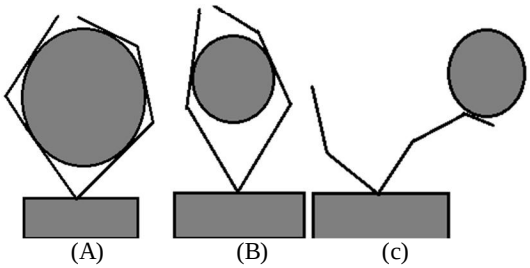

Fig. 5 (A) Successful enveloping grasp, (B) non-enveloping grasp, and (C) unsuccessful grasp

شکل 5 (A) پوشش موفق جسم برای گرفتن، (B) پوشش نامناسب جسم برای گرفتن پایدار، (C) گرفتن ناموفق

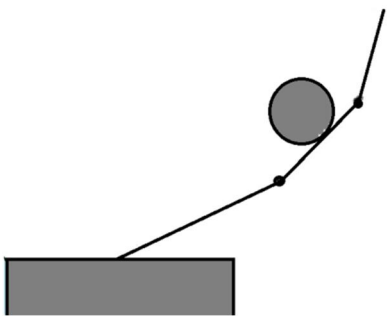

Fig. 6 The contact of object on the central link

شکل 6 تماس جسم روی لینک میانی

جدول 1 پارامترهای هندسی و نیروی جسم و انگشت

Table 1 Geometry parameters & forces of object and gripper

پارامترها	تعریف
φ_1 و φ_2 و φ_3	زاویه استراحت داخلی لینک‌ها
θ_1 و θ_2 و θ_3	زاویه خم شدگی لینک‌ها
k_1 و k_2 و k_3	مقادیر سفتی مفصل‌ها
k_t	سفتی کلی سه مفصل
x_0 , y_0	مختصات نقطه تماس اولیه جسم با انگشت
x_i , y_i	مختصات نقطه تماس اولیه جسم با بند iام، پس از لغزش
x_c	فاصله مرکز جسم با خط المرکزین دست
r	شعاع جسم
y	مقدار فاصله‌ای که سطح روبات پس از اولین تماس به جلو حرکت می‌کند
l	طول لینک داخلی
a_2	فاصله نقطه تماس جسم با لینک انگشت تا مرکز مفصل دوم
α	زاویه میان شعاع عمودی بین نقطه تماسی جسم و لینک با جهت حرکت ربات
$f_r = \sqrt{{f_t}^2 + {f_n}^2}$	نیروی تماسی
f_t , f_n	نیروی تماسی مماسی و عمودی
μ_s , μ_k	ضرایب اصطکاک استاتیکی و جنبشی

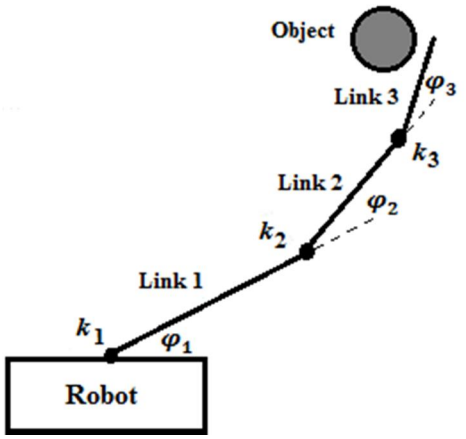

Fig. 7 Kinematic details of object & finger

شکل 7 جزئیات سینماتیکی جسم و انگشت

$$\begin{aligned} x_3 &= l_1\cos(\varphi_1+\theta_1)+l_2\cos(\beta)+a_3\cos(\alpha') \\ y_3 &= l_1\sin(\varphi_1+\theta_1)+l_2\sin(\beta)+a_3\sin(\alpha') \end{aligned} \quad (3)$$

و در نهایت از تعادل گشتاور حول مفاصل نیز روابط زیر نتیجه می‌شوند.

$$\begin{aligned} F_n a_3 &= -k_3\theta_3 \\ -k_2\theta_2 &= F_n \\ &\sqrt{(x_3-l_1\cos(\varphi_1+\theta_1))^2+(y_3-l_1\sin(\varphi_1+\theta_1))^2} \\ &\times\left[\sin(\alpha)+\tan^{-1}\left(\frac{x_3}{y_3}\right)+\mu_k\cos(\pi-\alpha\right. \\ &\qquad \left.-\tan^{-1}\left(\frac{x_3}{y_3}\right)\right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$-k_1\theta_1 = F_N\sqrt{x_3^2+y_3^2}\left[\sin(\alpha'+\tan^{-1}\left(\frac{x_3}{y_3}\right)+\mu_k\cos(\pi\right. \\ \left.-\alpha'-\tan^{-1}\left(\frac{x_3}{y_3}\right)\right] \quad (5)$$

که در آن

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-13]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.1.2]

$$\beta = \varphi_1 + \varphi_2 + \theta_1 + \theta_2$$
$$\alpha = \varphi_2 + \varphi_3 + \theta_2 + \theta_3$$
$$\alpha' = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (6)$$

همچنین قیود زیر نیز به عنوان محدودیت‌های حرکتی بندها در نظر گرفته می‌شوند. به این صورت که بندها تا زمانی قادر به گرفتن موفق در طی پروسه هستند که از خط افق به عقب برنگردند.

$$\varphi_1 + \theta_1 \geq 0$$
$$\varphi_2 + \theta_2 \geq 0$$
$$\varphi_3 + \theta_3 \geq 0 \quad (7)$$

4-2- حالت دوم: تماس روی لینک میانی

برای این حالت تماس، با استفاده از بررسی های دالر برای انگشت دو بندی، مختصات نقطه اولیه تماس در لحظه برخورد جسم با سطح لینک میانی از رابطه (8) بدست آمده است. پس از حرکت رو به جلو ربات، جسم روی لینک دوم لغزش و غلتش داشته که در نهایت مختصات هر لحظه نقطه تماسی جسم و لینک میانی از رابطه (9) نتیجه خواهند شد [2].

$$x_0 = r\sin(\varphi_1 + \varphi_2) + x_c$$
$$y_0 = l\sin\varphi_1 + (x_0 - l\cos\varphi_1)\tan(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (8)$$
$$x_2 = r\sin(\beta) + x_c$$
$$y_2 = y_0 - y + r\cos(\varphi_1 + \theta_1) - r\cos(\beta)$$

$$x_2 = l\cos(\varphi_1 + \theta_1) + a_2\cos(\beta)$$
$$y_2 = l\sin(\varphi_1 + \theta_1) + a_2\sin(\beta) \quad (9)$$

تعادل گشتاور روی مفاصل از روابط زیر بدست می‌آید.

$$-k_2\theta_2 = f_N a_2$$
$$\frac{-k_1\theta_1}{f_N\sqrt{x_2 + y_2}} = \sin[\beta + \tan^{-1}(\frac{x_2}{y_2}) + \mu_k\cos[\pi - \beta - \tan^{-1}(\frac{x_2}{y_2})] \quad (10)$$

دسته معادلات مشابه دیگری نیز برای توضیح تماس روی لینک 1 مشابه بالا می‌توان تعریف کرد که ساده‌تر و بر اساس سینماتیک و تعادل گشتاور روی مفاصل انگشت بدست خواهند آمد؛ که در اینجا از این معادلات صرف نظر شده است و تماس روی لینک داخلی، همیشه موفقیت آمیز در نظر گرفته شده است.

5- بهینه سازی و شبیه سازی پنجه ربات

در این بخش با توجه به روابط بیان شده به شبیه سازی انگشت سه‌بندی پرداخته می‌شود و برای انگشت دوبندی نتایج مرجع [2] ملاک قرار گرفته شده است. در این قسمت با استفاده از حل همزمان معادله (1 تا 9) و (10 تا 14) مقادیر θ_2 و θ_1 به عنوان تابعی از y بدست می‌آیند. حال با داشتن مقادیر مشخص دیگر پارامترها یعنی r، x_c، φ_1 و φ_2 (در مورد مقادیر هر یک از این پارامترها و بهینه سازی آنها توضیح داده می‌شود) و داشتن قیود مساله که ذکر شد، می‌توان مساله گرفتن موفق یا ناموفق را که استراتژی آن توضیح داده شد، با یک شبیه سازی دقیق تعیین نمود.

برای یک انگشت سه‌بندی که اندازه‌های بندهای آن متناسب با بندهای انگشت اشاره دست انسان در نظر گرفته شده است (جدول 2)، آنالیز ساختار سینماتیکی انگشت و تعیین زوایای بهینه بندها و نیز نسبت سفتی مفاصل آن یک ساده‌سازی پارامتری انجام شده است. به این صورت که زاویه استراحت داخلی لینک شماره یک (φ_1) و نیز نسبت سفتی مفصل یک به دو (k_1/k_2) مقادیر ثابتی در نظر گرفته شد. برای این کار از تحقیق قبلی مرجع [18] استفاده شده و زاویه استراحت لینک یک (لینک داخلی) برابر 20 درجه ($\varphi_1 = 20°$) و نسبت سفتی مفصل یک به مفصل دو نیز 0.5 در نظر گرفته شده است ($k_1/k_2 = 0.5$). سپس با این فرض اولیه دیگر پارامترهای پنجه مثل زاویه استراحت داخلی بند دوم و سوم (φ_2 و φ_3) و همچنین نسبت سفتی مفصل دو به سه (k_2/k_3)، مورد بررسی قرار گرفت. شبیه سازی مسئله بر اساس تغییرات این پارامترها انجام شده است. پس از آن مقدار بهینه هر یک از پارامترها استخراج گردید. طول هر یک از لینک‌های انگشت سه‌بندی معادل اندازه‌های بندهای انگشت اشاره دست انسان انتخاب شده و مقادیر طولی بر اساس طول لینک اول ($l_1 = l$) نیز نرمالیزه شده‌اند.

فاصله مرکز جسم دایروی تا خط المرکزین دست را با طول l نرمالیزه کرده و مقادیر آن بین صفر تا یک در نظر گرفته شده‌اند. این مقدار از صفر تا یک با مقادیر افزایشی 0.01 در شبیه‌سازی وارد خواهند شد.

$$0 \leq \frac{x_c}{l} \leq 1 \quad (11)$$

همچنین سفتی کلی مفاصل به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند.

$$\frac{1}{k_t} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \quad (12)$$

برای آنالیز مقدار نسبی سفتی دو مفصل دو و سه k_2/k_3 مقادیر0.3، 0.6 و 1 در نظر گرفته شده است. مقادیر φ_2 و φ_3 که به ترتیب بیانگر زاویه لینک دوم با لینک یک و زاویه لینک سوم با لینک دوم می‌باشند نیز دارای مقادیر بین صفر تا 70 درجه با مقادیر افزایشی 5 درجه انتخاب شده‌اند.

مقادیر متغیر بعدی که نشان دهنده اجسام با اندازه های مختلف است، یعنی r که بیانگر شعاع جسم می‌باشد نیز توسط l نرمالیزه شده و در سه سایز r/l=0.12, 0.6, 1.2 در آنالیز مورد بررسی قرار می‌گیرند. جهت شبیه‌سازی رفتار مکانیزم توضیح داده شده، پروسه گرفتن در نرم افزار متلب شبیه سازی شده و خمش مکانیزم برای مقادیر افزایشی Y شبیه سازی شده است. همچنین مقدار μ برابر 2 در محاسبات در نظر گرفته شده است.

نیروی تماسی F توسط ترم l یعنی طول لینک داخلی و نیز سفتی کلی مفاصل (k_t) نرمالیزه می‌شود. پس از انجام آنالیز، مقادیر ماکزیمم x_c/l به طوری که یک گرفتن موفق واقع شود، استخراج شده است. این مقدار بیانگر دامنه‌ای است که اگر جسم در آن محدوده قرار گیرد، قطعا به طور موفق توسط دست گرفته خواهد شد. این مقدار دامنه‌ی ماکزیمم برای هر ترکیبی از φ_2 و φ_3 پس از آنالیز در شکل 8 آورده شده است. در مرحله بعدی بزرگ‌ترین نیروی تماسی ایجاد شده روی جسم در طی فاز اول پروسه گرفتن برای هر کدام از مقادیر x_c/l بررسی شده و نتایج آن در شکل 8 نشان داده شده است.

سپس میانگین تمامی این مقادیر به عنوان میانگین نیروی ماکزیمم تماسی در کل دامنه موفقیت‌آمیز پروسه گرفتن نرمالیزه شده و به عنوان $f_r l/k_t$ بیان شده است. شکل 9 مقادیر نیرو را نشان می‌دهد که برای سه اندازه‌ی مختلف شعاع جسم و سه مقدار مختلف برای نسبت سفتی مفصل‌های لینک‌های دو به سه ارائه شده است. همانطور که گفته شد مقادیر زاویه لینک یک را برابر 20 درجه و نسبت سفتی مفصل یک نسبت به دو (k_1/k_2) برابر 0.5 به صورت ثابت و با توجه به پژوهش‌های قبلی در نظر گرفته شده‌اند [18]. مقایسه نمودارها در هر ردیف نشان می‌دهند که

جدول 2 اندازه طول بند های انگشت اشاره دست انسان [18]

Table 2 Length of knuckles of the human hand index finger

نام لینک	طول لینک (mm)
بند داخلی (لینک شماره 1)	$l_1 = l = 47$
بند میانی (لینک شماره 2)	$l_2 = 0.54l = 25.7$
بند خارجی (لینک شماره 3)	$l_3 = 0.48l = 22.4$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-13]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.1.2]

نسبتk_2/k_3 تاثیری روی دامنه ماکزیمم x_c/l نخواهند داشت. ولی به هر حال در اجسام بزرگتر، روی ناحیه بهینه مقدار x_c/l ماکزیمم تاثیر اندکی خواهد داشت. با توجه به نتایج شبیه‌سازی مشخص است که برای داشتن شرایط بهینه برای اجسام بزرگتر نیاز است که مقادیر نسبی سفتی مفصل‌ها را کوچکتر(k_2/k_3 کوچکتر) در نظر گرفت. هرچند که این تاثیر ناچیز باشد ولی بهتر است که این مقدار کوچکتر انتخاب شود. همچنین مقادیر زاویه نیز در این شرایط برای لینک دوم (φ_2) بین 25 تا 30 درجه و برای لینک سوم (φ_3) برابر 15 درجه شرایط بهتری را برای گرفتن اجسام بزرگتر در موقعیت‌های دورتر از خط مرکزی انگشت فراهم می‌کند. این امر در مورد اجسام بزرگتر قابل توجه می‌شود.

به هر حال اگر $k_2 < k_3$ باشد، روی وسعت دامنه φ_3 که مقادیر x_c/l ماکزیمم را ایجاد می‌نماید تاثیر دارد. مقایسه ستون‌ها نشان می‌دهد که فضای بهینه، اندکی با تغییرات اندازه جسم (r/l) تغییر می‌یابد و کمی کوچکتر شده و با افزایش (r/l) به سمت افزایش φ_2 پیش می‌رود. در هر صورت با افزایش φ_2 یا φ_3، مقدار x_c/l ماکزیمم، کاهش پیدا می‌کند.

با مقایسه دو کانتور مربوط به موقعیت و نیرو در شکل‌های 8 و 9 می توان مشاهده نمود که وضعیتی که منجر به نقاط بهینه برای مقادیر x_c/l می‌شود متناظر آن سبب تولید نیروهای خمشی میانگین پایین $(f_r l/k_t)$ می‌شود و بالعکس.

نکات مهمی که از این بخش استخراج می شود شامل:

1. نسبت سختی مفاصل 2 و 3 به صورت کلی تاثیر چندانی روی x_c/l ندارد ولی در اجسام با نسبتr/l بیش تر از یک، تاثیر اندکی دارد و در اجسام بزرگ بهتر است k_3 با نسبت زیادی از k_2 بیشتر در نظر گرفته شود.
2. دامنه مقادیر φ_2 و φ_3 بهینه برای جسم های کوچک وسیع تر است.
3. تاثیر اندازه جسم بر تغییر φ_3 نسبت به φ_2 با در نظر گرفتن $f_r l/k_t$ ثابت، بیشتر است.
4. وضعیت‌هایی که در آن مقادیر x_c/l بهینه می‌شود متناسب با آن نیروی خمشی میانگین کاهش می‌یابد.

همانطور که از شکل‌ها مشخص شده، با داشتن زاویه داخلی 20 درجه برای لینک شماره 1 انگشت سه‌بندی و نیز نسبت k_1/k_2 =0.5، برای داشتن دامنه گسترده‌ای از موقعیت‌های قرارگیری جسم یعنی x_c/l ماکزیمم و نیز اندازه‌های مختلف اجسام در حالی که نیروی تماس در فاز اولیه گرفتن پایین باشد، بایستی مقادیر φ_2 و φ_3 به ترتیب بین 25 تا 30 درجه و 15 تا 20 درجه انتخاب شوند. همچنین مقادیر k_2/k_3 نیز هرچه کوچکتر باشند مقدار نیروی تماسی کمتر و ناحیه بهینه x_c/l ماکزیمم بیشتر می‌شود. برای صحت سنجی مطالب، این مقادیر را با مرجع [18] مقایسه کرده و همانطور که در این پژوهش آمده است، برای حالت طبیعی دست انسان زوایای داخلی بندها در حالت باز شدگی انگشت، برابر $\varphi_1 = 20°$، $\varphi_2 = 27°$، $\varphi_3 = 15°$ می‌باشند. در پژوهش ذکر شده، مقادیر نیروها و بازوی ممان روی هر مفصل آورده شده و با استفاده از آنها می‌توان مقادیر گشتاورهای اعمالی روی هر مفصل و نسبت آنها را که متناظر با نسبت سختی هر مفصل می‌باشند، محاسبه نمود.

از آنجا که در مطالعه حاضر، مقادیر سختی مفاصل متفاوت و نسبت گشتاوری یکسان در نظر گرفته شده است به استناد پژوهش‌های قبلی [19,14,3-1] نسبت سختی‌های مفاصل نسبت معکوسی با گشتاورهای اعمالی روی مفاصل دارد. بدین معنا که گشتاور بیشتر، معادل استفاده از یک گشتاور ثابت برای یک مفصل با ضریب سختی پایین است. با یک محاسبه ساده، مقادیر نسبی سختی مفاصل به ترتیب k_1/k_2=0.52 و k_2/k_3=0.3 محاسبه می‌شوند. از طرفی می‌توان از این پژوهش برای انتخاب مقادیر زوایای داخلی مفاصل انگشت اشاره دست انسان در حالت باز شدن و نیز میزان نیروی کشش کابل برای حرکت انگشتان نیز استفاده کرد. در پژوهش حاضر بیان شده است که برای طرحی که تمام بندهای انگشتان توسط یک تاندون حرکت داده می‌شوند، میزان کشش تاندون برابر 208 نیوتن برای تمامی لینک ها کافی است و این مقدار کشش، ظرفیتی معادل انگشت دست انسان فراهم خواهد آورد. لذا در اینجا برای دست مورد نظر با توجه به شباهت‌های ذکر شده سعی بر آن شده که این مقدار کشش کابل فراهم شود.

با توجه به کانتورهای بدست آمده برای انگشت سه‌بندی، مشخص شد که با داشتن زوایای داخلی φ_1، φ_2، φ_3 به ترتیب برابر 20، 30، 15 درجه و نیز نسبت‌های سختی مفاصل پایین در حدود k_1/k_2= 0.52 و k_2/k_3 =0.3 می‌توان دامنه بهینه‌ای از نظر موفقیت در امر گرفتن برای اجسام با اندازه‌های مختلف و در موقعیت‌های مختلف داشت، در حالی که نیروهای تماسی در طی پروسه گرفتن در مقادیر پایین باقی بمانند. با مقایسه این نتایج با مطالب گفته شده در مرجع [18] اختلاف اندکی در نتایج با مقادیر محاسبه شده برای دست انسان دیده می‌شود. این اختلاف برای زوایای بندهای دوم و سوم حدود 10 درصد می‌باشد. برای مقادیر نسبی سختی مفصل دوم و سوم اختلاف ناچیزی می‌باشد. با توجه به مطالب ذکر شده مشخص شدکه نتایج به دست آمده برای زاویه لینک‌ها و نیز نسبت‌های سختی مفاصل بهینه، با داده های ذکر شده در پژوهش قبلی ذکر شده هم‌خوانی مناسبی داشته و به دست انسان نزدیک‌تر می‌باشد.

برای یک انگشت دو بندی تحقیقی مشابه تحقیق حاضر صورت گرفت. در این تحقیق زوایای استراحت داخلی یک انگشت دو لینکی و نیز نسبت سختی مفصل‌های آن بررسی شده (شکل 10) و نتایج نشان دادند که با داشتن زوایای داخلی 25 و 45 درجه برای لینک‌های داخلی و خارجی و نسبت سختی مفاصل کوچک (0.1 تا 0.6=k_1/k_2) می‌توان دامنه گسترده‌ای از اجسام با اندازه‌های مختلف و در موقعیت‌های مختلف را با داشتن کمترین نیروی تماسی در فاز اول مرحله گرفتن به طور موفق گرفت [19,14, 3-1]. از نتایج انگشت دوبندی و نتایج حاصل برای ساختار سینماتیک و تطبیق‌پذیر انگشت سه بندی، برای ساخت پنجه دو انگشتی که شامل یک انگشت دوبندی و یک انگشت سه‌بندی می‌باشد استفاده کرده و کارایی آن برای جابجایی اجسام مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت.

6- ساخت مدل پنجه

با استفاده از نتایج بدست آمده از پروسه شبیه‌سازی و نیز تحقیقات قبلی، به ساخت و ارزیابی یک دست دو انگشتی پرداخته می‌شود که بیشترین شباهت را به دست انسان داشته باشد. این پنجه ترکیبی از یک انگشت دوبندی با اندازه لینک‌های برابر به عنوان شست و یک انگشت سه‌بندی به عنوان انگشت اشاره که با استفاده از نتایج بهینه‌سازی ساختار انگشت سه‌بندی در پژوهش حاضر ساخته شده است می باشد.

برای ساخت دست از پرینتر سه بعدی استفاده شد که کم‌هزینه، دارای دقت بالا و سریع می‌باشد. در این تحقیق از ماده PLA (اسید پلی لاکتیک) برای ساخت لینک‌ها و کف دست استفاده شده است. این ماده سبک و مقاوم

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-13]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.1.2]

بوده، قیمت پایینی داشته و برای ساخت دست با این ماده زمان کوتاه‌تری نیاز است که منجر به پایین آمدن هزینه ساخت می‌شود.

برای اتصال لینک‌ها و به دست آوردن تطبیق‌پذیری مد نظر طراحی، از مفصلی با جنس پلی‌اورتان استفاده شده است. از بارزترین خصوصیات این ماده، مقاومت در برابر سایش و ضربه‌پذیر بودن و خاصیت ویسکوالاستیک این ماده است که باعث دمپینگ ارتعاشات ناخواسته انگشتان می‌شود. همچنین این ماده دارای سختی پایینی نسبت به ارتعاشات آن بوده و مقاومت مکانیکی بالایی دارد.

با توجه به شرایط و امکانات موجود برای نیروی محرکه انگشتان نیز از سروموتورهایی استفاده شد که علاوه بر داشتن قدرت مناسب حجم و هزینه پایینی داشته باشند. برای ساخت دست ابتدا مدل سه‌بعدی آن در نرم افزار طراحی مکانیکی(سالید ورک) طراحی و پس از رفع ایرادات احتمالی آن، با استفاده از پرینتر سه بعدی ساخته شد (شکل 11).

برای قرار دادن مفاصل و نیز حفظ زاویه بین بندهای انگشتان متناسب با نتایج شبیه‌سازی، لینک‌های انگشتان توسط یک دیواره نازک توخالی که محل قرارگیری مفصل‌ها می‌باشند به هم متصل شده که پس از قرارگیری مفاصل در محل خود، این دیواره‌های نازک به راحتی شکسته شده و از طرح حذف خواهند شد. سطح داخلی هر انگشت شامل یک پد نرم است که جهت بالا بردن اصطکاک استفاده شده است و باعث بالا رفتن و تا حدودی موفق بودن عمل گرفتن می‌شود. ضخامت این لایه حدود 2 میلیمتر و جنس آن نیز از همان ماده پلی‌اورتان مورد استفاده در مفاصل انتخاب شده است که ضریب اصطکاک مناسبی دارد.

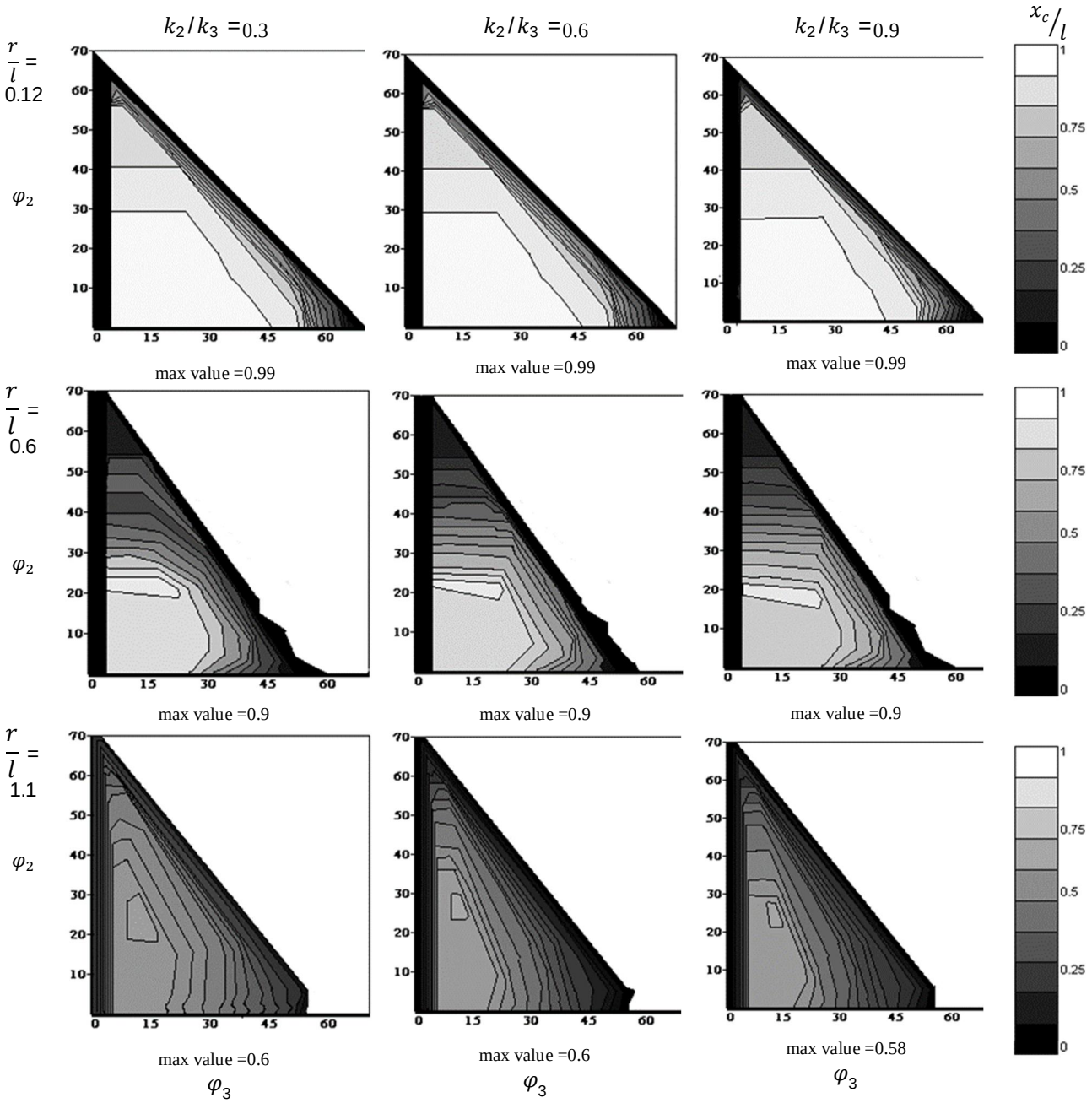

Fig. 8 Result of kinematic structure simulation and 3 degree of freedom planer manipulator compliant revolute joints

شکل 8 نتایج شبیه‌سازی ساختار سینماتیک و مفاصل تطبیق پذیر با طرح 3 درجه آزادی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-13]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.1.2]

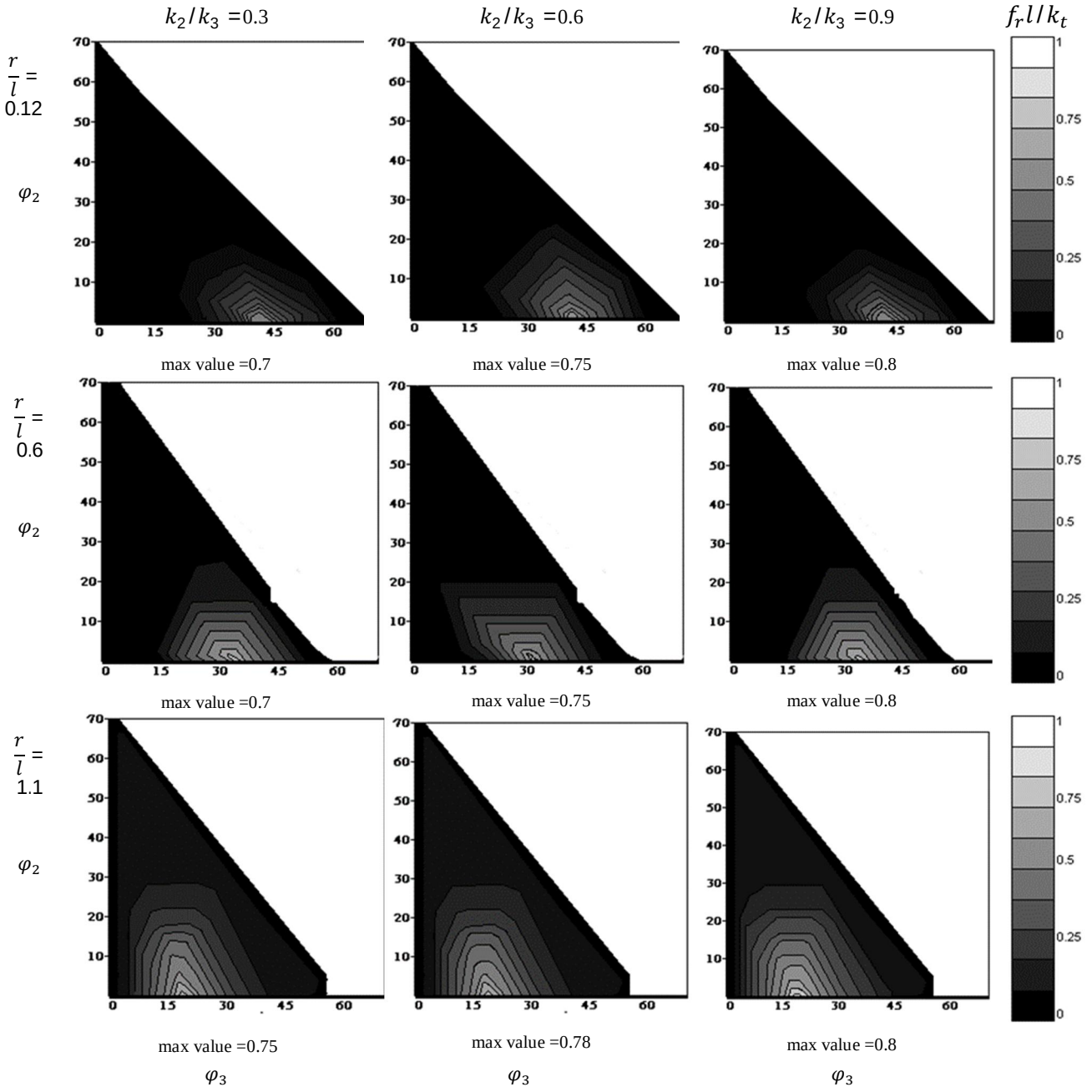

Fig. 9 Average normalized force ($f_r l/k_t$) for link length normalization according to the links initial angle

شکل 9 میانگین نیروی نرمالیزه شده برای طول نرمالیزه بر حسب زاویه اولیه لینک ها

برای اعمال نسبت متفاوت سفتی مفصل‌ها می‌توان نسبت ضخامت‌های متفاوتی برای مفصل‌ها درنظر گرفت. همچنین برای انتقال نیرو بین بندهای انگشت، هر انگشت شامل یک تاندون از جنس نخ ماهیگیری با حداکثر کشش 27 کیلوگرم می‌باشد که به طور سراسری در میان لینک‌ها کشیده شده و انتهای آن به انتهای لینک خارجی در هر انگشت متصل می‌باشد. طرف دیگر نخ هر انگشت نیز به محرک‌ها متصل می‌شود که خارج از فضای دست قرار خواهند گرفت.

برای اعمال نیروی محرکه به تاندون‌ها از سروو موتور MG 995 استفاده شد. سرعت زاویه‌ای این موتور بین 6.5 تا 8.5 rad/s است و دارای حداکثر گشتاور خروجی 1.2-1.4 NM می‌باشد. با این مقدار گشتاور خروجی، برای شعاع 0.7 سانتیمتر پولی که کابل به دور آن پیچیده می‌شود، حدود 200 نیوتن نیرو برای کابل هر انگشت ایجاد می‌کند. این مقدار نیرو همانطور که در

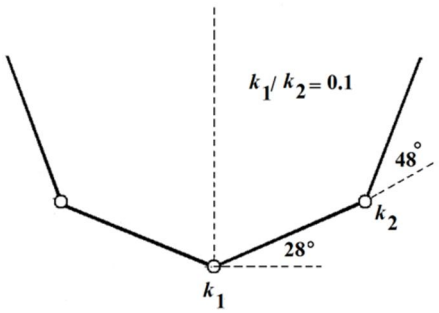

Fig. 10 Optimum finger configuration with 2 link

شکل 10 شکل بهینه انگشت دو لینکی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-13]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.1.2]

مرجع [18] آمده است برابر نیرویی است که در انگشتی با یک کابل سراسری به سه بند اعمال شده است. با این مشخصات محدوده سرعت انگشت مابین 1 تا 2 سانتی متر بر ثانیه می‌باشد.

7- ارزیابی عملی

پس از ساخت دست، آزمایش‌هایی ترتیب داده شد تا اهداف مطرح شده در این تحقیق،گرفتن موفق اجسام مختلف و افزایش محدوده گرفتن اجسام بزرگ، ارزیابی شود و نتایج این آزمایش‌ها با مشاهدات حاصل از شبیه سازی مقایسه شوند. برای این کار ابتدا دست ساخته شده بر روی یک قطعه مستطیل شکل طوری ثابت شد که فقط حرکت رو به جلو و عقب داشته باشد و دامنه حرکت آن به طرفین توسط یک بست که در زیر آن قرار دارد مقید می‌شود. سپس از یک جسم استوانه‌ای با شعاع حدود 1.2 برابر طول لینک به عنوان جسم هدف استفاده و بر روی میز کار ثابت می‌شود (شکل 12). برای تست، دست به صورت مستقیم در طول یک خط مستقیم با سرعتی مناسب، تقریبا یکنواخت و آرام به سمت تماس با جسم مورد نظر حرکت داده شده تا از ایجاد ضربه به جسم و اختلال در روند گرفتن جسم جلوگیری شود. برای این کار از اجسام با اشکال و جهت‌گیری‌های مختلف می‌توان استفاده نمود. در اینجا همانطور که گفته شد از بزرگترین جسم استفاده شد تا بتوان نتایج را تا حدودی با شبیه‌سازی مقایسه کرد. به انگشتان اجازه داده می‌شود که به صورت غیر فعال با جسم وفق پیدا کنند. لازم به ذکر است که انگشتان در این حالت هیچ حرکتی توسط موتورها نداشته و تنها هدف، بررسی این مورد است که جسم با شعاع مشخص و در موقعیت خاص توسط بندهای انگشتان

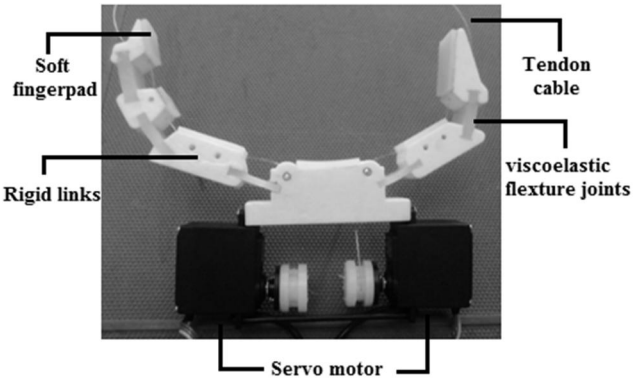

Fig. 11 Details of gripper parts and placement of components

شکل 11 جزئیات قسمت‌های دست و جانمایی اجزاء

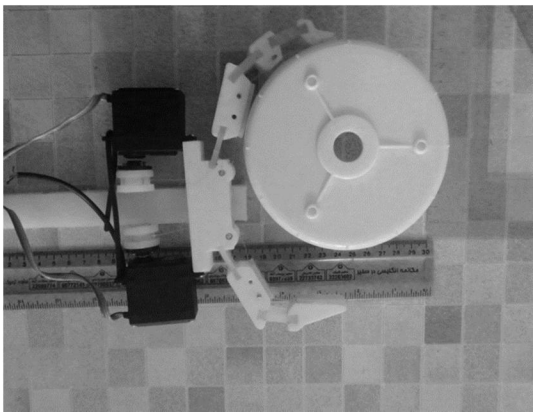

Fig. 12 The moved of gripper toward contact with object fixed on workspace

شکل 12 حرکت انگشت دست به سمت تماس با جسمی که روی میز کار ثابت شده

براحتی پوشش داده شود. کیفیت این موضوع نیز بایستی به گونه‌ای باشد که لینک‌های انگشت بیش از خط افق به سمت عقب برنگردند. مقایسه مقدار بیشینه انحراف موقعیت جسم نسبت به خط مرکزی دست یعنی همان مقدار x_c/l برای انگشت سه‌بندی و نیز در مقایسه با انگشت دوبندی در نمودار شکل 13 آورده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که مقادیر تئوری با نتایج طرح واقعی اختلاف اندکی داشته (حدود 15%) و در مقایسه با نتایج بدست آمده برای انگشت دوبندی به اندازه 30% بهبود یافته است.

در قسمت بعدی، جهت بررسی عملکرد دست، یک آزمون کمی ترتیب داده شده و در آن دست ساخته شده برای برداشتن اجسام مختلف در شرایط مختلف مورد ارزیابی عملی قرار گرفت (انتخاب اجسام بر اساس اندازه، شکل و وزن بوده است) (شکل 14).

با توجه به این که پنجه بر اساس مقادیر بهینه‌ی به دست آمده در شبیه سازی ساخته شده بود در گرفتن اجسام با نسبت‌های r/l کم موفق تر عمل می‌کرد. در آزمایشات انجام شده اجسامی که نسبت r/l نزدیک به 0.6 داشتند (فلاکس، پرتغال، لیوان) معمولا در $0 \le x_c/l \le 1$ بیشتر مواقع به صورت پایدار گرفته می شدند که با توجه به شبیه سازی‌ها قابل درک بود.

8- بحث و نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده برای پنجه ساخته شده در این پژوهش، دامنه خطای موقعیت یابی مجاز، حدود 30 درصد نسبت به انگشت دوبندی بررسی شده توسط دالر بهبود یافته است. این مقدار برای پنجه دوبندی متقارن دالر برای اجسام بزرگ برابر 0.46 در تحقیقات قبلی بدست آمده است و در این تحقیق، برای پنجه ساخته شده مشابه دست انسان 0.6 برآورد شده است. لذا استفاده از یک انگشت سه‌بندی در طرح ساخت دست دو انگشتی، شرایط گرفتن موفق و نیز وضعیت نیروی تماسی را بهبود می‌بخشد. همچنین مقایسه مقدار بیشینه انحراف موقعیت جسم نسبت به خط مرکزی دست یعنی همان مقدار x_c/l برای پنجه سه‌بندی-دوبندی در تئوری و نتیجه ذکر شده آن با نتایج عملی، با پنجه دوبندی-دوبندی ارزیابی شدند. این مقایسه نشان داد که مقادیر تئوری با نتایج طرح واقعی اختلاف اندکی داشته (حدود 15%) و در مقایسه با نتایج بدست آمده برای پنجه دوبندی-دوبندی همانطور که گفته شد به اندازه 30% بهبود یافته است. نتایج بررسی عملکرد دست نشان می‌دهند، دست ساخته شده با وجود اینکه دارای دو انگشت بوده و نیز برای آن از موتوری ساده و ارزان قیمت استفاده شده است، توانایی گرفتن

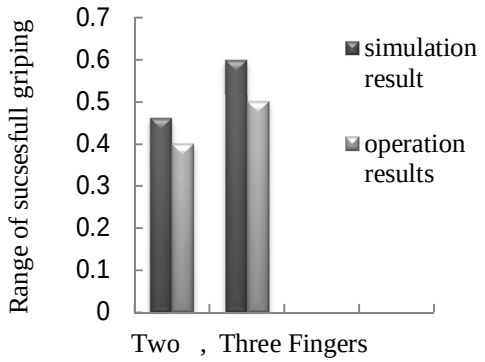

Fig. 13 The comprising of theoretical results with evaluate performance fabricated hand for 2 & 3 link finger

شکل 13 مقایسه نتایج تئوری با بررسی عملکرد دست ساخته شده برای انگشتان دو و سه‌بندی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-13]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.1.2]

Fig. 14 The performance evaluation gripper by picking up and moving various objects

شکل 14 ارزیابی عملکرد دست با برداشتن و جابجایی اجسام مختلف

اجسام مختلفی همانند دست‌های ساخته شده قبلی را دارد. همچنین نسبت به پنجه‌های متقارن طرح های قبلی با نزدیک شدن طرح به ساختار دست انسان عملکرد پنجه بهبود می‌یابد. از طرفی نتایج شبیه‌سازی نیز نشان داد که استفاده از یک انگشت سه‌بندی، دامنه خطاهای موقعیت‌یابی ربات را بالا برده و نیز حدود 10% برای اجسام بزرگ، نیروهای تماسی بین جسم و انگشت طی فاز اولیه گرفتن را کاهش می‌دهد.

این امر به طراح اجازه استفاده از حسگرهای ضعیف‌تر و ارزانتر را برای موقعیت‌یابی بازوی ربات خواهد داد و عمل گرفتن در شرایط نامعلوم و نامنظم روزمره با درصد خطای پایین‌تر و موفقیت بیشتر را همراه خواهد داشت.

9- مراجع

[1] A. M. Dollar, R. D. Howe, The SDM Hand: A highly adaptive compliant grasper for unstructured environments, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 29, No. 5, pp. 3-11, 2010.

[2] A. M. Dollar, R. D. Howe, Towards grasping in unstructured environments: grasper compliance and configuration optimization, *Advanced Robotics*, Vol. 19, No. 5, pp. 523-543, 2005.

[3] A. M. Dollar, R. D. Howe, The highly adaptive SDM hand: design and performance evaluation, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 29, No. 5, pp. 585-597, 2010.

[4] H. Bruyninckx, S. Demey, V. Kumar, Generalized stability of compliant grasps, *Proceedings of the 1998 International Conference on Robotics and Automation*,Leuven, Belgium, May 16-20 ,1998.

[5] M. R. Cutkosky, I. Kao, Computing and controlling the compliance of a robotic hand, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 5, No. 2, pp. 151-165, 1989.

[6] K. J. Salisbury, Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates, *19th IEEE Conference Decision and Control*,Stanford,California, pp.95-100, 1980.

[7] J. P. Desai, R. D. Howe, Towards the development of a humanoid arm by minimizing interaction forces through minimum impedance control, *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*,Philadelphia, Pennsylvania, USA, pp. 4214-4219, 2001.

[8] C. Francois, K. Ikeuchi, M. Hebert, A three-finger gripper for manipulation in unstructured environments, *Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*,Sacramento, California,USA ,April9-11, 1991.

[9] S. Joo, N. Yoshihara, F. Miyazaki, Development of variable RCC using elastomer shearpads, *JSME International Journal*, Series C, Vol. 44, No. 4, pp. 867-876, 1998.

[10] S.H. Drake, *Using compliance in lieu of sensory feedback for automatic assembly*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, Massachusetts, 1977.

[11] N. Ciblak, H. Lipkin, New Properties of the Remote Center of Compliance, *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*,Albuquerque, New Mexico,USA, pp. 921-926, 1997.

[12] J.Nevins, D. Whitney, Computer controlled assembly, *Scientific American*, Vol. 238, No. 2, pp. 62-74, 1978.

[13] J. M. Schimmels, S. Huang, A passive mechanism that improves robotic positioning through compliance and constraint, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 12, No. 1, pp. 65-71, 1996.

[14] R.Ma.Raymond, L. U.Odhner, A.M.Dollar,A modular, open-source 3D printed underactuated hand, *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*,Karlsruhe, Germany, May 6-10, 2013.

[15] G.A.Kragten., M.Baril., C.Gosselin., J.L.Herder, Stable precision grasps by underactuated fingers, *transaction on Robotics*, Vol. 27,pp. 1056-1066, 2011.

[16] A. Naimzad,Y. Hojat, Design and fabrication of two fingers flexible miniature gripper based on porpous mgnetorheological nanocomposites and its operational study, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 86-179, 2014.

[17] A. Fakhari, M. Keshmiri, Slippage dynamic modeling in object grasping and manipulation with soft fingers, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 332-340, November 2014.

[18] N.Pollard, G.Richards, Tendon arrangement and muscle force requirements for humanlike force capabilities in a robotic finger, *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington DC, USA, pp.3755- 3762, 2002.

[19] R.Ma.Raymond, L.U.Odhner, A.M.Dollar,On dexterity and dexterous manipulation, *The 15th International Conference on Advanced Robotics, Tallinn University of Technology*, Tallinn, Estonia, June 20-23, 2011.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-13]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.1.2]