ISSN: 2476-6909; Modares. Mech. Eng. *;*(*):*-*

Modares Mechanical Engineering

DOI:
journal homepage: mme.modares.ac.ir

Design and development of a two-fingered parallel robotic gripper with three rotational DOF and force control for object grasping

Mahdi Dalvand[1], Mahdi Tale Masouleh[2*], Mohammad Reza Hairi Yazdi[1]

[1] School of Mechanical Engineering, College of Engineering, Tehran University, Tehran, Iran
[2] School of Electrical Engineering, College of Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History
Received: **** **, *
Revised: **** **, *
Accepted: *** **, *
ePublished: **** **, *

ABSTRACT

Robotic grippers serve as the interface between a robot and the manipulated object and play a key role in accurate and safe object handling. When a gripper lacks the capability to reorient the grasped object, the range of feasible operations is limited, particularly in robots with a restricted number of DOF, such as Delta parallel robots. In this study, a parallel two-finger robotic gripper with three rotational DOFs and grasping-force control was designed and fabricated for modular integration with a Delta parallel robot. The gripper was designed to minimize weight and dimensions while maintaining the robot's agility and workspace. A parallel arrangement of servo motors and a combination of metallic and plastic components were employed to achieve a compact structure. A tactile sensor was integrated to measure the contact force and enable control of the grasping force. The developed gripper provides rotational ranges of 360° about the vertical axis, 90° about the horizontal axis, and 180° about the axis perpendicular to the horizontal axis. The angular command increment is 1°. The grasping force is adjustable from 0.5 to 5 N in increments of 0.1 N. Experimental tests were conducted to evaluate the rotational motion about the three axes and the grasping-force control capability. The results demonstrated stable operation in both rotational motion and grasping-force control, indicating that the proposed gripper can effectively extend the operational capabilities of Delta parallel robots through modular integration.

Keywords: Robotic Gripper, 3 Rotational DOF, Delta Parallel Robot , Tactile Sensor, Pick-and-Place

In Press
Pre-Proof Version

How to cite this articl
Dalvand M, Tale Masouleh M, Hairi Yazdi M.R, Design and development of a two-fingered parallel robotic gripper with three rotational DOF and force control for object grasping. Modares Mechanical Engineering; *(*): ****-****.

*Corresponding author's email: m.t.masouleh@ut.ac.ir
*Corresponding ORCID ID: 0000-0001-8249-1998

Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

شاپا: ۶۹۰۹-۲۴۷۶ مهندسی مکانیک مدرس. *؛*(*):*_*
مهندسی مکانیک مدرس
DOI:
صفحه اصلی مجله: mme.modares.ac.ir

طراحی و توسعه گیره رباتیک دو انگشتی موازی با قابلیت سه درجه آزادی دورانی و کنترل نیرو به جهت برداشت اجسام

مهدی دالوند[۱]، مهدی طالع ماسوله[۲*]، محمدرضا حائری یزدی[۱]

[۱] گروه مهندسی مکانیک، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۲] گروه مهندسی برق، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله
مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله
دریافت: **/**/****
بازنگری: **/**/****
پذیرش: **/**/****
ارائه آنلاین: **/**/****

چکیده

گیره‌های رباتیک به‌عنوان واسط میان ربات و جسم، نقش مهمی در ایجاد تعامل دقیق و ایمن با محیط ایفا می‌کنند. استفاده از گیره‌های رباتیک فاقد قابلیت تغییر جهت‌گیری جسم در ربات‌هایی با درجات آزادی محدود، نظیر ربات موازی دلتا، موجب محدود شدن دامنه عملیات قابل انجام توسط سامانه می‌شود. در این پژوهش، یک گیره رباتیک دو انگشتی موازی با سه درجه آزادی دورانی و قابلیت کنترل نیروی گرفتن، با هدف نصب ماژولار بر روی ربات موازی دلتا طراحی و ساخته شد. ساختار مکانیکی گیره با تأکید بر کاهش وزن و ابعاد به منظور حفظ چابکی و فضای کاری ربات توسعه یافت و برای این منظور، آرایش موازی سروموتورها و ترکیب قطعات فلزی و پلاستیکی به کار گرفته شد. برای اندازه‌گیری نیروی تماس و کنترل نیروی گرفتن نیز از حسگر لامسه استفاده شد. گیره رباتیک ساخته شده قابلیت دوران ۳۶۰ درجه حول محور عمودی، ۹۰ درجه حول محور افقی و ۱۸۰ درجه حول محور عمود بر محور افقی را با گام کنترلی ۱ درجه فراهم می‌کند. همچنین نیروی گرفتن در محدوده ۰٫۵ تا ۵ نیوتون با گام کنترلی ۰٫۱ نیوتون قابل تنظیم است. عملکرد سامانه در سناریوهای مختلف شامل ایجاد دوران حول سه محور و کنترل نیروی گرفتن ارزیابی شد. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده عملکرد پایدار در انجام حرکات دورانی و کنترل نیروی گرفتن بود و قابلیت استفاده از آن به‌عنوان یک ماژول مستقل برای افزایش قابلیت‌های حرکتی ربات موازی دلتا را نشان داد.

کلیدواژه‌ها: گیره رباتیک، سه درجه آزادی دورانی، سنسور لامسه، ربات موازی دلتا، عملیات گذاشت و برداشت

نحوه ارجاع به این مقاله
دالوند مهدی، طالع ماسوله مهدی، حائری یزدی محمدرضا، طراحی و توسعه گیره رباتیک دو انگشتی موازی با قابلیت سه درجه آزادی دورانی و کنترل نیرو به جهت برداشت اجسام، مهندسی مکانیک مدرس. * (*): ****-****.

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.t.masouleh@ut.ac.ir
*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۰۰۰۰-۰۰۰۱-۸۲۴۹-۱۹۹۸

Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

In Press, Proof Version

۱- مقدمه

گیره‌های رباتیک به‌عنوان واسط مکانیکی میان ربات و محیط، نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت عملیات گرفتن، جابه‌جایی و دستکاری اجسام دارند. عملکرد یک سامانه رباتیکی در انجام عملیات دستکاری تنها به قابلیت‌های بازوی ربات وابسته نیست، بلکه ویژگی‌های مکانیکی گیره، نحوه تماس با جسم، قابلیت کنترل نیرو و امکان تغییر موقعیت و جهت‌گیری جسم نیز در عملکرد نهایی سامانه مؤثر هستند [۱]. ازاین‌رو، توسعه گیره‌ها و مکانیزم‌های دستکاری با قابلیت انطباق با وظایف مختلف، یکی از زمینه‌های مهم پژوهش در رباتیک و مکاترونیک محسوب می‌شود. در این زمینه، طراحی گیره‌هایی با قابلیت انطباق مناسب با اجسام مختلف و عملکرد قابل اعتماد در شرایط متنوع محیطی مورد توجه قرار گرفته است [۲].

گیره‌های صنعتی متداول معمولاً وظیفه اصلی گذاشت و برداشت جسم را بر عهده دارند و قابلیت تغییر موقعیت و جهت‌گیری جسم عمدتاً توسط بازوی ربات تأمین می‌شود. این رویکرد در بازوهای سری با شش یا تعداد بیشتری درجه آزادی امکان‌پذیر است، زیرا بخشی از درجات آزادی بازو به موقعیت‌دهی و بخش دیگری به کنترل جهت‌گیری ابزار یا جسم اختصاص می‌یابد. بااین‌حال، استفاده از گیره‌های فاقد قابلیت تغییر جهت‌گیری جسم در ربات‌هایی با درجات آزادی محدود، دامنه عملیات قابل انجام توسط سامانه را محدود می‌کند. این مسئله به‌ویژه در ربات‌های موازی مانند ربات موازی دلتا اهمیت بیشتری دارد، زیرا این ربات‌ها در پیکربندی متداول خود عمدتاً سه درجه آزادی انتقالی در اختیار دارند و تغییر مستقل جهت‌گیری ابزار یا جسم در آن‌ها به‌طور ذاتی امکان‌پذیر نیست.

یکی از راهکارهای توسعه قابلیت‌های دستکاری، افزودن یک مکانیزم مچ رباتیکی میان بازو و گیره است. مچ‌های رباتیکی می‌توانند درجات آزادی دورانی لازم برای تغییر جهت‌گیری ابزار را فراهم کنند؛ بااین‌حال، استفاده از مچ‌های سری متداول ممکن است موجب افزایش ابعاد، جرم و اینرسی مجموعه انتهایی ربات شود. از سوی دیگر، طراحی مکانیزم‌های فشرده با قابلیت کنترل چندمحوره، به‌ویژه در کاربردهایی که فضای کاری، جرم متحرک و قابلیت مانور اهمیت دارند، همچنان یک چالش طراحی محسوب می‌شود.

در سال‌های اخیر، سازوکارهای مختلفی برای ایجاد حرکت دورانی چندمحوره در بخش انتهایی سامانه‌های رباتیکی ارائه شده‌اند. والیا و همکاران [۳] یک مکانیزم موازی کروی با سه درجه آزادی دورانی و عملگرهای یکپارچه ارائه کردند. در این پژوهش، از طراحی مولد و بهینه‌سازی ساختار با هدف کاهش جرم و دستیابی به یک مکانیزم فشرده استفاده شد و قابلیت مکانیزم برای کنترل جهت‌گیری در سه محور مورد ارزیابی قرار گرفت. این پژوهش نشان می‌دهد که مکانیزم‌های موازی کروی می‌توانند گزینه‌ای مناسب برای ایجاد حرکت دورانی چندمحوره در سامانه‌های فشرده باشند؛ بااین‌حال، مکانیزم ارائه‌شده به‌عنوان یک مچ برای کنترل جهت‌گیری توسعه یافته و قابلیت گرفتن اجسام را ندارد.

در پژوهشی دیگر، ریورا سوتو و همکاران [۴] یک مچ رباتیکی شش درجه آزادی مبتنی بر هندسه پلتفرم استوارت را با یک گیره دو انگشتی موازی ترکیب کردند. در این ساختار، شش عملگر خطی در آرایش شش–شش، یک صفحه پایه را به یک صفحه متحرک متصل کرده و گیره بر روی صفحه متحرک نصب شده است. این سامانه علاوه بر حرکات دورانی، امکان جابه‌جایی انتقالی صفحه متحرک را نیز فراهم می‌کند و با هدف افزایش قابلیت حرکتی گیره‌های موازی توسعه یافته است. هرچند این رویکرد دامنه حرکتی قابل توجهی فراهم می‌کند، استفاده از شش عملگر خطی و پلتفرم استوارت، ساختار را از نظر ابعاد، پیچیدگی و تعداد عملگرها نسبتاً پیچیده می‌سازد.

در زمینه توسعه گیره‌های رباتیک با قابلیت تغییر جهت‌گیری، بکر و همکاران [۵] یک گیره چرخان ارائه کردند که شامل یک بخش پایه، یک بخش قابل دوران نسبت به پایه و یک گیره با دو فک است. در این ساختار، علاوه بر عملکرد گرفتن و رهاسازی جسم، امکان دوران مستقل مجموعه گیره و جسم گرفته‌شده حول یک محور فراهم شده است. اگرچه این ساختار قابلیت تغییر جهت‌گیری جسم را افزایش می‌دهد، ولی حرکت دورانی آن به یک محور محدود است.

سیماعان و همکاران [۶] نیز یک مجموعه مچ و گیره رباتیکی برای استفاده در ربات‌های پیوسته و سامانه‌های جراحی ارائه کردند. در این ساختار، گیره در انتهای یک مچ رباتیکی قرار گرفته و با استفاده از سازوکارهای مختلف، امکان ایجاد حرکات دورانی چندمحوره برای مجموعه گیره فراهم شده است. در ساختار پیشنهادی، ترکیب حرکات پیچش، خم‌شدن و چرخش جانبی، قابلیت کنترل جهت‌گیری گیره و ابزار را فراهم می‌کند. بااین‌حال، این سازوکار به‌طور ویژه برای کاربردهای جراحی و ربات‌های پیوسته توسعه یافته است.

لوران و همکاران [۷] یک مچ رباتیکی موازی با چهار درجه آزادی ارائه کردند که سه درجه آزادی آن برای تغییر جهت‌گیری مجموعه متحرک و درجه آزادی چهارم برای عملکرد گیره یا ابزار مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ساختار پیشنهادی، عملگرها بر روی بخش ثابت مکانیزم قرار گرفته‌اند که موجب کاهش جرم و اینرسی اجزای متحرک می‌شود. همچنین، حرکت نسبی اجزای متحرک می‌تواند برای ایجاد عملکرد گرفتن یا برش مورد استفاده قرار گیرد. این ساختار، قابلیت‌های مناسبی برای ایجاد حرکت دورانی چندمحوره فراهم می‌کند، اما از نظر ساختار و کاربرد هدف با یک گیره مستقل و ماژولار برای افزایش درجات آزادی ربات‌های موازی متفاوت است.

در زمینه مکانیزم‌های موازی، گاسلن و همکاران [۸] یک مکانیزم فضایی با تحریک افزونه سینماتیکی ارائه کردند که هدف آن افزایش محدوده حرکت دورانی و اجتناب از وضعیت‌های تکین است. در یکی از ساختارهای پیشنهادی، یک سکوی متحرک توسط چند شاخه مکانیکی کنترل می‌شود و یک گیره دو انگشتی نیز با بخش خروجی مکانیزم یکپارچه شده است. با وجود قابلیت‌های حرکتی قابل توجه، ساختار پیشنهادی از مکانیزم موازی چندشاخه و تحریک افزونه استفاده می‌کند و از نظر تعداد اجزا و عملگرها با یک ماژول فشرده و مستقل برای نصب بر روی ربات‌های دارای سه درجه آزادی انتقالی متفاوت است.

شنون [۹] نیز مکانیزمی با سه درجه آزادی دورانی ارائه کرد که امکان کنترل مستقل حرکات غلتش، خم‌شدن و چرخش جانبی را فراهم می‌سازد. در این ساختار، حرکت سه ورودی از طریق مجموعه‌ای از چرخ‌دنده‌ها و محورهای استوانه‌ای هم‌مرکز به بخش خروجی منتقل می‌شود. استفاده از محورهای هم‌مرکز علاوه بر ایجاد قابلیت کنترل مستقل جهت‌گیری خروجی، یک مسیر عبوری مرکزی برای کابل‌ها، سیم‌ها، فیبرهای نوری یا مجاری انتقال سیال فراهم می‌کند. این مکانیزم برای کنترل جهت‌گیری ابزار یا حسگر در بخش انتهایی سامانه‌های رباتیکی مناسب است، اما به‌طور خاص به‌عنوان یک گیره رباتیکی مستقل با قابلیت دوران توسعه نیافته است.

در کنار قابلیت تغییر جهت‌گیری، کنترل نیروی گرفتن نیز یکی از عوامل اساسی در دستکاری ایمن و قابل اعتماد اجسام است. اعمال نیروی ناکافی می‌تواند موجب لغزش یا افتادن جسم شود، در حالی که اعمال نیروی بیش از حد ممکن است باعث آسیب به جسم گردد. رفتار تماس و لغزش میان انگشت‌های گیره و جسم، از عوامل مؤثر بر پایداری عملیات گرفتن و دستکاری محسوب می‌شود و مدل‌سازی دینامیکی لغزش می‌تواند در تحلیل عملکرد گیره‌های مجهز به انگشت‌های نرم مورد استفاده قرار گیرد [۱۰]. همچنین استفاده از حسگرهای نیرو در حلقه بازخورد، امکان پیاده‌سازی کنترل حلقه‌بسته نیروی گرفتن و تنظیم نیروی اعمالی متناسب با شرایط تماس را فراهم می‌کند [۱۱]. همچنین، پیشرفت حسگرهای لمسی و به‌کارگیری آن‌ها در سامانه‌های گرفتن، امکان دریافت اطلاعات مربوط به تماس و نیرو و بهبود قابلیت انطباق سامانه در هنگام دستکاری اجسام را فراهم کرده است [۱۲].

با وجود این، استفاده همزمان از یک ساختار مکانیکی دارای قابلیت تغییر جهت‌گیری مستقل و سامانه کنترل نیروی گرفتن مبتنی بر بازخورد لمسی، به‌ویژه در قالب یک ماژول مستقل قابل نصب بر روی ربات‌های موازی، نیازمند طراحی یکپارچه سازوکار مکانیکی، سامانه محرک و کنترل‌کننده است.

بررسی پژوهش‌ها و سازوکارهای موجود نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از مطالعات پیشین بر توسعه مچ‌های رباتیکی چنددرجه‌آزادی، مکانیزم‌های کنترل جهت‌گیری یا گیره‌های دارای قابلیت کنترل نیرو متمرکز بوده‌اند. بااین‌حال، ترکیب قابلیت گرفتن، کنترل نیرو و ایجاد سه درجه آزادی دورانی در قالب یک گیره دو انگشتی موازی که بتواند به‌صورت یک ماژول مستقل به ربات‌های دارای درجات آزادی انتقالی، مانند ربات موازی دلتا، افزوده شود، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. چنین ماژولی باید ضمن فراهم کردن قابلیت تغییر جهت‌گیری جسم، دارای جرم و ابعاد مناسب باشد تا تأثیر نامطلوبی بر چابکی و فضای کاری ربات نداشته باشد. افزون بر این، قابلیت کنترل نیروی گرفتن برای دستکاری ایمن و قابل اعتماد اجسام ضروری است.

بر این اساس، در پژوهش حاضر یک گیره رباتیک دو انگشتی موازی با سه درجه آزادی دورانی و قابلیت کنترل نیروی گرفتن طراحی و ساخته شده است. ساختار پیشنهادی به‌گونه‌ای توسعه یافته است که به‌صورت یک ماژول مستقل بر روی ربات موازی دلتا نصب شده و بدون ایجاد تغییر در ساختار اصلی ربات، قابلیت تغییر جهت‌گیری جسم را به سامانه می‌افزاید. در طراحی مکانیکی، کاهش جرم و ابعاد مجموعه با استفاده از آرایش مناسب عملگرها و ترکیب اجزای فلزی و پلاستیکی مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، با استفاده از حسگر لمسی، بازخورد لازم برای کنترل نیروی گرفتن فراهم شده است. عملکرد سامانه طراحی‌شده از نظر ایجاد حرکات دورانی حول سه محور و کنترل نیروی گرفتن به‌صورت تجربی ارزیابی شده است.

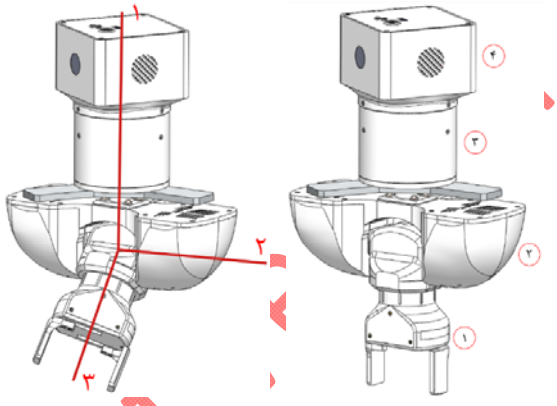
۲- طراحی گیره رباتیک

با توجه به مسئله موجود، گیره رباتیک باید به‌گونه‌ای باشد که توانایی دوران در راستای سه محور را داشته باشد تا در کنار سه درجه آزادی انتقالی که ربات موازی

In Press, Pre-Proof Version

دلتا فراهم می‌کند، در مجموع شش درجه آزادی در دسترس باشد. در طراحی انجام‌شده، اولین درجه آزادی در راستای محور عمودی است. دومین درجه آزادی در راستای محور افقی است و سومین درجه آزادی در راستای محوری عمود بر محور افقی است (شکل ۱).

در مسیر طراحی برای رسیدن به هدف مورد نظر، اولین و مهم‌ترین قید طراحی، کمینه کردن ارتفاع گیره رباتیک است تا فضای کاری ربات موازی دلتا بیشینه شود. قید بعدی کمینه‌سازی وزن گیره رباتیک است تا چابکی ربات موازی موازی دلتا حفظ شود. همچنین طراحی باید به‌گونه‌ای باشد که کمترین هزینه ساخت در عین حفظ کیفیت را داشته باشد.



(b) (a)

شکل ۱ گیره رباتیک ۳ درجه آزادی دورانی طراحی شده الف) محورهای دوران ب) بخش‌های تشکیل دهنده گیره رباتیک

Fig. 1 Designed 3-DOF rotational robotic gripper (a) Rotation axis, (b) Sections of the Robotic Gripper

جدول ۱ مشخصات فنی گیره رباتیک

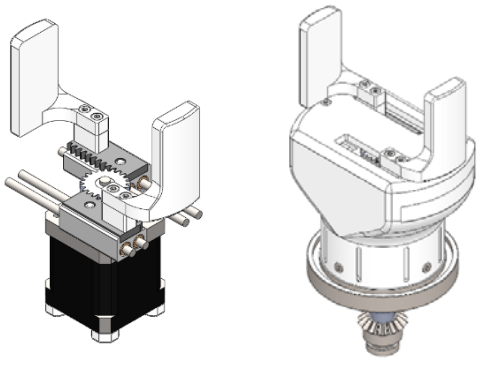
Table 1 Technical specifications of the robotic gripper

Height	**236 mm**
Maximum grip force	**5 N**
Minimum grip force	**0.5 N**
Grip force resolution	**0.1 N**
Rotation range about the vertical axis	**360°**
Rotation range about the horizontal axis	**90°**
Rotation range about the axis perpendicular to the horizontal axi	**180°**
Rotational angle control resolution	**1°**

با توجه به قیود موجود، در نهایت طراحی انجام‌شده در شکل ۱ قابل مشاهده است. در این طراحی گیره رباتیک از چهار بخش تشکیل شده است. این بخش‌ها در شکل ۱ بخش الف به ترتیب از پایین به بالا شمارگذاری شده‌اند. بخش اول وظیفه گرفتن و تعامل با جسم را بر عهده دارد. بخش دوم وظیفه ایجاد دوران در راستای محور افقی و محوری عمود بر محور افقی را بر عهده دارد. بخش سوم وظیفه ایجاد دوران در راستای محور عمودی را بر عهده دارد و بخش چهارم محل قرارگیری قطعات الکترونیکی است. مشخصات فنی گیره رباتیک ساخته شده، در جدول ۱ آورده شده است. در ادامه اجزای هر بخش به‌تفضیل شرح داده می‌شود.

۱-۲- بخش اول گیره رباتیک

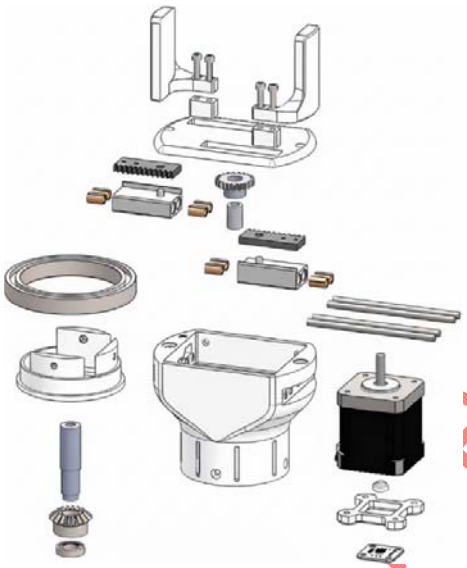
این قسمت وظیفه گرفتن و تعامل با جسم را بر عهده دارد و بدون در نظر گرفتن پیچ و مهره‌ها، در مجموع از ۳۲ قطعه تشکیل شده است (شکل ۲). ساختار کلی آن شامل یک بدنه اصلی است که سایر اجزا بر روی آن مونتاژ می‌شوند. برای ایجاد حرکت خطی انگشت‌ها، از مکانیزم تبدیل حرکت دورانی به خطی مبتنی بر مجموعه چرخ‌دنده ساده و دندهشانه‌ای در کنار یک موتور پله‌ای استفاده شده است. در این سامانه، چرخ‌دنده ساده به محور موتور متصل بوده و با درگیر شدن با چرخ‌دنده دندهشانه‌ای، موجب حرکت خطی واگن و در نتیجه جابه‌جایی انگشت‌ها می‌شود.



(b) (a)

شکل ۲ بخش اول گیره رباتیک الف) تمامی اجزای بخش اول در کنار یکدیگر ب) مکانیزم حرکت خطی انگشت‌ها

Fig. 2 First section of the robotic gripper (a) All components of the first section assembled together (b) Fingers linear motion mechanism



شکل ۳ نمای انفجاری از قطعات تشکیل دهنده بخش اول

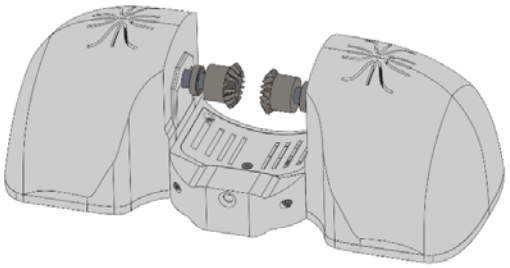
Fig. 3 Exploded view of the components of the first section

طراحی انجام‌شده برای گرفتن و جابه‌جایی اجسامی با حداکثر جرم ۵۰۰ گرم در نظر گرفته شده است. چرخ‌دنده‌های استفاده‌شده بر اساس نمونه‌های استاندارد موجود در بازار انتخاب شده‌اند. چرخ‌دنده ساده دارای ۲۱ دندانه با مدول ۱ است. به منظور کنترل نیرو از سنسور لامسه بر روی انگشت‌ها استفاده شده. سطح این سنسور از جنس سیلیکون است و در طی آزمایش‌های انجام شده، ضریب اصطکاک آن در حدود ۱/۱ بدست آمد. با توجه به این قیود،

رابطه نیرو و گشتاور و رابطه نیروی عمودی و اصطکاک، گشتاور موردنیاز برای گرفتن جسمی با جرم ۵۰۰ گرم برابر است با:

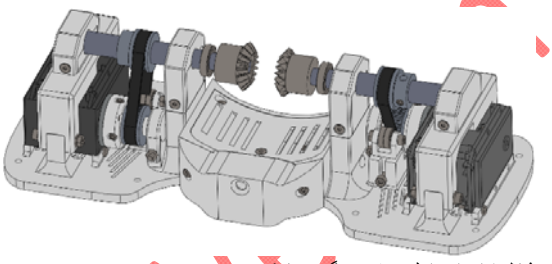
$$T = \frac{0.5 \times 9.81 \times \frac{0.21}{2}}{1.1} \cong 0.468\ \mathrm{N.m\#} \qquad (۱)$$

In Press, Corrected Proof



شکل ۴ بخش دوم گیره رباتیک

Fig. 4 Second Section of the robotic gripper



شکل ۵ اجزای داخلی بخش دوم گیره رباتیک

Fig. 5 Internal components of the second section of the robotic gripper

بر اساس گشتاور محاسبه‌شده و با بررسی کاتالوگ موتورهای پله‌ای نما ۱۷ مدل 17HS8401 انتخاب شد که توانایی تولید گشتاور ۰/۵۲ نیوتون متر را دارد و حاشیه اطمینان مناسبی نسبت به مقدار موردنیاز فراهم می‌کند. هر یک از دندشانه‌ای‌ها بر روی قطعه‌ای به نام واگن نصب می‌شوند. هر واگن دارای چهار بوش گرافیتی است که به واسطه آن‌ها بر روی شفت‌های راهنما با اصطکاک کم و حرکت نرم جابه‌جا می‌شود. چرخ‌دنده ساده از طریق یک شفت رابط به محور موتور متصل شده و با یک پیچ آلن مغزی در جای خود تثبیت می‌شود. انگشت‌ها نیز به‌وسیله قطعه رابط به چرخ‌دنده دندشانه‌ای متصل می‌شوند. به‌منظور دریافت بازخورد از موقعیت محور موتور پله‌ای، از کدگذار مدل AS5600 استفاده شده است. این کدگذار به‌کمک یک قطعه رابط به انتهای شفت موتور متصل می‌شود. زیر بدنه اصلی توسط قطعه‌ای به نام پوشش زیرین بسته می‌شود و قسمت فوقانی نیز با پوشش بالایی پوشانده می‌شود (شکل ۳). قسمت اول حول محوری عمود بر محور افقی دوران می‌کند و این حرکت توسط قسمت دوم ایجاد می‌شود که مکانیزم آن در بخش مربوطه به‌تفصیل شرح داده خواهد شد.

۲-۲- بخش دوم گیره رباتیک

این قسمت وظیفه ایجاد دوران در راستای دو محور افقی و محور عمود بر آن را بر عهده دارد و بدون در نظر گرفتن پیچ و مهره‌ها مجموعا از ۵۵ قطعه تشکیل شده است. برای ایجاد دوران در راستای این دو محور از ساختار موازی برای انتقال توان سروموتورها استفاده شده است تا ارتفاع به حداقل مقدار ممکن برسد. برای انتخاب سروموتورها ابتدا باید گشتاور مورد نیاز تعیین شود. بیشترین وزن جسمی که گیره رباتیک باید بتواند گرفته و حرکت دهد، ۵۰۰ گرم در نظر گرفته شده است. وزن قسمت اول حدود ۶۰۰ گرم است که مرکز جرم آن در فاصله ۳۸ میلی‌متری از محور دوران قرار دارد. فاصله نوک انگشتان از محور دوران ۱۶۰ میلی‌متر است. با توجه به این اطلاعات، گشتاور مورد نیاز برابر است با:

$$T = 0.6 \times 9.81 \times 0.038 + 0.5 \times 9.81 \times 0.16 \cong 1\ \mathrm{N.m} \qquad (۲)$$

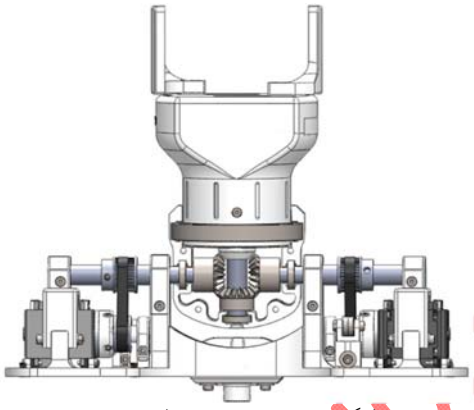
با در نظر گرفتن یک ضریب اطمینان ۲، حدودا به ۲ نیوتون‌متر گشتاور نیاز است. با توجه به این موضوع، از سروموتورهای شرکت داینامیکسل مدل MX64 استفاده شده است.

قسمت دوم یک قطعه مبنا اصلی دارد که سایر قطعات روی آن متصل می‌شوند و ۲۸۵ میلی‌متر طول و ۱۱۳ میلی‌متر عرض دارد. در زیر این قسمت، یک قطعه رابط متصل می‌شود که واسطه ارتباط قسمت دوم با قسمت سوم است. همان‌طور که گفته شد برای ایجاد دوران در راستای دو محور افقی و محور عمود بر آن از چینش موازی موتورها با ترکیب چرخ‌دنده‌های مخروطی استفاده می‌شود (شکل ۵). قدرت سروموتورها به‌کمک تسمه و پولی تایمینگ به چرخ‌دنده‌ها منتقل می‌شود. پولی به واسطه یک قطعه رابط به سروموتور متصل می‌شود. پولی دوم به یک شفت متصل می‌شود که در انتهای آن یک چرخ‌دنده مخروطی قرار دارد و به واسطه دو بلبرینگ مقید می‌شود.

سروموتور در حالی که پولی تایمینگ به‌کمک قطعه رابط به آن متصل شده، به قطعه مبنا متصل می‌شود. انتهای آزاد پولی به واسطه یک بلبرینگ مقید می‌شود تا سفت کردن تسمه تایمینگ به محور سروموتور صدمه وارد نکند. تمام بلبرینگ‌ها به واسطه یک محفظه نگه‌دارنده که از دو قسمت پایه و پوشش تشکیل شده‌اند، مقید می‌شوند. همچنین برای سفت کردن تسمه‌ها، یک تسمه سفت‌کن طراحی شده تا کشش تسمه به اندازه مورد نیاز تعیین شود.

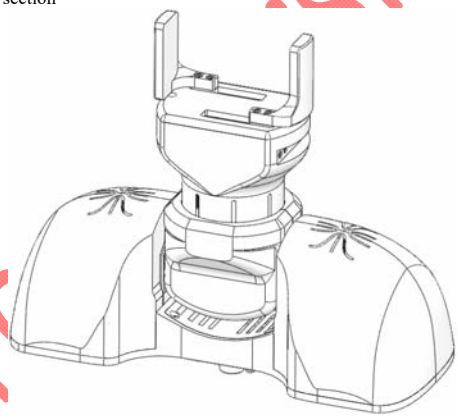
تسمه و پولی تایمینگ باید با توجه به نمونه‌های موجود در بازار و شرایط بارگذاری انتخاب شوند. برای انتخاب پولی مناسب ابتدا باید موقعیت و نسبت تبدیل آن انتخاب شود. سروموتورهای مدل MX64، قابلیت کنترل موقعیت ۳۶۰ درجه‌ای را دارا می‌باشند. فضای کاری در نظر گرفته شده برای گیره رباتیک، دوران ۹۰ درجه‌ای در راستای محور افقی و دوران ۱۸۰ درجه‌ای در راستای محور عمود بر محور افقی است. با توجه به این موضوع، در مجموع به ۲۷۰ درجه چرخش در شفت متصل به سروموتور نیاز است. بنابراین نسبت تعداد دندانه‌های پولی متصل به شفت به پولی متصل به سروموتور نباید بزرگ‌تر از نسبت ۳۶۰ به ۲۷۰ (حدود ۱/۳۳) و همچنین نباید کمتر از ۱ باشد زیرا باعث کاهش گشتاور و افزایش سرعت می‌شود که دقیقا برعکس شرایط مطلوب است. با توجه به این نکته، ابعاد شفت و سروموتور و نمونه‌های موجود

In Press, Pre-Proof Version



شکل ۶ مکانیزم انتقال گشتاور از بخش دوم به بخش اول

Fig. 6 Torque transmission mechanism from the second section to the first section



شکل ۷ بخش اول و دوم در کنار یکدیگر

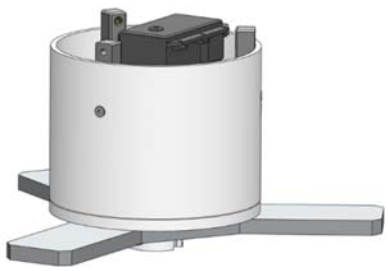
Fig. 7 The first and second sections assembled together

در بازار، از پولی با ۳۰ دندانه، برای سروموتور و از پولی با ۳۲ دندانه برای شفت استفاده شد. تسمه‌های سری GT از انواع تسمه‌های متداول در بازار هستند که فرم خاص دندانه‌های آن‌ها باعث کاهش لقی و دقت تعیین موقعیت می‌شوند. این تسمه‌ها در گام، عرض و طول‌های متفاوت موجود می‌باشند. برای بررسی و انتخاب نمونه مناسب ابتدا از کوچکترین گام و عرض شروع کرده و سپس بررسی تا جایی ادامه پیدا می‌کند که تسمه مناسب شرایط بارگذاری باشد. بیشترین گشتاور مورد نیاز برای انتقال، ۱ نیوتون‌متر است و قطر پولی کوچکتر برابر ۵٫۲۱ میلی‌متر است. با توجه به این موضوع، بیشترین نیروی وارده به تسمه برابر است با:

$$T = Fr \;\rightarrow\; F = \frac{1}{\frac{21.5}{2}\times 10^{-3}} = 93.02\ \text{N} \qquad (۳)$$

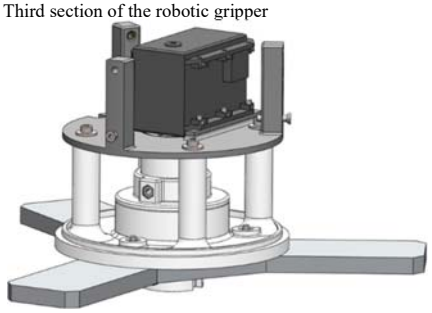
با توجه به مشخصات تسمه، استحکام شکست تسمه برابر ۸۶ نیوتون به ازای هر ۱ میلی‌متر عرض تسمه است. با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۲، عرض تسمه مورد نیاز برابر خواهد بود با:

$$w = \frac{F \times n}{\sigma} = \frac{93.02 \times 2}{86} \cong 2.16\ \text{mm} \qquad (۴)$$



شکل ۸ بخش سوم گیره رباتیک

Fig. 8 Third section of the robotic gripper

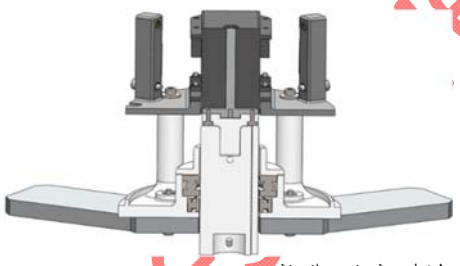


شکل ۹ اجزای داخلی بخش سوم

Fig. 9 Internal components of the third section

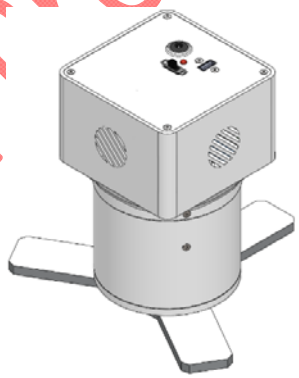
در نهایت نزدیک‌ترین عرض تسمه موجود در بازار به عدد به‌دست آمده ۶ میلی‌متر است. برای انتقال گشتاور سروموتورها به بخش اول از مجموعه چرخدنده‌های مخروطی استفاده شده است. چرخدنده‌های انتخاب شده با توجه به ابعاد و نمونه‌های موجود در بازار، دارای مدول ۱٫۵ و ۱۶ دندانه هستند. دو عدد از این چرخدنده‌ها به شفت‌هایی در قسمت دوم گیره رباتیک متصل هستند و یکی از آن‌ها به انتهای شفتی در قسمت اول گیره رباتیک متصل است. این سه چرخدنده به واسطه یک جعبه دنده در قسمت دوم در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و به این صورت قسمت اول به دوم متصل شده و گشتاور سروموتورها برای ایجاد دوران در راستای محور عمود بر محور افقی، به قسمت اول انتقال می‌یابد (شکل ۶). همان‌طور که گفته شد، سروموتورها برای کاهش ارتفاع گیره رباتیک چینشی موازی دارند. در این ساختار زمانی که دو چرخدنده مخروطی متصل به شفت‌های قسمت دوم، در یک جهت بچرخند، گیره رباتیک در راستای محور افقی دوران پیدا می‌کند و زمانی که چرخدنده‌ها در جهت خلاف یکدیگر بچرخند، گیره رباتیک در جهت محور عمود بر محور افقی دوران می‌کند. در نهایت قسمت اول و دوم در کنار هم در شکل ۷ قابل مشاهده هستند.

به منظور کاهش جرم به منظور حفظ چابکی ربات و کاهش هزینه تولید، تمامی قطعات به جز چرخدنده‌ها، شفت‌های راهنما در بخش اول و شفت‌ها رابط در بخش دوم از جنس PLA و با فرآیند پرینت سه بعدی به روش FDM ساخته شده‌اند.



شکل ۱۰ نمای برش خورده از بخش سوم

Fig. 10 Sectional view of the third section



شکل ۱۱ بخش سوم و چهارم در کنار یکدیگر

Fig. 11 The third and fourth sections assembled together

In review Preprint

۳-۲- بخش سوم گیره رباتیک

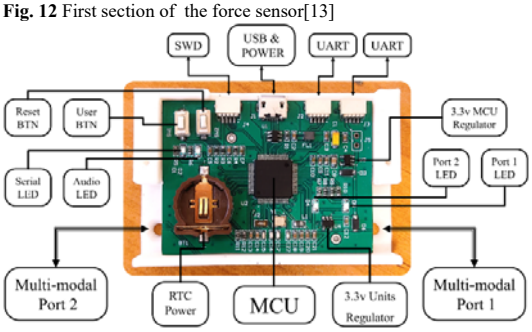
این قسمت وظیفه ایجاد دوران در راستای محور عمودی را بر عهده دارد و مجموعه بخش اول و دوم به شفت اصلی این قسمت متصل می‌شوند (شکل ۸). بالای قسمت مجری نهایی ربات موازی دلتا فضای خالی زیادی وجود دارد که قابل استفاده است. برای افزایش هرچه بیشتر فضای کاری ربات موازی دلتا، قسمت سوم و چهارم در بالای مجری نهایی ربات موازی دلتا متصل می‌شوند و بدین صورت این دو قسمت عملا فضای کاری موثر ربات موازی دلتا را تغییر نمی‌دهند. در این قسمت یک قطعه مبنا وجود دارد که به مجری نهایی ربات موازی دلتا متصل شده و سایر قطعات روی آن سوار می‌شوند. دوران در این بخش توسط یک سروموتور MX64 ایجاد می‌شود (شکل ۹).

سروموتور به یک قطعه رابط متصل شده که خود قطعه رابط به قطعه مبنای اصلی متصل می‌شود. سروموتور توسط یک قطعه رابط، به شفت مرکزی متصل شده و خود شفت مرکزی در نهایت به قسمت دوم گیره ربات متصل می‌شود و آن را دوران می‌دهد. قطعه رابط بین سروموتور و شفت مرکزی، سطح مقطعی مربعی دارد که درون شیاری که روی شفت وجود دارد قرار می‌گیرد. این نوع اتصال باعث می‌شود که هیچگونه بار محوری روی سروموتور نباشد و تنها گشتاور ایجاد شده توسط سروموتور به شفت مرکزی و در نهایت به قسمت دوم منتقل شود. شفت مرکزی باید در دو راستای محوری و شعاعی مقید شود تا تنها توانایی دوران در راستای محور عمودی را داشته باشد. برای این منظور شفت توسط یک بلبرینگ شیار



شکل ۱۲ بخش اول سنسور اندازه گیری نیرو [۱۳]

Fig. 12 First section of the force sensor[13]



شکل ۱۳ بخش دوم سنسور اندازه گیری نیرو [۱۳]

Fig. 13 Second section of the force seonsor[13]

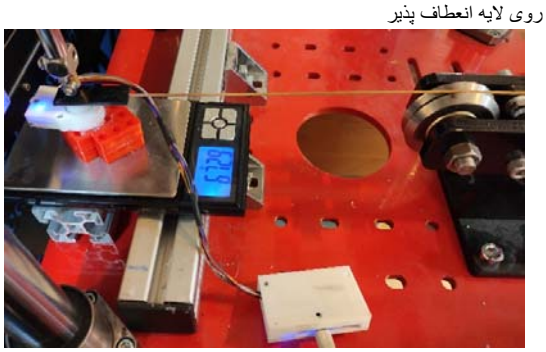
عمیق در راستای شعاعی محدود شده و توسط یک بلبرینگ کفگرد در راستای عمودی مقید می‌شود (شکل ۱۰)

۴-۲- بخش چهارم گیره رباتیک

این بخش محل قرارگیری قطعات الکترونیکی مانند پردازنده، درایور، انواع ماژول‌های مبدل و غیره است. در این بخش یک قطعه مبنا وجود دارد که سایر قطعات روی آن نصب می‌شوند. یک درپوش وجود دارد که بعد از نصب قطعات الکترونیکی درون قطعه مبنا، روی آن را می‌بندد. روی این قطعه مبنا محلی برای قرارگیری کانکتورها تعبیه شده. در نهایت این بخش توسط سه پیچ، از بغل به بخش سوم متصل می‌شود. بخش سوم و چهارم در کنار هم، در شکل ۱۱ قابل مشاهده هستند.

۳- سنسور اندازه گیری نیرو

سنسوری که برای اندازه‌گیری نیرو بر روی انگشتان گیره رباتیک نصب شده از دو جزء کلی تشکیل شده. یکی از اجزا بخش اصلی سنسور است که وظیفه تعامل با جسم را دارد (شکل ۱۲). ساختار به‌کاررفته در این بخش برای اندازه‌گیری نیرو شامل استفاده از سنسور بارومتریک، سنسور اثرهال و یک میکروفون است که تمامی این اجزا بر روی یک برد و در داخل یک لایه انعطاف پذیر از جنس سیلیکون قرار گرفته‌اند. سنسور بارومتریک وظیفه اندازه گیری نیروی عمودی را بر عهده دارد. درون لایه سیلیکونی یک آهنربا قرار گرفته که با اعمال فشار بر روی لایه انعطاف پذیر



شکل ۱۴ مجموعه به کار رفته برای کالیبراسیون سنسور نیرو

Fig. 14 Setup used for force sensor calibration

موقعیت آن تغییر کرده و این تغییر موقعیت توسط حسگرهای اثرهال اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت از این ترکیب برای اندازه‌گیری نیرو در راستای سه محور استفاده شده و از ترکیب داده‌های حسگر اثر هال با حسگر بارومتریک برای بهبود نیروی اندازه‌گیری شده استفاده می‌شود. وجود میکروفون درون لایه انعطاف پذیر باعث می‌شود که حسگر لامسه توانایی اندازه‌گیری نیرو به‌صورت دینامیک و سنجش ارتعاشات و لغزش را نیز دارا باشد [۱۳].

جزء بعدی، یک برد جمع‌آوری داده است که وظیفه دارد علاوه بر تامین تغذیه حسگرها، داده را از حسگرهای قرار گرفته در بخش اول دریافت کرده و داده مربوط به هر حسگر را متناسب با پروتکل ارتباطی آن حسگر ارسال کند (شکل ۱۳). از آنجایی که هر سنسور ماهیت فیزیکی و فرکانسی متفاوتی دارد، وجود یک برد جمع‌آوری داده برای همگام‌سازی و انتقال حجم بالای داده نیاز است. این فرآیندها به کمک یک ریزپردازنده STM32F405RGT6 با هسته‌ی ARM Cortex-M4 کنترل و مدیریت می‌شود [۱۳].

۱-۳ کالیبراسیون سنسور اندازه گیری نیرو

کالیبراسیون برای مشخصه‌یابی دقیق و استخراج رابطه کمی میان خروجی‌های حسگر و نیروهای فیزیکی اعمالی، ضروری است. کالیبراسیون حسگرهای چندوجهی نرم، برخلاف نمونه‌های تک‌محوری، پیچیدگی‌های بیشتری به همراه دارد؛ زیرا هدف نه‌تنها اندازه‌گیری نیرو، بلکه تفکیک و جداسازی نیروهای اعمالی در جهات مختلف از یکدیگر است. این فرآیند به‌ویژه برای جبران پدیده تداخل (Crosstalk) بین حسگرها و نیروهای اعمالی از جهات مختلف، حیاتی است. برای تعامل با محیط و برداشتن اشیا، علاوه بر اندازه‌گیری نیروی عمودی، اندازه‌گیری نیروهای مماسی و به خصوص نیروی ناشی از وزن اشیا در جهت گرانش نیز مورد نیاز است. این موضوع بر اهمیت کالیبراسیون چندجهته تاکید می‌کند.

۱-۱-۳ شرح مجموعه کالیبراسیون

برای کالیبره کردن حسگر نیرو مجموعه‌ای طراحی و پیاده‌سازی شد که قابلیت کالیبره کردن حسگر در دو راستای عمودی و افقی را می‌دهد. در این مجموعه، حسگر بر روی یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ نیوتن و بیشینه نیروی ۲۰ نیوتن قرار گرفته تا به این وسیله میزان نیروی عمودی وارده به حسگر اندازه‌گیری شده و مرجع مناسبی برای نیروی عمودی باشد. جزء اصلی اعمال نیروی عمودی یک بال‌اسکرو بسیار دقیق با گام ۵ میلی‌متر و دقت گام ۰/۰۵ میلیمتر است. یک میله عمودی که در انتهای آن یک بلبرینگ قرار گرفته، به بال‌اسکرو مذکور متصل شده و با چرخش بال‌اسکرو، به واسطه این چینش، بر روی حسگر نیروی عمودی وارد می‌شود. برای اعمال نیروی مماسی از یک صفحه پلاستیکی از جنس پلکسی‌گلس استفاده شده که به مقطع انتهایی آن یک طناب متصل شده است. طناب متصل شده بر روی یک پولی قرار گرفته و انتهای طناب به یک محفظه برای قرار دادن وزنه‌ها متصل شده است. همچنین، برای اینکه نیروی مماسی اعمالی توسط میله‌ی عمودی خنثی یا تضعیف نشود، انتهای میله، مطابق شکل به یک بلبرینگ کوچک مجهز شد تا فقط در جهت عمودی نیرو اعمال شود و در جهت مماسی مانع آزادی حرکت قسمت نرم حسگر نشود. در غیاب بلبرینگ، نیروی مماسی اعمال‌شده توسط طناب به میله عمودی نیز منتقل می‌شود و علاوه بر تضعیف در آن، باعث ایجاد گشتاور ناخواسته در سیستم می‌گردد. بلبرینگ با فراهم کردن حرکت آزادانه صفحه

In Press, Pre-Proof Version

نسبت به میله عمودی، تضمین می‌کند که نیروی مماسی طناب تنها به صفحه و در نهایت به حسگر منتقل شود و هیچ نیروی افقی یا گشتاوری به میله عمودی وارد نگردد. این تفکیک مکانیکی، دقت کالیبراسیون را افزایش می‌دهد و تأثیر تداخلات ناخواسته را به حداقل می‌رساند. ساختار کلی مجموعه‌ی کالیبراسیون در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

۲-۱-۳ جمع آوری داده

فرآیند جمع‌آوری داده‌ها به منظور ایجاد یک مجموعه داده جامع و قابل اتکا برای مدل‌سازی رفتار حسگر در هر دو جهت نیروی عمودی و مماسی طراحی شده است. نحوه‌ی جمع‌آوری داده به این شکل بوده که ابتدا یک نیروی عمودی مشخص اعمال شده و سپس نیروی مماسی به واسطه وزنه‌ها از مقادیر کم تا مقادیری نزدیک به نیروی عمودی اعمال شد. با توجه به ماهیت نرم حسگر لامسه، هنگام تغییر نیروی مماسی، نیروی عمودی نیز تغییر می‌کرد. این کار به ازای نیروهای عمودی مختلف انجام شد. در هر مرحله به ازای هر نیروی عمودی چندین نیروی مماسی اعمال شده و پس از اعمال هر نیروی مماسی مقادیر خروجی از سنسورها به مدت ۲ ثانیه ضبط شد. از آنجایی که روش کشش طناب، فقط در یک جهت می‌تواند نیرو وارد کند، حسگر ۱۸۰ درجه چرخانده و فرایند فوق دوباره تکرار شد اما این بار مقادیر نیروی مماسی با ضریب منفی ذخیره شدند. در مجموع ۴۵۵۸۰۶ داده جمع‌آوری شد. داده‌های حسگر ها شامل ۴ درایه به شرح زیر بوده‌است:

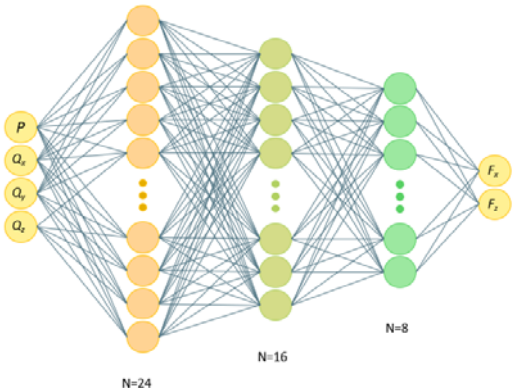
- داده‌ی فشار از حسگر بارومتریک.
- شدت میدان مغناطیسی در جهت محور x.
- شدت میدان مغناطیسی در جهت محور y.
- شدت میدان مغناطیسی در جهت محور z.

۳-۱-۳ کالیبراسیون سنسور نیرو با شبکه عصبی

در این پژوهش، به‌منظور کالیبراسیون سنسور لمسی و استخراج رابطه بین خروجی سنسور و نیروهای اعمال‌شده، از یک مدل مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است. داده‌های تجربی از دو آزمایش مجزا با آرایش‌های متفاوت سنسور جمع‌آوری شده‌اند و شامل مؤلفه‌های بردار اندازه‌گیری‌شده توسط سنسور و نیروهای مرجع در راستاهای مماسی و عمودی هستند. در ابتدا از داده‌های خروجی هر بخش دو ثانیه‌ای، میانگین گرفته می‌شود. با این کار از هر آزمایش ۱۴۰ داده به‌دست می‌آید. سپس میانگین خروجی سنسور در حالت بدون اعمال نیرو محاسبه و از داده‌های مربوط به همان آزمایش کسر شده است تا اثر خطای ثابت سنسور حذف شود.

پس از تصحیح انحراف، داده‌های معتبر مربوط به هر دو آزمایش تجمیع شده و نمونه‌هایی که دارای مقادیر نامعتبر یا گمشده در خروجی نیرو بوده‌اند حذف شده‌اند. بردار ورودی شبکه شامل سه مؤلفه از داده‌های سنسور بوده و بردار خروجی شامل دو مؤلفه نیروی عمودی و مماسی است. به‌منظور افزایش پایداری آموزش و جلوگیری از غلبه مقیاس یک متغیر بر سایر متغیرها، داده‌های ورودی و خروجی به‌صورت مستقل با استفاده از نرمال‌سازی بیشینه و کمینه به بازه [۰،۱] مقیاس‌بندی شده‌اند. سپس داده‌ها به دو مجموعه آموزش و آزمون با نسبت ۸۵ به ۱۵ تقسیم شده‌اند. برای مدل‌سازی رابطه غیرخطی بین خروجی سنسور و نیروهای اعمال‌شده، یک شبکه عصبی پیشخور چندلایه طراحی شده است. این شبکه شامل چهار لایه تمام‌متصل با ساختار نمایش داده شده در شکل ۱۵ است که در لایه‌های پنهان از تابع فعال‌سازی رلو استفاده شده است. انتخاب این ساختار با در نظر گرفتن تعداد محدود داده‌ها و ماهیت ایستای مسئله انجام شده است؛ به‌گونه‌ای که شبکه از یک‌سو توانایی کافی برای تقریب روابط غیرخطی سنسور را داشته باشد و از سوی دیگر از پیچیدگی بیش‌ازحد و بیش‌برازش جلوگیری شود. در لایه خروجی از تابع فعال‌سازی استفاده نشده است تا شبکه بتواند مقادیر پیوسته نیرو را بدون محدودیت دامنه پیش‌بینی کند، که این موضوع برای مسائل رگرسیونی ضروری است.

آموزش شبکه با استفاده از تابع هزینه میانگین مربعات خطا و به‌کمک الگوریتم آدام با نرخ یادگیری ۰/۰۰۵ انجام شده است. فرآیند آموزش در ۶۰۰ تکرار اجرا شده و در هر تکرار، مقدار خطای آموزش و خطای مجموعه آزمون محاسبه و ذخیره شده است. بررسی همزمان روند کاهش خطای آموزش و اعتبارسنجی امکان ارزیابی همگرایی مدل و شناسایی احتمالی بیش‌برازش را فراهم



شکل ۱۵ شبکه عصبی تربیت شده برای مدل سازی رفتار سنسور نیرو

Fig. 15 Trained neural network for modeling the behavior of the force sensor

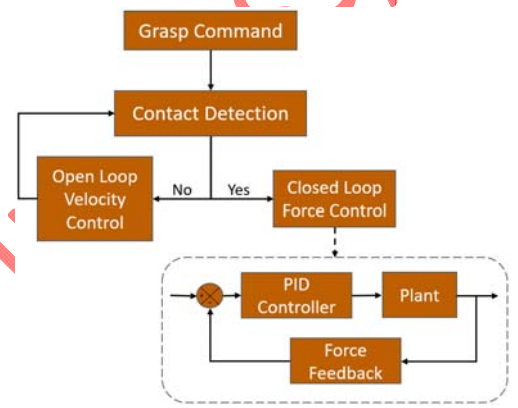
کرده است. نمودارهای مربوط به این خطاها نشان می‌دهند که شبکه به‌صورت پایدار آموزش دیده و عملکرد قابل قبولی روی داده‌های دیده‌نشده دارد.

پس از اتمام آموزش، عملکرد شبکه به‌صورت دقیق‌تری روی داده‌های هر آزمایش مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور، خروجی شبکه به مقیاس اصلی بازگردانده شده و خطای تخمین نیرو برای هر مقدار نیروی مرجع محاسبه شده است. معیارهای مورد استفاده شامل میانگین قدر مطلق خطا و انحراف معیار خطا برای نیروهای مماسی و عمودی هستند که به‌صورت تابعی از مقدار نیروی واقعی بررسی شده‌اند.

در مجموع، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که شبکه عصبی طراحی‌شده با وجود ساختار نسبتاً ساده، قادر است رفتار غیرخطی سنسور لمسی را با دقت مناسبی مدل‌سازی کند. استفاده از تصحیح انحراف مستقل برای هر آزمایش، نرمال‌سازی مناسب داده‌ها و انتخاب معماری متعادل شبکه، نقش مهمی در پایداری آموزش و کیفیت نهایی مدل داشته‌اند. این ویژگی‌ها، شبکه آموزش‌دیده را به گزینه‌ای مناسب برای کالیبراسیون استاتیکی سنسور و استفاده در کاربردهای عملی تبدیل می‌کند.

۴- کنترل نیرو

از آنجا که کیفیت تعامل گیره با جسم نقش مهمی در عملکرد کلی ربات دارد، کنترل بخش اول گیره رباتیک طراحی شده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در بخش اول، ایجاد حرکت خطی انگشتان گیره رباتیک توسط یک موتور پله‌ای و از طریق مکانیزم چرخ‌دنده ساده و دنده‌شانه‌ای انجام می‌شود. کنترل حرکت انگشتان در دو حالت مجزا طراحی شده است، حالت بدون حسگر لامسه و حالت مجهز به حسگر لامسه. این دو حالت به‌منظور افزایش انعطاف‌پذیری سیستم و امکان استفاده از گیره در شرایط مختلف در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۱۶ دیاگرام کنترل نیرو

Fig. 16 Force control diagram

جدول ۲ ضرایب کنترل کننده PID

Table 2 PID controller coefficients

k_p	**20**
k_i	**1**
k_d	**0.4**

Pre-Proof Version

در حالت عدم استفاده از حسگر لامسه، تشخیص زمان تماس انگشتان با جسم و توقف حرکت آن‌ها به‌صورت غیرمستقیم و با استفاده از کدگذار مغناطیسی نصب‌شده بر روی موتور پله‌ای انجام می‌شود. الگوریتم کنترلی در این حالت به‌گونه‌ای طراحی شده است که در صورت عدم تغییر مقدار خروجی کدگذار در سه گام متوالی، فرض می‌شود که انگشت‌ها به مانعی برخورد کرده‌اند و جسم گرفته شده است. در این شرایط، حرکت موتور متوقف می‌شود. این روش عملاً منجر به گرفتن جسم با بیشترین نیروی قابل اعمال توسط موتور می‌شود و تنها برای اجسامی مناسب است که توان تحمل بیشترین مقدار نیروی گیره را داشته باشند. بنابراین، این حالت بیشتر برای کاربردهایی که کنترل دقیق نیرو اهمیتی ندارد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در حالت استفاده از حسگر لامسه، امکان کنترل مستقیم نیروی واردشده به جسم فراهم می‌شود. در این حالت، سنسور لامسه‌ای که پیش‌تر معرفی شد، بر روی انگشت‌ها گیره نصب شده و نیروی تماس بین انگشت‌ها و جسم را اندازه‌گیری می‌کند. از آنجا که حرکت انگشت‌ها توسط موتور پله‌ای انجام می‌شود، کنترل نیروی تماس از طریق کنترل سرعت موتور پله‌ای صورت می‌گیرد. الگوریتم کنترلی، از دو کنترلر تشکیل شده است (شکل ۱۶). تا پیش از تماس انگشت‌ها با جسم، موتور با سرعت مشخصی به حرکت خود ادامه می‌دهد. این سرعت توسط یک کنترلر تناسبی حلقه باز، تعیین می‌شود. این کار به منظور کاهش اثر اینرسی موتور در اولین لحظه تماس با جسم، صورت می‌گیرد. به‌محض تشخیص تماس توسط حسگر لامسه، سیستم وارد یک حلقه کنترلی بسته می‌شود. در این حلقه، یک کنترل‌کننده PID پیاده‌سازی شده که وظیفه آن تنظیم سرعت موتور پله‌ای به‌گونه‌ای است که نیروی اعمال‌شده به جسم به مقدار مرجع تعیین‌شده توسط کاربر برسد و در همان مقدار باقی بماند. ورودی این حلقه کنترلی، نیروی مطلوب اعمالی به جسم است و خروجی آن فرمان سرعت موتور پله‌ای است.

از آنجا که موتور پله‌ای به‌صورت مستقیم امکان کنترل پیوسته سرعت را ندارد، سرعت حرکت آن از طریق تنظیم فاصله زمانی بین پالس‌های ارسالی از درایور، کنترل می‌شود. به بیان دیگر، با کاهش فاصله زمانی بین پالس‌ها، سرعت موتور افزایش یافته و با افزایش این فاصله، سرعت کاهش می‌یابد. بنابراین، خروجی کنترل‌کننده PID در نهایت به تغییر نرخ ارسال پالس‌ها به درایور موتور پله‌ای منجر می‌شود.

برای کنترل نیروی اعمال‌شده توسط انگشتان گیره رباتیک، استفاده از یک کنترل‌کننده PID به‌عنوان راهکاری ساده، پایدار و قابل پیاده‌سازی روی سخت‌افزار مورد استفاده انتخاب شد. دلیل اصلی انتخاب این نوع کنترل‌کننده، توانایی آن در ایجاد پاسخ نرم، کاهش نوسانات و امکان تنظیم آسان ضرایب بدون نیاز به مدل دقیق دینامیکی سیستم است. در این پروژه، به‌دلیل وجود اصطکاک، غیرخطی بودن رفتار تماس بین انگشت‌ها و جسم، و عدم قطعیت در خواص مکانیکی اجسام مختلف، استخراج یک مدل دقیق از سیستم عملی نبوده و روش تنظیم تجربی ضرایب مناسب‌ترین گزینه محسوب می‌شود. مقادیر ضرایب کنترل کننده طراحی شده به روش زیگلر-نیکولز، در جدول ۲ قابل مشاهده است.

۵- کنترل زاویه دوران

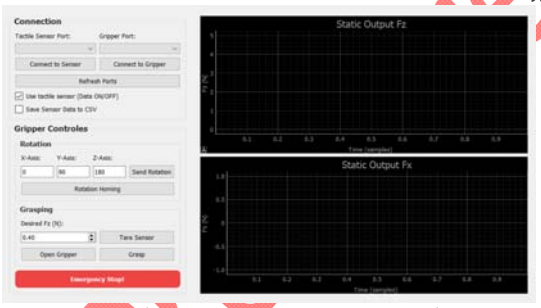
گیره رباتیک طراحی‌شده قابلیت دوران حول سه راستای اصلی را داراست؛ شامل دوران حول محور عمودی، محور افقی و محوری عمود بر آن. دوران حول محور عمودی به‌صورت مستقل از دو راستای دیگر انجام می‌شود، در حالی که دوران حول محور افقی و محور عمود بر آن، به‌دلیل چینش موازی سروموتورها و ساختار مکانیکی مجموعه، به‌صورت درهم‌تنیده و وابسته به یکدیگر است. با توجه به استقلال حرکتی دوران حول محور عمودی، کنترل این درجه آزادی به‌صورت مستقیم انجام می‌شود، به‌گونه‌ای که زاویه دوران مورد نظر مستقیماً به سروموتور متناظر ارسال می‌گردد. در مقابل، کنترل دوران در دو راستای دیگر نیازمند تعیین همزمان زاویه هر یک از سروموتورها بر اساس زاویه دوران مطلوب حول هر محور است. از آنجا که حرکت این دو محور به‌صورت درهم‌تنیده انجام می‌شود، تعیین فرمان مناسب برای هر سروموتور مستلزم استخراج روابط سینماتیکی معکوس بین زوایای مطلوب دوران و زوایای سروموتورها است. در ادامه، نحوه استخراج این روابط و پیاده‌سازی آن‌ها در سیستم کنترلی شرح داده می‌شود. روابط سینماتیکی معکوس بین زوایای دوران مطلوب و زوایای سروموتورها به‌صورت تحلیلی استخراج شده‌اند. در این روش،

ابتدا ساختار هندسی مکانیزم و نحوه درهم‌تنیدگی حرکتی سروموتورها مورد بررسی قرار گرفت و سپس با در نظر گرفتن نسبت پولی‌ها و موقعیت مرجع هر سروموتور، روابط خطی بین زوایای ورودی و خروجی تعریف شد. این رویکرد ضمن سادگی محاسبات، امکان پیاده‌سازی مستقیم روی برد کنترلی و اجرای بلادرنگ را فراهم می‌کند. هر سروموتور به‌کاررفته در این سامانه توانایی کنترل زاویه در یک بازه ۳۶۰ درجه‌ای را داراست. با توجه به این قابلیت و همچنین محدودیت‌های ساختاری گیره رباتیک، بازه دوران در راستای محور افقی بین ۰ تا ۹۰ درجه و بازه دوران در راستای محور عمود بر محور افقی بین ۰ تا ۱۸۰ درجه در نظر گرفته شده است. در آرایش موازی سروموتورها، زمانی که هر دو سروموتور در یک جهت دوران کنند، مجموعه گیره در راستای محور عمود بر محور افقی دوران می‌کند. در مقابل، زمانی که سروموتورها در جهت‌های مخالف یکدیگر دوران کنند، حرکت حاصل منجر به دوران مجموعه در راستای محور افقی می‌شود. بر این اساس، در دوران حول محور افقی، بسته به جهت دوران، زاویه یکی از سروموتورها افزایش یافته و زاویه سروموتور دیگر به همان میزان کاهش می‌یابد. در حالی که در دوران حول محور عمود بر محور افقی، بسته به جهت حرکت، زاویه هر دو سروموتور به‌صورت هم‌زمان افزایش یا کاهش می‌یابد. در نتیجه، در روابط سینماتیک معکوس، زاویه مورد نیاز حول محور افقی برای یک سروموتور با علامت مثبت و برای سروموتور دیگر با علامت منفی ظاهر می‌شود. از آن‌جا که انتقال حرکت از سروموتورها به بخش اول گیره رباتیک از طریق مجموعه‌ای از چرخ‌دنده‌های مخروطی انجام می‌شود، در دوران در راستای محور عمود بر محور افقی، جهت دوران خروجی نسبت به جهت دوران شفت سروموتور معکوس خواهد بود. به‌عبارت دیگر، برای ایجاد دوران ساعتگرد در قسمت اول گیره، لازم است سروموتورها در جهت پادساعتگرد دوران کنند. این موضوع نیز در روابط سینماتیک معکوس لحاظ شده و باعث می‌شود زاویه مورد نظر حول محور افقی با علامت منفی در معادلات ظاهر شود. در تمامی این روابط، فرض بر این است که افزایش زاویه در جهت ساعتگرد و کاهش آن در جهت پادساعتگرد تعریف شده است. معادلات سینماتیک معکوس مورد استفاده برای تعیین زاویه هر یک از سروموتورها به شرح زیر است:

$$\theta_R = \theta_{R_0} + k\left(\theta_x + \left(\theta_y - \theta_{y_0}\right)\right) \quad (۵)$$

$$\theta_L = \theta_{L_0} - k\left(\theta_x - \left(\theta_y - \theta_{y_0}\right)\right) \quad (۶)$$

که در این معادلات، زاویه‌های θ_x و θ_y به‌ترتیب بیانگر زاویه دوران مورد نیاز گیره رباتیک در راستای محور افقی و محور عمود بر آن هستند و زاویه‌های θ_R و θ_L به‌ترتیب زاویه سروموتور راست و سروموتور چپ را نشان می‌دهند. در این روابط چهار مقدار ثابت وجود دارد. ضریب k برابر نسبت تعداد دندانه پولی متصل به شفت خروجی به تعداد دندانه پولی متصل به سروموتور است که مقدار آن برابر با ۳۲/۳۰ می‌باشد. زاویه مرجع دوران در راستای محور عمود بر محور افقی در حالت اولیه برابر با ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است. بر این اساس، ثابت θ_{y_0} نیز برابر ۹۰ درجه تعریف شده تا



شکل ۱۷ رابط گرافیکی توسعه داده شده برای ارسال دستور به گیره رباتیک

Fig. 17 Developed graphical user interface for sending commands to the robotic gripper

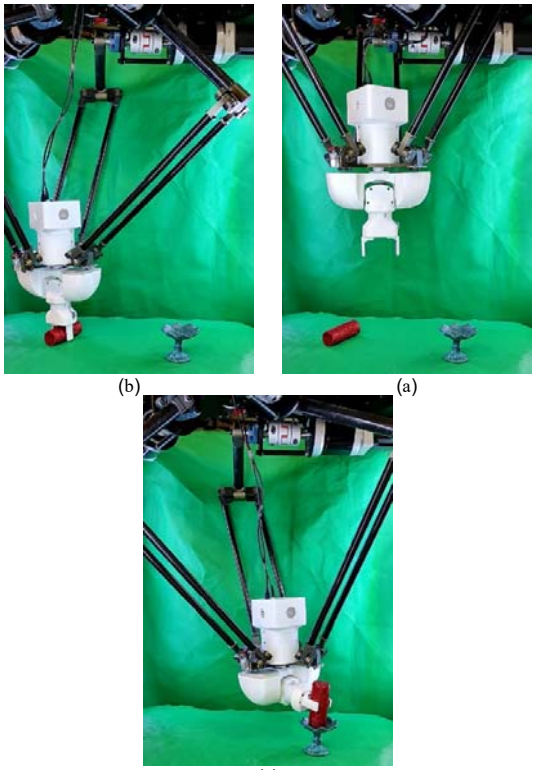
زاویه مورد نیاز سروموتورها نسبت به این وضعیت مرجع سنجیده شود. مقادیر θ_{R_0} و θ_{L_0} به‌ترتیب نشان‌دهنده زاویه اولیه سروموتورراست و سروموتور چپ هستند. برای تعیین این زوایا، رفتار مجموعه در شرایط مرزی مورد بررسی قرار گرفته است. زمانی که زاویه دوران مجموعه حول محور افقی برابر صفر باشد، باید امکان دوران در راستای محور عمود بر افق در بازه کامل ۰ تا ۱۸۰ درجه فراهم شود با توجه به این شرط و با در نظر گرفتن اینکه زاویه اولیه محور عمود بر افق برابر ۹۰ درجه است، هر سروموتور باید توانایی دوران ۹۰ درجه در جهت ساعتگرد و ۹۰ درجه در جهت پادساعتگرد را داشته باشد. بر این اساس، زاویه اولیه سروموتور سمت راست ۹۰ درجه و زاویه اولیه سروموتور سمت چپ ۲۷۰ درجه در نظر گرفته شده است. در نهایت، به‌منظور ایجاد حاشیه اطمینان و جلوگیری از رسیدن به محدوده‌های انتهایی عملکرد سروموتورها، این زوایا با ۱۰ درجه اختلاف تنظیم شده و مقادیر این ثابت‌ها به ترتیب ۱۰۰ و ۲۶۰ انتخاب شده‌اند. یکی از چالش‌های اصلی در کنترل حرکت سروموتورها، نحوه تغییر سرعت و شتاب در ابتدای حرکت، حین حرکت و در انتهای مسیر است. در صورتی

In Proof Version

که فرمان موقعیت به‌صورت پله‌ای به سروموتور اعمال شود، موتور تلاش می‌کند در کوتاه‌ترین زمان ممکن به موقعیت هدف برسد که این موضوع منجر به ایجاد شتاب‌های ناگهانی، تنش مکانیکی، لرزش و در برخی موارد ناپایداری در سیستم می‌شود. این مسئله به‌ویژه در مکانیزم‌هایی که دارای کوپلینگ بین محورها هستند، می‌تواند باعث بروز خطا در سایر درجات آزادی نیز شود. برای جلوگیری از این مشکلات، مسیر مرجع حرکت هر سروموتور به‌صورت یک پروفیل سرعت ذوزنقه‌ای تعریف شده است. به‌کارگیری این پروفیل باعث می‌شود تغییرات سرعت به‌صورت تدریجی انجام شده و حرکت در شروع و پایان مسیر تا حد امکان نرم و بدون ضربه باشد. در نهایت، به‌منظور کنترل دقیق زاویه هر یک از سروموتورها، برای هر سروموتور یک کنترل‌کننده PID با استفاده از روش زیگلر–نیکولز طراحی و تنظیم شد. فرآیند کنترل حرکت دورانی گیره به این صورت است که ابتدا کاربر زاویه دوران مطلوب را از طریق رابط گرافیکی توسعه‌یافته که در شکل ۱۷ قابل مشاهده است به سامانه ارسال می‌کند. سپس، با استفاده از روابط سینماتیکی معکوس، زاویه مورد نیاز هر یک از سروموتورها متناسب با زاویه دوران مطلوب گیره محاسبه می‌شود. مقادیر محاسبه‌شده به‌عنوان موقعیت هدف وارد پروفیل سرعت دوزنقه‌ای‌شده و زاویه مرجع لحظه‌ای هر سروموتور در طول مسیر تعیین می‌شود. در ادامه، مقدار زاویه مرجع حاصل از پروفیل حرکت با زاویه واقعی سروموتور مقایسه شده و خطای موقعیت به کنترل‌کننده PID اعمال می‌شود. کنترل‌کننده بر اساس خطای محاسبه‌شده، فرمان مناسب را تولید کرده و به سروموتور متناظر اعمال می‌کند. این فرایند به‌صورت پیوسته تکرار می‌شود تا سروموتورها به موقعیت‌های تعیین‌شده برسند و گیره در زاویه دوران مطلوب قرار گیرد.

۶- آزمایش و بررسی عملکرد

پس از طراحی، ساخت و مونتاژ گیره رباتیک و همچنین کالیبراسیون مجموعه حسگر لامسه و استخراج مدل نگاشت داده‌های خام حسگر به بردار نیروی اعمالی، عملکرد سامانه در قالب مجموعه‌ای از آزمون‌های عملی و کاربردی مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف از این آزمون‌ها، بررسی توانایی گیره رباتیک در اجرای وظایف اصلی مورد انتظار در کاربردهای دستکاری رباتیک و ارزیابی میزان دقت، پایداری و قابلیت اطمینان سامانه کنترلی بود. در این راستا، دو قابلیت بنیادین شامل توانایی ایجاد دوران در راستای سه محور و کنترل نیروی گرفتن مورد آزمون قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی توانایی گیره رباتیک ساخته‌شده در ایجاد و کنترل دوران در راستای سه محور، سناریویی طراحی شد که در آن یک شمع به وزن ۳۴۰ گرم در وضعیت اولیه افقی بر روی سطح زمین قرار داشت و در نهایت باید به‌صورت عمودی بر روی یک شمعدان قرار داده می‌شد. مختصات زاویه‌ای گیره در هر محله در جدول ۳ آورده شده است. این سناریو به‌گونه‌ای انتخاب شد که نیازمند ترکیب همزمان حرکات دورانی حول محورهای مختلف و حفظ پایداری جسم در حین جابه‌جایی باشد. نتایج آزمایش نشان داد که گیره رباتیک توانست در هر مرحله، دستورات ارسالی مربوط به وضعیت دورانی مورد نظر را با دقت مناسب اجرا کرده و در نهایت جسم را در وضعیت هدف قرار دهد. لازم به ذکر است که در این سناریو، گیره رباتیک در حالت بدون وجود حسگر لامسه مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۸ و شکل ۱۹). یکی از چالش‌های اساسی در گرفتن و دستکاری اشیاء، به‌ویژه اجسام ناشناخته، ظریف یا شکننده، تنظیم دقیق نیروی گرفتن است. اعمال نیروی بیش از حد می‌تواندموجب آسیب یا تغییر شکل ناخواسته جسم شود، در حالی که نیروی ناکافی احتمال لغزش یا سقوط آن را افزایش می‌دهد.



(b) (a) (c)

شکل ۱۸ گذاشت و برداشت یک شمع الف) گیره رباتیک در حالت اولیه ب) برداشت یک شمع از حالت افقی ج) قرار دادن شمع در شمعدان.

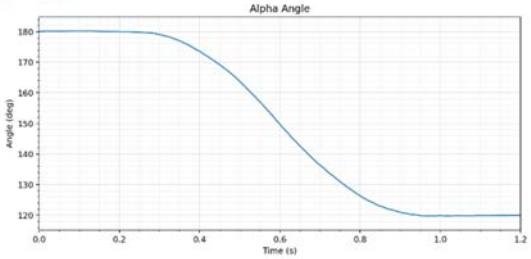
Fig. 18 Pick and place of a candle (a) robotic gripper in the initial position, (b) picking up a candle from the horizontal position, (c) placing the candle in a candle holder

جدول ۳ زوایای گیره رباتیک در هر یک از مراحل برداشتن شمع. در جدول زیر α زاویه دوران نسبت به محور عمودی، γ زاویه دوران نسبت به محور عمود بر محور افقی و β زاویه دوران نسبت به محور افقی است.

Table 3 Gripper angles at each stage of candle grsping. In the table, α represents the rotation angle about the vertical axis, γ represents the rotation angle about an axis perpendicular to the horizontal axis and β represents the rotation angle about the horizontal axis

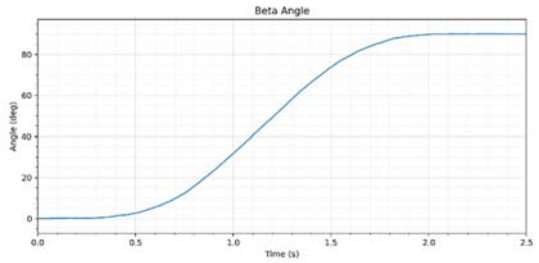
Rotation Angles	γ	β	α
Initial Gripper Configuration	˚90	˚0	180
Grasping the Candle in the Horizontal Position	˚90	˚0	130
Placing the Candle in the Candlestick	˚90	˚90	140

به‌منظور ارزیابی عملکرد گیره رباتیک و حسگر لامسه در کنترل این نیرو، یک سناریوی آزمایشی طراحی و اجرا شد. در این آزمایش، یک ظرف پلاستیکی منعطف توسط گیره گرفته شد و مقدار نیروی اعمالی به‌صورت تدریجی افزایش یافت تا تغییر شکل محسوس در آن مشاهده شود (شکل ۲۰). هدف از این آزمایش، بررسی توانایی سامانه در تنظیم پیوسته و نرم نیروی گرفتن و همچنین ارزیابی پایداری حلقه کنترل بود.



In Press Pre-Proof Version

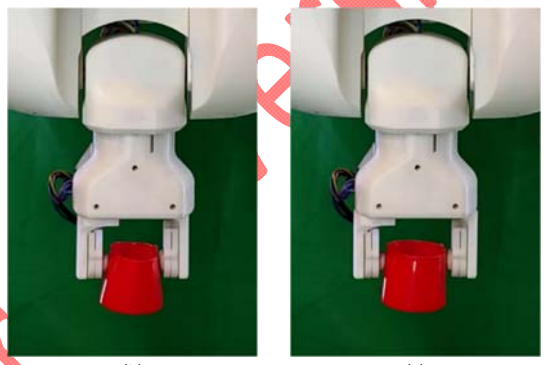
(a)



(b)

شکل ۱۹ نمودارهای تغییرات زاویه دوران بر حسب زمان در آزمایش گذاشت و برداشت شمع الف) نمودار تغییرات زاویه حول محور عمودی از ۱۸۰° به ۱۲۰° ب) نمودار تغییرات زاویه حول محور افقی از ۰° به ۹۰°.

Fig. 19 Angular displacement versus time during the candle picking and placement experiment: (a) rotation about the vertical axis from 180° to 120°; (b) rotation about the horizontal axis from 0° to 90°

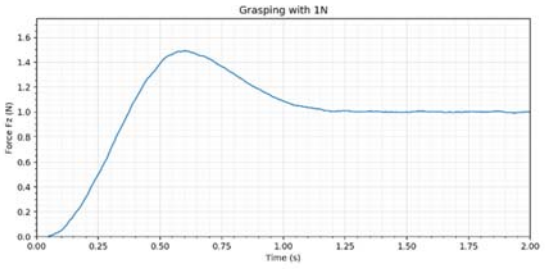


(b) (a)

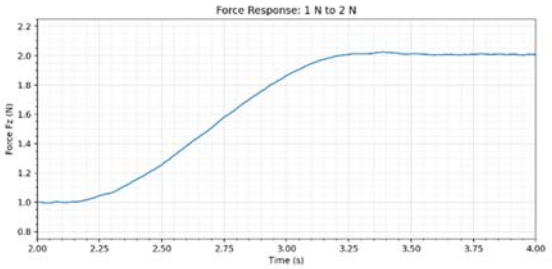
شکل ۲۰ اعمال نیروی بر روی یک جسم انعطاف پذیر الف) گرفتن جسم با نیروی ۱ نیوتون ب) اعمال نیروی ۵ نیوتون بر روی جسم

Fig. 20 Force application to a flexible object (a) grasping the object with 1 N force; (b) applying 5 N force to the object

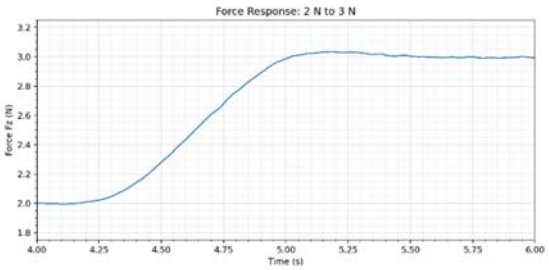
علاوه بر این، در حین آزمایش مقدار نیرو در گام‌های مختلف افزایش و کاهش داده شد تا عملکرد سامانه از نظر تکرارپذیری و پاسخ آن به مقادیر متفاوت نیرو مورد بررسی قرار گیرد. نمودار نیروهای اعمالی در شکل ۲۱ قابل مشاهده است.



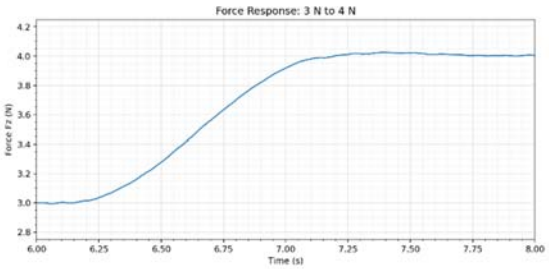
(a)



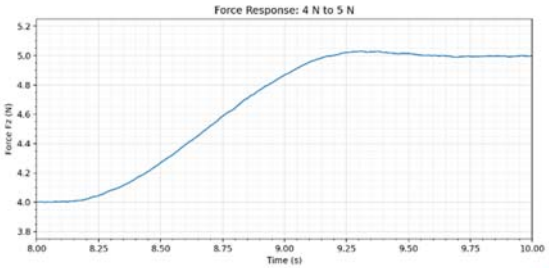
(b)



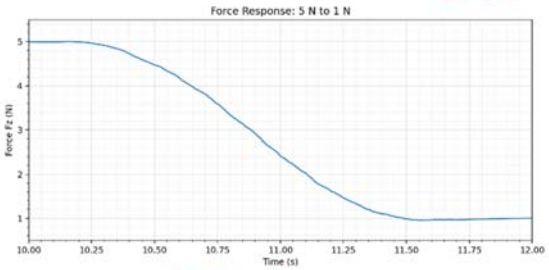
(c)



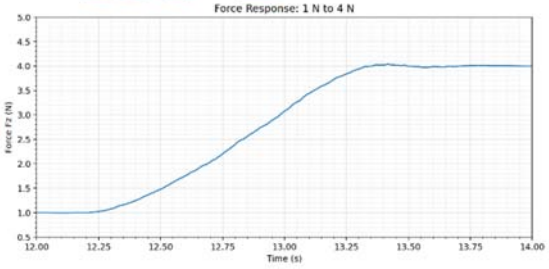
(d)



(e)



(f)



(g)

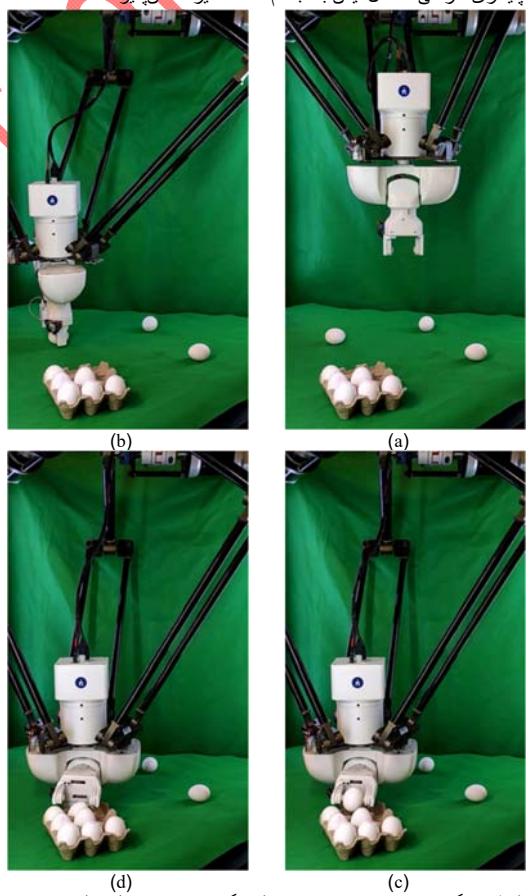
شکل ۲۱ نمودارهای نیروهای اعمال شده بر روی جسم انعطاف پذیر الف) گرفتن جسم با نیروی ۱ نیوتون ب) افزایش نیرو از ۱ نیوتون به ۲ نیوتون ج) افزایش نیرو از ۲ نیوتون به ۳ نیوتون د) افزایش نیرو از ۳ نیوتون به ۴ نیوتون ه) افزایش نیرو از ۴ نیوتون به ۵ نیوتون و) کاهش نیرو از ۵ نیوتون به ۱ نیوتون ز) افزایش نیرو از ۱ نیوتون به ۴ نیوتون.

Fig. 21 Diagrams of the applied forces on the flexible object (a) grasping the object with a force of 1 N; (b) increasing the force from 1 N to 2 N; (c) increasing the force from 2 N to 3 N; (d) increasing the force from 3 N to 4 N; (e) increasing the force from 4 N to 5 N; (f) decreasing the force from 5 N to 1 N; and (g) increasing the force from 1 N to 4 N

در ادامه، به‌منظور ارزیابی عملکرد سامانه در شرایط دینامیکی و حین حرکت، آزمایشی طراحی شد که در آن گیره رباتیک تعدادی تخم‌مرغ را از روی سطح زمین برداشته و درون شانه تخم‌مرغ قرار می‌داد. در این آزمایش تخم مرغ با نیروی ۲ نیوتون گرفته شده و به تعداد ۵۰ بار تکرار شد. در این سناریو، سامانه موظف بود ضمن حرکت در مسیر تعیین‌شده، مقدار نیروی تماس را در بازه‌ای ایمن و ثابت حفظ کند. نتایج آزمایش نشان داد که گیره رباتیک توانست در تمامی ۵۰ آزمایش بدون ایجاد ترک، شکستگی یا لغزش، تخم‌مرغ‌ها را به‌صورت سالم جابه‌جا کرده و در محل مورد نظر قرار دهد (شکل ۲۲). این آزمایش بیانگر پایداری کنترل نیرو نه‌تنها در حالت ایستا، بلکه در حین حرکت نیز است.

۷- جمع بندی

در این پژوهش، طراحی، ساخت و پیاده‌سازی یک گیره رباتیک دوانگشتی موازی با قابلیت سه درجه آزادی دورانی و کنترل نیروی گرفتن مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی، ارائه یک گیره رباتیک سبک، کم‌ارتفاع و مجهز به قابلیت‌های کنترلی مناسب برای نصب بر روی ربات موازی دلتا بود، به‌گونه‌ای که ضمن حفظ دقت و پایداری حرکتی، تعامل ایمن با اجسام مختلف نیز امکان‌پذیر باشد. در بخش طراحی مکانیکی، ساختار گیره به چهار بخش اصلی تقسیم شد و برای هر بخش، تصمیمات طراحی با توجه به الزامات عملکردی، محدودیت‌های ابعادی و شرایط بارگذاری اتخاذ گردید. استفاده از چینش موازی سروموتورها در بخش ایجاد دوران، نقش مؤثری در کاهش ارتفاع و افزایش فضای کاری ربات موازی دلتا ایفا کرد. همچنین به‌کارگیری ترکیبی از قطعات فلزی و قطعات ساخته‌شده به روش چاپ سه‌بعدی، امکان دستیابی به تعادل مناسبی میان استحکام، وزن و هزینه ساخت را فراهم نمود.



شکل ۲۲ گذاشت و برداشت یک تخم مرغ الف) گیره رباتیک در حالت اولیه ب) برداشتن تخم مرغ از حالت افقی ج) دوران تخم مرغ به حالت عمودی و انتقال آن در بالای شانه تخم مرغ د) رها کردن تخم مرغ

Fig. 22 Pick and place of an egg (a) Robotic gripper in the initial position, (b) Picking up the egg from the horizontal position, (c) Rotating the egg to the vertical position and transferring it above the egg tray, (d) Releasing the egg.

در بخش ساخت، انتخاب فرآیند چاپ سه‌بعدی FDM برای تولید قطعات پلاستیکی، همراه با تنظیم دقیق پارامترهای چاپ و در نظر گرفتن ملاحظات مونتاژی، منجر به تولید قطعاتی با دقت ابعادی و استحکام مناسب شد. این رویکرد نشان داد که با طراحی آگاهانه و توجه به محدودیت‌های ساخت، می‌توان از روش‌های ساخت کم‌هزینه برای تولید سامانه‌های رباتیکی کاربردی استفاده کرد.

در بخش کنترل، ساختار کنترلی گیره رباتیک به‌گونه‌ای طراحی شد که امکان کنترل مستقل حرکات دورانی و کنترل نیروی گرفتن فراهم شود. استخراج روابط سینماتیکی معکوس برای بخش دورانی و پیاده‌سازی پروفیل سرعت ذوزنقه‌ای برای سروموتورها، حرکت نرم، پیوسته و بدون ضربه را در شروع و پایان مسیر تضمین کرد. در کنترل نیروی گرفتن، استفاده از کنترل‌کننده PID راهکاری ساده و در عین حال مؤثر برای دستیابی به پاسخ پایدار و قابل اطمینان ارائه داد.

استفاده از حسگر لامسه و کالیبراسیون آن با بهره‌گیری از یک مدل مبتنی بر شبکه عصبی، امکان اندازه‌گیری و کنترل دقیق نیروی تماس را فراهم ساخت. نتایج نشان داد که حتی با یک مدل نسبتاً ساده، می‌توان رفتار غیرخطی حسگر را با دقت قابل قبول مدل‌سازی کرده و از آن در کاربردهای کنترلی استفاده نمود. علاوه بر این، طراحی سامانه به‌گونه‌ای انجام شد که گیره رباتیک در حالت عدم استفاده از حسگر نیز قابلیت عملکرد داشته باشد و این موضوع انعطاف‌پذیری سیستم را افزایش می‌دهد.

در نهایت، ارزیابی عملکرد گیره رباتیک در سناریوهای عملی نشان داد که سامانه طراحی‌شده توانایی اجرای وظایف اصلی مورد انتظار در دستکاری رباتیک را دارد. گیره رباتیک توانست حرکات دورانی مورد نظر را با دقت مناسب اجرا کرده و نیروی گرفتن را به‌صورت کنترل‌شده در تعامل با اجسام ظریف و منعطف تنظیم کند. بر اساس نتایج حاصل، می‌توان نتیجه گرفت که گیره رباتیک ارائه‌شده، از نظر طراحی مکانیکی، ساخت و کنترل، عملکردی پایدار و قابل اعتماد داشته و می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای مناسب برای توسعه‌های آتی در حوزه گیره‌های رباتیک مورد استفاده قرار گیرد.

۸- توسعه‌های آتی

در ادامه این پژوهش، ارزیابی کمی اثر رفتار ویسکوالاستیک ماده سیلیکونی، به‌ویژه هیسترزیس و خزش زمانی، بر عملکرد حسگر نیرو و خطای اندازه‌گیری در بازه‌های زمانی مختلف مورد توجه قرار خواهد گرفت. همچنین، به‌کارگیری روش‌های جبران‌سازی مناسب برای کاهش اثر این پدیده‌ها بر عملکرد سامانه کنترل نیرو بررسی خواهد شد. از سوی دیگر، استفاده از بینایی ماشین برای تخمین ابعاد و موقعیت جسم و هدایت انگشت‌های گیره تا نزدیکی آن پیش از تماس، از دیگر مسیرهای توسعه سامانه است. این رویکرد می‌تواند با کنترل سرعت حرکت انگشت‌ها در مرحله نزدیک‌شدن به جسم، اثرات دینامیکی ناشی از حرکت مجموعه و نیروی ضربه‌ای هنگام تماس را کاهش دهد و زمینه را برای بهبود عملکرد گیره در گرفتن اجسام با ابعاد و ویژگی‌های مکانیکی متفاوت فراهم سازد

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

بیانیه هوش مصنوعی: در جریان آمادسازی این اثر، نویسندگان از ChatGPT به‌منظور بهبود نگارش گرامری و بازنویسی برخی جملات جهت ارتقای روانی متن استفاده کرده‌اند. پس از استفاده از این ابزار، نویسندگان محتوا را بررسی و ویرایش کرده و مسئولیت کامل محتوای مقاله منتشرشده را بر عهده می‌گیرند.

حامی مالی: این پژوهش بدون دریافت حمایت مالی از سازمان یا نهاد خاصی انجام شده است.

نقش نویسندگان: نویسنده اول: مفهوم‌پردازی؛ ایده پردازی؛ روش‌شناسی؛ تحلیل محاسباتی و ریاضی؛ طراحی؛ ساخت و مونتاژ؛ کنترل؛ تهیه پیش نویس اولیه مقاله. نویسنده دوم: نظارت بر پروژه و تامین مالی؛ بازبینی و ویرایش علمی متن؛ مدیریت پروژه. نویسنده سوم: مدیریت پروژه.

تعارض منافع: هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

In Press Pre-Publication Version

منابع

[1] V. Babin and C. Gosselin, "Mechanisms for Robotic Grasping and Manipulation," *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems,* vol. 4, no. 1, pp. 573–593, 2021, doi: 10.1146/annurev-control-061520-010405.

[2] H. Heidari, M. Jafary Pouria, S .Sharifi, and M. R. Karami, "Design and fabrication of robotic gripper for robust grasping various objects in unstructured environments," *Modares Mechanical Engineering,* vol. 16, no. 8, pp. 241–250, 2016, doi: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.1.2.

[3] K. Walia, W. Navaraj, and P. Breedon, "Generatively optimised compact 3-DoF spherical parallel manipulator with tightly integrated actuators," *Frontiers in Mechanical Engineering,* vol. 11, p. 1629405, 2025, doi: 10.3389/fmech.2025.1629405.

[4] G. Rivera Soto, T .Whiteley, L. Critchfield, and A. Porras Díaz, "Compact Robotic Wrist and Gripper Using Stewart Platform Geometry," in "Advanced Mechanical Design, University of Rochester," University of Rochester, Rochester, NY, USA, 2025. Available: University of Rochester Senior Design Archive.

[5] R. Becker, M. Drab, and M. Quaas, "Gripper-swivel unit," Patent Appl. EP2986423B1, 2017 .

[6] N. Simaan, R. E. Goldman, and A. Bajo, "Dexterous wrists," Patent Appl. US10500002B2, 2019 .

[7] G. Laurent, R. Dahmouche, W. Haouas, and N. Piat, "Parallel robotic wrist with four degrees of freedom," Patent Appl. EP3523099B1, 2020 .

[8] C. Gosselin, K. Wen, D. Harton, and T. Laliberté, "Parallel mechanism with kinematically redundant actuation," Patent Appl. WO2020176973A1, 2020 .

[9] C. R. Shannon, "Mechanism with three degrees-of-freedom (DOF) output to provide independent control over roll, pitch, and yaw of output structure," Patent Appl. US11691270B2, 2023 .

[10] A. Fakhari and M. Keshmiri, "Slippage Dynamic Modeling in Object Grasping and Manipulation with Soft Fingers," *Modares Mechanical Engineering,* vol. 15, no. 8, pp. 332–340, 2015, doi: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.23.3.

[11] T. Li, Y. Yan, C. Yu, J. An, Y. Wang, and G. Chen, "A comprehensive review of robot intelligent grasping based on tactile perception," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,* vol. 90, p. 102792, 2024, doi: 10.1016/j.rcim.2024.102792.

[12] S. Cortinovis, G. Vitrani, M. Maggiali, and R. A. Romeo, "Control Methodologies for Robotic Grippers: A Review," *Actuators,* vol. 12, no. 8, p. 332, 2023 ,doi: 10.3390/act12080332.

[13] M. R. Sheykhazimi, M. R. Nayeri, M. T. Masouleh, and A. Kalhor, "Design, Prototyping and Performance Analysis of a Barometric-Based Soft Force Sensor," in *2025 33rd International Conference on Electrical Engineering (ICEE)* ,Isfahan, Iran, 2025, pp. 01–08, doi: 10.1109/ICEE67339.2025.11213923 .

In Press, Pre-Proof Version