

# کنترل تطبیقی انگشتان دست ربات برای گرفتن توپ نرم ساکن و در حال سقوط به روش فازی سوگنو

سورنا رادمقدم<sup>۱</sup>، دانشجوی دکتری؛ محمد فرخی<sup>۲</sup>، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران - s\_radmoghaddam@elec.iust.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران - farrokhi@iust.ac.ir

قطب علمی مدلسازی و کنترل سیستم های پیچیده - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران

**چکیده:** داشتن ابزار گرفتن مناسب و تطبیق پذیر با کارها و اجسام مختلف از ویژگی های بنیادین ربات ها در هنگام ارتباط با محیط می باشد. از این رو، برنامه ریزی و طراحی سازوکاری که در آن انگشتان دست به طور مطلوب هدایت شوند، امری حائز اهمیت است. انگشتان ربات رفتاری کاملا غیر خطی دارند و تحت تاثیر عواملی چون اصطکاک، ویژگی های فیزیکی سازوکارهای انتقال توان و تغییر جهت گیری دست، مدل سازی آن ها با دشواری هایی روبرو است. از این رو، استفاده از کنترل کننده ای که به طور مستقل از مدل عمل نماید، بسیار سودمند خواهد بود. در این مقاله، از کنترل کننده فازی تاکاگی- سوگنو-کانگ (TSK) که پارامترهای قسمت تالی آن به وسیله قاعده ای به روز می شوند، جهت کنترل نیرو و موقعیت انگشتان ربات برای گرفتن توپ سبک و نرم استفاده می شود. طراحی در فضای دکارتی و عدم وابستگی به مدل دینامیکی ربات از مهم ترین مزایای این روش می باشد. بنابراین ابتدا با تعیین استراتژی ای برای گرفتن توپ ساکن، مقادیر مرجع نیرو و موقعیت محاسبه می شوند. سپس عملکرد کنترل کننده فازی تطبیقی با و بدون حضور عواملی چون نویز اندازه گیری نیرو و اصطکاک مفصلی بررسی می شوند. علاوه بر این، فرآیند مهار کردن توپ متحرک در حال سقوط به ۳ فاز نزدیک شدن، قفل شدن (ضربه) و نگهداشتن تقسیم بندی می شود. سپس با بررسی نتایج به دست آمده از شبیه سازی، کارآمدی این روش در انجام مراحل سه گانه یاد شده نشان داده می شود.

**واژه های کلیدی:** دست ربات، گرفتن توپ نرم، کنترل کننده فازی، نویز اندازه گیری، اصطکاک مفصلی.

## Adaptive Control of Robotic Fingers for Grasping Stationary and Falling Soft Balls using Fuzzy Sugeno method

S. RadMoghadam, PhD Student<sup>1</sup>; M. Farrokhi, Professor<sup>2</sup>

1- Faculty of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email:

s\_radmoghaddam@elec.iust.ac.ir

2- Faculty of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: farrokhi@iust.ac.ir

Center of Excellence for Modelling and Control of Complex Systems, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

**Abstract:** Acquiring appropriate tools adaptable to various tasks is the most fundamental feature of the robots dealing with environment. Therefore, it would be more beneficial to plan a mechanism amenable to control the robotic fingers. Since robotic fingers have completely nonlinear behavior and their modeling is associated with the difficulties arising from the factors such as friction, physical features of transmission mechanisms, and changes in hand's orientation, adopting a model-independent method of control will be useful. In this paper, a Takagi-Sugeno-Kang (TSK) fuzzy controller, which adaptively updates its consequence parameters, is employed for position/force control of the fingertips grasping a light and soft ball. Designing in Cartesian space and being model-independent are some of the most important advantages of this method. In the first step, force and position reference values are calculated using a predetermined stationary grasping strategy. Afterward, the performance of the adaptive fuzzy TSK controller in maintaining the ball with and without the existence of force measurement noise and joint friction are evaluated. Furthermore, the process of catching a falling ball is divided into approaching, locking and holding phases. Finally, in the simulation section, it is shown that the adaptive fuzzy TSK controller is an efficient way for performing the aforementioned three phases.

**Keywords:** Robotic hand, grasping, fuzzy controller, measurement noise, joint friction.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۰۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۲۷

نام نویسنده مسئول: محمد فرخی.

نشانی نویسنده مسئول: تهران - خیابان دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی برق.

## ۱- مقدمه

منا سبب‌ترین ورودی کنترلی را برای اعمال به سیستم تولید می‌نماید. برای مثال، مرجع [۵] از روش تطبیقی برای کنترل از راه دور یک ربات فرمانبر استفاده کرده و به این طریق، بر نامعینی دینامیکی موجود در سیستم غلبه نموده است. در مرجع [۶] مساله تنظیم نیرو و موقعیت یک انگشت نرم در هنگام گرفتن سطوح هندسی نامشخص بررسی شده است. کنترل‌کننده تطبیقی ارائه‌شده در این مقاله، همگرایی مجانبی خطای نیروی اعمالی و همچنین خطای موقعیت تخمین‌زده‌شده نوک انگشت را به مقدار صفر تضمین می‌نماید. مطالعات انجام شده بر روی روش‌های مقابله با عامل‌های غیرخطی موجود در برخی دست‌های مصنوعی نشان می‌دهند که در این موارد، بهره‌گیری از روش‌های کنترل غیرخطی به فراگیرتر و مناسب‌تر بودن پاسخ منجر می‌گردد. برای نمونه می‌توان به غیرخطی‌گری شدید تاندون‌ها در دست‌های مصنوعی تاندونی اشاره کرد. این مساله به دلیل ویسکوالاستیسیته و اصطکاک موجود در سیستم انتقال توان، به وجود می‌آید. از این رو ابتدا در یک حلقه بیرونی، آثار نامطلوب عامل‌های مطرح‌شده توسط کنترل‌کننده غیرخطی‌ای چون مد لغزشی جبران‌سازی می‌شود؛ سپس مقدار حاصل‌شده به‌عنوان ورودی به حلقه کنترل اصلی (داخلی) داده می‌شود [۷، ۸]. برای مقابله با عوامل غیرخطی می‌توان مانند [۹] از روش دفع فعال اغتشاش نیز استفاده کرد. کنترل مقاوم نیز روش کلاسیک دیگری است که طیف گسترده‌ای از مقالات را به خود اختصاص داده است. به‌عنوان نمونه‌ای از کاربرد روش‌های کنترل مقاوم در این زمینه می‌توان به مرجع [۱۰] اشاره کرد. کنترل‌کننده  $H_{\infty}$  طراحی‌شده در این پژوهش دارای جمله‌های پیش‌خورد و پس‌خورد بوده و عملکرد مناسبی را در گرفتن با مهارت اجسام به ارمان می‌آورد.

کنترل امیدانس روش دیگری است که در آن اهداف کنترل از طریق تحقق مدل مرجع مطلوبی که بیان‌کننده برهم‌کنش میان سیستم و محیط است، محقق می‌شود. این مدل که به‌صورت رابطه ریاضی دیفرانسیلی نوشته می‌شود، عموماً به‌شکل یک سیستم جرم، فنر و میراکننده توصیف می‌گردد. در [۱۱] از کنترل امیدانسی جهت تعیین نیروی لازم از سوی انگشتان برای تحقق امیدانسی مکانیکی مطلوب جسم استفاده شده است. سپس در این مقاله، نیروی برآیند لازم به نیروهای تماسی تقسیم‌شده و گشتاور مورد نیاز هر یک از مفاصل انگشتان محاسبه می‌شوند. در روش امیدانسی، تعیین سختی سیستم به‌صورت فعال اتفاق می‌افتد. این در حالی است که این حالات را کم‌وبیش می‌توان به شیوه غیرفعال نیز در دست ربات به‌وجود آورد. در مرجع [۱۲] نشان داده شده است که به‌کارگیری توامان سختی فعال و غیرفعال منجر به بهبود اثرهای مخرب تاخیرهای موجود در حسگرها و عملگرها می‌شود. البته کنترل‌کننده‌های امیدانس از نظر فضای تحقق دارای انواع مختلفی هستند. در [۱] روش‌های مبتنی بر امیدانس بر اساس فضاهای مختلفی چون فضای مفصلی، نوک انگشتان، کاری جسم، مماسی و سینرزی طبقه‌بندی و بررسی شده‌اند. با اندکی تامل در روش‌های کنترل

اتوما سیون صنعتی در طول تاریخ، طی چندین دوره، تحولات سریع و قابل‌توجهی داشته است. یکی از بارزترین تحولات ایجادشده را می‌توان مربوط به ورود ربات‌ها به صنعت در دهه ۱۹۶۰ دانست. هدف اصلی از به‌کارگیری ربات‌ها، جایگزینی آن‌ها با انسان در انجام کارهای پرخطر و خسته‌کننده است. از ویژگی‌های بنیادین ربات‌ها می‌توان به دارا بودن ابزار گرفتن تطبیق‌پذیر با کارها و اجسام مختلف اشاره کرد. به‌دلیل پیچیده و متفاوت بودن انجام این کارها، دست‌های ماهر چندانگشتی همچنان موضوع تحقیقات گسترده بسیاری از پژوهشگران می‌باشد. با این وجود، میان قابلیت دست‌های ساخته‌شده تا به امروز و توانایی‌های طبیعی در گرفتن و کار با اجسام، فاصله‌ی زیادی وجود دارد.

اولین نکته‌ای که در رابطه با دست ربات مطرح می‌شود، میزان توانایی آن در شبیه‌سازی حرکات دست انسان است. هر یک از نمونه‌های ساخته‌شده تاکنون سعی در بهبود برخی ویژگی‌های ساختاری و یا سیستم کنترلی داشته‌اند. سازوکارهای مکانیکی متفاوت دست‌های ربات منجر به گوناگونی ساختاری آن‌ها می‌گردد. لذا طراحی سیستم کنترلی سازگار با ساختار، امری مهم و تعیین‌کننده است.

به‌طور کلی گرفتن اجسام به دو نوع گرفتن با دقت و با قدرت تقسیم‌بندی می‌شود. در نوع با دقت، جسم به‌وسیله نوک انگشتان گرفته می‌شود. اما در نوع با قدرت، گرفتن به‌کمک سطوح داخلی انگشتان و کف دست انجام می‌شود. بنابراین نوع با دقت، آزادی عمل بیشتری را برای کار با جسم فراهم می‌آورد. اما از سوی دیگر گرفتن با قدرت اجسام، استحکام بیشتری به‌همراه دارد [۱، ۲]. در این مقاله، به برنامه‌ریزی و طراحی سیستم کنترل برای گرفتن با دقت پرداخته می‌شود. در ادامه برخی از کارهای گذشته مرور می‌شوند.

در بسیاری از تحقیقات انجام‌شده از روش‌های کنترل کلاسیک استفاده شده است. ساده‌ترین کنترل‌کننده کلاسیک مورد استفاده، کنترل‌کننده PD می‌باشد. در [۳] دست رباتی با ساختار زیرتحرک در دو فضای مفصلی و فضای دکارتی سیستم انتقال تاندونی، به روش PD کنترل شده است. در این روش علاوه بر استفاده از ضرایب تناسبی و مشتق‌گیر، جمله‌ای جهت جبران نیروی گرانش به کنترل‌کننده اضافه شده است. ووجتارا و هم‌کارانش در [۴] ضمن به‌کارگیری کنترل‌کننده کامل‌تر PID از پیکربندی فرمانده‌فرمانبر برای کنترل یک ربات مین‌یاب استفاده کردند تا بدین ترتیب خطرهای ناشی از کار را به‌حداقل برسانند.

کنترل تطبیقی، یکی دیگر از پرکاربردترین روش‌های نظریه کنترل کلاسیک است. این روش، غالباً در مواردی که پارامترهایی از سیستم به‌طور مداوم در حال تغییر هستند، با الگوریتم‌های تطبیق خود

سیستم به دلیل عوامل و پدیده‌های مختلف امکان پذیر نباشد. یکی دیگر از مسائل مربوط به گرفتن اجسام نرم توسط انگشتان صلب، اندازه‌گیری مشخصات فیزیکی جسم می‌باشد. در بسیاری از کارهای انجام شده از جمله در [۲۱]، نیاز به دانستن جنس جسم و یا اندازه‌گیری خارج خط پارامترهایی چون سختی جسم وجود دارد. حال آن‌که در پیش‌گرفتن رویکردی که در آن سختی جسم در هر لحظه اندازه‌گیری شود بسیار مناسب خواهد بود.

بنابراین، هدف این مقاله برطرف کردن چالش‌های مطرح شده است. از این رو، روشی به کار گرفته می‌شود که در آن مسیر مطلوب در فضای دکارتی نوک انگشتان تعیین شود و به این طریق سرعت و شتاب فضای کاری نیز بدون نیاز به انجام محاسبات مربوط به سینماتیک وارون قابل تنظیم گردد. به این خاطر، روش پیشنهادی نسبت به بسیاری از روش‌های دیگر محاسبات کمتری دارد. برای این منظور، از روش کنترل فازی تاکاگی-سوگنو-کانگ (TSK) که به اختصار فازی-سوگنو نیز نامیده می‌شود، به همراه قاعده‌ای که پارامترهای تالی آن را به صورت وصل-خط تطبیقی دهد، استفاده می‌شود. خاصیت تقریب‌زنی عمومی سیستم فازی و قوانین تطبیقی قسمت تالی باعث می‌شوند تا طراحی به صورت مستقل از مدل انجام گیرد. علاوه بر این، برای یافتن میزان جابه‌جایی نوک انگشت، جهت اعمال نیروی مورد نظر به جسم نرم، از یک الگوریتم تخمین سختی استفاده می‌شود. نشان داده می‌شود که الگوریتم مذکور در حضور نویز اندازه‌گیری نیرو نیز عملکرد مناسبی را در تخمین سختی سطح دارا می‌باشد.

تاکنون اغلب تحقیقات انجام شده به گرفتن با قدرت (توسط کف دست و سطوح داخلی انگشتان) اجسام متحرک پرداخته‌اند. همچنین، کارهای بسیار اندکی در زمینه مهار کردن با دقت (توسط نوک انگشتان) اجسام متحرک توسط انگشتان ربات انجام شده است. در این مقاله ضمن برنامه‌ریزی برای مهار توپ در حال سقوط توسط نوک انگشتان، نشان داده می‌شود که کنترل کننده فازی تطبیقی ارائه شده از سرعت و دقت پاسخ مناسبی برای انجام این امر برخوردار است.

ساختار این مقاله بدین شرح است: در بخش بعد ضمن بیان مسئله مورد نظر به پیکربندی انگشتان نسبت به جسم، مدل‌سازی تماس، استراتژی گرفتن و تخمین سختی جسم پرداخته می‌شود. در بخش سوم ساختار کنترل کننده فازی تطبیقی به همراه تضمین پایداری آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی در بخش چهارم تحلیل می‌شوند. در بخش پنجم نیز به نتیجه‌گیری پرداخته می‌شود.

## ۲- پیکربندی انگشتان و استراتژی گرفتن

دست‌ها می‌توانند با تغییر درجه آزادی یا تغییر جهت‌گیری مچ، رفتار دینامیکی مختلفی از خود بروز دهند. همچنین، مدل‌سازی تماس بین جسم و انگشتان و نحوه گرفتن جسم می‌تواند انواع متنوعی به خود بگیرد. بنابراین، در ادامه ویژگی‌های دست ربات، مساله مدل تماس و نحوه گرفتن جسم نیز تشریح می‌گردد. همچنین از آن‌جا که

کلاسیک می‌توان به این نکته پی برد که روش‌های مذکور تا حدود زیادی وابسته به مدل هستند. از این رو می‌توان از روش‌های هوشمندی چون شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی و ویژگی تقریب‌زنی عمومی آن‌ها در بهبود عملکرد کنترل کننده‌های کلاسیک و کاهش وابستگی شان به مدل استفاده نمود. برای نمونه در [۱۳] به بهبود عملکرد کنترل کننده‌های کلاسیک جهت گرفتن اجسام پرداخته شده است. در این پژوهش نشان داده می‌شود که ترکیب روش‌هایی چون PID، مد لغزشی و پسگام با روش هوشمندی چون شبکه عصبی موجب بهبود عملکرد گرفتن می‌شود. در [۱۴] از شبکه‌های عصبی RBF تطبیقی برای تقریب ماتریس‌های ژاکوبی دارای نامعینی استفاده شده است. پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته مذکور که از پشخورد تصویری جهت تشخیص موقعیت استفاده نموده، با تعیین ضرایب تناسبی مناسب و قانون‌های تطبیقی به اثبات رسیده است. مرجع [۱۵] نیز به کنترل نیروی انگشت نرم پرداخته و از یک سیستم عصبی-فازی جهت جبران نامعینی ناشی از نرمی انگشتان استفاده کرده است. در مرجع [۱۶] به کنترل جمع‌شوندگی و بازشوندگی یک انگشت ربات به وسیله عملگرهای آلیاژ حافظه شکل (SMA) و کنترل کننده PID پرداخته شده است. از آنجایی که رفتار حرارتی و کشسانی SMA رفتاری کاملاً غیرخطی و نامعین است، از یک سیستم فازی-ممدانی جهت تعیین ضرایب تطبیقی کنترل کننده PID استفاده شده است. در پژوهش مشابه دیگری از روش کنترل فازی PD جهت کنترل یک دست ربات با ۱۴ درجه آزادی بهره گرفته شده است. در این مقاله، خطای مفصل‌ها و مشتق آن‌ها به عنوان ورودی به سیستم فازی وارد شده و پس از استنتاج در یک پایگاه قواعد با ۴۹ قاعده هر یک از ضرایب PD تعیین شده‌اند [۱۷]. در [۱۸] نیز از شبکه عصبی RBF جهت کنترل دست ربات انسان‌نما استفاده شده است. در این مقاله، پس از تعیین مدلی مبتنی بر شبکه عصبی بهبود یافته برای ربات و به دست آوردن قانون کنترل تطبیقی برای آن، نشان داده شد که الگوریتم کنترلی ارائه شده قابلیت مقابله با دینامیک غیرخطی ربات و میرا کردن بارهای خارجی وارده بر انگشتان را به خوبی دارا می‌باشد. همچنین، برای غلبه بر نامعینی پارامتری و اغتشاشات خارجی می‌توان از ترکیب شبکه عصبی RBF تطبیقی و قانون کنترل مد لغزشی مرتبه دوم بهره جست [۱۹]. در [۲۰] نیز دست ربات به دلیل درجات آزادی و مفصل‌هایش به صورت یک سیستم مقیاس بزرگ در نظر گرفته می‌شود. سپس از قابلیت تقریب‌زنی سیستم‌های فازی به همراه قاعده‌های تطبیقی استفاده می‌شود. در این روش، پارامترهای تنظیم به طور محسوسی کاهش پیدامی‌کنند.

در اغلب پژوهش‌های گذشته، هدایت در فضای مفصلی انگشتان صورت گرفته است. در نتیجه، لازم است که در هر لحظه، مسیر مرجع از فضای کاری (دکارتی) انگشتان توسط سینماتیک وارون به فضای مفصلی تبدیل شود. همچنین همان‌طور که در پیشینه کارهای انجام شده بیان شد، بسیاری از روش‌ها بر اساس مدل عمل می‌کنند حال آن‌که ممکن است در دسترس بودن مدل غیرخطی دقیقی از

خارجی وارد شونده بر جسم، نیروی وزن آن در نظر گرفته می شود. از این رو نیروهای اصطکاک تماسی برای مقابله با نیروی وزن، جهتی رو به بالا پیدامی کنند. بنابراین، با تعیین نیروی عمودی سطح  $(c_j f_x)$  می توان از افتادن جسم جلوگیری کرد. شکل ۲ نیروها و جهت آن ها را به خوبی نشان می دهد. چنانچه مشاهده می شود، شناخت مدل تماس انگشتان نقش مهمی در تعیین استراتژی گرفتن و شبیه سازی مساله دارد.

در صورتی که ماتریس  $G_j$  نیروی اعمالی از سوی انگشت زام را به مرکز جرم جسم نگاشت کند، برآیند نیروهای وارد شده به جسم به صورت زیر به دست می آید:

$${}^0F = G_1 c_1 f + G_2 c_2 f + G_3 c_3 f = \underbrace{[G_1 \ G_2 \ G_3]}_G \begin{bmatrix} c_1 f \\ c_2 f \\ c_3 f \end{bmatrix} \quad (2)$$

به  $G$  ماتریس نگاشت گرفتن گفته می شود. از این رو نگاشت گرفتن و مخروطهای اصطکاک، ویژگی های پیکربندی انگشتان را برای گرفتن جسم مشخص می کنند.

با توجه به این که نیروی وزن همواره در جهت منفی محور  $y_0$  به جسم وارد می شود، نیروی عمودی لازم برای گرفتن جسم از مساله ساده زیر محاسبه می شود:

$$\begin{cases} Gf = [0 \ m_0 g + d \ 0]^T \\ c_j f_{jx} > 0 \\ d > 0 \\ f = [c_1 f_{1x} \ \mu c_1 f_{1x} \ 0 \ \dots \ c_3 f_{3x} \ \mu c_3 f_{3x} \ 0]^T \\ j = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (3)$$

که در آن  $m_0$  بیانگر جرم جسم و  $g$  شتاب جاذبه است. در واقع، هدف از حل مساله فوق یافتن مقداری برای  $c_j f_{jx}$  ها است که نگاشت نیروهای اصطکاک مماسی در راستای قائم ناشی از آن ها در مرکز جرم جسم، مقداری بیش از نیروی وزن جسم و در خلاف جهت آن ایجاد نماید. در (۳) پارامتر  $d > 0$  تضمین می کند که نگاشت بیشینه نیروهای اصطکاک مماسی در مرکز جرم جسم، مقداری بیش از نیروی وزن آن دارد. البته به دلیل تقارن هندسی در حالت خاص فوق می توان نیروهای کنشگر عمودی سطح  $(c_j f_{jx})$  را برابر در نظر گرفت تا با خنثی نمودن یکدیگر نیرویی در راستای محوره های  $x_0$  و  $z_0$  به جسم وارد نشود. سپس با برابر قراردادن مجموع نیروهای مماسی انگشتان با نیروی وزن،  $c_j f_{jx}$  به صورت زیر به دست می آید:

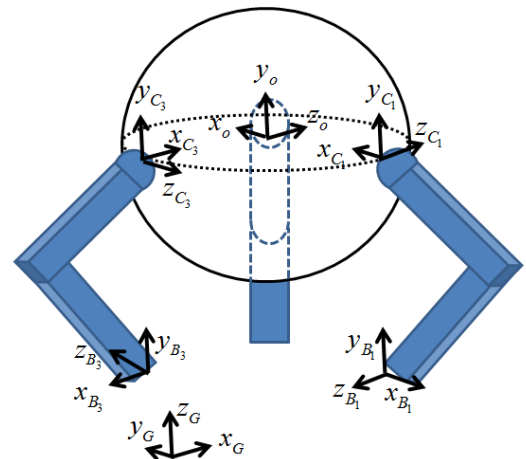
$$c_j f_{jx} = \frac{(m_0 g + d)}{3\mu} \quad (4)$$

تاکنون استراتژی اعمال نیرو برای گرفتن جسم ساکن بیان شد. حال، به بررسی حالت خاصی از گرفتن توپ نرم متحرک پرداخته می شود. همان طور که پیش تر نیز بیان شد در حالتی که جسم متحرک باشد، مهار کردن آن به طور کلی به صورت با قدرت انجام می شود. اما در [۲۳، ۲۴] به طور خاص به گرفتن جسم در حال سقوط به وسیله نوک

ضریب سختی توپ نرم مهارشونده توسط انگشتان می تواند مقادیر متفاوتی داشته باشد، در انتهای این بخش نحوه تخمین سختی جسم بررسی می شود.

## ۱-۲- پیکربندی انگشتان

دست مورد مطالعه در این مقاله از ۳ انگشت تشکیل شده است. هر یک از انگشتان دارای ۲ درجه آزادی بوده و مطابق شکل ۱ با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به یکدیگر قرار گرفته اند. هم چنین فرض می شود که جهت گیری کف دست و انگشتان رو به بالا باشد. هر چند که همان طور که در ادامه مشاهده می شود، الگوریتم کنترلی برای معادله دینامیک کلی ربات که شامل تمام جهت گیری ها است، طراحی می شود. همان طور که در شکل نیز دیده می شود، هر انگشت دارای چارچوبی در ابتدا و انتهای خود است که به ترتیب  $\{B_j\}$  و  $\{C_j\}$  نام گذاری شده اند. علاوه بر این، دو چارچوب جسم  $\{0\}$  (واقع در مرکز جرم جسم) و فراگیر  $\{G\}$  نیز در شکل قابل مشاهده هستند.



شکل ۱: پیکربندی انگشتان و چارچوب های آن ها

## ۲-۲- مدل تماس و استراتژی گرفتن

مدلی که در این مقاله برای توصیف تماس انگشت با جسم در نظر گرفته می شود، مدل اصطکاک کولمبی است. در این مدل، مجموعه نیروی اعمالی در نقطه تماس به صورت زیر تعریف می شود [۲۲]:

$$c_j f \in \left\{ c_j f \in \mathbb{R}^3 : \sqrt{c_j f_y^2 + c_j f_z^2} \leq \mu c_j f_x, c_j f_x \geq 0 \right\} \quad (1)$$

که در آن  $c_j f_x$  بیانگر مولفه عمودی نیرو در چارچوب تماس است.  $c_j f_y$ ،  $c_j f_z$  و  $\mu$  نیز نیروهای مماسی در چارچوب تماس و ضریب اصطکاک سطح هستند. از (۱) این گونه استنباط می شود که نیروهای مدل کولمبی درون یک مخروط با محوریت نیروی عمودی قرار دارند. بنابراین، نیروهای اصطکاک، مماس بر نقطه تماس و درون سطح مقطع دایره ای مخروط مذکور قرار می گیرند. شعاع این دایره برابر با حداکثر اندازه نیروی اصطکاک  $(\mu c_j f_x)$  است. در این مقاله، تنها نیروی

که در آن،  ${}^c_j X_{j_e}$ ،  ${}^c_j X_j$  و  ${}^c_j f_j$  بردارهایی سه‌بعدی و تعریف‌شده در چارچوب تماسی می‌باشند.  $\mathbf{K}_S$  نیز ماتریسی قطری بوده و درایه‌های روی قطر آن بیانگر ضریب سختی سطح می‌باشند. با توجه به این که انگشت‌ها دارای ۲ درجه آزادی هستند و در جهت محور  $z$  چارچوب تماس  $\{C_j\}$  حرکتی ندارند، نیروی وارد شونده در این راستا صفر بوده و از رابطه (۷) تنها در دو جهت  $x$  و  $y$  نقطه تماس استفاده می‌شود.

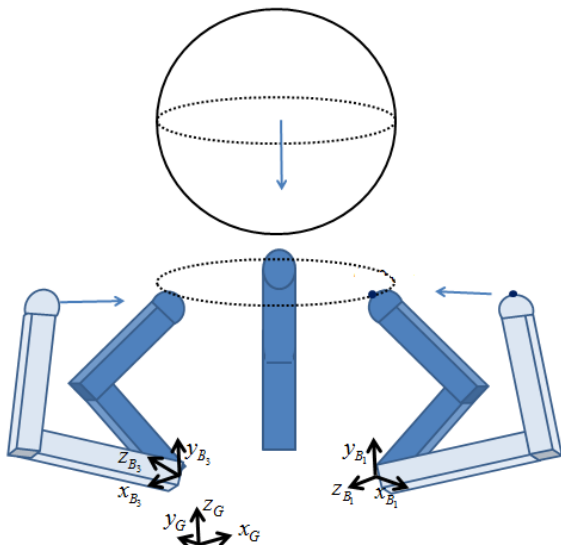
در بخش ۲-۲ بیان شد که برای گرفتن جسم باید نیروی عمودی سطح مطلوبی که از (۴) محاسبه می‌شود به جسم وارد شود. بنابراین جهت یافتن میزان فرورفتگی لازم باید نیروی مطلوب بر ضریب سختی سطح در راستای مذکور تقسیم گردد. از این رو دانستن مقدار سختی امری حائز اهمیت است. از سوی دیگر سختی یک جسم می‌تواند با جسم دیگر متفاوت باشد و یا مشخصه فشرده‌گی - نیروی هر جسم رفتاری کاملاً غیرخطی از خود بروز دهد. از این رو به کاربرد الگوریتمی که طی آن سختی در هر لحظه محاسبه شود، می‌تواند بسیار راه‌گشا باشد. ایده کلی محاسبه سختی در تخمین‌گر استفاده‌شده در این مقاله به نحوه یافتن سختی یک فنر از طریق تقسیم‌نمودن نیرو به جابه‌جایی آن باز می‌گردد. بنابراین برای محاسبه سختی عمودی سطح می‌توان از رابطه زیر بهره‌جست [۲۷]:

$$\hat{\mathbf{K}}_{S_x} = \frac{f_x}{\Delta} \quad (۸)$$

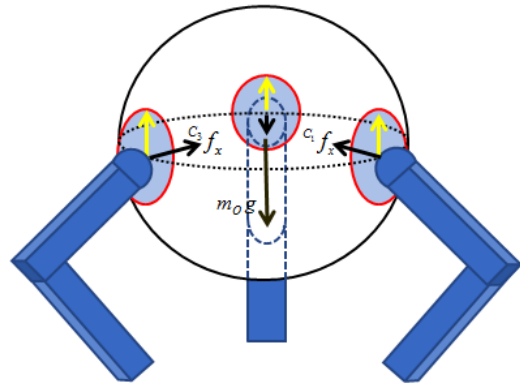
که در آن  $f_x$  و  $\Delta$  به ترتیب بیانگر نیروی عمودی اندازه‌گیری‌شونده توسط حسگر و میزان فرورفتگی می‌باشند. با توجه به از پیش معلوم‌بودن محل تماس، مقدار  $\Delta$  پس از سنجش مکان نوک انگشت، به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\Delta = {}^c_j x_j - {}^c_j x_{j_e} \quad (۹)$$

به این ترتیب، محاسبه مقدار تقریبی سختی در هر لحظه امکان‌پذیر است.



شکل ۳: حرکت انگشتان و توپ در فاز نزدیک‌شدن



شکل ۲: نیروهای اصطکاک تماسی و نیروی وزن وارد بر توپ

انگشتان پرداخته‌شده است. بررسی انجام‌شده غالباً از دیدگاه فیزیکی و عملی می‌باشد. لذا در این جا با توجه به مراجع مذکور و در نظر گرفتن توپ نرم در حال سقوط، فرآیند گرفتن به ۳ فاز نزدیک‌شدن، قفل‌شدن (ضربه) و نگه‌داشتن تقسیم‌بندی می‌شود. در فاز اول همان‌طور که از اسم آن مشخص است، انگشتان به محل برخورد با جسم هدایت می‌شوند. در این هنگام توپ در حال سقوط می‌باشد. شکل ۳ شمایی از این فاز را نشان می‌دهد. در فاز دوم انگشتان با ضربه‌زدن به توپ حرکت آن را متوقف می‌نمایند. در فاز نهایی نیز نیروهای تماسی به حداقل مقدار لازم جهت گرفتن و حفظ تعادل جسم ساکن کاهش می‌یابند. این مقدار از رابطه (۴) قابل محاسبه است. در فاز ضربه نیز نیروی وارد شونده به توپ باید به گونه‌ای باشد که رابطه زیر برقرار باشد [۲۴]:

$$3 \left( \mu \int c_j f_x dt \right) = m_o (v'_o - v_o) \quad (۵)$$

که در آن  $v_o$  و  $v'_o$  به ترتیب سرعت جسم قبل و بعد از اعمال ضربه را مشخص می‌کنند. با توجه به این که هدف توقف توپ است،  $v'_o$  برابر با صفر انتخاب می‌گردد.

### ۲-۳- نیروهای تماسی و تخمین سختی سطح

از آنجایی که توپ کروی مهارشونده نرم در نظر گرفته شده است، رفتار نیروهای تماس را می‌توان به صورت یک فنر در نظر گرفت. برای مثال، شکل ۴ را در نظر بگیرید. نیروی واردشونده در این شکل را می‌توان با رابطه زیر مدل کرد:

$${}^c_j f_{jx} = k_S ({}^c_j x_j - {}^c_j x_{j_e}) \quad (۶)$$

که در آن،  $k_S$ ،  ${}^c_j x_j$  و  ${}^c_j x_{j_e}$  به ترتیب ضریب سختی سطح، مکان نقطه انتهایی انگشت نام در چارچوب  $\{C_j\}$  و مکان سطح جسم در حالت تعادل نسبت به چارچوب تماسی  $\{C_j\}$  می‌باشند. در [۲۵، ۲۶] مدل نیروی تماسی به صورت حاصلضرب ماتریس سختی در نقطه تماس با بردار جابه‌جایی تعریف گردیده است. با این تعریف، رابطه (۶) به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$${}^c_j f_j = \mathbf{K}_S ({}^c_j X_j - {}^c_j X_{j_e}) \quad (۷)$$



$$\frac{\theta}{\theta_m} = \frac{\tau_m}{\tau} = R \quad (12)$$

که در آن،  $\theta_m$  و  $\theta$  زاویه شفت متصل به بار و زاویه روتور را نشان می دهند. فرض می شود که اندوکتانس ناچیز است. بنابراین، با یافتن  $i_a$  از رابطه سوم از مجموعه معادلات (۱۱) و جایگذاری آن در معادله دوم و استفاده از (۱۲) رابطه زیر به دست می آید:

$$\tau = \frac{K_T}{RR_a} v_t - \frac{J_m}{R^2} \ddot{\theta} - (B_m + \frac{K_e K_T}{R_a}) \frac{\dot{\theta}}{R} - \frac{D_m}{R} \quad (13)$$

با جایگزینی (۱۰) و (۱۳) دینامیک کلی انگشت و عملگر به صورت زیر به دست می آید:

$$\mathbf{M}(\theta)\ddot{\theta} + \mathbf{V}_m(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + \mathbf{N}(\theta) + \mathbf{D}(\dot{\theta}) = \tau' - \mathbf{J}^T f_c \quad (14)$$

که در آن:

$$\mathbf{M} = R^2 \mathbf{M}_f + J_m$$

$$\mathbf{V}_m = R^2 \mathbf{V}_{fm} + B_m + \frac{K_e K_T}{R_a}$$

$$\mathbf{D} = R^2 \mathbf{D}_f + R D_m$$

$$\mathbf{N} = R^2 \mathbf{N}_f$$

$$\tau' = \frac{K_T R}{R_a} v_t$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_f R^2$$

به دلیل آن که طراحی کنترل کننده در فضای کاری (دکارتی) انجام می شود، نیاز است تا دینامیک استخراج شده انگشت ربات در این فضا نوشته شود. لذا می توان دینامیک را به صورت زیر نیز نوشت:

$$\mathbf{M}_x \ddot{X} + \mathbf{V}_{mx} \dot{X} + \mathbf{N}_x + \mathbf{D}_x = f - f_c \quad (15)$$

برای هر انگشت  $X = [B_i x_i \quad B_i y_i]^T$ ، مختصات دکارتی انگشت را در چارچوب های  $\{B_i\}$  نشان می دهد که برای سادگی نوشتار، پی شوند مربوط به چارچوب آن نوشته نشده است. برای یافتن جملات بیان کننده رابطه فوق از ماتریس های تعریف شده در (۱۴)، به صورت زیر عمل می شود:

$$\mathbf{M}_x = \mathbf{J}^{-T} \mathbf{M}(\theta) \mathbf{J}^{-1} \quad (16)$$

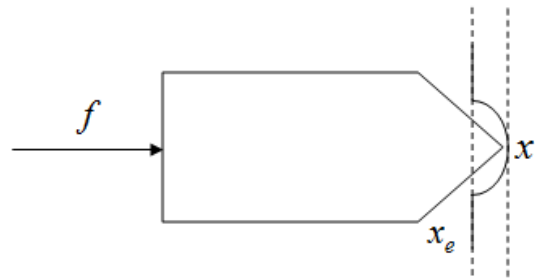
$$\mathbf{V}_{mx}(X, \dot{X})\dot{X} + \mathbf{N}_x(X) + \mathbf{D}_x(\dot{X}) = \mathbf{J}^{-T} (\mathbf{V}(\theta, \dot{\theta}) + \mathbf{N}(\theta) + \mathbf{D}(\dot{\theta}) - \mathbf{M}(\theta) \mathbf{J}^{-1} \mathbf{J} \mathbf{J}^{-1} \dot{X}) \quad (17)$$

$$f = \mathbf{J}^{-T} \tau' \quad (18)$$

در این صورت،  $\mathbf{M}_x - 2\mathbf{V}_{mx}$  ماتریسی پادمتقارن خواهد بود. که از این خاصیت در ادامه استفاده خواهد شد.

### ۲-۳- کنترل کننده فازی TSK تطبیقی

پیش تر بیان شد که به منظور هدایت انگشتان در فضای کاری و مقابله با وابستگی به مدل، از روش فازی TSK استفاده می شود. اما به دلیل نداشتن تجربه و معلومات کافی برای تنظیم پارامترهای قسمت تالی کنترل کننده فازی، رویکردی تطبیقی اتخاذ می شود. در این روش، مشابه ایده مرجع [۲۷] سیستم به طور تطبیقی و با توجه به خطای خروجی در هر لحظه اقدام به تصحیح پارامترهای مذکور می نماید.



شکل ۴: مدل نیروی عمودی سطح

### ۳- طراحی کنترل کننده فازی TSK تطبیقی در فضای دکارتی

در این بخش ابتدا معادلات دینامیکی هر انگشت بررسی می شود. سپس ساختار و روابط کنترل کننده فازی تطبیقی تشریح می گردد.

#### ۳-۱- دینامیک انگشت ربات و عملگر

جهت یافتن معادلات دینامیکی ربات، عموماً از روش لاگرانژ استفاده می شود. این روش که بر اساس معادلات انرژی پتانسیل و جنبشی به محاسبه دینامیک می پردازد، در نهایت منجر به رابطه ای به شکل زیر می شود [۲۸]:

$$\mathbf{M}_f(\theta)\ddot{\theta} + \mathbf{V}_f(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + \mathbf{N}_f(\theta) + \mathbf{D}_f(\dot{\theta}) = \tau - \mathbf{J}_f^T f_c \quad (10)$$

که در آن  $\mathbf{M}_f(\theta)$  و  $\mathbf{V}_f(\theta, \dot{\theta})$  به ترتیب ماتریس مربعی  $2 \times 2$  متقارن و معین مثبت جرم و بردار  $2 \times 1$  نیروهای کوریولیس و گریز از مرکز می باشند.  $\mathbf{N}_f(\theta)$  و  $\mathbf{D}_f(\dot{\theta})$  نیز به ترتیب، بردارهای ناشی از نیروی گرانش زمین و اصطکاک مفصل ها می باشند. همچنین  $\mathbf{J}_f$  نمایانگر ماتریس  $2 \times 2$  ژاکوبی است. بردار گشتاورهای مفصلی نیز با  $\tau$  نشان داده می شود. به علاوه، بردار نیروی تماسی  $f_c = [c f_x \quad c f_y]^T$  نیروهای تماسی را در چارچوب تماسی نشان می دهند که برای سادگی نوشتار، پیشوند مربوط به چارچوب آن حذف گردیده است. جمله  $\mathbf{V}_f(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$  می توان به صورت  $\mathbf{V}_{fx}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$  نیز نوشت. به منظور تولید گشتاورهای مفصلی در هر مفصل از عملگر موتور سرو استفاده می شود. معادلات موتور سرو به صورت زیر است [۲۵]:

$$\begin{cases} \tau_e = K_T i_a \\ \tau_e = J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + D_m + \tau_m \\ v_t = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_e \dot{\theta}_m \end{cases} \quad (11)$$

که در آن ها،  $i_a$ ،  $v_t$ ،  $R_a$ ،  $L_a$  و  $K_e$  به ترتیب، نشان دهنده جریان آمیچر، ولتاژ پایانه موتور، مقاومت آمیچر، اندوکتانس آن و ثابت ولتاژ محرک معکوس هستند. همچنین،  $J_m$ ،  $B_m$ ،  $D_m$  و  $K_T$  به ترتیب بیانگر اینرسی روتور، ضریب میرایی، اصطکاک و ثابت گشتاور موتور هستند. گشتاورهای روتور  $\tau$  و بار  $\tau_m$  به وسیله ضریب تناسب  $R$  مطابق رابطه زیر به یکدیگر تبدیل می شوند:

$$\gamma_i (\|X\|, s_i)_{27 \times 1} = [H_i^1(\|X\|, s_i) [\|X\| s_i 1] \dots H_i^9(\|X\|, s_i) [\|X\| s_i 1]]^T \quad (28)$$

$$w_i = [a_i^1 \ b_i^1 \ c_i^1 \ \dots \ a_i^9 \ b_i^9 \ c_i^9]^T \quad (29)$$

رابطه (۲۶) را می‌توان به صورت ضرب داخلی زیر نوشت:

$$f_{FUZZY_i} = w_i^T \gamma_i (\|X\|, s_i) \quad (30)$$

با تنظیم هر چه بهتر بردار  $w_i$  می‌توان به تقریب بهتری از مولفه  $\lambda_m$  چهار جمله اول رابطه (۲۳) دست یافت. در صورتی که  $w_i^*$  بردار تخمین بهینه باشد، می‌توان آن را به صورت زیر تعریف نمود:

$$w_i^* = \arg \min \left| O_i(x, \dot{x}, x_d, \dot{x}_d) - w_i^T \gamma_i (\|x\|, s_i) \right| \quad (31)$$

که در آن:

$$O_i(x, \dot{x}, x_d, \dot{x}_d) = (\mathbf{M}_x (\ddot{X}_d + \Lambda^{-1} \dot{e}) + \mathbf{V}_{mx} (\dot{X}_d + \Lambda^{-1} e) + N_x + D_x)_{i1} \quad (32)$$

زیروند  $i$  در بالا نشان‌دهنده درایه  $\lambda_m$  است. بنابراین، با دانستن (۳۰) روابط (۲۲) و (۲۳) به صورت زیر تغییر می‌کنند:

$$\mathbf{M}_x \Lambda^{-1} \dot{S} = \begin{bmatrix} w_1^T \gamma_1 (\|X\|, s_1) \\ w_2^T \gamma_2 (\|X\|, s_2) \end{bmatrix} - \mathbf{V}_{mx} \Lambda^{-1} S + f_C - f \quad (33)$$

$$f = \underbrace{\begin{bmatrix} w_1^T \gamma_1 (\|X\|, s_1) \\ w_2^T \gamma_2 (\|X\|, s_2) \end{bmatrix}}_{f_{FUZZY}} + f_C + \mathbf{K} S \quad (34)$$

حال جهت یافتن قانون تطبیق وزن‌های قسمت تالی ( $w_2$  و  $w_1$ ) در عین تضمین پایداری، تابع کاندید لیاپانوف به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$V_s = \frac{1}{2} S^T \mathbf{M}_x \Lambda^{-1} S + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \tilde{w}_i^T \Gamma_i^{-1} \tilde{w}_i \quad (35)$$

که در آن:

$$\tilde{w}_i = w_i^* - w_i \quad (36)$$

با مشتق‌گیری از (۳۵) نسبت به زمان، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{V}_s = S^T \mathbf{M}_x \Lambda^{-1} \dot{S} + \frac{1}{2} S^T \dot{\mathbf{M}}_x \Lambda^{-1} S + \sum_{i=1}^2 \tilde{w}_i^T \Gamma_i^{-1} \dot{\tilde{w}}_i \quad (37)$$

با جایگذاری از (۳۳) و (۳۴) نتیجه زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{V}_s = S^T & \left( \begin{bmatrix} w_1^T \gamma_1 (\|X\|, s_1) \\ w_2^T \gamma_2 (\|X\|, s_2) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} w_1^T \gamma_1 (\|X\|, s_1) \\ w_2^T \gamma_2 (\|X\|, s_2) \end{bmatrix} + \varepsilon \right) \\ & + \frac{1}{2} S^T (\mathbf{M}_x - 2\mathbf{V}_{mx}) \Lambda^{-1} S + \sum_{i=1}^2 \tilde{w}_i^T \Gamma_i^{-1} \dot{\tilde{w}}_i \\ & - S^T \mathbf{K} S \end{aligned} \quad (38)$$

که در آن،  $\varepsilon$  خطای تقریب سیستم فازی است. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد،  $(\mathbf{M}_x - 2\mathbf{V}_{mx})$  ماتریسی پادمتقارن است. لذا تساوی  $\frac{1}{2} S^T (\mathbf{M}_x - 2\mathbf{V}_{mx}) \Lambda^{-1} S = 0$  همواره برقرار خواهد بود. بنابراین با

ساده‌سازی خواهیم داشت:

$$\dot{V}_s = -S^T \mathbf{K} S + S^T \varepsilon + \sum_{i=1}^2 (\tilde{w}_i^T \gamma_i (\|X\|, s_i) s_i + \tilde{w}_i^T \Gamma_i^{-1} \dot{\tilde{w}}_i) \quad (39)$$

با برابر با صفر قراردادن جمله داخل سری، قانون‌های تطبیق پارامترهای تالی به صورت زیر به دست می‌آیند:

از ملزومات طراحی کنترل‌کننده تشکیل بردار خطای دکارتی

می‌باشد. این خطا به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$e = X_d - X \quad (19)$$

که در آن،  $X_d$  نشان‌گر بردار مطلوب است. با دو بار مشتق‌گیری از خطای فوق نسبت به زمان و قراردادن در (۱۵) معادله زیر به دست می‌آید:

$$\mathbf{M}_x \ddot{e} = \mathbf{M}_x \ddot{X}_d + \mathbf{V}_{mx} (\dot{X}_d - \dot{e}) + N_x + D_x + f_C - f \quad (20)$$

حال بردار  $\dot{S}$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = \Lambda \dot{e} + e \quad (21)$$

که در آن،  $\Lambda_{2 \times 2}$  ماتریسی قطری و مثبت معین است. بردار دو بعدی  $\dot{S}$  را می‌توان به صورت  $\dot{S} = [s_1 \ s_2]^T$  در نظر گرفت. با قراردادن (۲۱) در (۲۰) رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\mathbf{M}_x \Lambda^{-1} \dot{S} = \mathbf{M}_x (\ddot{X}_d + \Lambda^{-1} \dot{e}) + \mathbf{V}_{mx} (\dot{X}_d + \Lambda^{-1} e) - \mathbf{V}_{mx} \Lambda^{-1} S + N_x + D_x + f_C - f \quad (22)$$

در ادامه، نیروی کنترلی به صورت زیر انتخاب می‌شود:

$$f = \mathbf{M}_x (\ddot{X}_d + \Lambda^{-1} \dot{e}) + \mathbf{V}_{mx} (\dot{X}_d + \Lambda^{-1} e) + N_x + D_x + f_C + \mathbf{K} S \quad (23)$$

$\mathbf{K}$  ماتریسی قطری و مثبت معین است. حال با قراردادن (۲۳) در (۲۲) دینامیک حلقه بسته زیر حاصل می‌شود:

$$\mathbf{M}_x \Lambda^{-1} \dot{S} + (\mathbf{K} + \mathbf{V}_{mx} \Lambda^{-1}) S = 0 \quad (24)$$

با توجه به این که ضرایب معادله فوق مخالف صفر است، درایه‌های  $\dot{S}$  در نهایت به صفر می‌رسد. اما با توجه به این که  $N_x$ ،  $\mathbf{V}_{mx}$ ،  $\mathbf{M}_x$  و  $D_x$  عناصری به‌طور کلی ناشناخته و وابسته به سیستم هستند، (۲۳) قانونی وابسته به مدل می‌گردد. بنابراین جهت مقابله با این مساله از سیستم فازی برای تقریب چهار جمله اول (۲۳) استفاده می‌شود. از آن‌جا که حاصل جمع ۴ جمله مذکور برداری ۲ بعدی است، به همین تعداد سیستم فازی TSK جهت تقریب آن به کار گرفته می‌شود. حال، قواعد سیستم فازی TSK  $\lambda_m$  با ورودی‌های نرم مختصات دکارتی و مولفه  $\lambda_m$  بردار  $\dot{S}$  به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$R_l^i$ :

$$\text{IF } \|B_l X_i\| \text{ is } A_l^i \text{ and } s_i \text{ is } B_l^i \text{ THEN } h_l^i = a_l^i \|B_l X_i\| + b_l^i s_i + c_l^i \quad (25)$$

$l = 1, \dots, 9$

$i = 1, 2$

در بالا برای هر ورودی سه تابع عضویت فرض گردیده که این امر، موجب می‌گردد تا ۹ قاعده فازی تشکیل شود. از تئوری سیستم‌های فازی خروجی سیستم  $\lambda_m$  به صورت زیر خواهد بود:

$$f_{FUZZY_i} = \sum_{l=1}^9 H_l^i (\|X\|, s_i) (a_l^i \|X\| + b_l^i s_i + c_l^i) \quad (26)$$

که در آن:

$$H_l^i (\|X\|, s_i) = \frac{\mu_{A_l^i} (\|X\|) \mu_{B_l^i} (s_i)}{\sum_{l=1}^9 \mu_{A_l^i} (\|X\|) \mu_{B_l^i} (s_i)} \quad (27)$$

با انتخاب

لذا با توجه به (۴۵) و (۴۶) نامساوی زیر به دست می آید:

$$\dot{V} \leq -S^T \left( \mathbf{K} - \frac{1}{2}I \right) S - r \left( 1 - \frac{\eta}{2} \right) \sum_{i=1}^2 (\tilde{w}_i^T \tilde{w}_i) + \frac{r}{2\eta} \sum_{i=1}^2 (w_i^{*T} w_i^*) + \frac{1}{2} \|\varepsilon\|^2 \quad (47)$$

با انتخاب  $0 < \eta < 2$  و  $\lambda_{\min}(\mathbf{K}) > \frac{1}{2}$  جمله اول سمت راست

(۴۷) منفی می شوند. در ادامه، با تعریف بردار  $\Theta = [w^T S^T]^T$  نامساوی زیر به دست می آید:

$$\dot{V} \leq -\lambda_1 \|\Theta\|^2 + \lambda_2 \quad (48)$$

که در آن:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \min \left\{ \lambda_{\min} \left( \mathbf{K} - \frac{1}{2}I \right), r \left( 1 - \frac{\eta}{2} \right) \right\} \\ \lambda_2 = \frac{r}{2\eta} \sum_{i=1}^2 (w_i^{*T} w_i^*) + \frac{1}{2} \|\varepsilon\|^2 \end{cases} \quad (49)$$

حال می توان دریافت که اگر  $\|\Theta\| \geq \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}}$  باشد،  $\dot{V} \leq 0$  بوده و در

نتیجه با مراجعه به مرجع [۳۲] و قضیه کران داری یکنواخت می توان نتیجه گرفت که سیستم به طور یکنواخت کران دار است و در زمان محدودی به مجموعه ای فشرده همگرا می شود. از این رو در صورتی که  $\Omega_w$  به اندازه کافی بزرگ انتخاب شود تا  $\|w\| = \Omega_w$  درون ناحیه

مجانبی ضابطه دوم ( $\|\Theta\| > \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}}$ ) قرار گیرد، پارامترهای تطبیقی به درون  $\|w\| < \Omega_w$  هدایت می شود. لذا در این ناحیه با استفاده از ضابطه اول (۴۲) مانند آنچه پیشتر نشان داده شد، به (۴۱) می رسیم. اما این بار با توجه به تضمین محدودیت وزن ها با بزرگ انتخاب نمودن  $\mathbf{K}$ ، کران دار بودن خطای تخمین پارامترهای آزاد و خطای رد یابی در نزدیکی مبدا حاصل می شود.

۲- مشاهده می شود که پس از قرارگیری وزن ها در  $\|w\| < \Omega_w$ ، رابطه مشتق زمانی تابع لیاپانوف به صورت (۴۱) نوشته می شود. از این رو با استفاده از (۴۶) به دست می آید:

$$\dot{V} \leq -S^T \left( \mathbf{K} - \frac{1}{2}I \right) S + \frac{1}{2} \|\varepsilon\|^2 \quad (50)$$

هم چنین، می توان نامساوی زیر را استنتاج کرد:

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min} \left( \mathbf{K} - \frac{1}{2}I \right) \|S\|^2 + \frac{1}{2} \|\varepsilon\|^2 \quad (51)$$

با انتگرال گیری از دو طرف (۵۱) می توان نوشت:

$$V(t) - V(0) \leq -\lambda_{\min} \left( \mathbf{K} - \frac{1}{2}I \right) \int_0^t \|S(t')\|^2 dt' + \frac{1}{2} \int_0^t \|\varepsilon(t')\|^2 dt' \quad (52)$$

در نتیجه نامساوی زیر به دست می آید:

$$\int_0^t \|S(t')\|^2 dt' \leq \left( \lambda_{\min} \left( \mathbf{K} - \frac{1}{2}I \right) \right)^{-1} \left( |V(0)| + \sup_{t \geq 0} |V(t)| + \frac{1}{2} \int_0^t \|\varepsilon(t')\|^2 dt' \right) \quad (53)$$

$$w_i(t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \Gamma_i s_i \gamma_i (\|X\|, s_i) dt + w_i(t_1) \quad (40)$$

که در آن،  $t_1$  و  $t_2$  به ترتیب، لحظه کنونی و یک زمان نمونه برداری بعدتر می باشند. بنابراین، مشتق زمانی تابع لیاپانوف به صورت زیر می شود:

$$\dot{V} = -S^T \mathbf{K} S + S^T \varepsilon \quad (41)$$

علامت جمله دوم رابطه بالا در حالت کلی نامعلوم است. بنابراین با توجه به این که  $\varepsilon$  مقداری کوچک است، انتخاب مقداری مثبت و بزرگ برای  $\mathbf{K}$  می تواند منجر به منفی شدن  $\dot{V}$  گردد. در این صورت، پایداری برقرار می شود. اما ممکن است در طول روند کنترل، پارامترهای آزاد سیستم (وزن های سیستم فازی) واگرا شده و برای رسیدن به عملکرد مناسب به مکانی در بی نهایت میل نمایند [۲۹]. لذا برای جلوگیری از گریز پارامترها قانون تطبیق وزن ها باید به گونه ای اصلاح شود. برای این منظور به کمک مرجع [۳۰] و [۳۱] قوانین تطبیق به صورت زیر انتخاب می شوند:

$$\dot{w}_i = \begin{cases} \Gamma_i \gamma_i s_i & \text{if } \|w\| < \Omega_w \\ \Gamma_i \gamma_i s_i - r \Gamma_i w_i & \text{else} \end{cases} \quad (42)$$

که در آن،  $r$  و  $\Omega_w$  پارامترهای اسکالر مثبت می باشند. بردار  $w$  نیز به صورت  $w = [w_1^T \ w_2^T]^T$  در نظر گرفته می شود. حال قضیه زیر بیان می شود.

**قضیه ۱-** در صورتی که قانون کنترل (۳۴) به همراه انتخاب مناسب پارامترها و قوانین تطبیق (۴۲) به دینامیک انگشت توصیف شده با رابطه (۱۵) اعمال شود، بردارهای  $S$  و  $\tilde{w} = [\tilde{w}_1^T \ \tilde{w}_2^T]^T$  در حلقه بسته به طور یکنواخت کران دار و پایدار خواهد بود.  
۲- اگر خطای تقریب سیستم فازی ( $\varepsilon$ ) محدود بوده و در نامساوی  $\int_0^t \|\varepsilon(t')\|^2 dt' < \infty$  صدق کند، خطای ردیابی در زمان بی نهایت به صفر میل می کند.

**اثبات.** ۱- جهت بررسی کران دار بودن بردارها فرض می شود که وزن های سیستم فازی خارج ناحیه محدود  $\|w\| < \Omega_w$  باشند. از این رو از ضابطه دوم (۴۲) استفاده می شود. اگر تابع لیاپانوف به صورت (۳۵) در نظر گرفته شود، به طریق مشابه قبل می توان به رابطه (۳۹) رسید. حال با بهره گیری از ضابطه دوم (۴۲) معادله زیر حاصل می شود:

$$\dot{V} = -S^T \mathbf{K} S + S^T \varepsilon + r \sum_{i=1}^2 \tilde{w}_i^T w_i \quad (43)$$

رابطه (۴۳) را می توان به صورت زیر نیز نوشت:

$$\dot{V} = -S^T \mathbf{K} S + S^T \varepsilon + r \sum_{i=1}^2 \tilde{w}_i^T (w_i^* - \tilde{w}_i) \quad (44)$$

می دانیم که نامساوی های زیر همواره برقرار است:

$$r \sum_{i=1}^2 \tilde{w}_i^T w_i^* \leq r \sum_{i=1}^2 \left( \frac{\eta}{2} \tilde{w}_i^T \tilde{w}_i + \frac{1}{2\eta} w_i^{*T} w_i^* \right) \quad (45)$$

$$S^T \varepsilon \leq \frac{1}{2} (S^T S + \varepsilon^T \varepsilon) \quad (46)$$



اعمال نیروی مورد نظر استفاده شود و رابطه (۸) برای تخمین سختی در هر لحظه به کار گرفته شود، نمودار بلوکی کنترل دست ربات در فضای دکارتی مطابق شکل ۵ خواهد شد. از آنجا که هر سه انگشت ربات مورد بحث یکسان هستند، نمودار بلوکی شکل ۵ برای هر یک از انگشتان به طور یکسان قابل اجرا هستند.

#### ۴- نتایج شبیه سازی

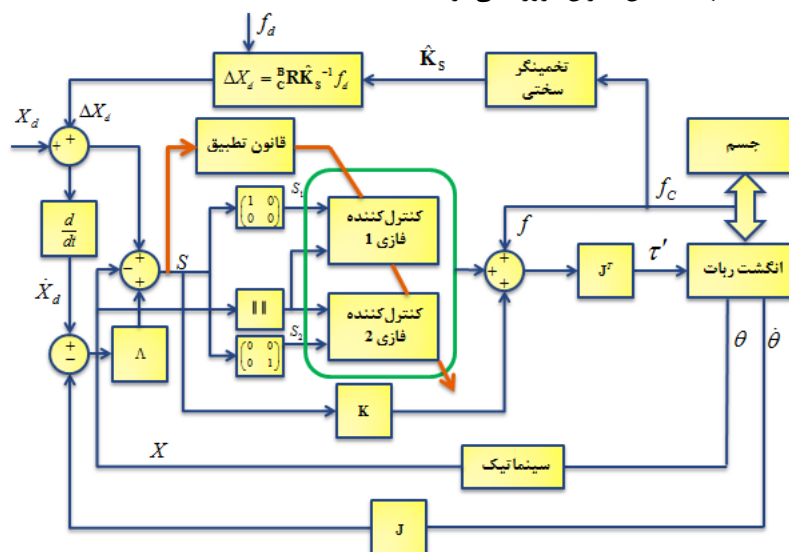
در این بخش، جهت ارزیابی روش ارائه شده برای گرفتن توپ نرم به بررسی نتایج پرداخته می شود. در میان کارهای اخیر، کاری که با رویکردی مشابه این مقاله به موضوع مورد بحث پرداخته با شد، انجام نشده است. این امر از آنجاست می شود که هر یک از مقالات بر روی حل بخشی از مسئله تمرکز داشته اند. برای مثال دسته ای از مقالات به طور خاص به برنامه ریزی نیرو، تعیین محل تماس انگشتان برای گرفتن شکل های مختلف اشیاء، پس خورد تصویری و مسائلی از این دست پرداخته اند. گروهی از مقالات نیز با طراحی انواع مختلف سازوکارهای مکانیکی زیر تحریک و افزونه برای انگشتان، به ارائه روش های کنترل آن ها پرداخته اند. بنابراین، اغلب مراجع با تمرکز بر بخش خاصی از مسئله بدون پرداختن به جزئیات بخش های دیگر راهکارهای خود را ارائه کرده اند.

به جهت ارزیابی بهتر روش ارائه شده برای گرفتن توپ نرم، نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از شبیه سازی مرجع [۱۸] مقایسه می شود. با توجه به این که در [۱۸] نیز از کنترل کننده های هوشمند و تطبیقی استفاده شده است، مقایسه با این مرجع می تواند مبنای ارزیابی بسیار خوبی باشد. البته به دلیل آن که در مقاله مذکور تنها به کنترل حرکت انگشتان دست ربات بسنده شده است، از استراتژی گرفتن و تخمین گر سختی ارائه شده در بخش ۲ برای شبیه سازی روش کنترلی [۱۸] استفاده شده است. بدین ترتیب، عملکرد کنترل کننده ها در شرایطی یکسان قابل ارزیابی است.

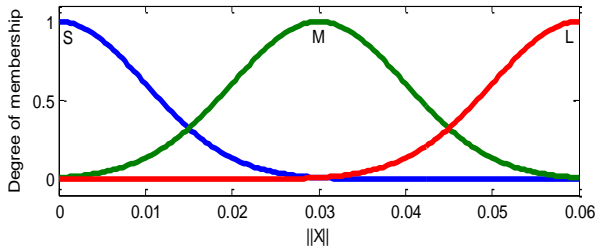
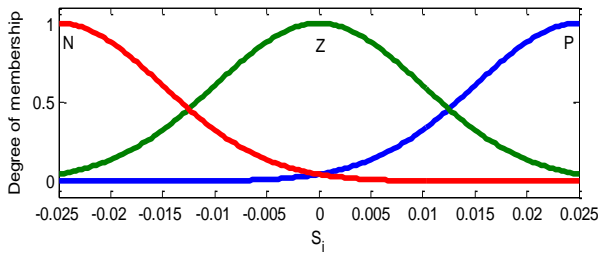
با توجه به پایدار بودن سیستم، تابع لیاپانوف همواره کراندار است. از این رو اگر  $\varepsilon \in L_2$  باشد، به عبارت دیگر اگر  $\int_0^t \|\varepsilon(t')\|^2 dt' < \infty$  برقرار باشد، آن گاه از (۵۳) می توان نتیجه گرفت که  $S \in L_2$  است. از آنجا که جملات سمت راست رابطه (۳۳) کراندار هستند،  $\dot{S} \in L_\infty$  است. حال با توجه به لم بارابلات اگر  $S \in L_2 \cap L_\infty$  و  $\dot{S} \in L_\infty$  آن گاه نرم ۲ بردار  $S$  به صفر میل خواهد کرد ( $\lim_{t \rightarrow \infty} \|S(t)\| = 0$ ) که این امر با توجه به مراجع [۳۰، ۳۱] همگرایی مجانبی خطا به صفر ( $\|e(t)\| \rightarrow 0$ ) را در پی دارد. بنابراین، اثبات قضیه کامل می شود.

**تبصره.** همانطور که بیان شد،  $\Omega_{\eta}$  محدوده مجاز وزن های فازی را مشخص می کند. این محدوده باید به گونه ای تعیین شود تا دربرگیرنده بردارهای بهینه ( $w_i^*, i = 1, 2$ ) باشد. از آنجایی که مقدار دقیق وزن های بهینه نامعلوم است، تعیین  $\Omega_{\eta}$  با دشواری همراه است. بنابراین در این مقاله نیز مشابه راهکار مرجع [۳۱] که با مسئله مشابهی مواجه بود، پیشنهاد می شود تا طراح با در نظر گرفتن مقادیر نسبتا بزرگ و تغییر دادن آن بهترین مقدار را انتخاب نماید.

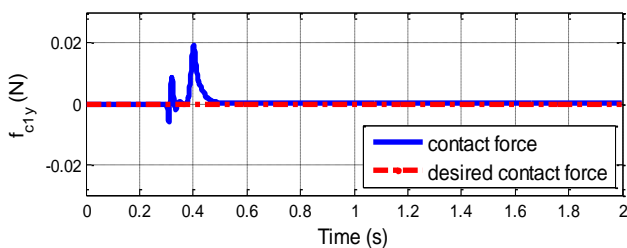
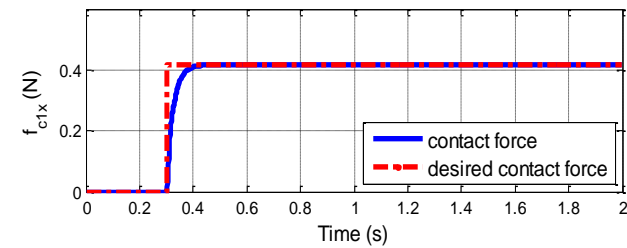
تاکنون قانون کنترلی در فضای نیرو محاسبه شد. اما این قانون جهت اعمال به ربات باید به گشتاور مورد نیاز مفصلی تبدیل شود. برای این کار می توان از ترانهاده ژاکوبی استفاده نمود. البته این مسئله ارتباطی به طراحی در فضای دکارتی ندارد زیرا قانون کنترل (۳۴) همچنان بر اساس پس خورد در فضای دکارتی تشکیل می شود. قانون کنترل (۳۴) از ویژگی مهمی برخوردار است زیرا چنانچه در بخش شبیه سازی گرفتن توپ در حال سقوط خواهیم دید، مسیر حرکت مرجع برای رسیدن به نقطه مورد نظر به شکل راحت تری تعیین می شود. و بر خلاف بسیاری از روش ها بدون نیاز به محاسبه سینماتیک وارون یا تبدیل مسیر مرجع دکارتی به مسیر مرجع مفصلی عمل می نماید. بنابراین اگر از رابطه (۹) جهت تعیین میزان فرورفتگی برای



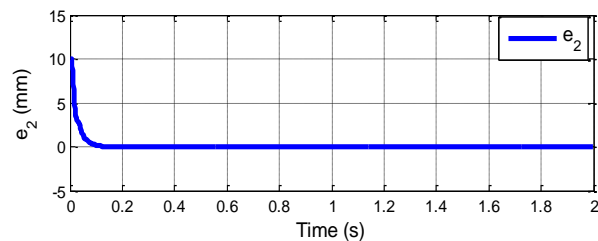
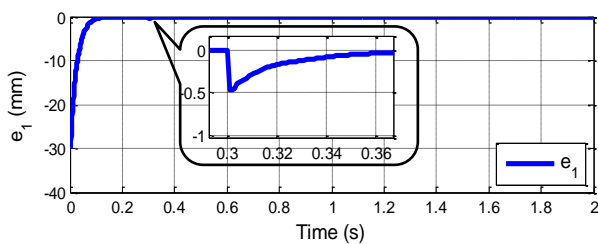
شکل ۵: نمودار بلوکی کنترل فازی تطبیقی هر انگشت



شکل ۶: توابع عضویت ورودی‌های سیستم‌های فازی



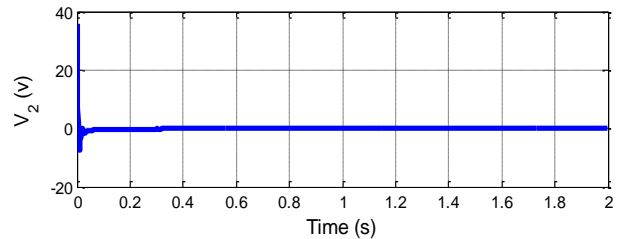
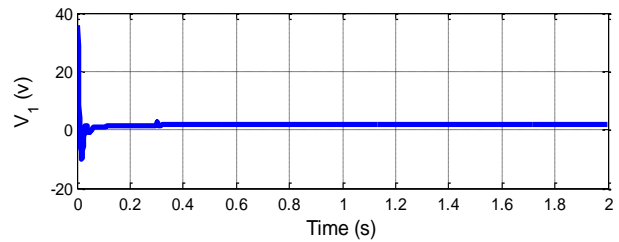
شکل ۷: نیروهای تماسی عمود بر سطح (شکل بالا) و مماسی (شکل پایین) هر انگشت



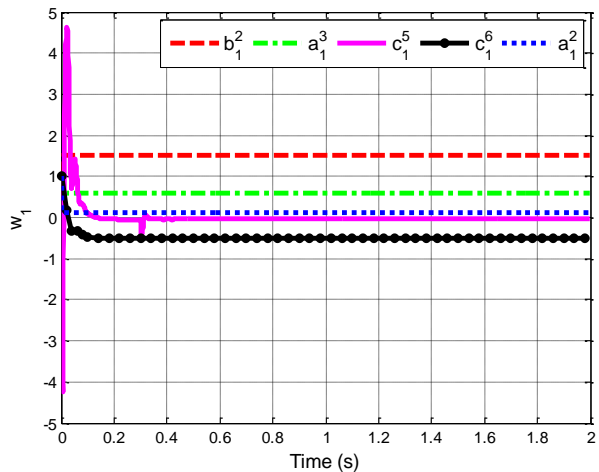
شکل ۸: بردار خطای دکارتی نوک انگشت

ابتدا توپ ساکنی را در نظر بگیرید که توسط شخص یا ربات دیگری به مدت ۱ ثانیه ساکن نگاه داشته شده است. در نتیجه، دست ربات می‌تواند در این مدت جهت گرفتن توپ اقدام کند. برای این منظور، مطابق شکل ۱ و استراتژی بخش ۲-۲ عمل می‌شود. در شبیه‌سازی‌ها جرم و طول هر یک از بندهای دست ربات به ترتیب برابر با  $g = 80$  و  $cm = 3$  در نظر گرفته شده است. با احتساب  $\mu = 0.8$ ، محاسبه می‌شوند. با وجود آن که سختی توپ در دو جهت  $x$  و  $y$  دستگاه تما سی برابر با  $1000$  N/m در نظر گرفته می‌شود، اما حدس اولیه برای آن  $900$  N/m فرض می‌شود که البته در ادامه با استفاده از رابطه (۸) تخمین لحظه‌ای این پارامتر به دست می‌آید. همچنین، پارامترهای کنترل کننده فازی تطبیقی به صورت  $\mathbf{K} = 1400I_{2 \times 2}$ ،  $\Lambda = 0.025I_{2 \times 2}$ ،  $\Gamma_1 = \Gamma_2 = 500000I_{27 \times 27}$ ،  $r = 2 \times 10^{-5}$  و  $\Omega_v$  برابر با  $100$  انتخاب می‌شوند. مقادیر پارامترهای موتورهای سرو نیز در جدول ۱ پیوست آمده‌اند. علاوه بر این، توابع عضویت سیستم‌های فازی مطابق شکل ۶ تعیین می‌شوند. لذا با توجه به موارد فوق، نیروهای تماسی هر انگشت به صورت شکل ۷ به دست می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نیروی عمودی سطح به مقدار مطلوب رسیده و نیروی مماسی نیز پس از طی یک حالت گذرا در اثر برخورد انگشت با جسم به مقدار صفر همگرا شده است. این امر به دلیل همگرایی سیگنال خطا به مقدار صفر پدید می‌آید. شکل ۸ رفتار بردار خطای رابطه (۱۹) را نشان می‌دهد. یادآوری می‌گردد که بردار  $\mathbf{d}$  و در نتیجه، قانون کنترل (۳۴) بر اساس سیگنال خطای مذکور تشکیل می‌شوند. شکل ۹ نیز نشان دهنده ولتاژ ورودی موتورهای می‌باشد. ملاحظه می‌شود که با وجود آن که ولتاژ اشباع موتورها  $36$  V بوده، پاسخ‌های مناسبی به دست آمده‌اند. همچنین، به منظور بررسی قانون تطبیق (۴۲)، نمودار تغییرات تعدادی از وزن‌های قسمت تالی سیستم فازی اول در شکل ۱۰ رسم شده‌اند. با توجه به شکل می‌توان دریافت که بر اساس میزان آتش‌شدن هریک از قوانین فازی، وزن‌های متناظر از مقادیر اولیه یکسان به مقادیر متفاوتی تغییر یافته‌اند.

شبکه RBF استفاده می‌شود تا هر یک از درایه‌های ماتریس  $M_x$  و بردار  $N_x$  تخمین زده شود. بردار زاویه مفصل‌های انگشت نیز ورودی‌های شبکه‌ها را تشکیل می‌دهند. برای تقریب درایه‌های ماتریس  $V_{mx}$  از ۱۰ سلول میانی استفاده می‌شود. طبق [۱۸] بردار ورودی شبکه‌های تقریب‌زننده  $V_{mx}$  شامل بردار زاویه‌های مفصلی و سرعت زاویه‌ای مفصل‌های انگشت می‌باشد. علاوه بر این برای انتخاب بهتر مرکزهای سلول‌های میانی تمامی شبکه‌ها از روشی با نام RPCL استفاده می‌شود. برای جزئیات بیشتر به مقاله مربوطه مراجعه شود. لذا در صورتی که از روش شبکه عصبی تطبیقی به همراه استراتژی گرفتن و تخمین‌گر سختی بخش ۲ استفاده شود، نتایجی به صورت شکل ۱۱ حاصل می‌شود. با مشاهده نتایج می‌توان دریافت که اگرچه نیرو به مقدار دلخواه رسیده و گرفتن با موفقیت انجام شده است اما پاسخ گذرای بدتری نسبت به شکل ۷ به دست آمده است. هم‌چنین، پاسخ کندتر شده است. توجه شود که در این بخش فرض شده است که شخصی توپ را تا ثانیه یکم ساکن نگه داشته و سپس رها می‌نماید تا دست ربات آن را نگه دارد. از این رو اگر چه تعادل توپ در زمان  $t = 1$  که توپ توسط فرد رها می‌شود توسط انگشتان ربات حفظ می‌شود، ولی پاسخ کند و حالت گذرای بد نیروی مماسی در زمان برقراری تماس ( $t = 0.3$ ) می‌تواند باعث عدم موفقیت در گرفتن توپ متحرک شود. علاوه بر این، از آنجا که انگشتان دست دارای ۲ درجه آزادی هستند، ابعاد ماتریس‌های  $M_x$  و  $V_{mx}$  و بردار  $N_x$  به گونه‌ای خواهد بود که در هر انگشت کنترل شده به روش عصبی-تطبیقی، در هر لحظه ۶۴۰ وزن تطبیقی، به‌روز می‌شوند. در صورتی که مراکز تحت آموزش سلول‌ها نیز محاسبه شوند، عدد پارامترهای به‌روزشونده بسیار بیشتر خواهد بود. حال آن که در هر انگشت کنترل شده به روش بخش ۳، دو سیستم فازی وجود دارد. با توجه به تعداد ۳ تابع عضویت برای هر یک از دو ورودی سیستم فازی (مطابق شکل ۶)، ۹ قاعده برای هر سیستم تشکیل می‌شود. از آنجا که در هر قاعده ۳ وزن تطبیقی وجود دارد، در مجموع برای هر سیستم فازی ۲۷ و برای هر انگشت ۵۴ وزن تطبیقی می‌توان متصور بود. مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی این مقاله وزن‌های به مراتب کمتری نسبت به [۱۸] برای به‌روزرسانی دارد. بنابراین محاسبات کمتر در روش پیشنهاد شده مزیت مهم دیگری است که در کاربردهای عملی بسیار راه‌گشا خواهد بود.



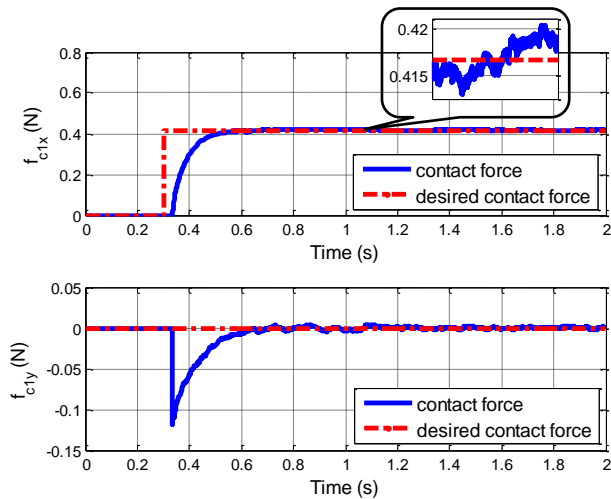
شکل ۹: ولتاژهای موتورهای هر انگشت



شکل ۱۰: تغییرات تعدادی از وزن‌های قسمت تالی کنترل‌کننده فازی ۱ در هر انگشت

همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، عملکرد کنترل‌کننده تطبیقی فازی در مقایسه با مرجع [۱۸] سنجیده می‌شود. در این مرجع، قانون کنترلی از یک PD، یک جمله مقاوم‌کننده و یک جمله تطبیقی تشکیل شده است. قسمت تطبیقی در واقع برای تقریب ماتریس‌های نامعلوم  $M_x$ ،  $V_{mx}$  و بردار  $N_x$  قرار داده شده است. در این بخش، هر درایه  $V_{mx}$  و  $N_x$  توسط یک شبکه عصبی RBF تقریب زده می‌شود. وزن‌های تطبیقی شبکه عصبی به‌گونه‌ای تنظیم می‌شوند که پایداری حلقه بسته تضمین شود. البته برخلاف روش تطبیقی و فازی ارائه شده در بخش ۳، محدود ماندن وزن‌های تطبیقی توسط مرجع مذکور تضمین نشده است که این امر می‌تواند یکی از مزایای روش ارائه شده نسبت به روش عصبی-تطبیقی یادشده باشد.

تمامی پارامترهای تنظیم‌شونده کنترل‌کننده عصبی-تطبیقی مطابق با مقاله مربوطه و متناسب با مسئله انتخاب شده‌اند تا بهترین عملکرد کنترل‌کننده با روش پیشنهاد شده در بخش ۳ مقایسه گردد. بدین ترتیب، مانند مرجع [۱۸] از ۱۰۰ سلول عصبی در لایه میانی هر

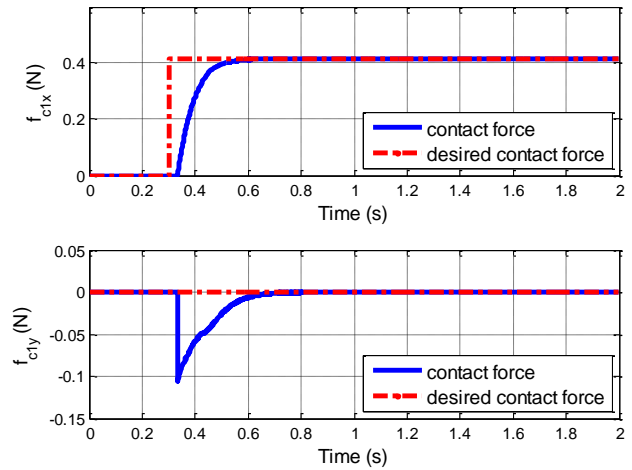


شکل ۱۳: نیروهای تماسی عمود بر سطح (شکل بالا) و مماسی (شکل پایین) در حضور نویز و کنترل شده به روش مرجع [۱۸]

یکی دیگر از عواملی که سیستم‌های کنترلی باید در مواجهه با آن مقاومت خوبی از خود نشان دهند، وجود عدم قطعیت داخلی می‌باشد. وجود اصطکاک در مفاصل‌ها یکی از موارد عدم قطعیت در سیستم است. از آن‌جا که مدل اصطکاک به‌طور معمول در دسترس نیست، طراحی کنترل‌کننده نیز لحاظ نمی‌شود. اما با توجه به این که چهار جمله اول سمت راست رابطه (۲۳) به وسیله سیستم فازی-تطبیقی تقریب‌زده می‌شود، اثر مخرب این عامل به میزان زیادی کاهش پیدا می‌کند. در شبیه‌سازی این بخش، از مدل اصطکاک مفصلی زیر استفاده شده است:

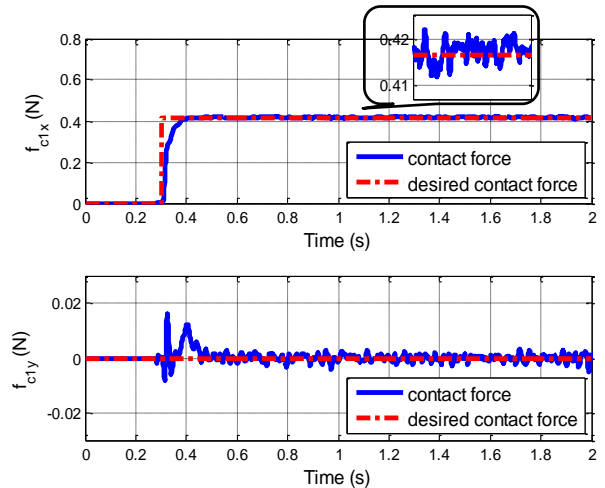
$$D(\dot{\theta}) = 0.03\dot{\theta} + 0.01\text{sgn}(\dot{\theta}) \quad (54)$$

که در آن، جملات اول و دوم به ترتیب نشان‌دهنده اصطکاک ویسکوز و اصطکاک دینامیکی هستند. شکل ۱۴ نشان‌گر نیروهای تماسی در حضور اصطکاک می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با وجود در نظر گرفتن عدم قطعیت، کنترل‌کننده پیشنهادی توانسته نیروها را به‌طور مناسب به مقدار مورد نظر برساند. اما این امر در روش مرجع [۱۸] با گذراندن حالت گذرای نسبتاً شدیدی محقق شده است. دلیل شدیدتر شدن حالت گذرای شکل ۱۵ نسبت به شکل ۱۱ وجود اصطکاک مفصلی پیش‌بینی نشده است. لذا تا زمانی که وزن‌های شبکه عصبی به‌خوبی تطبیق یابند، پاسخ نامطلوبی به دست می‌آید. اما پس از به‌روزرشدن وزن‌ها نیروها به سمت مقدار مطلوبشان هدایت می‌شوند. مقایسه شکل‌های ۱۴ و ۱۵ از برتری روش پیشنهادی در مقابله با عدم قطعیت داخلی حکایت دارد.



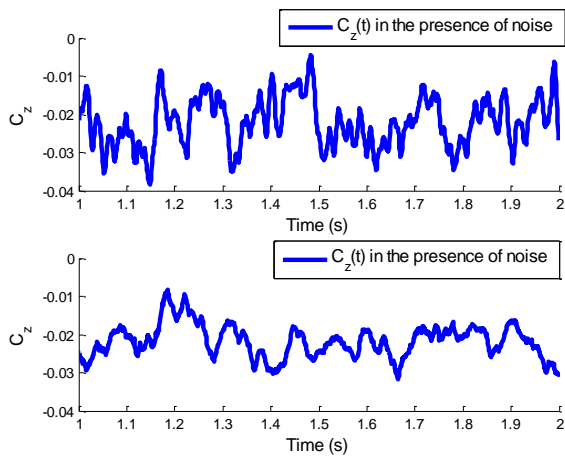
شکل ۱۱: نیروهای تماسی عمود بر سطح (شکل بالا) و مماسی (شکل پایین) کنترل‌شده به روش مرجع [۱۸]

جهت ارزیابی بهتر روش کنترل و تخمین سختی، کنترل انگشتان در حضور نویزی با حداکثر دامنه  $0.3 \text{ N}$  در اندازه‌گیری نیرو مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۱۲ و ۱۳ به ترتیب نشانگر نیروهای تماسی در روش فازی-تطبیقی و عصبی-تطبیقی می‌باشند. در این شکل‌ها کاملاً نمایان است که نیروهای تماسی در هر دو روش حول مقدار مرجع با دامنه اندکی دارای اعوجاج هستند. علاوه بر این می‌توان دریافت که با وجود نویز در اندازه‌گیری نیرو، الگوریتم تخمین سختی تا حدود بسیار خوبی کارآمد بوده است. لذا هر دو روش توانسته‌اند با وجود نویز اندازه‌گیری تعادل توپ را حفظ کنند.

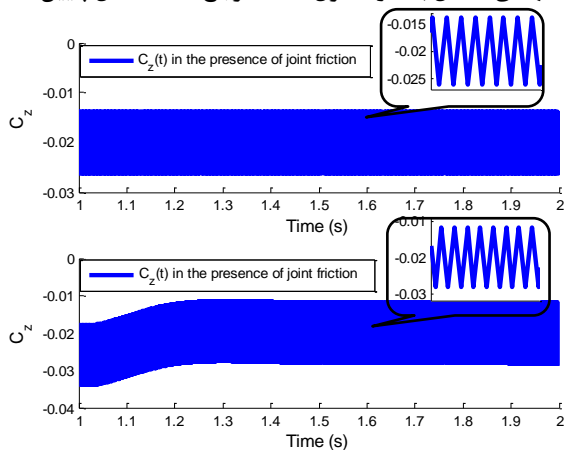


شکل ۱۲: نیروهای تماسی عمود بر سطح (شکل بالا) و مماسی (شکل پایین) در حضور نویز و کنترل شده به روش فازی تطبیقی

اما  $t = 1$  توپ تو وسط ربات یا شخص دیگری نگه داشته شده است. پس از آن توپ تنها توسط انگشتان ربات نگه داشته می‌شود. لذا با بررسی شکل‌ها می‌توان دریافت که از ثانیه یکم نامساوی (۵۶) و در نتیجه شرط تعادل توپ در هر دو حالت با نویز و با اصطکاک برقرار است. علت نوسان رخ داده در حالت با اصطکاک نیز وجود تابع  $\text{sgn}$  در رابطه (۵۴) و مدل اصطکاک می‌باشد که این امر به دلیل دامنه کم نوسان، تاثیر زیادی در نیروهای تماسی و برهم‌خوردن تعادل توپ ندارد. البته مشخص است که در حضور اصطکاک، روش پیشنهادی شرط (۵۶) را با حاشیه بهتری نسبت به مقدار صفر رعایت می‌کند. این درحالی است که این مسئله در حضور نویز برای روش مرجع [۱۸] صادق است.

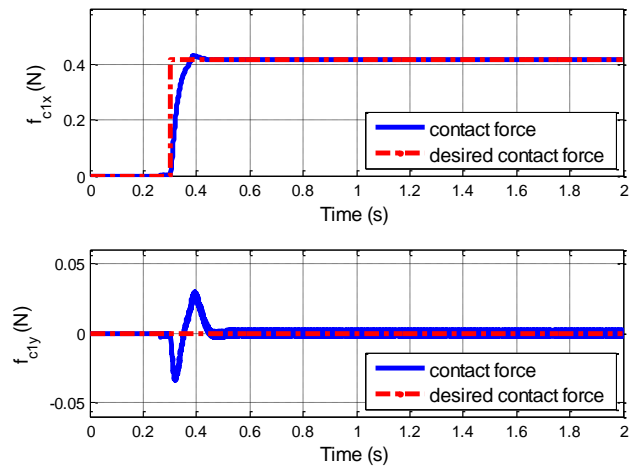


شکل ۱۶: تغییرات  $C_z(t)$  در حضور نویز در دو حالت کنترل کننده پیشنهادی (شکل بالا) و کنترل کننده مرجع [۱۸] (شکل پایین)

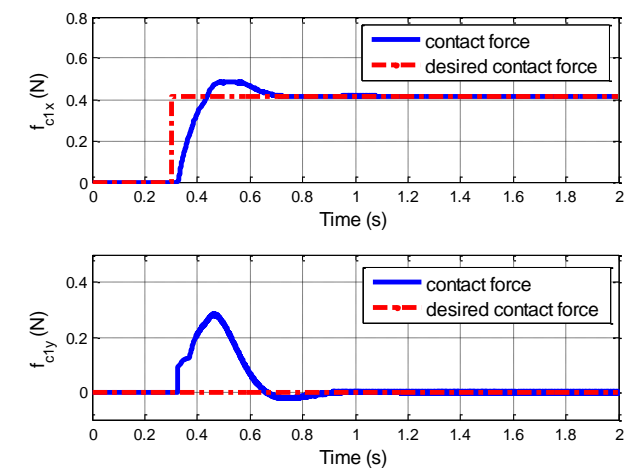


شکل ۱۷: تغییرات  $C_z(t)$  در حضور اصطکاک در دو حالت روش کنترلی پیشنهادی (شکل بالا) و روش مرجع [۱۸] (شکل پایین)

در ادامه، نتایج کنترل انگشتان دست ربات برای گرفتن جسم نرم ۱۰ گرمی که در حال سقوط بر روی کف دست است، بررسی می‌شود. در این راستا به گونه‌ای برنامه‌ریزی می‌شود که انگشتان در فاز نزدیک شدن، به محل از پیش تعیین شده‌ای که بزرگ‌ترین دایره مقطعی توپ نیز از آن نقطه عبور می‌کند، به‌طور همزمان برسند. با فرض آن که جسم دارای شعاعی برابر با ۲ cm باشد و هر انگشت از نقطه اولیه



شکل ۱۴: نیروهای تماسی عمود بر سطح (شکل بالا) و مماسی (شکل پایین) در حضور اصطکاک مفصلی و کنترل شده به روش فازی تطبیقی



شکل ۱۵: نیروهای تماسی عمود بر سطح (شکل بالا) و مماسی (شکل پایین) در حضور اصطکاک مفصلی و کنترل شده به روش مرجع [۱۸]

در شکل‌های فوق اگرچه نیروی تماسی عمودی غیر صفر نشانگر برقراری تماس و موفق بودن گرفتن است اما به‌منظور درک بهتر این موضوع لازم است که تعادل دینامیکی توپ در راستای قائم بررسی شود. لذا شرط زیر همواره باید برقرار باشد:

$$\begin{cases} F_f \leq -F_{ext} & \text{if } F_{ext} \geq 0 \\ F_f \geq -F_{ext} & \text{if } F_{ext} < 0 \end{cases} \quad (55)$$

نامساوی‌های بالا بیان می‌دارد که برای آن که تماس بین جسم و دست در اثر نیروی وزن از دست نرود، لازم است که همواره نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه ( $F_f$ ) از برآیند نیروهای دیگر وارد بر جسم در راستای قائم ( $F_{ext}$ ) بیشتر باشد. در واقع، پارامتر  $l$  در رابطه (۴) به گونه‌ای انتخاب می‌شود که شرط‌های بالا در حضور محدودی از نامعینی و نویز اندازه‌گیری برقرار باشد. البته جهت بررسی نامساوی‌های بالا می‌توان تحقق شرط زیر را همواره مورد بررسی قرار داد:

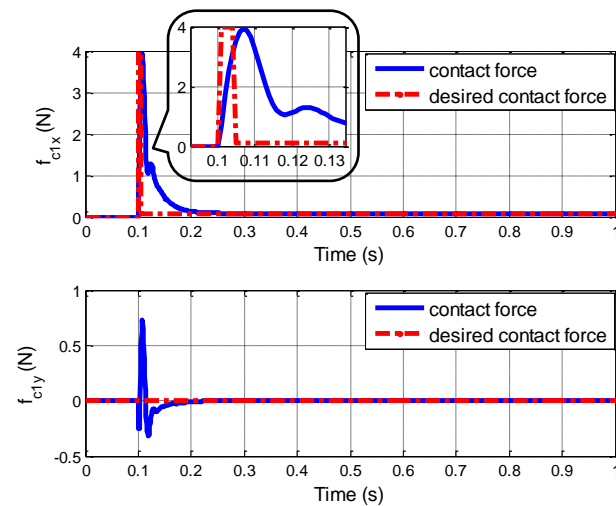
$$C_z(t) = \text{sgn}(F_{ext})(F_f + F_{ext}) \leq 0 \quad (56)$$

شکل‌های ۱۶ و ۱۷ تغییرات تابع  $C_z(t)$  را در دو حالت با نویز و با اصطکاک نشان می‌دهند. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، تا پیش از



در نظر گرفته شد. از این رو با توجه به سرعت رسیدن ۱ متر بر ثانیه‌ای توپ می‌توان میزان جابجایی توپ را در ۳ زمان نمونه‌برداری در بدترین شرایط (با صرف نظر کردن از اصطکاک جنبشی) برابر با ۳ mm محاسبه کرد. با توجه به این جابه‌جایی اندک، سطح تماس نوک انگشت با توپ حفظ شده و می‌توان نیروهای دلخواه را به آن اعمال نمود. در فاز نگهدارنده شتن نیز نیروی تماسی عمود بر سطح به مقدار به دست آمده از طریق رابطه (۴) همگرا گردید. شکل ۱۹ تغییرات سیگنال خطا را برای رسیدن به عملکرد مناسب نشان می‌دهد. جهت بررسی شرط تعادل توپ در طول انجام سه فاز یاد شده، مقدار تابع  $C_z(t)$  در شکل ۲۰ رسم شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، مقدار تابع همواره منفی است لذا شرط تعادل جسم برقرار می‌باشد و لغزشی صورت نگرفته است. شکل ۲۱ نیز شمایی از حرکت توپ و انگشتان را نشان می‌دهد.

در این جا باید متذکر شد که انجام سریع فازهای مذکور چنانچه در [۲۳] نیز بحث شده است، نیازمند بهره‌گیری از موتورهای سرو سریع و با ولتاژ بالا می‌باشد تا در حداقل زمان ممکن فرامین کنترلی اجرا و از لغزش و افتادن توپ جلوگیری شود. در شبیه‌سازی‌های گرفتن توپ ساکن، برتری روش پیشنهادی نسبت به مرجع [۸] از نظر سرعت پاسخ نشان داده شد. از آن جا که مهارت توپ در حال سقوط چنانچه مشاهده می‌شود، مستلزم سرعت بسیار بالایی است، روش مرجع مذکور سرعت کافی برای انجام سریع فاز ضربه و ورود به فاز بعد را ندارد. بنابراین، در شبیه‌سازی این بخش تنها از کنترل کننده فازی تطبیقی پیشنهادی استفاده شده است.



شکل ۱۸: نیروهای تماسی در طول فازهای سه‌گانه

می‌توان  $[0.04 \ 0.04]^T$  m در چارچوب  $\{B_i\}$  شروع به حرکت نماید، نقطه  $[0 \ 0.04]^T$  m را به‌عنوان نقطه ملاقات هر انگشت انتخاب نمود. در این مرحله، مسیر حرکت مطلوب داده‌شده به کنترل‌کننده برای هر انگشت در فضای دکارتی و به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$X_d(t) = \begin{bmatrix} x_d(t) \\ y_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \\ 0.04 \end{bmatrix} \quad (57)$$

ضرایب چندجمله‌ای مسیر به شکل زیر یافته می‌شوند [۲۸]:

$$\begin{cases} a_0 = x_0 \\ a_1 = \dot{x}_0 \\ a_2 = \frac{3}{t_f^2}(x_f - x_0) - \frac{2}{t_f}\dot{x}_0 - \frac{1}{t_f}\dot{x}_f \\ a_3 = -\frac{2}{t_f^3}(x_f - x_0) + \frac{1}{t_f^2}(\dot{x}_0 + \dot{x}_f) \end{cases} \quad (58)$$

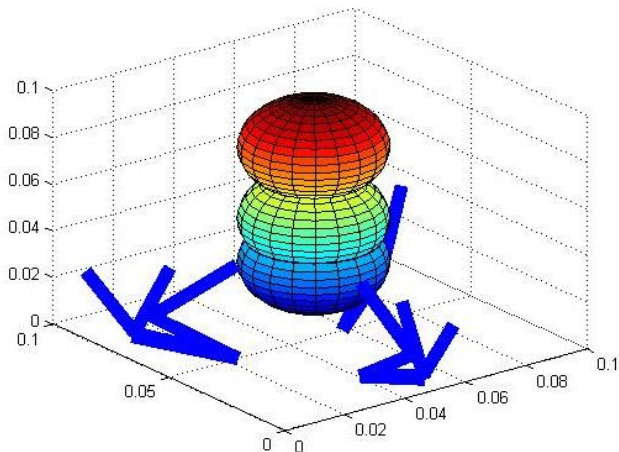
که در آن  $x_0$ ،  $x_f$  و  $t_f$  به ترتیب نمایانگر مکان اولیه، نهایی و زمان نهایی است. از آن جا که در فاز ضربه (قفل شدن) انگشتان باید در مدت زمان بسیار اندکی نیروی زیادی اعمال نمایند، سرعت نهایی فاز نزدیک شدن که همان سرعت برخورد فاز ضربه است، برابر با ۱- متر بر ثانیه انتخاب می‌شود تا در زمانی ناچیز مقدار فرورفتگی قابل توجهی ایجاد گردد. هم‌چنین با توجه به آن که ارتفاع سقوط توپ را می‌دانیم (مثلاً با استفاده از دوربین) با توجه به سقوط آزاد بودن حرکت، زمان رسیدن به نقطه ملاقات و سرعت توپ در هنگام برخورد یافته می‌شود. در این جا فرض می‌شود که توپ در مدت زمان ۰/۱ ثانیه و با سرعت ۱ متر بر ثانیه به مکان مورد نظر می‌رسد. بنابراین می‌توان نوشت:

$$x_0 = 0.04, x_f = 0, \dot{x}_0 = 0, \dot{x}_f = -1, t_f = 0.1 \quad (59)$$

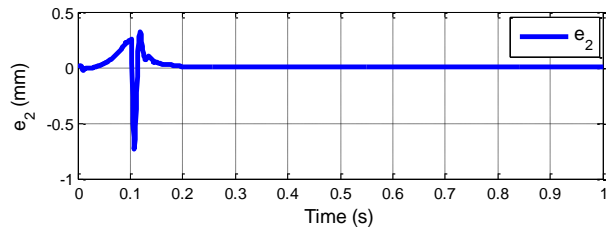
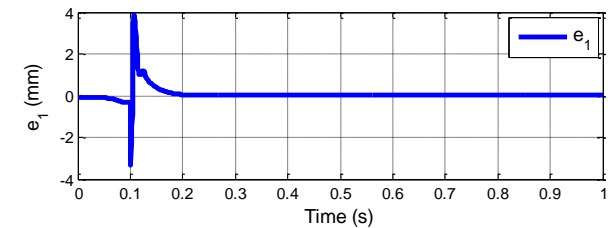
پس از فاز ضربه می‌توان نیروی اعمالی را به حداقل کاهش داد تا تنها بر نیروی وزن جسم غلبه شود. با انتخاب  $d = 0/1$  نیروی مورد نظر از رابطه (۴) به دست می‌آید. با این کار فاز نگهدارنده تکمیل می‌شود. در شبیه‌سازی‌های این بخش، با حفظ مقادیر اکثر پارامترهای شبیه‌سازی توپ ساکن، پارامترهای  $\mathbf{K}$  و  $\Gamma$  به صورت زیر انتخاب شده‌اند:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1700 & 0 \\ 0 & 3500 \end{bmatrix}, \Gamma_1 = \Gamma_2 = 1300000I_{27 \times 27} \quad (60)$$

شکل ۱۸ نیروهای تماسی را در هر سه فاز نشان می‌دهد. در فاز اول (نزدیک شدن) تنها انگشتان به محل برخورد نزدیک می‌شوند. طبیعتاً در این فاز نیرویی بین انگشتان و توپ رد و بدل نمی‌شود. این امر را می‌توان در شکل نیز مشاهده کرد. در فاز ضربه (قفل شدن) پله بزرگی به‌عنوان ورودی مرجع داده می‌شود تا به کمک آن، نیروی زیادی در مدت زمان اندکی به جسم وارد شود. با محاسبه تقریبی سمت چپ رابطه (۵) از روی پاسخ به دست آمده می‌توان دریافت که مقدار حاصله اندکی از ۰/۱ (یا همان مقدار سمت راست رابطه (۵)) بیش‌تر می‌باشد. لذا نتیجه مطلوبی از فاز ضربه حاصل شد. البته در شبیه‌سازی این قسمت بازه زمانی انتگرال رابطه (۵) برابر با ۳ ms (۳ زمان نمونه)



شکل ۲۱: شمایی از حرکت توپ و انگشتان هنگام گرفتن توپ متحرک



شکل ۱۹: بردار خطای دکارتی نوک انگشت در طول فازهای سه گانه

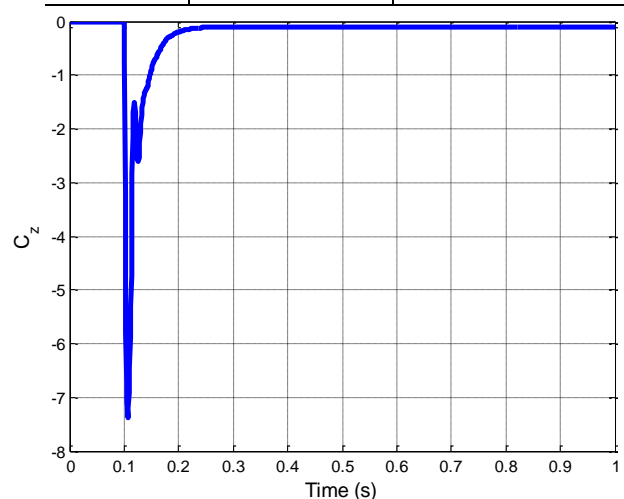
### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، به بررسی کنترل یک دست ربات ۳ انگشتی برای گرفتن توپ کروی نرم پرداخته شد. برای این منظور، از روش کنترل فازی TSK تطبیقی بهره گرفته شد. کنترل در فضای دکارتی نوک انگشتان، عدم وابستگی به مدل و مقابله با نامعینی‌های موجود در آن از مزایای روش بیان شده می‌باشند. همچنین استراتژی گرفتن به گونه‌ای تعیین شد که نیروهای اعمال شده به توپ، تعادل دینامیکی آن را حفظ نمایند. در حالت مهار کردن توپ در حال سقوط نیز با تقسیم بندی فرآیند به ۳ فاز نزدیک شدن، قفل شدن و نگهداشتن به ترتیب به نحوه رسیدن به محل برخورد، بازداشتن توپ از حرکت و اعمال نیروهای لازم جهت نگهداشتن پرداخته شد. شبیه سازی‌های انجام شده نشان داد که مجموعه روش کنترلی و استراتژی گرفتن یاد شده قابلیت خوبی در نگهداری توپ حتی در حضور عواملی چون نویز اندازه گیری نیرو و اصطکاک در نظر گرفته شده مفصلی دارند. همچنین، مقایسه کمی و کیفی با مرجع [۱۸] نشان داد که کنترل کننده پیشنهادی از مزایایی چون داشتن سازوکاری برای محدودماندن پارامترهای آزاد، پاسخ سریعتر، مقاومت بهتر در مقابل نامعینی داخلی و حجم محاسبات کمتر برخوردار است.

### پیوست

جدول ۱: پارامترهای موتور سرو

مقدار	واحد	نام پارامتر
۰/۰۲۸	Nm/W	ثابت موتور
۳۰/۴	g-cm <sup>2</sup>	اینرسی روتور
۰/۰۱	N.m	اصطکاک
۰/۰۰۴	Nm/KRPM	ضریب میرایی
۰/۰۳۲۵	V/rad/s	ثابت محرکه
۱/۳	Ohms	مقاومت آرمیچر
۰/۹	mH	اندوکتانس آرمیچر
۳۶	V	ولتاژ



شکل ۲۰: تغییرات تابع  $C_2(t)$  در طول فازهای سه گانه

### مراجع

- [1] R. Ozawa and K. Tahara, "Grasp and dexterous manipulation of multifingered robotic hands: a review from a control view point," *Advanced Robotics*, vol. 31, no. 20, pp. 1030-1050, 2017.
- [2] E. Melo, O. Sanchez and D. Hurtado, "Anthropomorphic robotic hands: a review," *Journal of Engineering and Development*, vol. 32, no. 2, pp. 217-313, 2014.
- [3] L. Zollo, S. Roccella, E. Guglielmelli, M. Chiara Carrozza and P. Dario, "Biomechatronic design and control of an anthropomorphic artificial hand for prosthetic and robotic

- [17] C. Chen and D. S. Naidu, "Hybrid control strategies for a five-finger robotic hand," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 8, no. 4, pp. 382-390, 2013.
- [18] X. Liu, X. Zheng, S. Li, X. Chen and Z. Wang, "Improved adaptive neural network control for humanoid robot hand in workspace," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 229, no. 5, pp. 869-881, 2015.
- [19] L. Tuan, Y. Joo, L. Tien and P. Duong, "Adaptive neural network second-order sliding mode control of dual arm robots," *International Journal of Control Automation and Systems*, vol. 15, no. 6, pp. 2883-2891, 2017.
- [20] Q. Zhou, H. Li and P. Shi, "Decentralized adaptive fuzzy tracking control for robot finger," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 501-510, 2015.
- [21] C. Barbalata, M. W. Dunnigan and Y. Petillot, "Position/force operational space control for underwater manipulation," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 100, no. 1, pp. 150-159, 2018.
- [22] R. M. Murray, Z. Li and S. S. Sastry, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press, 1994.
- [23] A. Namiki, Y. Imai, M. Ishikawa and M. Kaneko, "Development of a high-speed multifingered system and its application to catching," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, pp. 2666-2671, 2003.
- [24] Y. Imai, A. Namiki, K. Hashimoto and M. Ishikawa, "Dynamic active catching using a high-speed multifingered hand and a high-speed vision system," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, pp. 1849-1854, 2004.
- [25] F. L. Lewis, C. T. Abdallah and D. N. Dawson, *Robot Manipulator Control Theory and Practice*, CRC Press, 2003.
- [26] V. P. Jimenez, O. F. A. Sanchez and M. F. M. Monroy, "Hybrid force-position control of three fingers end effector," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 346, no. 75, pp. 75-82, 2013.
- [27] A. Fanaei and M. Farrokhi, "Robust adaptive neuro-fuzzy controller for hybrid position/force control of robot manipulators in contact with unknown environment," *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 125-144, 2006.
- [28] J. Craig, *Introduction to Robotic: Mechanics and Control*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [۲۹] پوریا جعفری، محمد تشنه‌لب و مهسان توکلی کاخکی، «طراحی کنترل‌کننده فازی تطبیقی مستقیم برای سیستم‌های مرتبه کسری غیرخطی به‌کمک جبران‌ساز»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۳، صفحات ۹۱۷-۹۲۹، پاییز ۱۳۹۶.
- [30] A. Boubakir, S. Labiod and F. Boudjema, "A stable self-tuning proportional-integral-derivative controller for a class of multi-input multi-output nonlinear systems," *Journal of Vibration and Control*, vol. 18, no. 2, pp. 228-239, 2011.
- [31] W. D. Chang, R. C. Hwang and J. G. Hsieh, "A self-tuning PID control for a class of nonlinear systems based on the Lyapunov approach," *Journal of Process Control*, vol. 12, no. 2, pp. 233-242, 2002.
- [32] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, Prentice-Hall, 1996.
- applications," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 12, no. 4, pp. 418-429, 2007.
- [4] T. Wojtara, K. Nonami, H. Shao, R. Yuasa, S. Amano, D. Waterman and Y. Nobumoto, "Hydraulic master-slave land mine clearance robot hand controlled by pulse modulation," *Mechatronics*, vol. 15, no. 5, pp. 589-609, 2005.
- [۵] مسعود سیدسخا، حامد خراطی و فرزاد هاشم‌زاده، «کنترل تطبیقی سیستم کنترل از راه دور با وجود نامعینی‌های دینامیکی و نامعینی در شتاب گرانشی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۴، صفحات ۲۳۳-۲۳۹، پاییز ۱۳۹۵.
- [6] Z. Doulgeri and Y. Karayiannidis, "Force-position control for a robot finger with a soft tip and kinematic uncertainties," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 55, no. 4, pp. 328-336, 2007.
- [7] V. Agrawal, W. J. Peine and B. Yao, "Modeling of transmission characteristics across a cable-conduit system," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 5, pp. 914-924, 2010.
- [8] G. Palli and C. Melchiorri, "Model and control of tendon-sheath transmission system," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 988-993, Orlando, 2006.
- [9] L. Zhao, L. Ge and T. Wang, "Position control for a two-joint robot finger system driven by pneumatic artificial muscles," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, pp. 1-12, 2017.
- [10] M. Grossard, "Robust decentralized control of a fully actuated robot hand," *15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing: INCOM*, vol. 48, no. 3, pp. 2176-2182, 2015.
- [11] T. Yoshikawa, "Multifingered robot hands: control for grasping and manipulation," *Annual Reviews in Control*, vol. 34, no. 2, pp. 199-208, 2010.
- [12] T. D. Niehues, P. Rao and A. D. Deshpande, "Compliance in parallel to actuators for improving stability of robotic hands during grasping and manipulation," *International Journal of Robotic Research*, vol. 34, no. 3, pp. 256-269, 2015.
- [13] M. Mukhtar, E. Akyurek, T. Kalganova and N. Lwsne, "Neural network based control method implemented on ambidexterous robot hand," *International Journal of Automation and Smart Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 27-32, 2017.
- [14] Y. Zhao and C. C. Cheah, "Neural network control of multifingered robot hands using visual feedback," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 20, no. 2, pp. 758-767, 2009.
- [15] R. Rodriguez and V. Vega, "Normal and tangent force neuro-fuzzy control of a soft-tip robot with unknown kinematics," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 65, no. 1, pp. 43-50, 2017.
- [16] J. Ko, M. B. Jun, G. Gilardi, E. Haslam and E. J. Park, "Fuzzy PWM-PID control of contracting antagonistic shape memory alloy muscle pairs in an artificial finger," *Mechatronics*, vol. 21, no. 7, pp. 1190-1202, 2011.