

((یادداشت مهندسی))

## طراحی سامانه شبیه‌ساز کنترل نیروی مجری نهایی

### یک ربات چند منظوره در محیط مجازی

امیر مواساتی<sup>۲</sup>احمدرضا خوگر<sup>۱\*</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۵)

#### چکیده

در این مقاله، کنترل نیروهای مجری نهایی یک بازوی رباتیک با استفاده از سامانه فرماندهی که به صورت مطلوب شش درجه آزادی دارد، انجام شده است. سامانه فرماندهی می‌تواند از یک جوی‌استیک که بر روی یک سازوکار موازی پیاده شده است، استفاده کند. در این مقاله ربات پیرو، رباتی است که مجری نهایی آن به کمک سامانه فرماندهی کنترل شده و قادر است مسیر مرجع را با نیروی مشخص شده طی کند. بدین منظور چندین مسیر مختلف و بر روی سطوح متفاوت در نظر گرفته شده است و مجری نهایی ربات در هر یک از موارد، مسیر طراحی شده را با وارد ساختن نیروی ثابتی طی کرده است. همچنین امکان شناسایی و عبور از موانع در این سامانه لحاظ شده است. سامانه کنترلی به گونه‌ای طراحی شده که مجری نهایی ربات ضمن نزدیک شدن به مانع، با آن برخورد نمی‌کند. از این رو ربات با کارایی بهتری می‌تواند به عنوان ربات جراح، ربات حمل مواد حساس و یا در کاربردهای دیگر مورد استفاده قرار گیرد و پس از برخورد با سطح، می‌تواند بازخورد نیرویی متناسب با نیروی برخورد را ایجاد و به دست اپراتور منتقل کند.

**واژه‌های کلیدی:** کنترل نیرو، مجری نهایی، جوی‌استیک

## The Design of a Force Control System Simulator for a General-Purpose Robot Using the Simulink Software

A.R. Khoogar<sup>۲</sup>A. Movasati<sup>۱\*</sup>Mechanical Engineering Department  
Malek-Ashtar University of Technology

(Received: 31/August/2019 ; Accepted: 26/December/2019)

#### ABSTRACT

In this article, controlling the end-effector forces is accomplished using a command system with six degrees of freedom. The command system can use a joystick implemented on a parallel mechanism. The follower robot's end-effector is controlled by the command system and is capable of traversing the reference path with the specified force. To demonstrate this, several paths on different planes are considered and the robot's end-effector is seen to traverse each assigned path by applying a constant force. It is also possible to identify obstacles and avoid them with this system. The control system is designed so that while approaching an obstacle, the robot's end-effector does not collide with it. Hence, a general-purpose robot can be navigated with better performance and it can be used as a surgical robot, a robot for carrying sensitive materials or other applications. In such operations, to adjust the contact forces after a collision of the end-effector with the surface, this control system produces the appropriate control feedback. This feedback gives the operator a sense of the forces at the end-effector position and increases the operator manipulation and maneuvering skill.

**Keywords:** Force Control, End-effector, Joystick

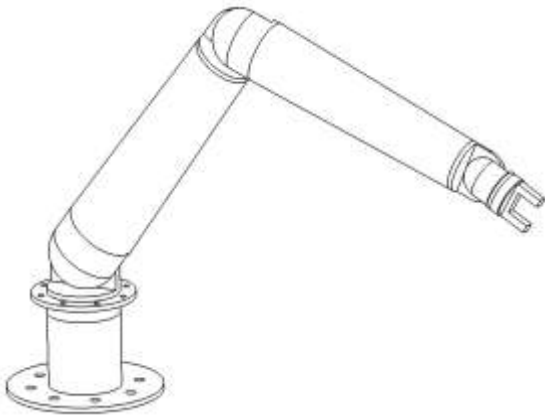
۱ - دانشیار (نویسنده پاسخگو): khoogar@mut.ac.ir

۲ - دانشجوی دکتری: amirmovasati@gmail.com

\* حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه جامع امام حسین (ع) داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (License Commons) CC BY-NC (Creative) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://maj.ihu.ac.ir> دیدن فرمائید.

## ۱- مقدمه

بسته می‌شود. شمای کلی ربات در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل (۱): شمای کلی ربات ۶ درجه آزادی طراحی شده

## ۳- سینماتیک مستقیم

اولین گام در به دست آوردن معادلات ربات، استخراج پارامترهای دناویت- هارتنبرگ است. پارامترهای دناویت- هارتنبرگ این ربات در جدول ۱ ارائه شده است:

جدول (۱): پارامترهای رابط ربات طراحی شده

$i$	$a_{i-1}$	$\alpha_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
۱	۰	۰	۰	$\theta_1$
۲	۰	-۹۰	۰	$\theta_2$
۳	۵۸۰	۰	۰	$\theta_3$
۴	۰	-۹۰	۵۶۰	$\theta_4$
۵	۰	۹۰	۰	$\theta_5$
۶	۰	-۹۰	۰	$\theta_6$

هر یک از تبدیل‌های کلی رابط‌ها چنین نوشته می‌شوند:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^1_2T = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & a_2 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^3_4T = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ -s\theta_4 & -c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

## ۲- معرفی ربات طراحی شده

رباتی به کار رفته در این تحقیق شش درجه آزادی دارد و از هفت عضو تشکیل شده است. البته در قسمت مجری نهایی آن، بسته به کاری که قرار است انجام دهد ابزار مورد نیاز

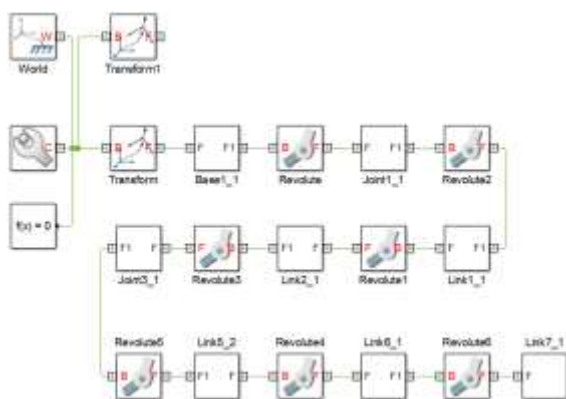
بهره‌گیری از کنترل حسی<sup>۱</sup> در هر شرایطی ارتباط اپراتور با محیط بیرون را ساده‌تر می‌کند. مهندس کنترلی را در نظر بگیرید که حین کار باید حواس مختلف خود، از جمله بینایی و لامسه‌اش را به کار گیرد. چنانچه در شرایطی باشد که میدان دید مناسبی نداشته باشد، استفاده از حس لامسه ضروری‌تر می‌نماید؛ لذا باید به دنبال روشی برای بهره‌گیری از حس لامسه باشد. کنترل هپتیک این نقش را ایفا می‌کند و ارتباط مناسبی بین اپراتور و محیط برقرار می‌سازد. واسطه هپتیکی وسیله‌ای الکترومکانیکی [۱] است که می‌تواند نیروهای ناشی از برخوردها و هرگونه کنش‌های دیگر در محیط مجازی را به‌عنوان پاسخ، از محیط مجازی به انسان برگرداند [۲]. سامانه‌های کنترل حسی کاربردهای بسیاری دارند که از جمله آنها می‌توان کاربردهای نظامی، پزشکی، تله‌راتیکی و بازی‌های رایانه‌ای را نام برد [۳]. تاکنون واسطه‌های کاربری گوناگونی در دنیا ساخته شده‌اند که هریک دارای کاربرد خاصی می‌باشند [۴-۷].

جوی‌استیک مورد نظر در مقاله حاضر، از قوانین کنترل هپتیک بهره می‌گیرد و بر سازوکار موازی استورات، ارائه‌شده در مرجع [۸]، سوار شده است. با توجه به در اختیار نداشتن جوی‌استیک، ورودی‌ها به‌صورت دستی وارد شده‌اند اما در صورت وجود جوی‌استیک، بازخورد نیرویی در اثر برخورد با سطوح کاری به دست اپراتور بازمی‌گردد و دقت و سرعت کار را بالا برده و احتمال خطا را کاهش می‌دهد. با پیاده‌سازی این سامانه کنترلی، از این ربات می‌توان در مصارف مختلفی نظیر جراحی از آن استفاده کرد. استفاده از ربات در جراحی مزایای فراوانی دارد که از آن جمله می‌توان به مواردی همچون دقت بالا و سرعت زیاد که در نتیجه‌ی آن، بیمار درد کمتری تحمل می‌کند، اشاره کرد. یکی دیگر از کاربردهای ربات‌ها، جراحی رباتیک از راه دور است که اولین بار توسط سازمان‌های فضایی و به منظور امداد رسانی فوری به فضانوردان، مورد استفاده قرار گرفت.

<sup>۱</sup> Haptic

شکل (۲): کتابخانه ایجاد شده برای ربات طراحی شده با استفاده از جعبه ابزار رباتیک متلب.

به منظور کنترل ربات، ابتدا می‌بایست دینامیک ربات را شبیه‌سازی شود. شبیه‌سازی دینامیک، با نرم‌افزارهای مختلفی قابل انجام است. در اینجا از جعبه‌ابزار سیم‌مکانیک<sup>۲</sup> نرم‌افزار متلب استفاده شده است. برای نرم‌افزار سالیدورک افزونه‌ای<sup>۳</sup> تحت عنوان مترجم سیم‌مکانیک<sup>۴</sup> جهت ارتباط با نرم‌افزار متلب طراحی شده است که با نصب این افزونه می‌توان فایل رباتی که در نرم‌افزار سالیدورک طراحی شده است را به‌صورتی که در نرم‌افزار متلب قابل ترجمه باشد، تبدیل کرد. با استفاده از این ابزار، اجزای ربات با فرمت فایل ایکس‌ام‌ال<sup>۵</sup> مدل سازی شده است و از این طریق شمای کلی ربات طراحی شده در محیط مجازی متلب پیاده‌سازی شده است (شکل ۳). راه دیگر برای پیاده‌سازی ساختار یک ربات در سیم‌مکانیک، انجام این کار به‌صورت دستی با استفاده از بلوک‌های موجود است. در مقاله‌ی حاضر ربات طراحی شده یک‌بار به‌صورت دستی و بار دیگر به‌صورت اتوماتیک وارد محیط نرم‌افزاری مجازی<sup>۶</sup> متلب شده است. در تعریف دستی، تمامی مشخصات رابطه‌ها مثل هندسه، اینرسی و گرافیک باید توسط اپراتور وارد شوند.



شکل (۳): دیاگرام مجازی سامانه دینامیک ربات.

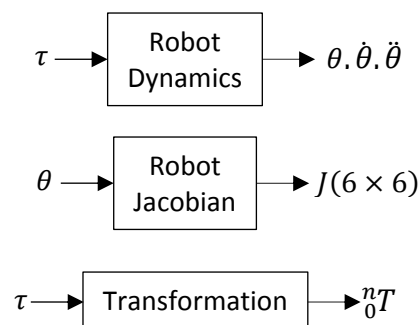
$${}^4_5T = \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_5 & c\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^5_6T = \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_6 & -c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

اکنون از ضرب ماتریس‌های تبدیل رابطه‌ها در یکدیگر، ماتریس کلی منفردی که چهارچوب شش را به چهارچوب صفر مربوط می‌سازد، به‌دست می‌آوریم:

$${}^0_6T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 580 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 560 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

#### ۴- دینامیک ربات پیرو

برای به‌دست آوردن معادلات دینامیکی ربات پیرو، از الگوریتم ارائه شده در مرجع [۹] استفاده شده است. راه حل دیگر، استفاده از جعبه ابزار رباتیک نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> است. با تعریف این ربات در قالب استاندارد جعبه ابزار سیم‌مکانیک، کتابخانه‌ای مختص ربات به‌کار رفته در این تحقیق ایجاد شده است. این کتابخانه قریب به ۲۰ ماژول دارد که در شکل ۲ چند نمونه از این بلوک‌ها به‌صورت ماژول مستقل ورودی خروجی نمایش داده شده‌اند. با استفاده از این بلوک‌ها، نرم‌افزار قادر است محاسبات سینماتیک، دینامیک و ژاکوبی ربات در شبیه‌سازی را با دقت‌های مناسب انجام دهد. و در ادامه، در روند کنترل ربات از نتایج آن استفاده کنیم.



<sup>2</sup> SimMechanics Toolbox

<sup>3</sup> Add in

<sup>4</sup> SimMechanics Translator

<sup>5</sup> xml

<sup>6</sup> Simulink

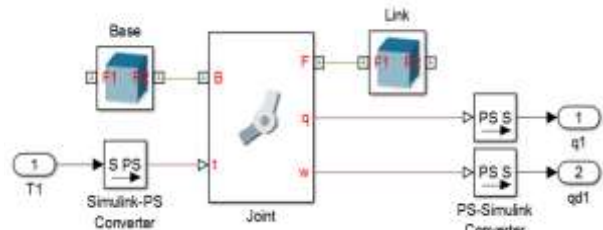
<sup>1</sup> MATLAB

یکی از کاربردهای ژاکوبی، استفاده از آن در محاسبه گشتاورهای مفصلی است. برای این منظور از ترانهاده ژاکوبی استفاده می‌کنیم:

$$\tau = J^T(q)F \quad (3)$$

که در آن،  $\tau$  بردار گشتاورهای مفصلی،  $J$  ژاکوبی موقعیت‌های مفصلی ( $q$ ) و  $F$  بردار نیروها و گشتاورهای وارد به مجری نهایی ربات است که به صورت  $F = [F_x, F_y, F_z, n_x, n_y, n_z]$  نمایش داده می‌شود. طبق رابطه (۳) ورودی تابع ژاکوبی نوشته شده، موقعیت‌های مفصلی است که از هر یک از مفصل‌های لولایی به صورت خروجی گرفته شده است. همچنین بردار  $F$  متشکل از نیروها و گشتاورهای وارد به مجری نهایی محاسبه شده است. از ضرب ترانهاده‌ی ماتریس ژاکوبی در ماتریس نیروها و گشتاورها، گشتاورهای مفصلی به دست می‌آیند و به عنوان بازخورد به حلقه کنترلی ارسال می‌گردند. با پیاده کردن این سیستم کنترلی بر روی ربات ارک و ربات‌های مشابه، می‌توان از این ربات در مصارف گوناگونی نظیر جوشکاری، حمل مواد حساس، خنثی کردن مین، پرداخت سطح، تمیزکاری سطوح و بسیاری کاربردهای دیگر استفاده کرد. همچنین از این ربات می‌توان به عنوان ربات جراح استفاده کرد. برای این که ربات ارک بتواند روی سطح مورد نظر را جوشکاری کند باید از ابتدا تا انتهای مسیر را با نیروی ثابتی پییماید. پاسخ سامانه کنترلی ربات در قالب مؤلفه‌های نیروی مجری نهایی ربات در شکل ۵ نمایش داده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود مجری نهایی ربات، مسیر مستقیم طراحی شده بر روی سطح دیواره را با اعمال نیرویی ثابت در یک راستای کرده است.

بعد از شبیه‌سازی دینامیک، کنترل ربات باید انجام گیرد. مسئله به این صورت است که مکان مجری نهایی ربات با استفاده از جوی استیک کنترل می‌شود. در واقع اگر جوی استیکی در اختیار داشته باشیم، به وسیله آن باید مکان مجری نهایی در هر لحظه تعیین شود و بازخورد مناسب را برگرداند. در صورتی که مانعی در مسیر حرکت مجری نهایی وجود داشته باشد باید بازخورد نیرویی مناسب را برگرداند تا نیروی برخورد قابل کنترل باشد. به دلیل در اختیار نداشتن جوی استیک به صورت فیزیکی، ورودی‌ها به صورت دستی وارد شده‌اند. مسیری برای حرکت مجری نهایی طرح ریزی شده و نیروهای برخورد با سطح، با استفاده از ژاکوبی کنترل شده‌اند. برای شبیه‌سازی بهتر برخورد، ابزاری نوک تیز به مجری نهایی ربات بسته شده تا حس دقیق تری را در برخورد با سطح منتقل کند. اتصال هر یک از رابط‌ها با یکدیگر از طریق یک مفصل لولایی به کمک جعبه ابزار سیم‌اسکیپ<sup>۱</sup> صورت گرفته است. به هر کدام از مفصل‌ها یک ورودی از جنس گشتاور وارد شده و مکان و سرعت آن به عنوان خروجی گزارش می‌شود (شکل ۴).

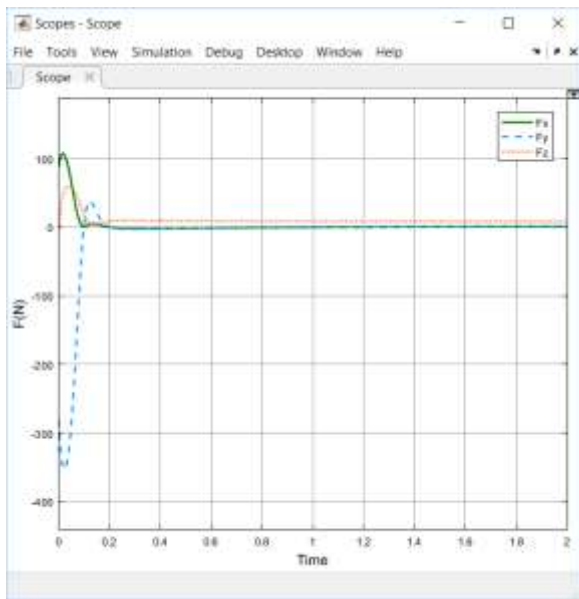


شکل (۴): ورودی و خروجی هر یک از مفصل‌ها

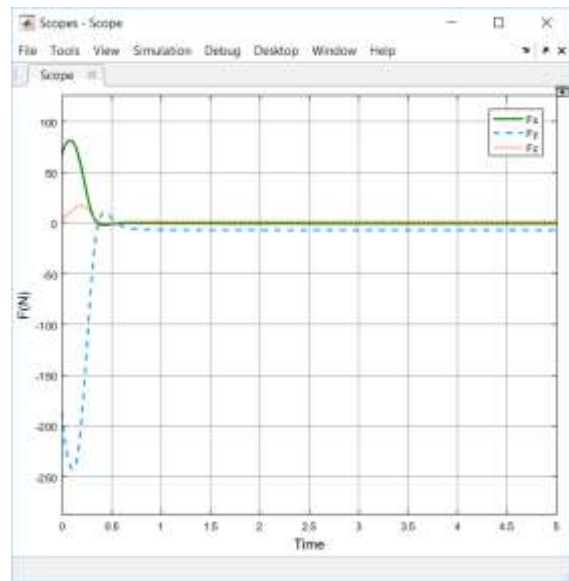
برنامه‌ریزی مسیری که مجری نهایی ربات باید طی کند با استفاده از تابع اسپلاین<sup>۲</sup> صورت گرفته است. نحوه طرح‌ریزی مسیر بدین صورت است که باید ماتریسی از مختصات نقاطی که مسیر را تشکیل می‌دهند به عنوان ورودی بلوک اسپلاین انتخاب شود. راه دوم اینست که تابعی که تولید مسیر می‌کند را به عنوان ورودی بلوک اسپلاین در نظر بگیریم. مسیر طرح‌ریزی شده بر روی یک دیواره است. مجری نهایی باید مسیر را روی دیواره با نیروی کنترل شده دنبال کند.

<sup>1</sup> Simscape Multibody

<sup>2</sup> Spline

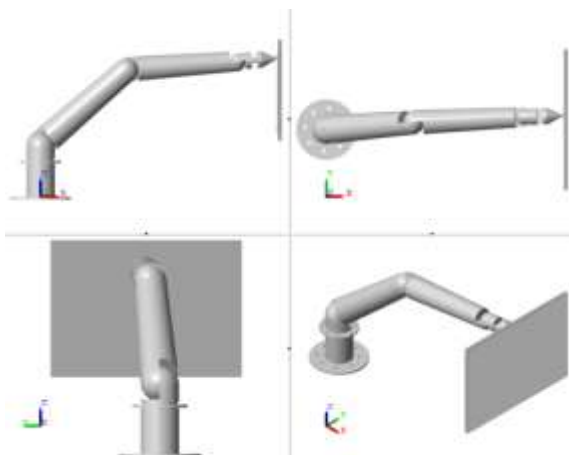


شکل (۷): نمودار نیروهای کنترل شده وارد بر سطح استوانه‌ای.



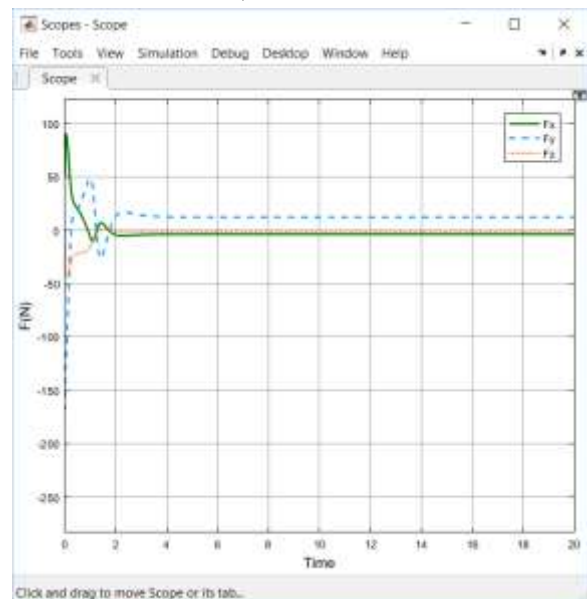
شکل (۵): نمودار نیروهای کنترل شده وارد بر سطح در مسیر مستقیم.

بار دیگر، پیمودن کمانی از دایره، حول یک دیسک در نظر گرفته است که مجری نهایی ربات می‌بایست با نیروی ثابتی این مسیر را طی کند. شکل ۷ نیروهای وارد از مجری نهایی به سطح استوانه‌ای شکل را در حرکت مذکور نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مجری نهایی در راستای Z نیروی ثابتی وارد کرده است. شکل ۸ شمای شبیه‌سازی شده‌ی ربات ارک را از چهار نمای مختلف در حال طی مسیر تعیین شده نمایش می‌دهد.



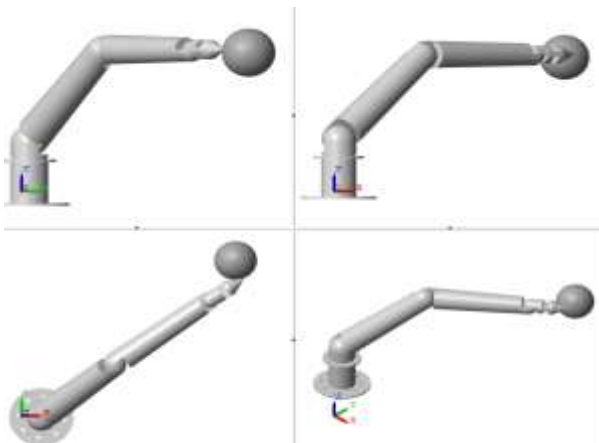
شکل (۸): شمای شبیه‌سازی شده‌ی ربات ارک در نرم‌فزار سیم‌مکانیک در حال طی مسیر تعیین شده.

بار دیگر، مانعی را در فضای کاری ربات قرار داده شده است. ربات باید بتواند ضمن اینکه به سمت مانع حرکت می‌کند از



شکل (۶): نمودار نیروهای کنترل شده وارد بر سطح در مسیر منحنی.

در آزمونی دیگر، مسیری منحنی شکل بر روی سطح دیواره در نظر گرفته شده است. شکل ۶ نیروهای وارد از مجری نهایی ربات به سطح را در مسیر منحنی شکل نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که بهره‌های کنترلی طی این پروژه بهینه‌سازی شده‌اند.



شکل (۱۰): عبور ربات از کنار مانع در حالی که از پتانسیل مصنوعی استفاده شده است.

#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از افزونه سیممکانیک ترنسلیتور، ربات شبیه سازی شده در نرم افزار سالیدورک وارد محیط سیممکانیک شده است. نوع مفاصل و اتصالات بازوهای ربات و حسگرهای اندازه گیری در مفاصل تعریف شده اند. حلقه کنترلی پیاده سازی شده و بهره های کنترلی بهینه سازی شده اند.

در دو حالت مختلف عملکرد ربات مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت اول، مسیری برای حرکت مجری نهایی ربات طراحی شده که مجری نهایی این مسیر را به درستی پیموده و بازخورد نیرویی لازم در اثر برخورد با دیواره را ایجاد می کند. در حالت بعدی با استفاده از میدان پتانسیل مصنوعی، شناسایی موانع توسط ربات مورد بررسی قرار گرفته است. حرکت ربات به سمت مانع تعبیه شده در فضای کاری در دو حالت وجود و عدم وجود پتانسیل مصنوعی مقایسه شده است. در حالت وجود پتانسیل مصنوعی، مجری نهایی بدون برخورد با مانع، حرکت مورد نظر را انجام می دهد. با توجه به موفق بودن نتیجه سامانه کنترلی پیاده شده، از این سامانه می توان در مصارف صنعتی و پزشکی و نیز در مصارف دیگر، بهره برد. پیشنهاد می شود در تحقیقات بعدی روش های کاهش شدت ضربه اولیه مجری نهایی به سطح برخورد، مورد بررسی قرار گیرد.

#### ۶- مراجع

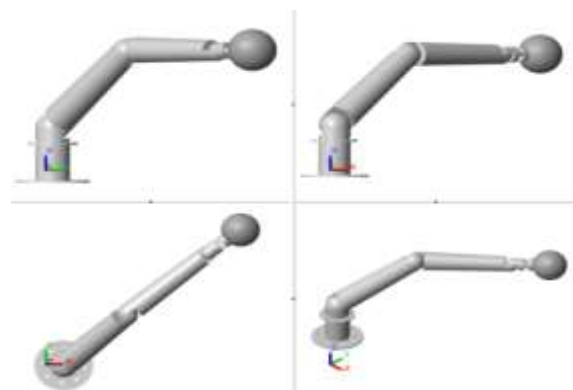
1. Z. Tang and S. Payandeh, "Experimental Studies of a Novel 6-DOF Haptic Device",

برخورد با آن اجتناب کند. بدین منظور از مفهوم پتانسیل مصنوعی مبتنی بر قانون گرانش نیوتن استفاده شده است. بنابراین قانون، نیروی گرانشی میان دو ذره با حاصل ضرب جرم دو ذره نسبت مستقیم و با مجذور فاصله آنها از یکدیگر نسبت وارون دارد. اگر جرم دو ذره  $M$  و  $m$  و فاصله میان آنها برابر  $r$  باشد، اندازه نیروی گرانشی میان دو ذره از رابطه زیر به دست می آید:

$$F_g = G \frac{Mm}{R_{BF}^2} \quad (4)$$

که در آن، مقدار  $G$  - ثابت گرانش عمومی - برابر با  $6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$  است.

در شکل های ۹ و ۱۰ دو حالت از حرکت ربات در یک زمان مقایسه شده اند. در حالت اول (شکل ۹)، از پتانسیل مصنوعی استفاده نشده و مانع بر سر راه ربات قرار گرفته است و ملاحظه می شود که ابزار متصل به مجری نهایی به درون مانع نفوذ می کند؛ یعنی برخورد صورت گرفته است. در حالت دوم (شکل ۱۰)، با پیاده سازی مفهوم پتانسیل مصنوعی در فضای شبیه ساز، حرکت بازوهای ربات از کنار مانع به گونه ای کنترل شده است که ضمن نزدیک شدن به مانع، با آن برخورد نکرده و از کنار آن عبور می کند.



شکل (۹): برخورد ربات از کنار مانع در حالی که از پتانسیل مصنوعی استفاده نشده است.

- Proceedings of the IEEE Int. Conf. Syst. Man, Cybern., pp. 3372–3377, 2013.
2. F. Barbagli and K. Salisbury, "Haptic Discrimination of Force Direction and the Influence of Visual Information", *ACM Transactions on Applied Perception* 3 (2), pp 125-135, 2006.
  3. Mohammad Reza Arbabtakhti, "Design and Simulation and manufacturing of a six degrees of Freedom Haptic Mechanism", *Proceedings of the ISME Conference*, 2008. (In Persian)
  4. Grigore C. Burdea, "Haptic feedback for virtual reality. special issue on Virtual Prototyping", *International Journal Des. Innovation Research*, pp. 2:17–29, 2000.
  5. P. Gallina and G. Rosati and A. Rossi, "3-d.o.f. Wire Driven Planar Haptic Interface", *Journal of Intelligent Robotic System*, 32, pp. 23–36, 2001.
  6. C. J. Chandrabalan, "Design and Construction of One DOF Haptic Interface", *MSc Thesis*, Florida State University, College of Engineering, 2004.
  7. M. Agus, "Haptic and Visual Simulation of Bone Dissection", *PHD Dissertation*, University of Cagliari, 2004.
  8. K. Liu, J. M. Fitzgerald, F. L. Lewis, and S. Member, "Kinematic Analysis of a Stewart Platform Manipulator", *Vol. 40, No. 2*, pp.282\_293, 1993.
  9. J. J. Craig, "Introduction to Robotics: Mechanics and Control", *Prentice Hall*, Upper Saddle River, 2003.