



کنترل موقعیت ربات موازی نیوماتیکی 6 درجه آزادی گاف-استوارت به کمک کنترل کننده‌ی پسگام مدلفزشی

امیر سلیمی لافمجان¹، مهدی طالع ماسوله^{2*}، احمد کلهر³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکترونیک، دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، هوش ماشین و رباتیک، دانشگاه تهران، تهران

3- استادیار، مهندسی کنترل، دانشگاه تهران، تهران

* صندوق پستی 143951374، m.t.masouleh@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 06 تیر 1396

پذیرش: 06 شهریور 1396

ارائه در سایت: 13 مهر 1396

کلید واژگان:

ربات موازی گاف-استوارت

عملگر نیوماتیکی

شیربرقی تناسبی

سینماتیک معکوس

کنترل کننده پسگام مدلفزشی

چکیده

در این مقاله، کنترل موقعیت یک ربات موازی نیوماتیکی 6 درجه آزادی گاف-استوارت موسوم به هگزاتار به منظور ردیابی مسیرهای مطلوب مطالعه شده است. در ابتدا، معادلات دینامیکی مربوط به سیستم نیوماتیکی هر شاخه از این ربات استخراج شده است که شامل معادلات دینامیکی یک عملگر نیوماتیکی و یک شیربرقی تناسبی می‌باشد. متغیرهای نامعلوم معادلات دینامیکی شامل ضریب ویسکوزیته، نیروی اصطکاک عملگر و متغیرهای مربوط به شیربرقی بدست آمده و توسط الگوریتم ژنتیک شناسایی شده‌اند. سپس، کنترل موقعیت عملگر نیوماتیکی با توجه به این مدل و براساس طراحی کنترل کننده‌ی پسگام مدلفزشی انجام می‌گیرد. به علاوه، معادلات سینماتیک ربات هگزاتار بدست می‌آید و با استفاده از یک روش ابتکاری با نام روش هندسی حل شبه سینماتیک، بدون استفاده از حسگرهای گران‌قیمت و براساس داده‌های حسگرهای پتانسیومتر خطی روی هر شاخه و حسگر دوران متصل شده بر روی مجری نهایی ربات، موقعیت مجری نهایی ربات محاسبه می‌شود. بدین ترتیب، کنترل موقعیت حلقه بسته‌ی ربات هگزاتار بر مبنای کنترل همزمان در فضای فواصل و فضای کاری ربات به کمک کنترل کننده‌ی پسگام مدلفزشی و روش محاسبه‌ی موقعیت مجری نهایی ربات انجام می‌گیرد. مسیرهای مطلوب سینوسی برای ردیابی در راستا و حول هر یک از محورهای مختصات به منظور ارزیابی عملکرد استراتژی کنترلی به کارگرفته شده مورد آزمایش قرار می‌گیرند. نتایج آزمایش‌های عملی نشان می‌دهد که مسیرهای مطلوب مستقیم در راستا و دورانی حول محورهای مختصات به ترتیب با اندازه‌ای کمتر از 2 سانتی‌متر و 3 درجه ردیابی می‌شوند. این حد از دقت برای یک ربات نیوماتیکی بسیار مطلوب می‌باشد.

Position Control of a 6-DoF Pneumatic Gough-Stewart Parallel Robot Using Backstepping-Sliding Mode Controller

Amir Salimi Lafmejani¹, Mehdi Tale Masouleh^{2*}, Ahmad Kalhor²

1- Faculty of Mechatronics engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- School of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 143951374, Tehran, Iran, m.t.masouleh@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 27 June 2017

Accepted 28 August 2017

Available Online 05 October 2017

Keywords:

Gough-Stewart parallel robot

Pneumatic actuator

Proportional valve

Inverse kinematics

Backstepping-Sliding Mode controller

ABSTRACT

In this paper, position control is addressed for a pneumatically actuated 6-DoF Gough-Stewart parallel robot. At first, dynamic model of the pneumatic system of each link of the robot which comprises a pneumatic actuator and a proportional electrical control valve is extracted. Unknown parameters of the obtained dynamic model consisting friction force, viscous coefficient and the parameters of the valve are identified by employing an evolutionary algorithm. Then, position control of the robot's pneumatic actuator is performed based on designing Backstepping-Sliding Mode controller according to the nonlinear dynamic model of the pneumatic system. Moreover, kinematic equations of the 6-DoF parallel robot are achieved and a novel method is proposed, the so-called Geometry-based Quasi-Forward Kinematic, to the end of calculating the position of the end-effector of the robot without using expensive position sensors. Accordingly, kinematic closed-loop control of the parallel robot, which is based on simultaneous joint space and task space control, is investigated for trajectory tracking using potentiometers, a rotation sensor, and based on the computed position of the end-effector by the proposed method. Desired sinusoidal trajectories with pure motions and also complicated trajectories are tracked in which error of positions and rotations are lower than 2 (cm) and 3 (deg), respectively. The results reveal that the trajectory tracking control of the pneumatic 6-DoF Gough-Stewart parallel robot is performed properly based on the proposed control strategies and the novel method for calculating the position of the end-effector.

1- مقدمه

بیشتر و قابلیت رسیدن به سرعت‌ها و شتاب‌های بالاتر اشاره کرد [1]. پلتفرم گاف-استوارت به عنوان یک ربات موازی 6 درجه‌ی آزادی شناخته شده است که دارای یک صفحه‌ی متحرک به عنوان مجری نهایی که توسط 6 شاخه هر

ربات‌های موازی در قیاس با ربات‌های سری از مزیت‌های زیادی برخوردار دارند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به سفتی بیشتر، نسبت بار به وزن بالاتر، دقت

Please cite this article using:

A. Salimi Lafmejani, M. Tale Masouleh, A. Kalhor, Position Control of a 6-DoF Pneumatic Gough-Stewart Parallel Robot Using Backstepping-Sliding Mode Controller, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 101-111, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

یک شامل عملگر تناسبی می باشد [2]. از ربات گاف-استوارت در کاربردهای فراوانی نظیر شبیه سازهای پرواز [3]، ماشین کاری [4]، رادیوتلیکوپ های غول پیکر [5]، مکانیزم تست تاثیر خودرو [6] و توانبخشی استفاده شده است [7]. با توجه به پیچیدگی معادلات دینامیکی و سینماتیکی ربات گاف-استوارت، مساله ی ردیابی مسیر یکی از موضوعات پرچالش برای این نوع از ربات ها می باشد [8]. دو روش کنترلی به منظور کنترل موقعیت یک ربات گاف-استوارت شامل کنترل در فضای مفصل و کنترل در فضای کاری ربات مطرح می شود. در مرجع [9]، کنترل در فضای مفاصل یک ربات گاف-استوارت به وسیله ی محاسبه ی طول مطلوب شاخه های متناظر با مسیر مطلوب از حل سینماتیکی معکوس ربات و مقایسه ی آن با مقادیر اندازه گیری شده ی طول شاخه ها توسط حسگرهای جابجایی خطی انجام شده است. اگرچه کنترل در فضای کاری ربات از دقت بیشتری برخوردار است، اما نسبت به کنترل ربات در فضای مفاصل از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. کنترل در فضای کاری ربات گاف-استوارت را می توان براساس دو روش، (1) کنترل ربات با استفاده از روش های پردازش تصویر [10]، (2) حل معادلات سینماتیک مستقیم ربات با استفاده از اندازه گیری طول شاخه های ربات [11] انجام داد. روش اول اقتصادی نمی باشد و باعث کندي در کنترل برخط ربات می شود و از طرفی استفاده از روش دوم به دلیل پیچیدگی حل سینماتیک مستقیم ربات گاف-استوارت حجم محاسباتی بسیار بالایی دارد. در مرجع [12]، به منظور کنترل یک ربات موازی 6 درجه آزادی از روش پردازش تصویر استفاده شده است که در آن موقعیت مجری نهایی ربات توسط یک سیستم ردیاب مسیر محاسبه شده است. در مرجع [13]، روشی جدید برای حل معادلات غیرخطی سینماتیک مستقیم ربات های موازی براساس روش هوموتوبی بیان شد که در آن با استفاده از این روش، معادلات سینماتیک مستقیم یک ربات 3-RPR با دقت بسیار خوبی حل شد. به علاوه، در مرجع [14] یک روش برخط برای حل معادلات سینماتیک مستقیم ربات گاف-استوارت پیشنهاد شد و یک مطالعه ی جامع بر مبنای بیان تفاوت های مابین نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی و روش های متداول انجام گرفت. پیچیدگی و یا سادگی حل مساله ی ردیابی مسیر برای ربات گاف-استوارت به میزان قابل توجهی به نوع عملگرهای ربات بستگی دارد. سه نوع عملگر از نوع هیدرولیکی، الکتریکی و نیوماتیکی به عنوان محرک های یک ربات گاف-استوارت متداول می باشد. با وجود معایب استفاده از عملگرهای نیوماتیکی، که بیشتر آن ها از خاصیت تراکم پذیری هوا و غیرخطی بودن رفتار نیروی اصطکاک عملگر ناشی می شود، مزایای بسیاری را می توان برای این نوع عملگرها برشمرد که می توان به مواردی همچون پاک بودن از نظر استفاده از هوا، اقتصادی بودن، سادگی در نگهداری و تعمیرات و سرعت بالا اشاره کرد. روش های متفاوتی در مطالعات مختلف، به منظور کنترل ربات 6 درجه آزادی گاف-استوارت نظیر کنترل کننده ی گوسی مرتبه ی دوم خطی، کنترل کننده ی تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر، روش های مقاوم، کنترل کننده های تطبیقی و مدلغزشی به کارگرفته شده است. در مرجع [15]، از کنترل کننده ی گوسی مرتبه ی دوم خطی برای ردیابی مسیر مطلوب یک ربات نیوماتیکی 6 درجه آزادی نیوماتیکی گاف-استوارت استفاده شده است. در طراحی این کنترل کننده، از ترکیب یک تخمین گر خطی مرتبه ی دوم و یک تنظیم کننده ی خطی مرتبه ی دوم استفاده شده است که میزان قوام کنترل کننده ی طراحی شده تحت بارهای خارجی متفاوت در آزمایش های عملی مطالعه شد. در مرجع [16] به کمک طراحی کنترل کننده ی تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر بر مبنای

خطی سازی فیدبک، مساله ی ردیابی مسیر یک ربات نیوماتیکی 6 درجه آزادی گاف-استوارت انجام شد که در آن از یک الگوریتم بهینه سازی فراابتکاری به منظور تنظیم متغیرهای کنترل کننده استفاده شد. در این مطالعه، از حلقه ی داخلی به منظور کنترل فشار کاری و حلقه ی بیرونی برای کنترل جابجایی شاخه ها استفاده شد. در مرجع [17]، کنترل یک ربات نیوماتیکی گاف-استوارت به منظور توانبخشی پا و زانوی بیماران نقص حرکتی، مطالعه شده است. از کنترل کننده ی تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر اصلاح شده برای کنترل موقعیت این ربات و ایجاد حرکات مطلوب توانبخشی استفاده شده که در مقایسه با کنترل کننده های تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر رایج از عملکرد بهتری از نظر میزان فراجاهش پاسخ برخوردار بود. در مرجع [19]، یک کنترل کننده ی تطبیقی براساس مدل دینامیکی خطی شده، برای کنترل موقعیت ربات 6 درجه آزادی گاف-استوارت برای شبیه سازی رانندگی طراحی شده است. در این مطالعه، از دو حلقه ی کنترلی داخلی و خارجی و ترکیب کنترل کننده ی تناسبی-مشتق گیر و تطبیقی برای کنترل این ربات استفاده شده است. در مرجع [19]، یک کنترل کننده ی مقاوم تطبیقی برای کنترل یک ربات موازی 6 درجه آزادی به کار گرفته شده است. همچنین، آن ها از یک کنترل کننده ی ترکیبی مدلغزشی و شبکه ی عصبی برای کنترل این ربات استفاده کرده اند. در مرجع [20]، مطالعه ای عملی بر روی کنترل یک ربات موازی 6 درجه آزادی گاف-استوارت صورت گرفته که کنترل این ربات، هم در فضای مفاصل و هم در فضای کاری آن انجام شده است. در واقع، کنترل مقاوم موقعیت عملگر ربات به کمک جبران گر پیشخور و مشاهده گر پسخور طراحی گردید. در مرجع [21]، از کنترل کننده ی مقاوم تطبیقی برای کنترل ربات 6 درجه آزادی گاف-استوارت در فضای کاری آن استفاده شده که به منظور ردیابی مسیرهای مطلوب سینوسی توسط ربات در محیط شبیه ساز نرم افزار متلب آزمایش شده است. همچنین، در مرجع [22] مطالعه ای در زمینه ی کنترل موقعیت ربات گاف-استوارت براساس کنترل کننده ی مدلغزشی انتگرالی انجام شده است. روش پیشنهادی آن ها از قوام نسبتا خوبی در برابر اغتشاش های خارجی سازگار از خود نشان داد. از طرف دیگر تعداد زیادی از تحقیقات انجام شده براساس روش های مبتنی بر پردازش تصویر برای کنترل ربات گاف-استوارت می باشد. در مرجع [23]، یک مدل تصویری از سینماتیک ربات گاف-استوارت، بر مبنای مشاهده ی طول شاخه های ربات به کمک دوربین ها به کارگرفته شد که با توجه به هندسه ی خطوط متناظر با شاخه های ربات انجام شد. آن ها ادعا کردند که به کمک این روش، کنترل و شناسایی ربات گاف-استوارت ساده تر خواهد شد. به علاوه، در مرجع [24] یک مفهوم کلی در زمینه ی کاربرد پردازش تصویر برای کنترل ربات های موازی بیان شده است که براساس مشاهده ی طول شاخه های ربات عمل می کند.

مهم ترین نوآوری این مقاله، کنترل موقعیت یک ربات نیوماتیکی 6 درجه آزادی گاف-استوارت، با نام هگزاتار، با استفاده از کنترل همزمان در فضای مفاصل و فضای کاری ربات به کمک کنترل کننده ی غیرخطی پسگام مدلغزشی و ارائه ی یک روش هندسی برای محاسبه ی موقعیت مجری نهایی ربات می باشد. محرک های ربات هگزاتار، 6 سیستم نیوماتیکی می باشند که هر یک شامل یک عملگر نیوماتیکی، یک شیربرقی تناسبی و حسگرهای فشارسنج می باشد. مدل دینامیکی این سیستم نیوماتیکی به منظور دستیابی به بیان فضای حالت از این سیستم غیرخطی استخراج می شود. متغیرهای نامعلوم در معادلات دینامیکی این سیستم شامل ضریب ویسکوزیته، نیروی



Fig. 1 The 6-DoF pneumatically-actuated HexaTaar robot

شکل 1 ربات نیوماتیکی 6 درجه آزادی هگزاتار

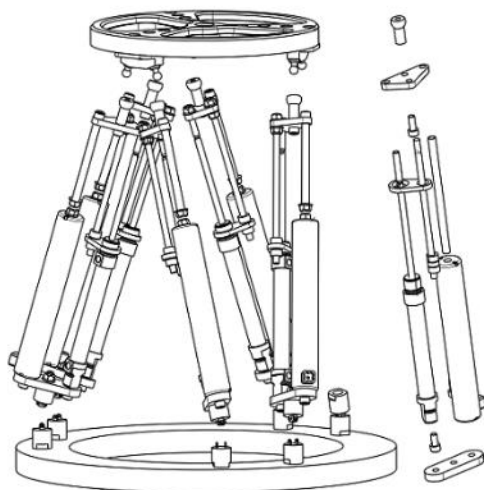


Fig. 2 Explosion plan of the 6-DoF HexaTaar robot

شکل 2 طرح انفجاری ربات 6 درجه آزادی هگزاتار

جدول 1 اجزای مکانیکی ربات هگزاتار در طرح انفجاری

Table 1 Mechanical parts of the HexaTaar robot in explosion plan

توضیحات	شماره در شکل 2
مجری نهایی ربات هگزاتار	1
بستر ثابت ربات هگزاتار	2
نقطه اتصال شاخه ها به مجری نهایی ربات	3
شاخه های ربات هگزاتار شامل عملگر نیوماتیکی	4
مفصل یونیورسال متصل به پایه ثابت ربات	5
مفصل کروی متصل به مجری نهایی ربات	6

یک شیربرقی تناسبی، دو عدد حسگر فشارسنج، راهنمای مکانیکی، حسگر اندازه گیری جابجایی خطی (پتانسیومتر) تشکیل شده است. شیربرقی تناسبی هوای فشرده ی تولیدی توسط کمپرسور را هدایت می کند. با توجه به ولتاژ اعمال شده به شیربرقی اسپول¹ آن به نحوی جابجا می شود تا دبی هوای خروجی از شیربرقی باعث ایجاد حرکات مطلوب در عملگر نیوماتیکی شود. فشار داخل محفظه های شیربرقی تناسبی توسط حسگرهای فشارسنج اندازه گیری می شوند که بر سر راه اتصال آن ها به عملگر نیوماتیکی قرار دارد.

¹ Spool

اصطکاک و متغیرهای شیربرقی تناسبی می باشد. ضریب ویسکوزیته به کمک آزمایشی موسوم به تست-آزاد محاسبه می گردد. از طرفی نیروی اصطکاک به کمک مدل شناخته شده ی لوگر مدل سازی می شود. با انجام آزمایش های عملی و به کارگیری الگوریتم بهینه سازی ژنتیک، نیروی اصطکاک به همراه متغیرهای شیربرقی ژنتیک تخمین زده شده و شناسایی می شوند. هر یک از این سیستم های نیوماتیکی به صورت جداگانه بررسی شده و تاثیر هر یک از عملگرها بر روی عملگرهای دیگر به صورت یک نامعینی و اغتشاش در نظر گرفته می شود. عملگر نیوماتیکی ربات هگزاتار به وسیله ی کنترل کننده ی پسگام مدلغزشی کنترل می شود. همچنین پس از استخراج معادلات سینماتیکی، یک روش هندسی برای حل معادلات سینماتیکی مستقیم ربات هگزاتار پیشنهاد می شود. در روش پیشنهاد شده که روش هندسی حل سینماتیکی شبه مستقیم نامگذاری شده است، با استفاده از داده های بدست آمده از حسگر دوران و حسگرهای اندازه گیری جابجایی خطی طول شاخه ها، و بدون استفاده از حسگرهای گران قیمت موقعیت و روش های مبتنی بر پردازش تصویر، موقعیت مجری نهایی ربات محاسبه می شود.

در ادامه و در بخش 2 ربات 6 درجه آزادی نیوماتیکی هگزاتار به همراه اجزای مکانیکی تشکیل دهنده ی آن شرح داده می شود. معادلات دینامیکی سیستم نیوماتیکی شامل دینامیک پیستون و دینامیک فشار در شیربرقی تناسبی در بخش 3 بدست می آیند. بخش 4، به شناسایی متغیرهای نامعلوم معادلات دینامیکی سیستم نیوماتیکی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و همچنین محاسبه ی ضریب ویسکوزیته ی عملگر به کمک آزمایش تست-آزاد اختصاص داده می شود. بعلاوه، طراحی کنترل کننده ی پسگام مدلغزشی برای کنترل موقعیت عملگر نیوماتیکی بیان می شود. در بخش 5 معادلات سینماتیک ربات هگزاتار بدست می آید و روش هندسی حل سینماتیک شبه مستقیم با جزئیات کامل معرفی خواهد شد. در بخش 6 روش کنترلی پیشنهادی شامل کنترل حلقه بسته در فضای کاری و فضای مفاصل ربات هگزاتار به منظور حل مساله ی ردیابی مسیر مطلوب ربات هگزاتار تشریح خواهد شد. همچنین، نتایج آزمایش های عملی در قالب نمودارها و جداول بیان می شوند. در نهایت، نتیجه گیری و کارهای پیشنهادی بیان می شوند.

2- ربات موازی نیوماتیکی 6 درجه آزادی گاف-استوارت

در این بخش، ساختار هندسی و اندازه های اجزای مکانیکی ربات هگزاتار بیان می شوند. همچنین، سیستم نیوماتیکی هر شاخه از این ربات با جزئیات تشریح می شود.

2-1- ساختار هندسی ربات هگزاتار

"شکل 1" ربات 6 درجه آزادی نیوماتیکی هگزاتار را نشان می دهد که در آزمایشگاه تعامل انسان و ربات دانشگاه تهران (تارلب) ساخته شده است. این ربات که مطابق پلتفرم ربات موازی گاف-استوارت ساخته شده که مجری نهایی آن توسط 6 عدد شاخه ی نیوماتیکی به بستر ثابت ربات متصل می شود. "شکل 2" نیز طرح انفجاری ربات هگزاتار را نشان می دهد که اجزای اصلی مکانیکی ربات در جدول 1 لیست شده اند.

2-2- سیستم نیوماتیکی ربات

ربات هگزاتار از 6 سیستم نیوماتیکی یکسان که در هر شاخه عملگر نیوماتیکی به عنوان مفصل تناسبی وظیفه ی حرکت مجری نهایی ربات را بر عهده دارد. "شکل 3" یک شاخه ی ربات هگزاتار شامل یک عملگر نیوماتیکی،

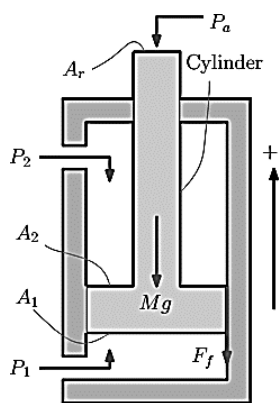


Fig. 4 Free body diagram of the pneumatic actuator including imposed forces

شکل 4 دیاگرام جسم آزاد عملگر نیوماتیکی به همراه نیروهای وارده به آن

2-3-2- دینامیک فشارها

طبق مرجع [28]، مدل جریان جرمی هوای فشرده در محفظه های شیربرقی تناسبی به صورت زیر پیشنهاد شده است:

$$\dot{m}(P_u \cdot P_d) = \begin{cases} C_f A_v \left(\frac{2k}{R(k-1)} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{P_u}{\sqrt{T}} \left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{\frac{1}{k}} \left(1 - \left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)^{\frac{1}{2}} & \frac{P_d}{P_u} > P_c \\ C_f A_v \frac{P_u}{\sqrt{T}} \left(\frac{k}{R} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2}} & \frac{P_d}{P_u} < P_c \end{cases} \quad (3)$$

که در آن فشار بحرانی طبق رابطه ی زیر محاسبه خواهد شد:

$$P_c = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (4)$$

براساس استاندارد ایزو-6358، نسبت گرمای ویژه، ثابت گاز، دما و فشار اتمسفر طبق مقادیر ذکر شده در جدول 2 می باشد. بنابراین با جایگذاری مقدار k در معادله ی (4)، مقدار فشار بحرانی 0.528 بدست می آید. از طرفی شیربرقی و ولتاژ ورودی آن به صورت زیر محاسبه می شود [29]:

$$A_v = \pi \frac{X_s^2}{4} \rightarrow X_s = C_v u \quad (5)$$

که در آن سطح موثر شیربرقی $A_v = 15 \times 10^{-6}$ متر مربع می باشد. فشار بالادست و پایین دست برای حرکت روبه بالا و حرکت رو به پایین عملگر متفاوت است. فشارهای بالادست و پایین دست در این دو حالت در جدول 3 و 4 ذکر شده اند. بدین طریق، معادلات دینامیکی سیستم نیوماتیکی به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{M} (P_1 A_1 - P_2 A_2 - P_a A_r - Mg \mp F_f) \\ \dot{P}_1 &= \frac{RT}{V_1} (\gamma_1 \dot{m}_{i1} - \gamma_o \dot{m}_{o1}) - \gamma_k \frac{P_1}{V_1} \dot{V}_1 \\ \dot{P}_2 &= \frac{RT}{V_2} (\gamma_2 \dot{m}_{i2} - \gamma_o \dot{m}_{o2}) - \gamma_k \frac{P_2}{V_2} \dot{V}_2 \end{aligned} \quad (6)$$

جدول 2 متغیرهای ثابت محیطی آزمایش های عملی

Table 2 Constant parameters of the environment conditions of the experiment place.

نشانه	مقدار	بعد متغیر
k	1.4	-
T	294	K
R	287	$\text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$
P_a	10^5	Nm^{-2}

جدول 3 فشارهای بالادست و پایین دست برای حرکت رو به بالای عملگر

Table 3 Upstream and downstream pressures for upward strokes

شماره محفظه	فشار بالادست	فشار پایین دست
1	P_s	P_1
2	P_1	P_2

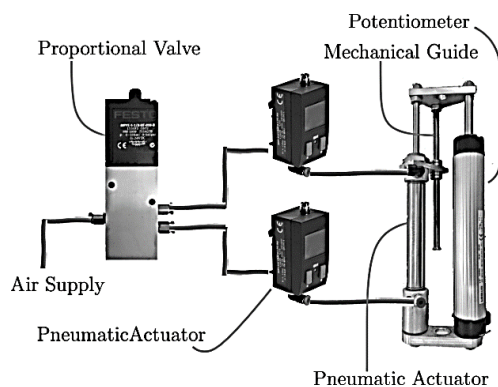


Fig. 3 The pneumatic system of each link of the HexaTaa robot

شکل 3 سیستم نیوماتیکی هر شاخه از ربات هگزاتار

بدین ترتیب، این نیروی ناشی از هوای فشرده ای که توسط شیربرقی تنظیم می شود، باعث ایجاد حرکات رو به بالا و یا رو به پایین عملگر نیوماتیکی خواهد شد. موقعیت پیستون عملگر نیوماتیکی توسط حسگر پتانسیومتر خطی اندازه گیری می شود. همچنین، سرعت حرکت پیستون با مشتق گیری از داده های پتانسیومتر خطی بدست می آید. نویزهای حاصله از مشتق گیری توسط یک فیلتر پایین گذر از بین می روند. علاوه، راهنمای مکانیکی که به عملگر نیوماتیکی متصل شده است، باعث افزایش سفتی عملگر نیوماتیکی و به تبع آن سفتی کلی ربات هگزاتار خواهد شد.

2-3-2- مدل ریاضی سیستم نیوماتیکی

در این بخش، معادلات دینامیکی سیستم نیوماتیکی ربات هگزاتار با هدف رسیدن به بیان فضای حالت از این سیستم استخراج می شود. بدین منظور، معادلات دینامیکی حرکت پیستون عملگر نیوماتیکی و دینامیک فشارها در شیربرقی تناسبی می بایست نوشته شود. مدل ریاضی همین سیستم نیوماتیکی در مرجع [25] استخراج شده است. در این جا به منظور سادگی، تمامی متغیرهای استفاده شده در معادلات دینامیکی در فهرست علائم و نشانه های انتهای این مقاله آورده شده است.

2-3-1- دینامیک پیستون

"شکل 4" دیاگرام جسم آزاد یک عملگر نیوماتیکی را به همراه نیروهای نیوماتیکی، وزن و نیروی اصطکاک وارده به پیستون را نشان می دهد. با استفاده از قانون دوم نیوتون، معادلات دینامیکی پیستون برای حرکات روبه بالا و رو به پایین به صورت زیر به دست می آید:

$$Ma = P_1 A_1 - P_2 A_2 - P_a A_r - Mg \mp F_f \quad (1)$$

که در آن F_f براساس مدل پیشنهادی لوگر¹ برای نیروی اصطکاک مدل شده است. مدل پیشنهادی لوگر در مرجع [26] به عنوان تابعی از سرعت پیستون، سرعت استریک، نیروی اصطکاک استاتیکی و نیروی اصطکاک تشریح شده است. طبق مرجع فوق الذکر، نیروی اصطکاک توسط معادله ی زیر بیان می شود:

$$F_f = F_c \text{sgn}(v) + (F_s - F_c) \exp\left(-\frac{v}{v_s}\right)^2 \text{sgn}(v) + Bv \quad (2)$$

همچنین، سرعت استریک [27]، ضریب ویسکوزیته، اصطکاک ایستایی و اصطکاک کولمب از جمله متغیرهای نامعلوم در مدل لوگر می باشند که می بایست شناسایی شوند و نیروی اصطکاک در معادله های (1) و (2) جای گذاری شود.

¹ LuGre

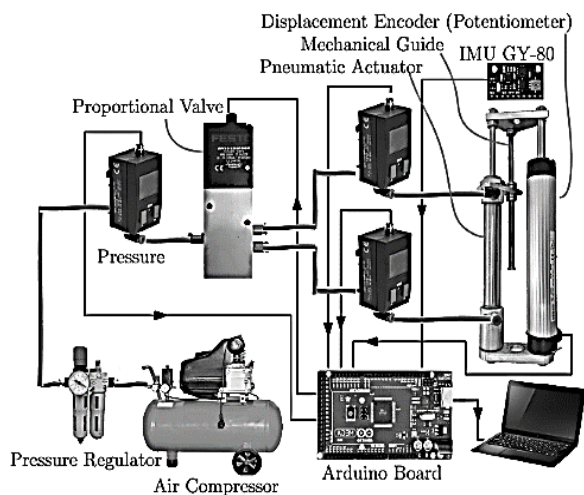


Fig. 5 The experimental setup of the pneumatic system for identification procedure

شکل 5 نحوه ی اتصال ادوات نیوماتیکی و الکتریکی به منظور انجام شناسایی سیستم نیوماتیکی

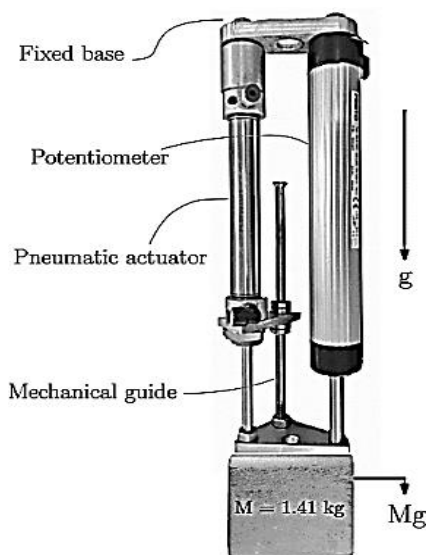


Fig. 6 The experimental setup for Free-Fall test

شکل 6 عملگر نیوماتیکی به منظور انجام تست-آزاد

کیلوگرم به پیستون عملگر متصل شده و رها می شود. بنابراین با صفر شدن P_1 ، P_2 و P_s در معادله ی دینامیک پیستون طبق معادله ی (1)، بدست می آید:

$$(M_{load} + M)\ddot{x} = P_{atm}A_r - B\dot{x} - Mg - F_{fric} \quad (9)$$

که در آن M_{load} جرم بار خارجی می باشد. بنابراین، معادله دینامیک (1) به صورت معادله دیفرانسیل زیر بدست می آید:

$$\ddot{x} = g - \frac{g}{W}F_{fric} - \frac{g}{W}B\dot{x} \quad (10)$$

که در این معادله $W = (M_{load} + M)$ مجموع وزن پیستون و بار خارجی می باشد. با فرض این که شرایط اولیه حرکت پیستون به صورت $x = 0$ و $\dot{x} = 0$ باشند. با حل معادله ی دیفرانسیل (10) ضریب ویسکوزیته و اصطکاک کولمب به صورت زیر بدست می آید:

$$F_{fric} = W \left(1 - \frac{c_1}{gc_2}\right) \quad (11)$$

$$B = \frac{W - F_{fric}}{c_1}$$

که c_1 و c_2 متغیرهای ثابت می باشند. مقدار این ثابت ها با توجه به

جدول 4 فشارهای بالادست و پایین دست برای حرکت رو به پایین عملگر

Table 4 Upstream and downstream pressures for downward strokes

شماره محفظه	فشار بالادست	فشار پایین دست
1	P_1	P_a
2	P_s	P_2

که در آن $\dot{P}_1$ و $\dot{P}_2$ نشان دهنده ی دینامیک فشار هوای محفظه های شیربرقی تناسبی می باشد.

2-3-3- بیان فضای حالت سیستم نیوماتیکی

فرض می شود، متغیرهای حالت این سیستم به صورت زیر تعریف شوند:

$$x_1 = x \quad x_2 = v \quad x_3 = P_1 \quad x_4 = P_2 \quad (7)$$

آن گاه با در نظر گرفتن معادله ی (7) بیان فضای حالت سیستم نیوماتیکی هر شاخه از ربات هگزاتار به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{M}(x_3A_1 - x_4A_2 - P_aA_r - Mg \mp F_f) \\ \dot{x}_3 &= \frac{RT}{V_1}(\gamma_1\dot{m}_{i1} - \gamma_o\dot{m}_{o1}) - \gamma_k \frac{x_3}{V_1}\dot{V}_1 \\ \dot{x}_4 &= \frac{RT}{V_2}(\gamma_1\dot{m}_{i2} - \gamma_o\dot{m}_{o2}) + \gamma_k \frac{x_4}{V_2}\dot{V}_2 \end{aligned} \quad (8)$$

که در این معادله علامت جمله ی نیروی اصطکاک با توجه به نوع حرکت و جهت سرعت پیستون تعیین می شود. علامت بالایی مربوط به سرعت های مثبت و علامت پایینی مربوط به سرعت های منفی پیستون می باشند. در عمل، x_1 موقعیت پیستون توسط حسگر پتانسیومتر خطی و x_2 سرعت پیستون توسط مشتق گیری از داده های موقعیت پیستون به دست می آیند. به علاوه، x_3 و x_4 بیانگر فشار هوای شیربرقی می باشد که توسط حسگرهای فشارسنج اندازه گیری می شوند.

3- شناسایی سیستم نیوماتیکی و کنترل موقعیت عملگر نیوماتیکی

در این بخش متغیرهای نامعلوم مدل دینامیکی سیستم نیوماتیکی طبق معادله ی (6) شناسایی می شوند. به علاوه، کنترل موقعیت عملگر نیوماتیکی توسط کنترل کننده ی پسمام مدلغزشی انجام می گیرد.

به منظور شناسایی سیستم نیوماتیکی و کنترل عملگر نیوماتیکی، هر یک از شاخه های نیوماتیکی ربات به یک حسگر فشارسنج بر روی پیستون شیربرقی تناسبی مجهز می شوند. بدین ترتیب، حسگر IMU بر روی پیستون عملگر نیوماتیکی نصب می شود که از حسگر شتابسنج به منظور اندازه گیری شتاب پیستون به کار گرفته شده که سیستم موردنظر در "شکل 5" نشان داده شده است. جزئیات مربوط به هر یک از اجزای این سیستم در جدول 2 لیست شده است. تنظیم کننده ی فشار وظیفه ی تنظیم فشار ورودی کمپرسور را به عهده دارد. براساس مرجع [30]، مقدار شتاب خطی و اطلاعات ژيروسکوپی حسگر IMU با یکدیگر ترکیب می شود تا شتاب در راستای محور حرکت پیستون بدست آید.

3-1- شناسایی متغیرهای نامعلوم در مدل دینامیکی

متغیرهای ضریب ویسکوزیته، نیروی اصطکاک عملگر و متغیرهای شیربرقی می بایست شناسایی شوند. ضریب ویسکوزیته عملگر توسط روشی به نام تست-آزاد محاسبه می شود. این روش در مرجع [25] اشاره شده که در آن تمامی اتصالات نیوماتیکی عملگر جدا می گردد و عملگر نیوماتیکی به صورت برعکس به یک میز ثابت متصل شده و با اتصال یک وزنه به جرم مشخص رها می شود. همان طور که در "شکل 6" مشاهده می شود، وزنه ای به جرم 1.14

$$\begin{aligned}\dot{V}_s &= S\dot{S} = S(\varphi - B\dot{x}_1 + C - \ddot{x}_{1d} + \lambda\dot{e}_x) \\ &= S(\dot{B}\dot{x}_1 - \dot{C} - B\dot{x}_1 - K\text{sgn}(S) + C) \\ &= S((\dot{B} - B)\dot{x}_1 + (\dot{C} - C) - K\text{sgn}(S))\end{aligned}\quad (17)$$

در نهایت، به منظور اثبات پایداری، مشتق تابع لیاپانوف را می توان به صورت زیر بدست آورد:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= S(B - \hat{B})\dot{x}_1 + (C - \hat{C})S - K|S| \\ K &= \eta + \bar{B}\gamma_{\dot{x}} + \bar{C} \quad \eta > 0\end{aligned}\quad (18)$$

طبق نامساوی کوشی-شوارتز طبق معادله ی (19) و با توجه به فرض های فوق که در آن محدوده ی بالایی معادله ی (20) می باشد:

$$\begin{aligned}S(\hat{B} - B)\dot{x}_1 &\leq |S||\hat{B} - B||\dot{x}_1| \leq |S|B\gamma \\ S(\hat{C} - C)\dot{x}_1 &\leq |S||\hat{C} - C| \leq |S|\bar{C}\end{aligned}\quad (19)$$

$$A_1 F_1(X \cdot u) - A_2 F_2(X \cdot u) = -\gamma_{\dot{x}}|\dot{x}| \quad (20)$$

می توان نتیجه گرفت که مشتق تابع لیاپانوف به صورت زیر بدست می آید:

$$\dot{V} \leq (B\gamma_{\dot{x}} + \bar{C} - K)|S| \leq -\eta|S| \quad (21)$$

بنابراین، سطح لغزش S در زمان محدود $T \leq 1/\eta$ به سمت صفر میل می کند. در مورد کراندار بودن مقادیر تخمین زده شده B و C شایان ذکر است که با توجه قیدهای فیزیکی در سیستم نیوماتیکی، شامل محدود بودن فشارهای دو سمت شیربرقی و همچنین این واقعیت که مقادیر هر یک از آن ها در عمل نمی تواند بیشتر از مقدار فشار اصلی ورودی به شیربرقی (فشار مرجع) بشود، می توان فرض کرد که این پارامترها محدود و کراندار خواهند ماند. با توجه به تغییر متغیر $z = x_3 A_1 - x_4 A_2 - \hat{\varphi}$ تابع لیاپانوف برای سیستم اصلی و مشتق آن نسبت به زمان، به صورت زیر بدست می آید:

$$\begin{aligned}W &= V_s + \frac{1}{2}z^2 \\ W &= S\dot{S} + z\dot{z} = S((\hat{B} - B)\dot{x}_1 + (\hat{C} - C) - K\text{sgn}(S)) \\ &\quad + z(A_1 F_1(X \cdot u) - A_2 F_2(X \cdot u) - \dot{\hat{\varphi}})\end{aligned}\quad (22)$$

در نهایت، این معادله به یک معادله ی کنترلی (26) مبدل می شود که می بایست سیگنال کنترلی u در آن بدست آید:

$$A_1 F_1(X \cdot u) - A_2 F_2(X \cdot u) - \dot{\hat{\varphi}} = -\beta z \quad (23)$$

که در آن β یک ثابت مثبت می باشد. بدین ترتیب $\dot{W}$ منفی نیمه معین خواهد بود و به صفر میل می کند. در نتیجه:

$$S \rightarrow 0 \Rightarrow x_1 \rightarrow x_{1d} \quad z \rightarrow 0 \Rightarrow x_3 = x_4 \quad (24)$$

به عبارت دیگر، با میل کردن S به سمت صفر، می توان نتیجه گرفت که متغیر حالت x_1 به سمت مقدار مطلوب خود میل می کند. از طرف دیگر، زمانی که z به سمت صفر میل کند، متغیرهای حالت داخلی سیستم یعنی x_3 و x_4 محدود باقی می مانند. با توجه به رابطه ی بین جابجایی اسپول شیربرقی و ولتاژ ورودی آن در مرجع، نرخ جریان جرمی هوای فشرده با تابع چندجمله ای درجه دوم به سیگنال کنترلی مرتبط می شود:

$$m(P_u \cdot P_d) = H(P_u \cdot P_d) \frac{\pi}{4} (au + b)^2 \quad (25)$$

که در این معادله، $H_i(P_u \cdot P_d)$ جملاتی از رابطه ی جریان جرمی هوای فشرده می باشد که مربوط به فشارهای بالادست و پایین دست در محفظه های شیربرقی می باشند. با حل معادله ی (22) سیگنال کنترلی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$u = \frac{2}{a} \left(\frac{V_1 A_1 \gamma_k x_3 - V_2 A_2 \gamma_k x_4 - \beta + \dot{\hat{\varphi}}}{\pi \left(\frac{A_1 R T \gamma_i H_1}{V_1} - \frac{A_2 R T \gamma_i H_2}{V_2} \right)} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{b}{a} \quad (26)$$

با اعمال این سیگنال کنترلی به شیربرقی، می توان موقعیت عملگر نیوماتیکی را کنترل کرد. در حالت کلی به دلیل پیچیدگی و غیرخطی بودن ارتباط بین نرخ جریان جرمی هوا و سیگنال کنترلی u برای شیرهای برقی، برای حل معادله ی (23) نیاز به استفاده از روش های عددی می باشد که پیاده سازی آن در سخت افزار موجود برای کنترل شیرهای برقی (آردوینو) بسیار دشوار

آزمایش های عملی و کمینه سازی معیار ریشه ی میانگین مربعات خطا بدست می آیند. بنابراین، مقدار ضریب ویسکوزیته و اصطکاک کولمب به ترتیب 1.539 نیوتون.ثانیه بر متر و 73.183 نیوتون محاسبه شد. به منظور شناسایی دیگر متغیرهای نامعلوم، الگوریتم بهینه سازی ژنتیک با تابع هدف ریشه ی میانگین مربعات خطای نرمالیزه شده به کار می رود. ضریب ویسکوزیته که پیش از این محاسبه شد و متغیرهای نامعلوم نیروی اصطکاک و متغیرهای γ_k و γ_o در دینامیک فشارها در شیربرقی شناسایی می شوند. طبق نتایج آزمایش های عملی و داده های بدست آمده از حسگرهای فشار، پتانسیومتر خطی و حسگر شتابسنج، و با اعمال الگوریتم بهینه سازی ژنتیک، مقادیر شناسایی شده طبق جدول 5 بدست می آید.

3-2- کنترل موقعیت عملگر نیوماتیکی براساس کنترل کننده ی پسمام مدلفزشی

با توجه به بیان فضای حالت سیستم نیوماتیکی در معادله ی (8)، متغیر جدید C به عنوان متغیرهای ثابت در معادله دینامیک پیستون، به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{aligned}x_1 &= x_2 \\ x_2 &= x_3 A_1 - x_4 A_2 - B x_2 + C \\ x_3 &= F_1(X \cdot u) \\ x_4 &= F_2(X \cdot u) \\ y &= x_1 \\ \varphi &= x_3 A_1 - x_4 A_2 \\ C &= -P_d A_1 - M g - [F_c \text{sgn}(x_2) \\ &\quad + (F_s - F_c) e^{-\frac{x_2^2}{v_s^2}} \text{sgn}(x_2)]\end{aligned}\quad (12)$$

که متغیر φ شامل متغیرهای حالت معادله شیربرقی در معادله دینامیک پیستون می باشد. به منظور اعمال کنترل کننده ی پسمام مدلفزشی خطا و مشتق آن با e_x و $\dot{e}_x$ نشان داده می شوند. بنابراین، سطح لغزش و مشتق آن سبب به زمان به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{aligned}S &= (\dot{x}_1 - \dot{x}_{d1}) + \lambda(x_1 - x_{d1}) = \dot{e}_x + \lambda e_x \\ \dot{S} &= \ddot{e} + \lambda \dot{e}_x = \ddot{x}_1 - \ddot{x}_{d1} + \lambda \dot{e}_x = \varphi - B\dot{x}_1 + C - \ddot{x}_{d1} + \lambda \dot{e}_x\end{aligned}\quad (13)$$

با فرض اینکه C و B متغیرهای نامعلوم مساله می باشند که با $\hat{C}$ و $\hat{B}$ تخمین زده می شوند، آن گاه، می توان فرض کرد که $|\hat{C} - C| < \bar{C}$ و $|\hat{B} - B| < \bar{B}$ و همچنین با در نظر گرفتن φ :

$$\begin{aligned}\varphi &= \hat{\varphi} - K\text{sgn}(S) \quad K > 0 \\ \hat{\varphi} &= \arg_{\varphi}(\dot{S}|_{B=\hat{B}, C=\hat{C}} = 0)\end{aligned}\quad (14)$$

با بازنویسی مشتق سطح لغزش در معادله ی (16) و با جای گذاری $\hat{\varphi}$ در معادله ی (7):

$$\varphi = B\dot{x}_1 - \hat{C} + \dot{x}_{d1} - \lambda\dot{e}_x - K\text{sgn}(S) \quad (15)$$

تابع لیاپانوف به صورت زیر تعریف می شود:

$$V_s = \frac{1}{2}S^2 \quad (16)$$

با محاسبه ی مشتق تابع لیاپانوف در معادله ی (19) نسبت به زمان:

جدول 5 متغیرهای شناسایی شده توسط الگوریتم ژنتیک پس از شناسایی سیستم نیوماتیکی

Table 5 The identified parameters of the pneumatic system by Genetic Algorithm

متغیر	بعد متغیر	حرکت رو به بالا	حرکت رو به پایین
v_s	ms^{-1}	0.5641	-0.2894
B	Nsm^{-1}	34.4445	-3.2342
F_s	N	86.654	-91.9421
F_c	N	49.1371	-78.8793
γ_i	-	1.78×10^{-14}	10.0013
γ_o	-	4.6263	4.2568
γ_k	-	0.1440	0.1965

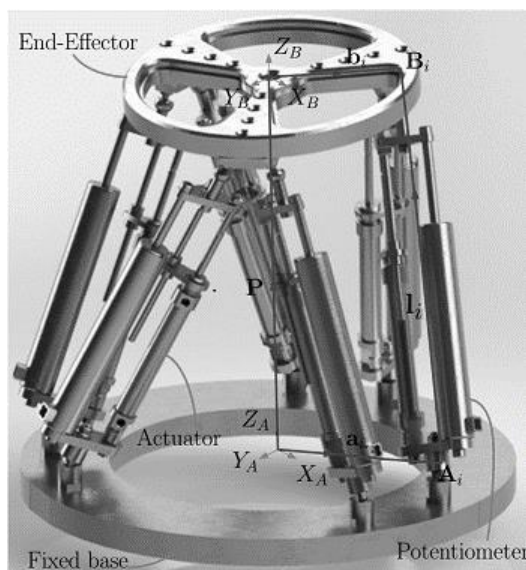


Fig. 7 The coordinate frames and vectors for extracting kinematic equations of the HexaTaar robot

شکل 7 مختصات و بردارهای مورد نیاز جهت نوشتن معادلات سینماتیکی ربات هگزاتار

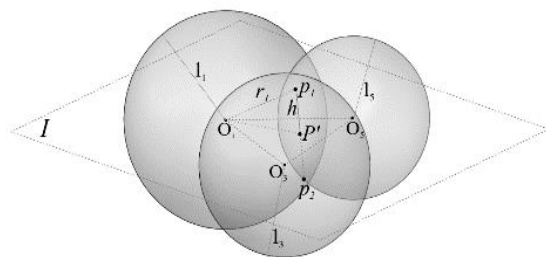


Fig. 8 The three spheres formed by 1st, 3rd and 5th links of the HexaTaar robot

شکل 8 سه کره متناظر با شاخه های 1، 3 و 5 ربات هگزاتار

به امکان پذیر بودن جوابها، موقعیت مجری نهایی ربات را نشان می دهد. بنابراین با یافتن این دو نقطه، موقعیت مجری نهایی بدست می آید. براساس برخی محاسبات هندسی نقطه ی $\hat{P}$ که در "شکل 8" نشان داده شده است، در "شکل 8" مقدار h بیان گر فاصله ی عمودی بین نقطه ی $\hat{P}$ و محل بردار موقعیت مجری نهایی ربات می باشد. بنابراین بردار موقعیت مجری نهایی ربات به صورت زیر بدست می آید:

$$h = \pm \sqrt{r_1^2 - \|\hat{P} - O_1\|^2} \quad (30)$$

پس از ساده سازی های محاسباتی، می توان بردار موقعیت مجری نهایی را به صورت بسته ی زیر نوشت:

$$P = O_1 + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{l_1^2 - l_3^2}{\|O_3 - O_1\|^2} \right) \frac{(O_3 - O_1) + \frac{1}{2\|\hat{d}\|} \left(\left(\|O_5 - O_1\|^2 + l_1^2 - l_5^2 - \left(1 + \frac{l_1^2 - l_3^2}{\|O_3 - O_1\|^2} \right) \right) \left((O_3 - O_1)(O_5 - O_1) \times (\hat{d} \times (O_3 - O_1)) \right) \pm (l_1^2 - \frac{1}{4}(1 + \frac{l_1^2 - l_3^2}{\|O_3 - O_1\|^2})^2 + \frac{1}{4\|\hat{d}\|} (\|O_5 - O_1\|^2 + l_1^2 - l_5^2 - \left(1 + \frac{l_1^2 - l_3^2}{\|O_3 - O_1\|^2} \right)^2) (\|O_3 - O_1\|^2)^{\frac{1}{2}}) \hat{d}}{\|O_3 - O_1\|^2} \right) \quad (31)$$

خواهد بود و حجم محاسباتی را بسیار افزایش می دهد و به منظور کاربردهای زمان واقعی نمی توان از آن استفاده کرد. بنابراین، به ناچار می بایست از روابط ساده تر برای رابطه ی بین نرخ جریان جرمی هوا و سیگنال کنترلی u بهره برد که نهایتاً رابطه ی بین نرخ جریان جرمی و سیگنال کنترلی u به صورت رابطه ی (25) به دست می آید. استفاده از رابطه ی (25) در حل معادله ی (23)، امکان این را فراهم می سازد تا بتوان به حل بسته ی سیگنال کنترلی u دست پیدا کرد. در غیر این صورت، اگر به جای ارتباط خطی بین سیگنال کنترلی و میزان جابجایی اسپول شیربرقی از روابط دقیق تر اما دارای پیچیدگی بیشتر استفاده شود، حل معادله ی (23) می بایست با استفاده از روش های عددی انجام پذیرد.

4- معادلات سینماتیک و روش هندسی محاسبه ی موقعیت مجری نهایی ربات هگزاتار

1-4- معادلات سینماتیک ربات

"شکل 7" دستگاه مختصات مجری نهایی F_A ، و دستگاه مختصات بستر ثابت ربات F_B ، و همچنین بردارهای متناظر با هر یک از مفاصل کروی و یونیورسال ربات هگزاتار را نشان می دهد. همچنین بردار P موقعیت مجری نهایی ربات را نسبت به دستگاه مختصات اصلی که در مرکز جرم بستر ثابت ربات قرار گرفته نشان می دهد.

هر یک از شاخه های ربات هگزاتار از یک طرف توسط مفصل یونیورسال به بستر ثابت و از طرف دیگر توسط مفصل کروی به مجری نهایی ربات متصل می شوند. بردار مکان مفاصل با b_i و a_i نشان داده می شوند که از دستگاه مختصات محلی خود به محل اتصال مفاصل رسم می شوند. با تعریف s_i و l_i به ترتیب به عنوان طول و جهت هر یک از شاخه های ربات، بنابراین:

$$l_i = l_i s_i \rightarrow i = 1 \dots 6 \quad (27)$$

در معادله ی سینماتیک مستقیم ربات هگزاتار بردار موقعیت در مختصات اصلی به صورت $P = [p_x, p_y, p_z]^T$ تعریف می شود و دوران مجری نهایی توسط ماتریس دوران R تعیین می گردد. بردار دوران توسط داده های سنسور IMU بدست می آید اما بردار موقعیت مجری نهایی می بایست محاسبه شود. معادلات سینماتیک ربات 6 درجه آزادی هگزاتار به صورت زیر نوشته می شود:

$$l_i = [P^T P + b_i^T b_i + a_i^T a_i - 2P^T a_i + 2P^T (R b_i) - 2(R b_i)^T a_i]^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

2-4- روش هندسی حل سینماتیک شبه مستقیم

موقعیت مجری نهایی ربات هگزاتار با استفاده از یک روش ابتکاری پیشنهادی در این مقاله، براساس داده های حسگرهای پتانسیومتر خطی، حسگر دوران IMU، به دست می آید. با توجه به معادلات سینماتیکی در معادله ی (28) می توان نوشت:

$$l_i + a_i = P + R b_i \quad (29)$$

$O_i = a_i - R b_i \rightarrow P = O_i + l_i$ که در این معادله طول بردار l_i در واقع شعاع های کره هایی خواهند بود که متناظر با هر یک از شاخه های ربات خواهد بود. مرکز این کره ها در O_i قرار دارند. به عنوان اولین گام در این روش هندسی، "شکل 8" در نظر گرفته می شود که در آن 3 کره (متناظر با شاخه های 1 و 3 و 5 ربات) از 6 کره ی ذکر شده رسم شده است. هر یک صفحه ی گذرنده از مرکز این کره ها با I نشان داده شده است.

نقاط p_1 و p_2 محل تقاطع این سه کره می باشد که یکی از آن ها با توجه

که در این معادله $\ddot{d}$ و $\dot{d}$ به ترتیب بردارهای یک و نرمال صفحه ی I می باشد.

5- کنترل ردیابی مسیر ربات 6 درجه آزادی هگزاتار

5-1- کنترل حلقه بسته ی پیشنهادی

"شکل 9" بلوک دیاگرام کنترل حلقه بسته ی ربات 6 درجه آزادی هگزاتار را به منظور ردیابی مسیرهای مطلوب نشان می دهد. در ابتدا مسیر مطلوب توسط معادلات سینماتیک مستقیم ربات به طول های مطلوب شاخه ها تبدیل می شوند. کنترل در فضای مفصل (حلقه ی داخلی) براساس مقایسه ی داده های اندازه گیری شده از طول شاخه های ربات توسط پتانسیومتر خطی و طول های مطلوب شاخه ها انجام می گیرد. از طرف دیگر، کنترل در فضای کاری ربات توسط مقایسه ی موقعیت و دوران مطلوب مجری نهایی ربات و موقعیت و دوران اندازه گیری شده انجام می پذیرد.

دوران مجری نهایی ربات توسط سنسور دوران IMU اندازه گیری می شود اما موقعیت مجری نهایی ربات بدون استفاده ی مستقیم از حسگرهای اندازه گیری موقعیت گران قیمت، به وسیله ی روش هندسی حل سینماتیک شبه مستقیم ربات هگزاتار بدست می آید. خطای اندازه گیری شده در فضای کاری ربات توسط ماتریس ژاکوبین ربات از فضای کاری به فضای مفصل انتقال می یابد. بدین ترتیب، کنترل کننده ی پسگام مدلغزشی سیگنال کنترلی را براساس دو معیار ایجاد می کند:

(1) اختلاف بین طول مطلوب شاخه ها و طول اندازه گیری شده توسط حسگرهای پتانسیومتر خطی، (2) خطای نگاشت یافته از فضای کاری به فضای مفصل که این خطا ناشی از میزان فاصله ی موقعیت و دوران اندازه گیری شده از مقدار مطلوب خود می باشد. توجه به این نکته حائز اهمیت است که اجرای حلقه ی داخلی حدود 2 تا 3 میلی ثانیه زمان می برد. از طرف دیگر اجرای حلقه ی خارجی حدود 5 برابر بیشتر از این مقدار طول می کشد. بنابراین، کنترل کننده براساس تنظیم خطای نوع 1 عمل می کند و از خطای نگاشت شده ی نوع 2 صرفاً جهت تنظیم سیگنال کنترلی به منظور ایجاد رفتار بدون ارتعاش می باشد. استفاده از خطای نوع 2 به منظور حذف دو دسته نامعینی اهمیت دارد: (1) نامعینی و خطای ایجاد شده در اندازه گیری طول ها، ابعاد و زوایای بخش های مکانیکی ربات هگزاتار و (2) خطای اندازه گیری حسگرهای دوران و پتانسیومترهای خطی.

در روش کنترل به کار گرفته شده، از خطای مستقیم فضای مفصلی، برای رسیدن عملگرها به طول مطلوب خود استفاده می شود. طبق آزمایش های عملی انجام شده، همان طور که اشاره شد به دلیل اینکه حلقه ی داخلی کنترلی حدود پنج برابر سریعتر از حلقه ی بیرونی می باشد، بنابراین هر پنج بار که طول عملگرها توسط حلقه ی داخلی با مقدار مطلوب خود مقایسه می شوند، یک بار حلقه ی بیرونی اجرا می شود و خطای باقیمانده را جبران می کند. اگر چنانچه فقط از حلقه ی داخلی و کنترل در فضای مفصلی استفاده شود، آن گاه هیچ فیدبکی از مجری نهایی ربات و هیچ تضمینی برای ردیابی مسیرهای مطلوب در نظر گرفته شده وجود نخواهد داشت. از طرفی کنترل در حلقه ی خارجی به تنهایی نمی تواند عملکرد مناسبی را ایجاد کند. به این دلیل که حلقه ی داخلی به علت سرعت بالاتر خود می تواند تا حد بسیار زیادی در هر بازه ی زمانی اعمال حلقه ی خارجی، مقادیر مطلوب در فضای کاری را تا حد زیادی به نسبت حالتی که حلقه ی داخلی وجود نداشته باشد، به مقادیر مطلوب در فضای مفصلی نزدیک کند و به کار ردیابی در فضای کاری کمک کند. به عبارت دیگر، وقتی حلقه ی خارجی یک بار انجام می گردد، در این بازه ی زمانی حلقه ی داخلی پنج بار این فرصت را پیدا

5-2- ردیابی مسیرهای مطلوب سینوسی

شش مسیر سینوسی مجزا شامل 3 حرکت طولی در راستای محورهای مختصات و 3 حرکت دورانی حول هر یک از محورهای مختصات مورد آزمایش قرار گرفته است. دلیل انتخاب این نوع مسیر این است که با توجه به استراتژی کنترلی به کار گرفته شده، ربات هگزاتار در هر یک از راستاهای طولی و دورانی خود (هر یک از درجات آزادی) به چه میزان می تواند دقت داشته باشد. در واقع کنترل ربات برای هر یک از درجات آزادی با مسیر مطلوب سینوسی و در عین حال حرکت در دیگر درجات آزادی صفر بماند. برای حرکات انتقالی مسیرهای مطلوب سینوسی با فرکانس 0.1 هرتز و دامنه ی 4 سانتی متر آزمایش شده است. همچنین برای حرکات دورانی، با مسیرهای مطلوب سینوسی با فرکانس 0.1 هرتز و دامنه ی زاویه ای 7.5 درجه آزمایش شده است. نمودارهای "اشکال 10 تا 15"، ردیابی مسیر مطلوب سینوسی برای حرکات انتقالی و دورانی را نشان می دهند.

معیار ریشه ی میانگین مربعات خطا برای مقدار خطای ردیابی ربات هگزاتار در هر یک از درجات آزادی خود در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب با اعمال کنترل کننده ی پسگام مدلغزشی و همچنین کنترل حلقه بسته به کمک استفاده از کنترل در فضای مفصل و فضای کاری ربات هگزاتار، ردیابی مسیرهای انتقالی سینوسی با خطای کمتر از 2 سانتی متر و برای مسیرهای دورانی، خطای کمتر از 3 درجه بدست آمد که نتایج آن در جدول 6 لیست شده است. مسیرهای مطلوب در کاربردهای واقعی شامل طیف های مختلف فرکانسی از موج های سینوسی می باشند. از این رو، انتخاب مسیرهای مطلوب سینوسی به عنوان معیار مناسبی برای آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است. زمانی که مسیرهای مطلوب به صورتی باشند که همزمان هم حرکت جابجایی خطی و هم حرکت دورانی باشد، آن گاه ردیابی مسیر مطلوب به مراتب دشوارتر خواهد بود. همچنین، هر چقدر فرکانس مسیر سینوسی بیشتر باشد، به تبع آن عملگرهای نیوماتیکی با خطای بیشتری به طول مطلوب خود خواهند رسید و در نتیجه ردیابی در فضای کاری با دقت کمتری انجام خواهد شد.

6- نتیجه گیری

در این مقاله، کنترل ردیابی مسیر یک ربات نیوماتیکی 6 درجه آزادی گاف-استوارت، با نام هگزاتار بررسی شد. بدین منظور، مدل دینامیکی سیستم نیوماتیکی هر شاخه از ربات هگزاتار شامل دینامیک پیستون و دینامیک فشارها در شیربرقی استخراج گردید. متغیرهای نامعلوم در معادلات دینامیکی سیستم نیوماتیکی ربات به کمک الگوریتم ژنتیک شناسایی شدند. همچنین، با استفاده از کنترل کننده ی پسگام مدلغزشی کنترل موقعیت عملگر نیوماتیکی ربات انجام گرفت. معادلات سینماتیکی ربات 6 درجه آزادی هگزاتار استخراج شد و به وسیله ی یک روش ابتکاری با نام روش هندسی حل

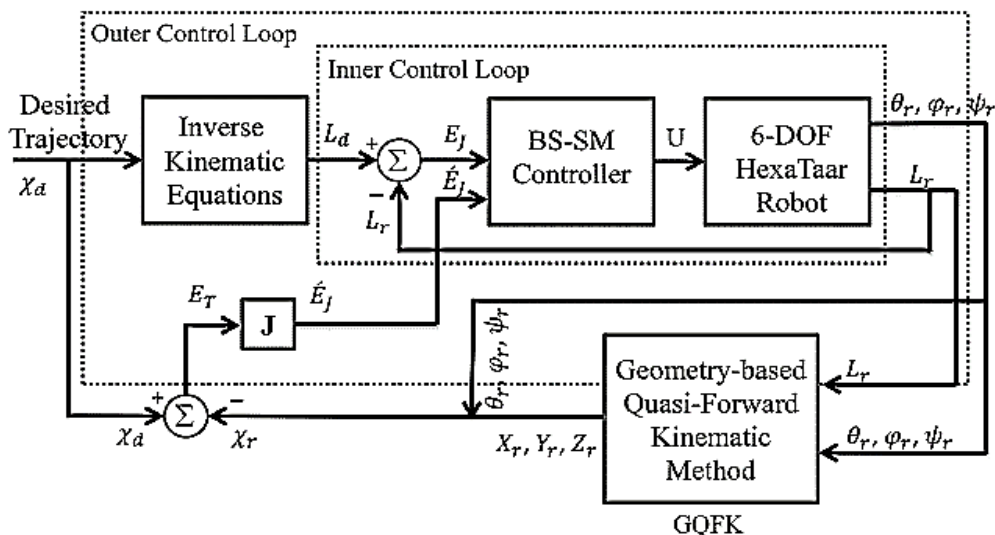


Fig. 9 Schematic of control loops for kinematic control of the 6-DoF HexaTaar robot

شکل 9 طرح‌واره‌ی حلقه‌های کنترلی به منظور کنترل سینماتیکی ربات 6 درجه آزادی گاف-استوارت

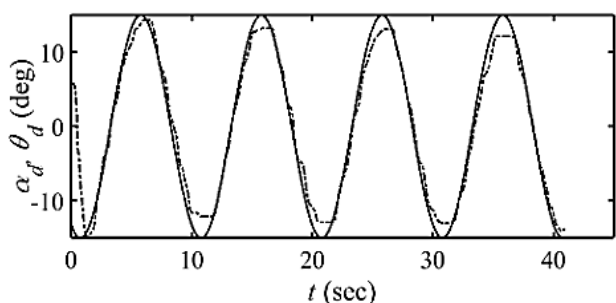


Fig. 13 Tracking sinusoidal trajectory around the X axis

شکل 13 ردیابی مسیر سینوسی مطلوب حول محور X.

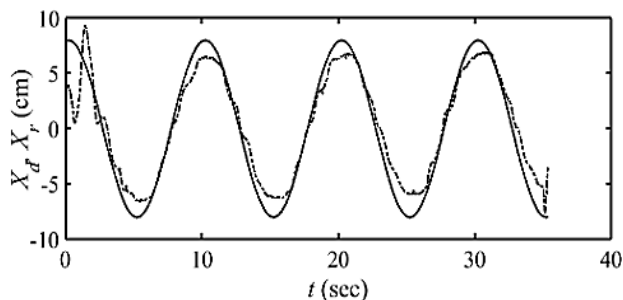


Fig. 10 Tracking sinusoidal trajectory along the X axis.

شکل 10 ردیابی مسیر سینوسی مطلوب در راستای محور X.

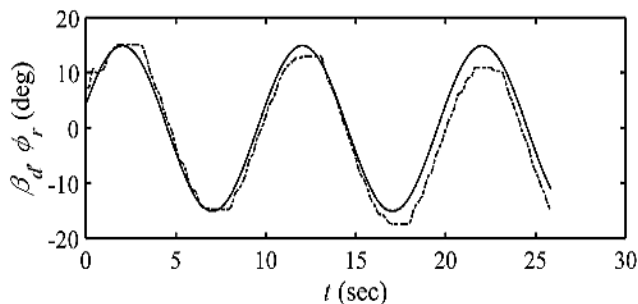


Fig. 14 Tracking sinusoidal trajectory around the Y axis

شکل 14 ردیابی مسیر سینوسی مطلوب حول محور Y.

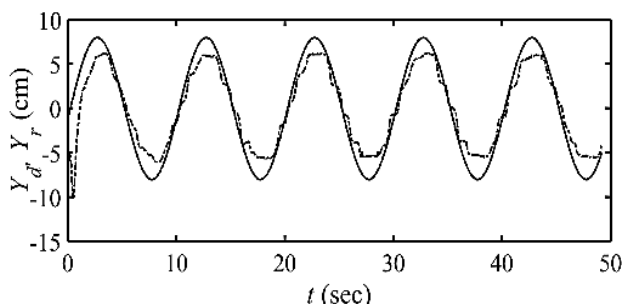


Fig. 11 Tracking sinusoidal trajectory along the Y axis.

شکل 11 ردیابی مسیر سینوسی مطلوب در راستای محور Y.

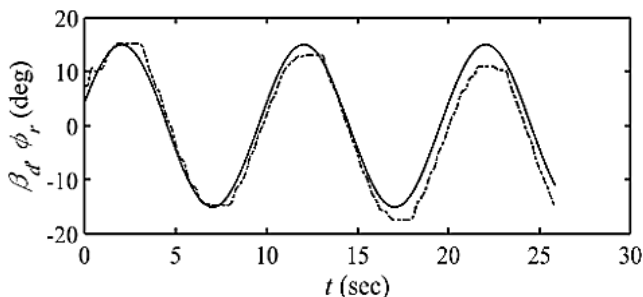


Fig. 15 Tracking sinusoidal trajectory around the Z axis

شکل 15 ردیابی مسیر سینوسی مطلوب حول محور Z.

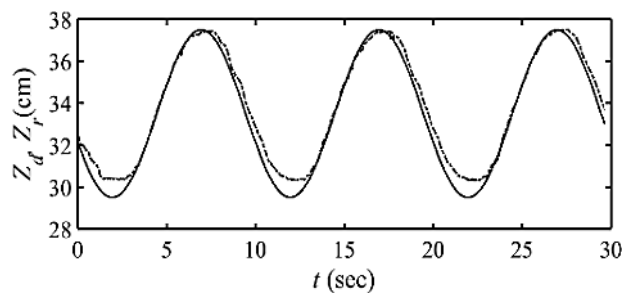


Fig. 12 Tracking sinusoidal trajectory along the Z axis.

شکل 12 ردیابی مسیر سینوسی مطلوب در راستای محور Z.

8- مراجع

- [1] J. P. Merlet, *Parallel Robots*, Springer Science & Business Media, Vol. 128, pp. 1-70, 2006.
- [2] H. Tari, H. J. Su, J. D. Hauenstein, Classification and complete solution of the kinestatics of a compliant Stewart-Gough platform, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 49, pp. 177-186, 2012.
- [3] A. Cirillo, P. Cirillo, G. De Maria, A. Marino, C. Natale, S. Pirozzi, Optimal custom design of both symmetric and unsymmetrical hexapod robots for aeronautics applications, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 44, pp. 1-16, 2017.
- [4] A. Rabbani, M. J. Nategh, D. Karimi, Machining free form surfaces with hexapod machine tool, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 395-400, 2016.
- [5] L. Yingjie, Z. Wenbai, R. Gexue, Feedback control of a cable-driven Gough-Stewart platform, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 22, No. 1, pp. 198-202, 2006.
- [6] J. Cabrera, A. Ortiz, A. Simon, F. Garcia, A. P. La Blanca, A versatile flat track tire testing machine, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 40, No. 4, pp. 271-284, 2003.
- [7] A. Rastegarpanah, M. Saadat, A. Borboni, Parallel robot for lower limb rehabilitation exercises, *Applied Bionics and Biomechanics*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-6, 2016.
- [8] Y. Pi, X. Wang, Trajectory tracking control of a 6-DOF hydraulic parallel robot manipulator with uncertain load disturbances, *Control Engineering Practice*, Vol. 19, No. 2, pp. 185-193, 2011.
- [9] J. H. Machiani, M. T. Masouleh, A. Kalhor, M. G. Tabrizi, F. Sanie, Control of a pneumatically actuated 6-DOF Gough-Stewart platform, *Robotics and Mechatronics (ICRoM) second RSI/ISM International Conference on*, pp. 166-171, 2014.
- [10] H. Bayani, M. M. Tale, A. Kalhor, Practical performance comparison of pole placement and sliding mode controller for position control of cable-driven parallel robots using visual servoing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 63-74, 2016.
- [11] S. K. Song, D. S. Kwon, Efficient formulation approach for the forward kinematics of 3-6 parallel mechanisms, *Advanced Robotics*, Vol. 16, No. 2, pp. 191-215, 2002.
- [12] R. Chellal, L. Cuvillon, E. Laroche, Model identification and vision-based H_{∞} position control of 6-DoF cable-driven parallel robots, *International Journal of Control*, Vol. 90, No. 4, pp. 684-701, 2017.
- [13] A. Salimi, Lafmejani, A. Kalhor, M. T. Masouleh, A new development of Homotopy continuation method, applied in solving nonlinear kinematic system of equations of parallel mechanisms, *Robotics and Mechatronics (ICRoM) third RSI International Conference on*, pp. 737-742, 2015.
- [14] A. Mahmoodi, A. Sayadi, M. B. Menhaj, Solution of forward kinematics in Stewart platform using six rotary sensors on joints of three legs, *Advanced Robotics*, Vol. 28, No. 1, pp. 27-37, 2014.
- [15] K. S. Grewal, R. Dixon, J. Pearson, LQG controller design applied to a pneumatic stewart-gough platform, *International Journal of Automation and Computing*, Vol. 9, No. 1, pp. 45-53, 2012.
- [16] D. Pršić, N. Nedić, V. Stojanović, A nature inspired optimal control of pneumatic-driven parallel robot platform, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 231, No. 1, pp. 59-71, 2017.
- [17] H. Takemura, T. Onodera, D. Ming, H. Mizoguchi, Design and control of a wearable stewart platform-type ankle-foot assistive device, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 9, No. 5, pp. 202, 2012.
- [18] Q. Zhao, N. Wang, B. F. Spencer Jr, Adaptive position tracking control of electro-hydraulic six-degree-of-freedom driving simulator subject to perturbation, *Simulation*, Vol. 91, No. 3, pp. 265-275, 2015.
- [19] B. Achili, B. Daachi, Y. Amirat, A. Ali-Cherif, A robust adaptive control of a parallel robot, *International Journal of Control*, Vol. 83, No. 10, pp. 2107-2119, 2010.
- [20] H. Abdellatif, B. Heimann, Advanced model-based control of a 6-DOF hexapod robot: A case study, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, Vol. 15, No. 2, pp. 269-279, 2010.
- [21] E. Yime, R. Saltaren, J. Diaz, Robust adaptive control of the Stewart-Gough robot in the task space, *American Control Conference (ACC), IEEE*, pp. 5248-5253, 2010.
- [22] R. Kumar, A. Chalanga, B. Bandyopadhyay, Smooth integral sliding mode controller for the position control of Stewart platform, *ISA Transactions*, Vol. 58, pp. 543-551, 2015.
- [23] N. Andreff, P. Martinet, Unifying kinematic modeling, identification, and control of a Gough-Stewart parallel robot into a vision-based framework, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 22, No. 6, pp. 1077-1086, 2006.
- [24] V. Rosenzweig, S. Briot, P. Martinet, E. Özgür, N. Bouton, A method for simplifying the analysis of leg-based visual servoing of parallel robots, *Proceeding of IEEE*, pp. 5720-5727.
- [25] A. Salimi, Lafmejani, M. T. Masouleh, A. Kalhor, An experimental study on friction identification of a pneumatic actuator and dynamic modeling of a proportional valve, *Robotics and Mechatronics (ICRoM) fourth RSI International Conference on*, pp. 166-172, 2016.
- [26] W. H. Yuan, M. S. Tsai, A novel approach for forward dynamic analysis of 3-PRS parallel manipulator with consideration of friction effect, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 30, No. 3, pp. 315-325, 2014.

جدول 6 ریشه‌ی میانگین مجموع مربعات خطا ردیابی مسیرهای مطلوب سینوسی در راستا و حول محورهای مختصات

Table 6 Root mean square error of trajectory tracking for sinusoidal translations and rotations along and around axes.

معیار	خطای حرکت انتقالی در			خطای حرکت دورانی حول		
	راستای محور	محور		محور	محور	
	X	Y	Z	X	Y	Z
ریشه‌ی میانگین مربعات خطا	1.163	1.242	0.233	1.216	1.892	2.563

سینماتیک شبه مستقیم موقعیت مجری نهایی ربات بدست آمد. بنابراین با توجه به کنترل کننده‌ی پسگام جهت کنترل عملگرهای ربات و همچنین روش پیشنهادی محاسبه‌ی موقعیت مجری نهایی، کنترل موقعیت ربات هگزاتار انجام شد. کنترل این ربات هم در فضای مفاصل و هم در فضای کاری ربات و به صورت همزمان اجرا شد. در نهایت، مساله ردیابی مسیرهای مطلوب، به منظور سنجش میزان کارایی روش‌های پیشنهاد شده در نظر گرفته شد که نتایج آزمایش‌های عملی، مسیرهای مطلوب سینوسی را برای حرکات انتقالی با خطای 2 سانتی‌متر و برای حرکات دورانی با خطای 3 درجه ردیابی شد.

7- فهرست علائم

A_i	سطح محفظه (m^2)
A_r	سطح میله پیستون (m^2)
A_v	سطح اریفیس شیربرقی (m^2)
a	شتاب پیستون (ms^{-2})
B	ضریب ویسکوزیته (NSm^{-1})
C_d	ضریب تخلیه شیربرقی
C_v	ثابت شیربرقی
C_d	ضریب تخلیه شیربرقی
C_v	ثابت شیربرقی
F_c	اصطکاک کولمب (N)
F_f	نیروی اصطکاک (N)
F_s	اصطکاک ایستایی (N)
g	ضریب جاذبه (ms^{-2})
k	ثابت گرمای ویژه
L	طول عملیاتی عملگر (m)
M	جرم پیستون (kg)
R	ثابت جهانی گاز
T_s	دما (K)
u	ولتاژ ورودی (V)
V_0	حجم مرده (m^3)
V_i	حجم محفظه (m^3)
V_0	حجم مرده (m^3)
v	سرعت پیستون (ms^{-1})
v_s	سرعت استریک (ms^{-1})
X_s	جابجایی اسپول (m)
x	موقعیت پیستون (m)

- [29] G. Kothapalli, M. Y. Hassan, Design of a neural network based intelligent PI controller for a pneumatic system, *IAENG International Journal of Computer Science*, Vol. 35, No. 2, pp. 217-225, 2008.
- [30] B. McCarron, *Low-Cost IMU Implementation via Sensor Fusion Algorithms in the Arduino Environment*
- [27] X. B. Tran, H. Yanada, Dynamic friction behaviors of pneumatic cylinders, *Intelligent Control and Automation*, Vol. 4, No. 2, pp. 1-180, 2013.
- [28] S. Ramezani, S. M. Rezaei, M. Zareinejad, K. Baghestan, Control of pneumatic servo system based on simultaneous pressure observing on both sides of the cylinder by high-gain observer, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, 2015.