



کالیبراسیون سینماتیکی و جبران‌سازی خطای موقعیت‌دهی مدل ربات پوما

احمد خالقیان^۱، بهنام داداش‌زاده^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکترونیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۲- استادیار، مهندسی مکترونیک، دانشگاه تبریز، تبریز

* تبریز، صندوق پستی ۵۱۶۷۴۱۶۶۶۱، b.dadashzadeh@tabrizu.ac.ir

چکیده

در این مقاله به افزایش دقت موقعیت‌دهی ابزار نصب شده روی بازوی ربات‌های صنعتی از طریق اصلاح نرم‌افزاری پرداخته شده‌است. روش کالیبراسیون پیشنهادی روی مدل ربات استاندارد پوما شبیه‌سازی می‌شود و برای انواع ربات‌های ماشین‌کاری قابل تعمیم است. مدل سینماتیکی ربات به روش دیناوت- هارتنبرگ استخراج شده و ماتریس ژاکوبین برای آن محاسبه می‌گردد. بعد از اندازه‌گیری اختلاف بین موقعیت نامی و موقعیت واقعی پنجه ربات از روش حداقل مربعات خطا برای شناسایی پارامترهای سینماتیکی صحیح استفاده می‌شود. در نهایت مقدار اصلاح زوایای هر مفصل برای جبران‌سازی خطا محاسبه گردیده و به مدل سینماتیکی اعمال می‌شود. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی نرم افزاری نشان دهنده آن است که پارامترهای سینماتیکی نامعین به درستی شناسایی شده و دقت موقعیت‌دهی توسط این الگوریتم به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند. **کلیدواژه‌ها:** کالیبراسیون، حداقل مربعات خطا، شناسایی پارامترهای سینماتیکی، ربات پوما

Kinematic Calibration and Positioning Error Compensation for the Puma Robot Model

Ahmad Khaleghian, Behnam Dadashzadeh*

Department of Mechatronics Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* P.O.B. 5167416661 Tabriz, Iran, b.dadashzadeh@tabrizu.ac.ir

ABSTRACT

This paper presents a method to improve positioning accuracy of end-effector tool of manipulators based on modifying the controller software. The proposed calibration method is simulated on 6 DOF Puma manipulator and can be generalized for other types of machining robots. The kinematic model of the robot was derived using Denavit - Hartenberg method and its Jacobian matrix was calculated. After measuring the difference between nominal and real position on end effector, least squares method is used for identifying the correct kinematic parameters. Finally, the joints angles corrections were calculated for compensating the errors and implemented on the kinematic model. The results showed that the kinematic parameters were well identified by this algorithm and positioning accuracy was improved significantly.

Keywords: Calibration, Kinematic Parameters Identification, Least Squares Method, Puma Robot.

باشد. خطاهای هندسی را می‌توان انحراف در پارامترهای مدل سینماتیکی ربات معرفی کرد. منظور از خطاهای غیرهندسی اصطکاک، اینرسی، بار اعمالی به ربات و دما می‌باشند. نتایج تجربی گزارش شده در [۱] نشان دهنده آن است که ۹۵٪ عدم دقت در موقعیت‌دهی ربات‌های بازو از خطاهای هندسی ناشی می‌شوند.

هدف از کالیبراسیون، شناسایی و جبران‌سازی خطا در مدل سینماتیکی ربات برای افزایش دقت موقعیت‌دهی و جهت‌گیری آن می‌باشد. این روش توسط نصب کننده دستگاه و کاربر نهایی آن قابل اجرا می‌باشد و باعث بهبود عملکرد ربات و قابل استفاده نگهداشتن آن برای مدت زمان طولانی‌تر می‌شود. کالیبراسیون سینماتیکی ربات دارای چهار مرحله می‌باشد [۲]:

- ۱- مدل‌سازی سینماتیکی ربات
 - ۲- اندازه‌گیری موقعیت پنجه ربات
 - ۳- شناسایی انحراف در پارامترهای سینماتیکی ربات
 - ۴- جبران‌سازی خطا در فضای مفصل‌های ربات
- مدل سینماتیکی برای توصیف موقعیت و جهت‌گیری بازوهای ربات مورد

۱- مقدمه

امروزه ربات‌ها در صنایع مختلف مورد استفاده گسترده قرار گرفته‌اند. مشخصات عملکردی ربات‌های صنعتی را می‌توان حداکثر نیروی اعمالی در پنجه ربات، سرعت، تکرارپذیری و دقت ربات برشمرد. دقت ربات ارتباط مستقیمی با کیفیت ساخت و مونتاژ اجزای مکانیکی آن دارد. یکی از راه‌های افزایش دقت ربات در نظرگیری تلرانس‌های دقیق‌تر در زمان ساخت اجزای آن می‌باشد. به‌کمک این روش اندازه اجزای مکانیکی به مقادیر نامی تعریف شده در سیستم کنترلی آن نزدیک‌تر می‌شود. اما در عمل این روش تنها توسط سازنده ربات قابل پیاده‌سازی است و به‌صورت چشمگیری باعث افزایش هزینه‌های ساخت ربات می‌گردد. از نقاط ضعف دیگر این روش می‌توان به عدم کارآمدی آن در مورد عواملی همچون سایش اجزای مکانیکی، اثرات دما و تغییرات ناشی از برخورد ربات با موانع که در هنگام به کارگیری ربات بروز می‌کنند و باعث خطا در موقعیت‌دهی آن می‌شوند اشاره کرد.

خطا در موقعیت‌دهی ربات می‌تواند ناشی از خطاهای هندسی و غیر هندسی

Please cite this article using:

A. Khaleghian, B. Dadashzadeh, Kinematic Calibration and Positioning Error Compensation for the Puma Robot Model, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 506-510, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

پنجه توسط تغییرات مکانی n مفصل تعیین می‌گردد [۱۲]. روش دیناویت- هارتنبرگ به‌عنوان یک روش قانونمند توصیف ارتباط سینماتیکی مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۱، روش تعریف پارامترهای دیناویت- هارتنبرگ برای یک جفت بازو مجاور در یک زنجیره باز سینماتیکی نمایش داده شده است. به‌کمک چهار پارامتر a, d, α, θ می‌توان موقعیت نسبی دو سیستم مختصات را به‌طور کامل بیان کرد. پارامترهای a, d, α پارامترهای ثابتی هستند که از هندسه لینک تعیین می‌شوند. پارامتر θ متغیر است و با حرکت مفاصل تغییر می‌کند. در روش دیناویت- هارتنبرگ از ماتریس ${}^{i-1}T_i$ برای نشان دادن موقعیت و جهت‌گیری سیستم مختصات i نسبت به سیستم مختصات $i-1$ استفاده می‌شود. این ماتریس به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود. رابطه (۲) معادله سینماتیکی بازوی مکانیکی نام‌گذاری شده است که نشانگر رابطه بین موقعیت و جهت‌گیری پنجه ربات نسبت به پایه مرجع می‌باشد.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^bT = {}^bT_0 \times {}^0T_1 \times {}^1T_2 \times {}^2T_3 \times {}^3T_4 \times {}^4T_5 \times {}^5T_6 \quad (2)$$

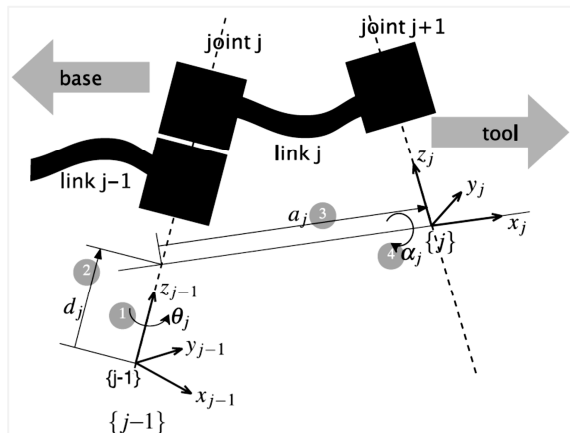
۲-۲- ماتریس ژاکوبین

مفهوم ژاکوبین را می‌توان تاثیر تغییرات کوچک در پارامترهای سینماتیکی بر روی موقعیت پنجه ربات تعریف کرد. این مفهوم در رابطه (۳) بیان شده است. در رابطه (۳)، k نشان دهنده مدل سینماتیکی ربات می‌باشد که از رابطه (۲) بدست می‌آید. برای محاسبه ژاکوبین (ψ) به‌صورت تحلیلی، از ماتریس سینماتیک مستقیم نسبت به هر یک از پارامترهای سینماتیکی (a, d, α, θ) مشتق گرفته می‌شود. این روش در رابطه (۴) نشان داده شده است. برای محاسبه ماتریس ژاکوبین به‌صورت عددی رابطه (۵) به‌کار گرفته می‌شود در این رابطه ζ نشان دهنده پارامترهای سینماتیکی و k مدل سینماتیکی رابطه (۲) می‌باشد [۱۳].

$$\Delta x = \frac{\partial k}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial k}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial k}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial k}{\partial a} \Delta a \quad (3)$$

$$\psi = \left[\frac{\partial x}{\partial \theta_1} \dots \dots \dots \frac{\partial x}{\partial \alpha_4} \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \zeta} = \frac{k(\zeta + \delta \zeta) - k(\zeta)}{\delta \zeta} \quad (5)$$



شکل ۱ تعریف پارامترهای دیناویت- هارتنبرگ [۱۴]

استفاده قرار می‌گیرد. تاکنون روش‌های مختلفی برای تعریف مدل سینماتیکی ربات‌های صنعتی ارائه شده‌اند. از پرکاربردترین آن‌ها می‌توان به روش دیناویت - هارتنبرگ [۳] اشاره کرد. این روش از کمترین تعداد پارامتر برای توصیف کامل ارتباط سینماتیکی استفاده می‌کند. مشکل استفاده از این روش را می‌توان تکین بودن ماتریس تبدیل همگن آن عنوان کرد. حیاتی [۴] روشی برای رفع تکین بودن ماتریس تبدیل مدل دیناویت- هارتنبرگ ارائه کرد. در روش حیاتی یک پارامتر برای تعریف مفاصل موازی به پارامترهای روش دیناویت- هارتنبرگ اضافه شده است. مدل‌های سینماتیکی دیگری نیز برای تعریف سینماتیک ربات‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از آن میان می‌توان به روش مدل- اس اشاره کرد. در روش مدل- اس از شش پارامتر برای توصیف سینماتیک هر بازو استفاده می‌شود [۵].

در مرحله اندازه‌گیری، موقعیت واقعی پنجه ربات در محیط عملکردی آن اندازه‌گیری شده و با موقعیت نامی حاصل از محاسبات سینماتیک مستقیم ربات مقایسه می‌شود. هدف از این مرحله پیدا کردن مقدار خطا در موقعیت دهی پنجه ربات در یک پیکربندی مشخص ربات می‌باشد. دقت بالاتر در سیستم اندازه‌گیری منجر به شناسایی صحیح تر پارامترهای سینماتیکی ربات می‌شود. از ابزارهایی که برای اندازه‌گیری موقعیت در کالیبراسیون ربات مورد استفاده قرار گرفته‌اند، می‌توان به دنبال کننده‌های لیزری [۶]، استفاده از دوربین‌ها و پردازش تصویر [۸،۷] و استفاده از انواع پروب‌های مکانیکی، اپتیکی و لیزری [۹] اشاره کرد.

برای شناسایی انحراف در پارامترهای سینماتیکی معمولاً روش‌های عددی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مرحله با به‌کارگیری روش‌های شناسایی سیستم مانند روش حداقل مربعات خطا به تخمین مقدار صحیح پارامترها پرداخته می‌شود. روش‌های پیشرفته دیگری برای تخمین پارامترها مانند روش حد اکثر احتمال نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۰]. در برخی مطالعات از فیلتر کالمن برای افزایش دقت تخمین پارامترها با در نظر گرفتن واریانس خطا در ابزار اندازه‌گیری استفاده شده است [۱۱]. جبران‌سازی آخرین مرحله کالیبراسیون ربات می‌باشد که در آن پارامترهای اصلاحی به- دست آمده از مرحله شناسایی به سیستم کنترلی ربات اعمال می‌شود. جبران سازی در فضای مفصل به دلیل پیچیدگی تغییر پارامترها در کنترل کننده ربات مورد توجه قرار گرفته است [۱۲].

در این مقاله به شبیه‌سازی اندازه‌گیری و شناسایی خطاهای مدل سینماتیکی ربات پوما ۵۶۰ پرداخته می‌شود. در بخش ۲ مدل‌سازی سینماتیکی ربات بر مبنای روش دیناویت- هارتنبرگ شرح داده شده و محاسبه ماتریس ژاکوبین معرفی می‌گردد. در بخش ۳ استفاده از روش حداقل مربعات خطا برای شناسایی خطا در پارامترها و جبران‌سازی آن‌ها شرح داده می‌شود. در بخش ۴ روش ارائه شده در بخش‌های قبلی، بر روی ربات شش درجه آزادی پوما ۵۶۰ شبیه‌سازی شده و نتایج کالیبراسیون گزارش داده می‌شوند. در بخش ۵ جمع بندی نتایج بدست آمده ارائه می‌گردد.

۲- تعریف مدل سینماتیکی ربات

۲-۱- روش دیناویت - هارتنبرگ

از دیدگاه سینماتیکی، یک ربات بازو از $n+1$ اهرم که توسط n مفصل به یکدیگر متصل شده‌اند تشکیل می‌شود. حرکت نسبی لینک‌های مجاور به وسیله حرکت مفصل متصل بین دو بازو به وجود می‌آید. هر مفصل توسط یک موتور محرک مستقل به حرکت در می‌آید. بنابراین موقعیت و جهت

۳- شناسایی انحراف پارامترهای هندسی

مدل سینماتیکی ربات را می‌توان به صورت رابطه (۶) بیان کرد. در این رابطه بردار پارامترهای سینماتیکی بر مبنای روش دیناویت-هارتنبیگ می‌باشد. در رابطه (۶)، x به موقعیت پنجه ربات اختصاص یافته است. موقعیت اندازه گیری شده با xme و موقعیت نامی با xno تعریف گردیده است. $\Delta x = xme - xno$ نشان دهنده دقت موقعیت دهی ربات در یک پیکربندی مشخص می‌باشد. برای شناسایی مقدار انحراف در پارامترهای سینماتیکی می‌توان رابطه (۶) را به صورت رابطه (۷) نوشت. در این رابطه $\Delta \zeta = \zeta me - \zeta no$ است و Ψ نشان دهنده ژاکوبین $\delta k / \delta \zeta$ می‌باشد. هدف از کالیبراسیون سینماتیکی محاسبه $\Delta \zeta$ یا همان انحراف پارامترها با دانستن xno ، اندازه گیری xme می‌باشد. رابطه (۷) از m معادله (نقاط اندازه گیری) و h مجهول (پارامترهای سینماتیکی) تشکیل می‌شود که در رابطه (۸) نشان داده شده است. در این رابطه دقت موقعیت دهی و ژاکوبین برای هر پیکربندی محاسبه می‌شود. برای محاسبه $\Delta \zeta$ در رابطه (۸) از روش حداقل مربعات خطا که در رابطه (۹) نشان داده شده است، استفاده می‌شود. پارامترهای شناسایی شده ζ' در هر تکرار توسط رابطه (۱۰) نمایش داده شده‌اند. این پروسه برای هر تکرار تا رسیدن به دقت مطلوب $\Delta \zeta$ ادامه پیدا می‌کند. نکته مهم در این روابط آن است که بعد از بدست آمدن ζ' ، ماتریس ژاکوبین در تکرار بعدی بر اساس ζ' جدید محاسبه می‌شود.

در مرحله آخر از طریق اصلاح زاویه مفصل‌های ربات، به جبران‌سازی خطای مدل سینماتیکی ربات پرداخته می‌شود. روابط (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) برای محاسبه مقادیر اصلاح زوایا مورد استفاده قرار می‌گیرند. در رابطه (۱۱)، z (ژاکوبین) تنها نسبت به پارامترهای زاویه مفصل تعریف شده است. در رابطه (۱۲) روش محاسبه تحلیلی ژاکوبین نسبت به زوایای مفصل‌های اول تا سوم نشان داده شده است. در رابطه (۱۳) روش محاسبه ماتریس ژاکوبین به صورت عددی نشان داده شده است

$$x = k(\zeta) \quad (6)$$

$$\Delta x = \psi(\zeta) \cdot \Delta \zeta \quad (7)$$

$$\Delta \bar{x} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \vdots \\ \psi_n \end{bmatrix} \Delta \zeta = \bar{\psi} \Delta \zeta \quad (8)$$

$$\Delta \zeta = (\psi^T \psi)^{-1} \psi^T \Delta x \quad (9)$$

$$\zeta' = \zeta + \Delta \zeta \quad (10)$$

$$\Delta \theta = j^{-1} \times \Delta x \quad (11)$$

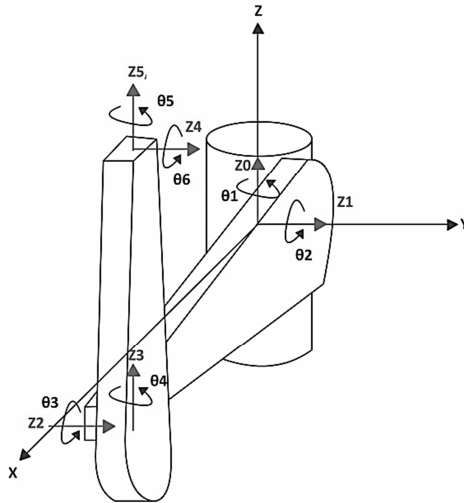
$$j = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \theta} = \frac{k(\theta + \delta \theta) - k(\theta)}{\delta \theta} \quad (13)$$

۴- شبیه سازی کالیبراسیون ربات پوما

در این بخش به شناسایی مقادیر صحیح ۱۲ پارامتر از پارامترهای دیناویت-هارتنبیگ ربات پوما که در بردار (۱۴) نشان داده شده‌اند پرداخته می‌شود. در شکل ۲، محورهای مختصات ربات بر اساس روش دیناویت-هارتنبیگ تعیین شده و پارامترهای متناظر با آن‌ها در جدول ۱، نمایش داده شده‌اند.

$$\zeta = [\theta_1, a_1, \theta_2, a_2, \theta_3, a_3, \theta_4, a_4, \theta_5, a_5, \theta_6, a_6]^T \quad (14)$$



شکل ۲ تعریف محورهای مختصات ربات پوما

جدول ۱ پارامترهای دیناویت - هارتنبیگ ربات پوما [۳]

بازو	θ (rad)	d (mm)	a (mm)	α (rad)
۱	θ_1	.	.	$-\pi/2$
۲	θ_2	.	۶۰۰	.
۳	θ_3	۲۰۰	۱۵	$\pi/2$
۴	θ_4	۵۰۰	.	$-\pi/2$
۵	θ_5	.	.	$\pi/2$
۶	θ_6	.	.	.

در این تحقیق برای شبیه‌سازی ربات پوما ۵۶۰ و انجام محاسبات مربوط به شناسایی پارامترها از نرم‌افزار متلب و جعبه ابزار روباتیک [۱۵] استفاده شده است. در شکل ۳ شبیه‌سازی ربات پوما برای زوایای مفصل صفر در نرم‌افزار متلب نمایش داده شده است.

با توجه به مطالب اشاره شده در بخش ۳، رابطه (۷) دارای ۳ معادله (مختصات x, y, z ، پنجه ربات) و ۱۲ مجهول (پارامترهای کالیبراسیون رابطه (۱۴) می‌باشد. پس حداقل به ۴ موقعیت مختلف برای شناسایی پارامترها در هر تکرار نیاز می‌باشد. در این شبیه‌سازی برای شناسایی دقیق‌تر پارامترها از اندازه‌گیری ۱۰ موقعیت مختلف در هر تکرار برای محاسبه خطا استفاده می‌شود. در شکل ۴، ۱۰ پیکربندی که برای اندازه‌گیری در تکرار اول کالیبراسیون ربات در نظر گرفته شده‌اند نشان داده شده و موقعیت‌های متناظر با آن‌ها در جدول ۲ نمایش داده شده‌اند.

برای شبیه‌سازی اندازه‌گیری موقعیت واقعی ربات در محیط عملکردی آن از مدل سینماتیکی ربات به همراه پارامترهای دارای انحراف از مقدار نامی استفاده شده است. پارامترهای دارای انحراف به مدل سینماتیکی اعمال شده و مدلی جدید تشکیل می‌دهند که خروجی آن موقعیت و جهت‌گیری پنجه ربات با در نظر گرفتن سینماتیک دارای انحراف می‌باشد. با اضافه کردن خطای ابزار اندازه‌گیری موقعیت واقعی ربات شبیه‌سازی شده است. با مقایسه موقعیت نامی ربات و موقعیت واقعی آن، خطای دقت موقعیت‌دهی ربات در هر پیکربندی استخراج می‌گردد.

بعد از بدست آمدن مقدار خطا و محاسبه ماتریس ژاکوبین از رابطه (۵) برای پیکربندی‌های متناظر با هر یک از موقعیت‌های جدول ۲، مقدار اصلاح

رسیدن مقدار اصلاح پارامترها به $\Delta\zeta < 0.01$ ادامه پیدا کرده است. در شبیه سازی صورت گرفته بعد از ۴ تکرار، مقدار اصلاح پارامترها به مقدار مطلوب خود رسیده است. در جدول ۳ مقدار خطای تعریف شده برای هر پارامتر و مقادیر شناسایی شده توسط روش حداقل مربعات خطا در تکرار اول و چهارم نمایش داده شده است. این جدول نشان دهنده آن است که مقدار خطای پارامترها با دقت مورد نظر صحیح شناسایی شده اند. شکل های ۵ و ۶ نشان دهنده خطای موقعیت دهی ربات در ۴۰ موقعیتی که در طول فرایند کالیبراسیون اندازه گیری شده اند می باشد. در این شکل ها به وضوح مشهود است که دقت موقعیت دهی ربات در هر تکرار افزایش پیدا کرده است. مرحله نهایی شبیه سازی به جبران سازی خطاها از طریق اصلاح زوایای مفصل ها اختصاص دارد. در این مرحله افزایش دقت موقعیت دهی ربات برای یک موقعیت نمونه مانند $P = [300, 800, -300]$ (mm) از طریق اصلاح زوایای مفصل های اول تا سوم مدنظر قرار گرفته است. زوایای متناظر با موقعیت P از سینماتیک معکوس ربات بدست آمده اند. این زوایا به سینماتیک مستقیم اصلاح شده در مرحله قبل اعمال شده اند. جدول ۴ مقدار خطا در موقعیت دهی نقطه P را قبل از مرحله جبران سازی نشان می دهد. به کمک روابط (۱۱) و (۱۳) مقادیر اصلاح پارامترهای $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3$ محاسبه شده و نتایج در جدول ۵ نشان داده شده اند. با اعمال اصلاح پارامترهای $\theta + \Delta\theta$ به سینماتیک مستقیم ربات، موقعیت بدست آمده برای موقعیت P محاسبه شده است. موقعیت ربات بعد از مرحله جبران سازی برای نقطه P در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج جدول ۶ نشانگر دقت بالای موقعیت دهی ربات بعد از فرآیند کالیبراسیون می باشند. در این مطالعه برای اعتبارسنجی نتایج و مدل سینماتیکی ربات، از مقایسه مدل سینماتیکی محاسبه شده و مدل سینماتیکی ربات پوما ۵۶۰ گزارش داده شده در مقاله [۱۶] استفاده شده است.

جدول ۴ خطا قبل از کالیبراسیون موقعیت P

Δx (mm)	-۱/۷۲۷۳
Δy (mm)	-۱/۱۳۴۹
Δz (mm)	۶/۴۷۴۲

جدول ۵ مقدار اصلاح زوایای متناظر با موقعیت P

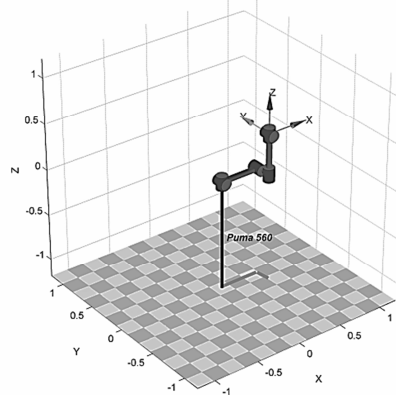
$\Delta\theta_1$ (rad)	۰/۰۰۱۱
$\Delta\theta_2$ (rad)	-۰/۰۰۰۵
$\Delta\theta_3$ (rad)	-۰/۰۰۰۵

جدول ۲، ۱۰ موقعیت مطلوب برای کالیبراسیون ربات در تکرار اول

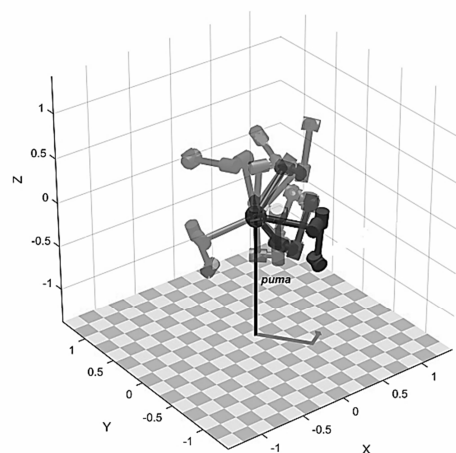
	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
X[mm]	۳۰۳/۰	-۳۶۷/۵	-۳۴۰/۸	۶۹۶/۲	۲۸۲/۰	۶۶۲/۴	۵۷۱/۴	۶۲۷/۶	۱۷۲/۲	۵۰۰/۵
Y[mm]	۳۴۹/۳	۲۷۴/۰	۵۸۶/۵	۲۴/۸	۵/۲	-۴۴/۰	۱۳۹/۰	-۴۷/۵	۱۷۶/۸	-۳۴۸/۲
Z[mm]	۶۴۸/۸	-۵۸۳/۸	۵۰۲/۹	۷۸۸/۸	-۹۷/۹	-۵۷/۱	۱۰/۵	-۳۰/۴	-۳/۴	-۵۲۵/۶

جدول ۳ اصلاح پارامترهای شناسایی شده در تکرار اول و چهارم

$\Delta\theta_1$	$\Delta\alpha_1$	$\Delta\theta_2$	$\Delta\alpha_2$	$\Delta\theta_3$	$\Delta\alpha_3$	$\Delta\theta_4$	$\Delta\alpha_4$	$\Delta\theta_5$	$\Delta\alpha_5$	$\Delta\theta_6$	$\Delta\alpha_6$	
(mrad)	(mm)	(mrad)	(mm)	(mrad)	(mm)	(mrad)	(mm)	(mm)	(mm)	(mrad)	(mm)	
۱/۵۴۸۹	۱/۸۴۹۱	۳/۴۷۳۵	۱/۷۴۰۹	-۰/۱۸۸۸	۰/۷۱۴۷	۱/۷۱۰۷	-۳/۱۰۹	۲/۵۱۸۶	-۰/۱۴۱۴	۱/۴۶۸۴	۳/۱۴۸۰	خطا
۱/۵۵۹۱	۱/۸۴۷۰	۳/۴۸۳۹	۱/۷۳۶۳	-۰/۲۵۴۸	۰/۹۴۳۹	۰	-۳/۱۰۶	۰	-۰/۱۴۰۳	۰	۳/۱۴۹۱	تکرار اول
۱/۵۴۷۶	۱/۸۴۸۳	۳/۴۷۴۶	۱/۷۴۲۲	-۰/۲۵۲۰	۰/۶۸۱۵	۱/۶۰۸۳	۳/۱۱۰	۳/۰۸۰۱	-۰/۱۴۰۴	۱/۵۱۳۸	۳/۱۴۹۲	تکرار چهارم



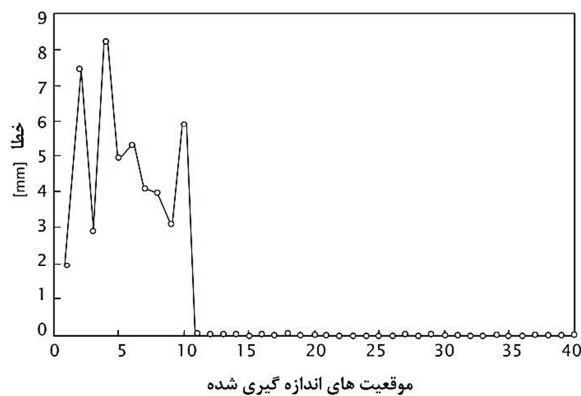
شکل ۳ شبیه سازی ربات پوما در نرم افزار متلب



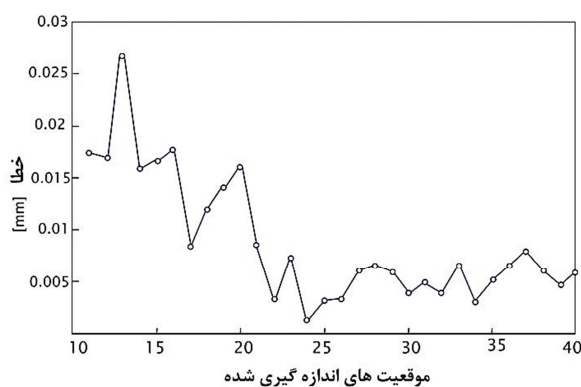
شکل ۴، ۱۰ موقعیت مطلوب کالیبراسیون در تکرار اول

پارامترها $\Delta\zeta$ از رابطه (۹) محاسبه شده است. مقدار انحراف پارامترهای شناسایی شده در تکرار اول در جدول ۳ نمایش داده شده است. این مقادیر همان طور که در رابطه (۱۰) بیان شده است به مقادیر اولیه پارامترهای سینماتیکی اضافه شده و این الگوریتم دوباره اجرا می شود. این فرایند تا

- [3] Craig, John J, Introduction to robotics: mechanics and control. *Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson/Prentice Hall*, 2005.
- [4] Hayati, S. A., and M. Mirmirani. A software for robot geometry parameter estimation, in *the Robots West Conference*. 1984.
- [5] Stone, Henry W, *Kinematic modeling, identification, and control of robotic manipulators*. Vol. 29. Springer Science & Business Media, 1987.
- [6] Gan, Yahui, and Xianzhong Dai. Base frame calibration for coordinated industrial robots, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol 59, No7, pp.563-570, 2011.
- [7] Ha, In-Chul. Kinematic parameter calibration method for industrial robot manipulator using the relative position, *Journal of mechanical science and technology*, Vol 22, No6, pp.1084-1090, 2008.
- [8] Xueyou, and Y. E. Shenghua. Method of robot calibration based on laser tracker, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Vol 9, pp.40, 2007.
- [9] He, Ruiho, et al. Experimentation on identifying the kinematic parameters of serial mechanism based on the product-of-exponential formula. *Jiqiren(Robot)*, Vol 33, No1, 2011.
- [10] Renders, J-M., et al. Kinematic calibration and geometrical parameter identification for robots, *Robotics and Automation*, IEEE Transactions, Vol 7, No6, pp.721-732, 1991.
- [11] Du, Guanglong, Ping Zhang, and Di Li. Online robot calibration based on hybrid sensors using Kalman Filters, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol 31, pp.91-100, 2015.
- [12] Elatta, A. Y, et al. An overview of robot calibration. *Information Technology Journal*, Vol 3, No1, pp.74-78, 2004.
- [13] Asada, Haruhiko, and J-JE Slotine. *Robot analysis and control*. John Wiley & Sons, 1986.
- [14] Corke, Peter. Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB, *Springer Science & Business Media*, Vol73, 2011.
- [15] Corke, Peter. A robotics toolbox for MATLAB, *Robotics & Automation Magazine*, IEEE, Vol 3, No1, pp.24-32, 1996.
- [16] Paul, Richard P., and Hong Zhang. Computationally efficient kinematics for manipulators with spherical wrists based on the homogeneous transformation representation. *The International Journal of Robotics Research*, Vol 5, No2, pp.32-44, 1986.



شکل ۵ خطای موقعیت دهی در تکرارهای اول تا چهارم



شکل ۶ خطای موقعیت دهی در تکرارهای دوم تا چهارم

جدول ۶ موقعیت P بعد از کالیبراسیون

۷۹۹/۹۵۷۶	X (mm)
۲۹۹/۹۹۶۹	Y (mm)
-۳۰۰/۰۱۵۵	Z (mm)

۵- نتیجه گیری

در این مقاله روند کالیبراسیون ربات های صنعتی با استفاده از روش حداقل مربعات خطا شرح داده شده و از این روش برای کالیبراسیون ۱۲ پارامتر از پارامترهای سینماتیکی ربات پوما استفاده شده است. در هر تکرار از اندازه گیری خطای موقعیت دهی در ۱۰ موقعیت مختلف برای شناسایی پارامترها استفاده شده است. پارامترهای اصلاحی توسط روش حداقل مربعات خطا شناسایی شده و بعد از ۴ تکرار مقدار اصلاح پارامترها به تکرار مورد نیاز رسیده است. در مجموع از اندازه گیری ۴۰ موقعیت مختلف برای کالیبراسیون ربات پوما استفاده شده است. نتایج گزارش شده نشان دهنده صحت پارامترهای شناسایی شده و افزایش دقت موقعیت دهی ربات بعد از کالیبراسیون می باشد.

۶- مراجع

- [1] Judd, Robert P., and Al B. Knasinski. A technique to calibrate industrial robots with experimental verification. *Robotics and Automation, IEEE Transactions*, Vol 6, No1, pp.20-30, 1990.
- [2] Xuan, Jia-Qing, and Sun-Han Xu. Review on kinematics calibration technology of serial robots. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol 15, No8, pp. 1759-1774, 2014.