http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک مدرس
دوره ۱۲ شماره ۱ اردیبهشت ۱۳۹۱ ص ص ۹۸-۱۰۵

تاریخچه مقاله:
دریافت ۹۰/۲/۱۴
پذیرش ۹۰/۱۰/۱۹
ارائه در سایت ۹۱/۱/۳۰

روشی نوین در کالیبراسیون حلقه بسته یک ربات پنج درجه آزادی

مجید محمدی مقدم[۱*]، محمدرضا ارباب تفتی[۲]، شهرام شهریاری[۳]، سید علی‌اصغر حسینی[۴]

۱- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- دانشجوی دکترا، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳- دانشجوی دکترا، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۴- دانشجوی دکترا، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۱۱-۱۴۱۱۵، m.moghadam@modares.ac.ir

چکیده- هدف از این مقاله کالیبراسیون یک ربات پنج درجه آزادی میتسوبیشی با استفاده از روش حلقه بسته است. در این روش، اطلاعات زوایای ربات برای کالیبراسیون استفاده خواهد شد. در روش حلقه بسته بایستی بتوان با محدودکردن کارگیر ربات در نقطه مشخصی مفاصل آن را به حرکت درآورد، اما با توجه به اینکه ربات درجات آزادی محدودی دارد نمی‌توان کارگیر آن را مستقیماً به زمین وصل کرد تا حلقه بسته‌ای تشکیل شود و زوایای آن آزادانه به‌حرکت درآیند. به همین علت از میله‌ای که دارای دو مفصل کروی در دو انتهای آن است استفاده می‌شود. در این حالت مفاصل ربات قادر به حرکت بوده و درجات آزادی ربات متصل شده به زمین بزرگ‌تر از یک خواهد شد و مکانیزم حاصله می‌تواند به صورت صفحه‌ای و یا فضایی حرکت داشته باشد. مشکل اصلی در این روش حذف زوایایی است که نمی‌توان آن ها را مستقیما اندازه گرفت. در واقع در کالیبراسیون حلقه بسته بایستی زوایایی را که نمی‌توان به طور مستقیم اندازه گرفت بر حسب زوایایی که می‌توان اندازه گرفت محاسبه کرد و یا آن‌ها را حذف کرد. در این مقاله از یک روشی ابداعی استفاده می‌شود که به راحتی بتوان زوایایی را که نمی‌توان اندازه گرفت حذف کرد. این روش را می‌توان به انواع دیگر ربات‌ها هم تعمیم داد. نتایج حاصل از اجرای این روش و مقایسه با مقادیر اسمی پارامترهای ربات نشان می‌دهد که روش فوق از دقت خوبی برخوردار است و خطای محدودی در زوایای کاتالوگی ارائه‌شده توسط سازنده وجود دارد.

کلید واژگان: کالیبراسیون، سینماتیک حلقه بسته، ربات صنعتی

A novel closed-loop calibration of a 5-DOF robot manipulator

M. M. Moghaddam[1*], M. R. Tafti[2], Sh. Shahriari[3], S. R. Hosseini[4]

1- Assoc. Prof. of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
2- PhD Student of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
3- PhD Student of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
4- PhD Student of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
* P. O. B. 14115-111 Tehran, m.moghadam@modares.ac.ir

Abstract- This paper presents the closed-form calibration procedure of a 5-Dof Mitsubishi robot. In this method only the joint angle information is required. But due to the limitation of the robot degrees of freedom it is not possible to attach the end-effector of the robot directly to the ground; however, we can use a bar with two ball end joints for this purpose. By doing this, the robot can move freely in space. The most limiting factor of the closed-loop calibration of robot is that we cannot measure the non-moving joints, and we have to use other joint to estimate the motion of these joints. A novel approach to estimate the non-moving degrees of freedom are presented in the paper that can be extended to other robots. Experimental results validate the proposed method and the deviation of the joint parameters compared with the nominal values of the robot parameters delivered in the catalogue is very limited and are in an acceptable ranges.

Keywords: Calibration, Closed-Loop Kinematics, Industrial Robot

Archive of SID

www.SID.ir

۱- مقدمه

خطاهای فیزیکی مانند تلرانس‌های ماشین‌کاری، خطاهای مونتاژ و تغییر شکل‌های الاستیک باعث می‌شود که مقادیر خواص هندسی یک بازوی مکانیکی ماهر (ربات صنعتی) با مقادیر واقعی آن تفاوت داشته باشد. کالیبراسیون ربات‌های صنعتی می‌تواند به عمل کنترل موقعیت ربات که توسط نرم‌افزار انجام می‌شود دقت ببخشد. فرایند کالیبراسیون گاهی جهت کنترل کیفیت ربات‌های ساخته‌شده و چک‌کردن دقت‌های ابعادی ادعاشده توسط سازنده ربات نیز انجام می‌گیرد. فرایندهای کالیبراسیون مختلفی جهت افزایش دقت ربات‌ها ارائه شده است[۱]. این روش‌ها شامل روش‌های کالیبراسیون مدار باز و کالیبراسیون مدار بسته‌اند. در روش کالیبراسیون مدار باز کارگیر ربات بایستی توسط وسایل اندازه‌گیری دقیق مکان‌یابی شود[۲-۳]. دقت این روش‌ها بایستی از دقت مورد انتظار در کالیبراسیون ربات بالاتر باشد که معمولاً هزینه‌بر و وقت‌گیر است. جهت رهایی از این روش کالیبراسیون مدار بسته در سال ۱۹۸۹ ارائه شد[۴]. در این روش تنها نیاز به حس‌کردن زاویه مفصلی یا انحراف مفصلی در بازوهای ربات می‌باشد. از آنجا که معمولاً ربات‌های صنعتی در مفاصل خود دارای حساسه‌های اندازه‌گیری مکان نسبی رابط‌های مجاورند (در تمامی درجات آزادی) زاویه مفصلی یا انحراف مفصلی را اندازه می‌گیرند. بنابراین، کالیبراسیون مدار بسته را می‌توان بر روی آن‌ها اعمال کرد. در این روش کارگیر ربات بایستی به گونه‌ای به نقطه‌ای ثابت شود که تمامی درجات آزادی ربات گرفته نشود و یک زنجیره سینماتیک بسته متحرک تشکیل شود. اگر با توجه به قیدی که بر کارگیر ربات اعمال می‌شود درجات آزادی آن به صفر نرسد ربات می‌تواند یک زنجیره سینماتیک بسته را تشکیل دهد. به عنوان مثال کارگیر یک ربات شش درجه آزادی می‌تواند درحالی که با یک کار با پنج درجه آزادی یک حلقه سینماتیک بسته را تشکیل می‌دهد با روش کالیبراسیون حلقه بسته کالیبره شود، زیرا هنوز یک درجه آزادی برای متحرک‌بودن حلقه مدار بسته باقی می‌ماند[۴].

نتیجه منطقی این است که در پروسه کالیبراسیون مدار بسته پارامترهای قید اعمال‌شدن به کارگیر ربات (یا همان کاری که کارگیر انجام می‌دهد) نیز کالیبره می‌شود. می‌توان نشان داد که هر چند درجات آزادی کار انجام‌شده توسط کارگیر توسط حسگر اندازه‌گیری نمی‌شود ولی در صورت متحرک‌بودن زنجیره سینماتیک بسته معادلات شامل این پارامترها را می‌توان برحسب معادلات دیگر به‌دست آورد و آن‌ها را حذف کرد.

در پاره‌ای از روش‌های کالیبراسیون حلقه بسته قبلی که برای کالیبره‌کردن بازوهای مکانیکی ماهر ارائه شده است کارگیر ربات روی یک مفصل لغزنده که حس نمی‌شود حرکت داده شده است که این مفصل لغزنده می‌تواند حرکت کارگیر در یک صفحه باشد[۵]. همچنین، در یک ربات هیدرولیکی شش درجه آزادی، کارگیر ربات به یک مفصل کروی متصل به صفحه پایه ربات ثابت شده است و پارامترهای آن به روش کالیبراسیون حلقه بسته استخراج شده است[۶]. در این کار در مچ ربات یک سنسور (حسگر) نیرو اضافه شده است و توسط آن اثرات الاستیک با توجه به نیروی نقطه نهایی و مُمان‌های واردشده کالیبره شده است. روش بهینه اندازه‌گیری برای بهبود انتخاب تعداد موقعیت‌های ربات برای کالیبراسیون آن ارائه شده است[۷]. تعداد زیادی از موقعیت‌های اندازه‌گیری به موقعیت-های از قبل تعیین‌شده اضافه شد تا بتوان به کالیبراسیون دقیق‌تری از ربات دست یافت.

کالیبراسیون یک ربات موازی با استفاده از یک روش بهینه به نام مارگارت-لونبرگ-اتفاقی[1] ارائه شده است[۸]. در این روش یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی حل شده است. سپس روش ارائه‌شده بر روی ربات پیاده‌سازی شده است. در کار دیگری با استفاده از سنسور لیزری فاصله میان ابزار متصل به کارگیر ربات و صفحه مدرج شده اندازه‌گیری می‌شود. سپس با ارسال دو فرمان به ربات و محاسبه اختلاف موقعیت اندازه‌گیری شده با استفاده از سیستم لیزری و مقادیر فرمان داده شده پارامترهای سینماتیکی ربات به‌دست آورده می‌شوند[۹].

در این مقاله، به کالیبراسیون پارامترهای یک ربات صنعتی میتسوبیشی[2] توسط روشی جدید بر پایه کالیبراسیون حلقه بسته پرداخته شده است. برای این منظور یک لینک (رابط) به بازوهای ربات اضافه شده است. یک سر این بازو توسط یک مفصل کروی به کارگیر ربات و سر دیگر آن توسط مفصل کروی دیگری به صفحه ثابتی که به پایه ربات متصل است

1. Random-Levenberg-Marquardt
2. Mitsubishi

www.SID.ir
Archive of SID

وصل شده است و یک زنجیره سینماتیک بسته تشکیل شده است. ربات در حالی که بازوی اضافه به آن متصل شده است دارای هفت درجه آزادی بوده که دو عدد از آن‌ها متعلق به مفصل کروی اضافه شده است و این درجات آزادی قابلیت اندازه‌گیری را ندارند. پس از اتصال میله به صفحه متصل به پایه ربات چهار درجه آزادی از ربات کاسته شده و ربات یک زنجیره سینماتیک بسته با سه درجه آزادی را تشکیل می‌دهد که البته چرخش میله (رابط) به دور خود نیز یکی از این درجات آزادی است و در فرایند کالیبراسیون وارد نمی‌شود. در این حالت با حرکت‌دادن ربات در موقعیت‌های مختلف زاویه مفاصل مختلف ثبت شده است. با استفاده از سینماتیک مستقیم و نوشتن یک معادله قید که طول ثابت لینک اضافه شده را مبنای خود دارد و با استفاده از روش حداقل مربعات پارامترهای ربات کالیبره شده به‌دست می‌آید.

۲- معرفی ربات

ربات مورد بررسی یک ربات میتسوبیشی با پنج درجه آزادی است. در شکل ۱ تصویر ربات به همراه یکی از میله‌های دوسر مفصل ساخته‌شده برای کالیبراسیون آن نشان داده شده است.

شکل ۱ تصویری از ربات به همراه میله

مشخصات کاتالوگی ربات فوق در جدول ۱ نشان داده شده است. این ربات دارای ۵ درجه آزادی بوده و ماکزیمم بار[3] قابل حمل توسط این ربات ۳ کیلوگرم است. مقادیر مجاز حرکت مفاصل ربات نیز در جدول نمایش داده شده است.

جدول ۱ پارامترهای ربات میتسوبیشی

			نوع پنج محوره		نوع شش محوره
مدل		واحد	RV-3AJM	RV-3AJ	RV-2AM	RV-2A
درجات آزادی			۵		۶	
نوع عملگرها			AC سرو موتور (J1-J3 and J5 axis brake attached)			
روش اندازه گیری موقعیت			انکودر مطلق			
ماکزیمم تحمل بار		کیلوگرم	۳		۲	
ماکزیمم شعاع دسترسی		میلی‌متر	۶۳۰		۶۲۱	
فضای کاری	J1	درجه	۳۲۰ (+۱۶۰ - -۱۶۰)			
	J2		۱۸۰ (+۱۳۵ - -۴۵)			
	J3		۱۳۵ (+۱۳۵ - -۰)		۱۲۰ (+۵۰ - +۱۷۰)	
	J4		-		۳۲۰ (+۱۶۰ - -۱۶۰)	
	J5		۲۴۰ (+۱۲۰ - -۱۲۰)			
	J6		۴۰۰ (+۲۰۰ - -۲۰۰)			
ماکزیمم سرعت	J1	درجه/ثانیه	۱۵۰			
	J2		۱۵۰			
	J3		۱۸۰			
	J4		-		۲۴۰	
	J5		۱۸۰			
	J6		۳۳۰			
دقت تکرار پذیری		میلی‌متر	± ۰/۰۴			
دمای کاری		درجه سانتی‌گراد	۰ - ۴۰			
وزن		کیلوگرم	Approx. 34	Approx. 33	Approx. 38	Approx. 37
استاندارد حفاظت			IP54	IP30	IP54	IP30

۳- پارامترهای HD

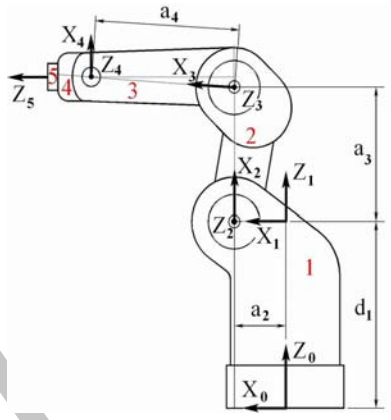
برای استخراج معادلات سینماتیکی ربات، باید پارامترهای دناویت-هارتنبرگ (HD) آن را به‌دست آورد. بدین منظور ابتدا بایستی دستگاه‌های مختصات مطابق با استانداردهای موجود بر روی ربات منطبق شده و سپس پارامترهای HD را با داشتن مقادیر اندازه‌های فیزیکی ربات به‌دست آورد. در شکل ۲ پارامترهای HD ربات نشان داده شده است. همچنین در جدول ۲ این پارامترها آورده شده است. اطلاعات مربوط به پارامترهای فوق را می‌توان در مراجع مختلف پیدا نمود[۱۰].

3. Payload

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۲ پارامترهای HD ربات

I	θ	d	a	α
۱	θ_1	d_1	۰	۰
۲	θ_2	۰	a_2	-۹۰
۳	θ_3	۰	a_3	۰
۴	θ_4	۰	a_4	۰
۵	θ_5	۰	۰	-۹۰



شکل ۲ پارامترهای HD ربات

اکنون ماتریس تبدیل هر دستگاه نسبت به دستگاه قبل با قراردادن مقادیر فوق در ماتریس تبدیل زیر حاصل می‌شود.

$$T_{i+1}^{i}=\begin{bmatrix}\mathrm{Cos}\theta_i & \mathrm{Sin}\theta_i\mathrm{Cos}\alpha_i & \mathrm{Sin}\theta_i\mathrm{Sin}\alpha_i & a_i\mathrm{Cos}\theta_i\\ \mathrm{Sin}\theta_i & \mathrm{Cos}\theta_i\mathrm{Cos}\alpha_i & -Cos\theta_i\mathrm{Sin}\alpha_i & a_i\mathrm{Sin}\theta_i\\ 0 & \mathrm{Sin}\alpha_i & \mathrm{Cos}\alpha_i & d_i\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad (۱)$$

که در آن مقادیر θ_i و α_i برابر زوایای مفاصل و خارج از خط بودن محورهای دوران از یکدیگر و d_i نیز جابه‌جایی مفاصل است. با داشتن ماتریس تبدیل فوق می‌توان بین هر دو مفصل مجاور یکبار از این ماتریس استفاده و ماتریس تبدیل کل را بین دستگاه آخر و دستگاه صفر به‌دست آورد.

$$T_5^0=T_1^0T_2^1T_3^2T_4^3T_5^4 \quad (۲)$$

این روابط در نرم‌افزار متلب[4] وارد شده و در قسمت‌های بعد برای کنترل درستی آن‌ها از نتایج آزمایش و مدل آدامز[5] استفاده شده است.

4. Matlab
5. ADAMS

۳-۱- فرایند تشکیل قید برای انجام کالیبراسیون

با استفاده از روش ذکرشده توانستیم مختصات مفصل (E آخرین مفصل ربات) را بر حسب محورهای مختصات متصل به پایه محاسبه کنیم. در اینجا از روش جدیدی استفاده می‌شود و برای حذف زاویایی که اندازه‌گیری نمی‌شوند بدین صورت عمل می‌شود؛ با استفاده از معادلات قبل مختصات مفصل E را در محور مختصات (۰) داریم. از طرفی مکان نقطه D را نیز که مفصل کروی است را در مختصات (۰) اندازه‌گیری می‌کنیم. چون میله صلب است نقطه E نمی‌تواند روی هر مسیری حرکت کند. نقطه E فقط می‌تواند روی یک کره حرکت کند که مرکز آن D و شعاع آن طول میله (طول ED) است. این در واقع قیدی است که با اضافه‌کردن میله به کارگیر ربات اعمال می‌شود. این قید را می‌توان به طور مجتمع به صورت رابطه (۳) بیان داشت:

$$(x_E-x_D)^2+(y_E-y_D)^2+(z_E-z_D)^2=a_7^2 \quad (۳)$$

که a_7 برابر طول میله رابط و x_E، y_E و z_E از طریق تبدیلات HD قابل محاسبه بوده و x_D، y_D و z_D هم قابل اندازه‌گیری اند. به عبارت دیگر پارامتر L را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$L=\left\{(x_E-x_D)^2+(y_E-y_D)^2+(z_E-z_D)^2\right\}^{1/2}-a_7 \quad (۴)$$

که متغیر مستقل L تابعی از پارامترهای HD موجود در جدول است که در مجموع ۱۶ پارامتر است. با روشی که در اینجا اعمال شد توانستیم معادله قیدی را به‌دست آوریم که مستقل از زوایایی است که قابل ثبت نیستند. قدم بعدی اعمال رویه کمترین مربعات به معادله اخیر است. ۱۶ پارامتر مربوط به HD می‌باشند و ۶ پارامتر هندسی x_D، y_D و z_D و a_7 هستند و در نهایت ۴ پارامتر θ_{off} است که مربوط به خطای[6] ربات می‌باشد، در مجموع ۲۴ پارامتر داریم. از این ۲۴ پارامتر ۴ پارامتر θ_1 تا θ_4 را می‌توان از روی ربات خواند و برای راحتی کار فقط ۱۱ پارامتر ذیل را کالیبره می‌کنیم:

$$\vec{\varphi}^T=\left\{\theta_{off_1},\theta_{off_2},\theta_{off_3},\theta_{off_4},a_1,a_2,a_3,a_7,x_D,y_D,z_D\right\} \quad (۵)$$

برای کالیبره‌کردن ۵۰ نمونه آزمایش انجام شده است و ربات را در ۵۰ پیکربندی[7] متفاوت قرار داده‌ایم. θ_1 تا θ_4 های متفاوت

6. Offset
7. Configuration

Archive of SID

www.SID.ir

قرائت شد. در واقع با این کار ۵۰ معادله و ۱۱ مجهول داریم که برای یافتن آن باید از روش کمترین مربعات استفاده شود.

۴- روش کمترین مربعات

همان‌طور که ذکر شد چون تعداد معادلات بیشتر از مجهولات است برای پیداکردن جواب بهینه باید از روش کمترین مربعات استفاده شود. فرض می‌شود که معادله طبق رابطه ذیل باشد:

$$L = L(\vec{\varphi}) \left\{ (x_E - x_D)^2 + (y_E - y_D)^2 + (z_E - z_D)^2 \right\}^{1/2} - a_7 \quad (۶)$$

از L نسبت به بردار $\vec{\varphi}$ مشتق می گیریم، داریم:

$$\Delta L = \frac{\partial L}{\partial \vec{\varphi}} \Delta \vec{\varphi} + n \quad (۷)$$

که n خطا می‌باشد، معادله بالا را می‌توان به صورت فشرده‌تر نوشت:

$$\Delta L = \{c\}^T \{\Delta \varphi\} + n \quad (۸)$$

که

$$\{c\}^T = \frac{\partial L}{\partial \vec{\varphi}} \quad (۹)$$

حال حدس اولیه را مقادیر اسمی ربات قرار داده و بردار بالا را تشکیل می‌دهیم، سپس بایستی خطا را با استفاده از رابطه زیر کمینه کرد:

$$E^2 = \left(\Delta L - \{c\}^T \{\Delta \varphi\}\right)^T \left(\Delta L - \{c\}^T \{\Delta \varphi\}\right) \quad (۱۰)$$

که نتیجه می‌دهد:

$$\Delta \varphi = \left(c^T c\right)^{-1} c^T \Delta L \quad (۱۱)$$

در نهایت حدس اولیه توسط رابطه زیر مجددا اصلاح می‌شود:

$$\vec{\varphi} = \vec{\varphi}_\bullet + \Delta \vec{\varphi} \quad (۱۲)$$

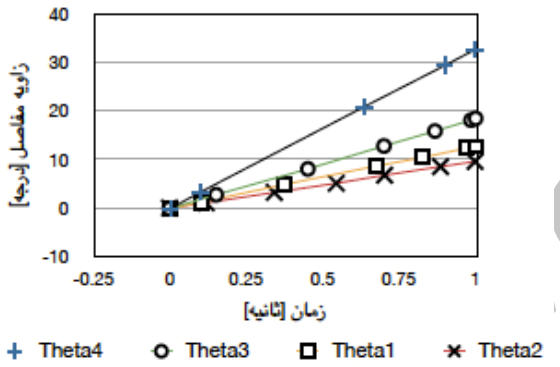
با روش تکرار می‌توان معادلات بالا را حل کرد تا جواب با دقت معینی حاصل شود.

۵- شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار آدامز

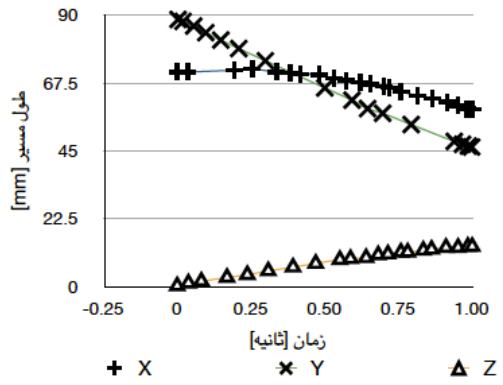
برای بررسی عملکرد ربات قبل از ساخت قطعات و انجام کالیبراسیون، اقدام به تهیه یک مدل کامپیوتری توسط نرم‌افزار آدامز شده است. این مدل دارای ابعاد اسمی ربات اصلی است. در هر یک از مفاصل این مدل از یک اتصال لولایی استفاده شده و برای امکان حرکت‌دادن مفصل از یک حرکت عمومی[8]

8. General Motion

استفاده شده است. میله دوسر مفصل مربوط به کالیبراسیون نیز به صورت پارامتریک مدل شده تا بتوان طول آن و همچنین محل اتصال آن به پایه را تغییر داد. برای کنترل صحت روابط بخش قبل، مقادیر مختلف زوایای مفصل‌ها که از آزمایش به دست آمده به حرکت عمومی مفصل داده شده و موقعیت سیبک متصل به مچ ربات اندازه‌گیری شده و با جواب حاصل از ضرب ماتریس‌های تبدیل که در قسمت قبل گفته شد مقایسه و نتایج یکسانی حاصل شده است. در شکل ۳ نمونه‌ای از زوایای مفصل‌ها در مدل آدامز که از نتایج آزمایشگاه به‌دست آمده به عنوان ورودی به مدل داده شده است. فرض شده که مفصل‌ها در مدت یک ثانیه به صورت خطی به مقدار مورد نظر چرخیده‌اند. در شکل ۴ موقعیت مفصل متصل به مچ ربات بر اساس زوایای مفصلی شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ زوایای داده‌شده به مدل آدامز



شکل ۴ موقعیت مفصل متصل به مچ ربات

بر اساس موقیت مفصل‌ها که از مدل‌های آدامز و متلب حاصل شده فاصله دو مفصل (طول میله) برای زوایای مربوط به

www.SID.ir

شکل ۴ برابر ۳۰۶/۲۲ میلی‌متر حاصل می‌شود. طول واقعی میله ساخته شده برابر ۳۰۷/۹ میلی‌متر است. مهم‌ترین عوامل اختلاف این دو طول عبارت‌اند از: ۱) وجود لقی در مفصل‌های ربات ۲) وجود خطا در ساخت میله دو سر مفصل و تکیه‌گاه‌ها ۳) وجود خطا در اندازه‌گیری زاویه مفصل‌های ربات.

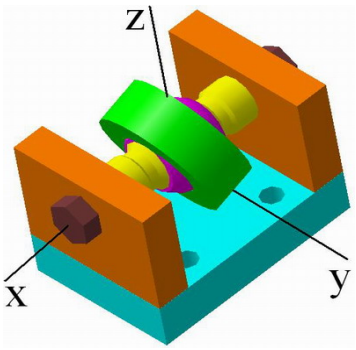
۵-۱- کنترل میزان گردش هر مفصل و داده‌برداری

در فرایند کالیبراسون، هر چه یک مفصل محدوده زاویه‌ای بزرگ‌تری را پوشش دهد محور آن دقیق‌تر محاسبه می‌شود. به همین جهت قبل از اجرای کالیبراسیون باید طول میله رابط و همچنین مکان نصب آن به گونه‌ای انتخاب شود که تمام مفصل‌ها حداکثر چرخش ممکن را داشته باشند. همچنین به هنگام کالیبراسیون توجه شود که تمام محدوده قابل پوشش عملا پوشش داده شود. برای تعیین محدوده حرکت هر مفصل بهترین راه انجام شبیه‌سازی کامپیوتری است. محدودیت عملکرد سیستم حلقه بسته از دو جا ناشی می‌شود:

الف- محدودیت حرکت ربات که به طول بازوها و محدودیت دوران مفصل‌های ربات بستگی دارد.

ب- محدودیت اضافه‌شده از سوی میله رابط که به طول میله و محدودیت دوران اتصالات کروی دو سر میله و محل نصب آن‌ها وابسته است.

محدودیت حرکت زاویه‌ای اتصالات کروی در دو صفحه متعامد با توجه به شکل حول محور y و z هر کدام به میزان $\pm 25^\circ$ و حول x حدود $\pm 90^\circ$ است (شکل ۵).



شکل ۵ محدودیت‌های مفصل کروی

برای داشتن داده‌های مناسب برای انجام کالیبراسیون به نکات زیر توجه شده است.

طول و محل نصب میله باید به گونه‌ای انتخاب شود که تمام محدوده حرکت هر مفصل و یا حداقل بیشترین مقدار ممکن را پوشش دهد و داده‌برداری به تعداد کافی و با پراکندگی همگن در محدوده فوق انجام شود.

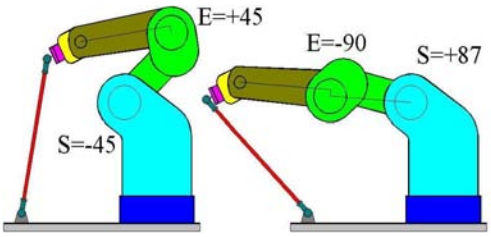
برای دست‌یابی به خواسته اول از مدل آدامز استفاده شده است. برای این منظور میله‌هایی با طول‌های مختلف و مکان نصب مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای هر وضعیت از میله محدوده حرکت هر مفصل تعیین شده و با مقدار ماکزیمم محدوده این مفصل مقایسه شده است. برای جستجوی سیستماتیک، یک تابع هدف به فرم زیر تعریف می‌شود و هدف ماکزیمم بودن آن است:

$$T = \left(\sum \left(\frac{\theta_i}{\theta_{inom}} \right)^{1/n} \right)^n \qquad (۱۳)$$

که در آن θ_{inom} حداکثر زاویه چرخش اسمی مفصل i برای ربات بدون نصب میله و θ_i حداکثر چرخش همان مفصل در سیستم حلقه بسته است. در این رابطه n یک عدد مثبت بزرگ‌تر از یک انتخاب می‌شود. این انتخاب برای همگن‌شدن زاویه چرخش مفصل‌هاست. اگر عدد n را واحد انتخاب کنیم تنها مجموع زوایا مهم می‌شود، اما از آنجا که در کالیبراسیون باید همه مفصل‌ها تا حد ممکن درصد بیشتری از محدوده خود را بچرخد، این عدد را بزرگ‌تر از واحد انتخاب می‌کنیم. به این ترتیب مفصلی که مقدار کمی از محدوده اسمی خود را بپوشاند تاثیر بیشتری بر کاهش عبارت مجموع فوق داشته و این حالت به عنوان حالت بهینه انتخاب نمی‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود در هر دو حالت مجموع زاویه دو مفصل با هم برابر است، اما حالت اول حالت مناسب‌تری است. در اینجا وضعیت ربات برای رسیدن به هریک از وضعیت‌های حدی مفصل‌ها در سیستم حلقه بسته برای یکی از وضعیت‌های میله مورد برررسی قرار گرفته است.

مفصل S: حرکت مفصل S در جهت مثبت به مقدار $+87^\circ$ (از مقدار $+135$ ربات بدون میله) می‌رسد (شکل ۶ سمت راست). حرکت این مفصل در جهت منفی بدون محدودیت بوده و تا مقدار نهایی -45° می‌رسد و در نتیجه این مفصل زاویه 132° را از کل محدوده حرکتی 180° خود پوشش می‌دهد (شکل ۶ سمت چپ).

www.SID.ir
Archive of SID

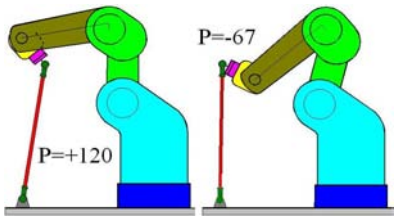


شکل ۶ وضعیت حدی مفصل‌های S و E

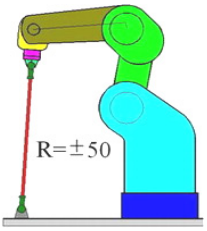
مفصل E: حرکت مفصل E در جهت مثبت و منفی بدون محدودیت بوده و تا مقادیر نهایی خود می‌رسد (°۹۰- و °۴۵+). وضعیت حدی در جهت مثبت این مفصل متناظر با وضعیت حدی مفصل S در جهت منفی (شکل ۶ سمت چپ) و وضعیت حدی در جهت منفی متناظر با وضعیت حدی مفصل S در جهت مثبت است (شکل ۶ سمت راست).

مفصل P: حرکت مفصل P در جهت مثبت بدون محدودیت بوده و تا مقدار نهایی خود (°۱۲۰+) می‌رسد (شکل ۷ سمت راست). حرکت این مفصل در جهت منفی محدود بوده و تا مقدار °۶۷- خواهد رسید (شکل ۷ سمت چپ).

مفصل R: برای استفاده بهینه از محدوده حرکت اتصال کروی باید مطابق شکل ۸ مچ ربات و میله در یک راستا باشد. در این صورت حرکت مفصل R در هر دو جهت تا آخرین حدی که مفصل کروی اجازه می‌دهد ممکن می‌شود (°۵۰±). نمایش محدوده حرکت مفصل W به دلیل حرکت فضایی مجموعه کمی دشوارتر است، اما می‌توان آن را به روش مشابهی نشان داد.



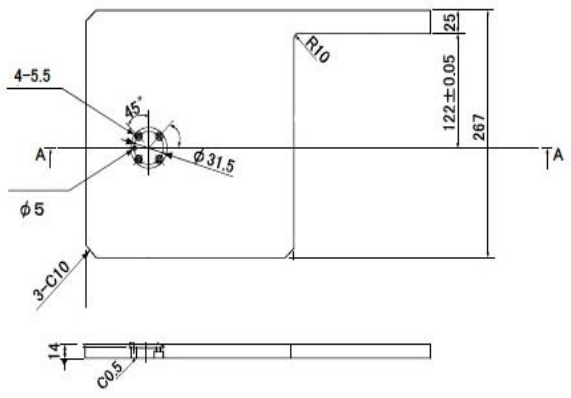
شکل ۷ وضعیت حدی مفصل P



شکل ۸ وضعیت حدی مفصل

۵-۲- انجام آزمایش‌های کالیبراسیون

سیستم کالیبراسیون اصلی ربات بنا به پیشنهاد سازنده آن بدین صورت است که از یک صفحه مرجع بایستی استفاده شود که مشخصات آن در شکل ۹ داده شده است. در این روش یک قید[9] به انتهای کارگیر ربات بسته می‌شود که بایستی آن قید به داخل سوراخ صفحه‌ای که نقشه آن داده شده است فرو برده شود. با داشتن پارامترهای مربوط به صفحه از یک طرف و ابعاد دقیق سوراخ می‌توان با فرایندی که در کاتالوگ دستگاه داده شده است مقادیر اسمی زوایای مفاصل ربات را به‌دست آورد. اما در این تحقیق به منظور شروع آزمایش و اعمال روش پیشنهادی پس از اتصال میله رابطی از یک‌طرف به کارگیر ربات و از طرف دیگر به میز ثابت متصل به پایه ربات، یک مکانیزم حلقه بسته تشکیل داده شد. سپس با توجه به درجات آزادی سیستم حلقه بسته لازم بود که تمامی مفاصل ربات را به حرکت درآورد. برای این کار با توجه به قفل‌بودن مفاصل ربات، به علت وجود سیستم ترمز، ابتدا با فرامین صادره قفل ربات آزاد و سپس با استفاده از نیروی دستی وارده به بازوهای ربات مفاصل آن تحریک می‌شوند. در هر وضعیتی که ربات قرار می‌گیرد می‌توان زوایای ربات را ذخیره نمود و به عنوان یک نقطه از مجموعه داده‌ها آن را در محاسبات مربوط به کالیبراسیون ربات به‌کار برد. هرچه میزان موقعیت‌های ربات بیشتر انتخاب شوند دقت نتایج به‌دست آمده بیشتر خواهد شد. در این تحقیق با توجه به محدودیت‌های موجود موقعیت ربات برای ۵۰ نقطه مستقل تغییر داده شد.



شکل ۹ صفحه مرجع کالیبراسیون ربات

9. Jig

Archive of SID
www.SID.ir

با رویه ذکرشده در بالا می‌توان مسئله کمترین مربعات را حل کرد. پارامترهای اسمی و پارامترهایی که از کالیبراسیون به‌دست آمده‌اند در جدول ۳ مشاهده می‌شوند. همان‌طوری که از جدول مشاهده می‌شود بین مقدار اسمی و مقدار کالیبره‌شده اختلافاتی وجود دارد که ناشی از خطای مهندسی و خطای اندازه‌گیری است که در هر پیکره‌بندی ربات وجود دارد و با استفاده از روش کمترین مربعات بهترین مقدار طوری تعیین می‌شود که خطا کمترین مقدار باشد.

جدول ۳ مقایسه پارامترهای اسمی و پارامترهای کالیبراسیون

پارامتر	مقدار اسمی پارامترها	مقدار به‌دست آمده از کالیبراسیون	قدر مطلق خطا
$\theta_{off\,1}$[deg]	۰/۰۰	۰/۸۳	۰/۸۲۷
$\theta_{off\,2}$[deg]	۰/۰۰	۱/۶۲	۱/۶۲
$\theta_{off\,3}$[deg]	۰/۰۰	۰/۶۴	۰/۶۴۱
$\theta_{off\,4}$[deg]	۰/۰۰	۰/۴۸	۰/۴۸۲
$a_1[mm]$	۱۱۵/۰۰	۱۱۵/۴۱	۰/۴۱
$a_2[mm]$	۱۰۰/۰۰	۸۸/۹۵	۱۱/۰۵
$a_3[mm]$	۲۵۰/۰۰	۲۴۸/۱۱	۱/۸۹
$d_{56}[mm]$	۲۸۰/۰۰	۲۸۰/۵۷	۰/۵۷
$x_D[mm]$	۴۱۷/۰۰	۴۱۳/۴۲	۳/۵۸
$y_D[mm]$	۰/۰۰	۰/۸۰	۰/۸
$z_D[mm]$	۳۰/۰۰	۲۹/۲۳	۰/۷۷

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله کالیبراسیون ربات پنج درجه آزادی میتسوبیشی ارائه شده است. روش حلقه بسته برای کالیبراسیون استفاده شده است. برای این کار از یک میله که در دو انتهای آن دو مفصل کروی است که از یک طرف به کارگیر و از طرف دیگر به زمین متصل است استفاده شده است. برای حذف زوایایی که نمی‌توان آن‌ها را از ربات قرائت کرد از یک معادله قیدی استفاده شده است که جنبه نوآوری مقاله است. در نهایت از مقادیر عددی اسمی ربات استفاده شده و مقادیر کالیبره‌شده محاسبه شده است. مقایسه نتایج حاصل از کالیبراسیون ربات و مقادیر اسمی آن با استفاده از اطلاعات کارخانه سازنده نشانگر دقت خوب روش ارائه شده می‌باشد.

۷- مراجع

[1] Hollerbach J. M., *A survey of kinematics calibration, Robotic Review*, Cambridge, MIT Press, 1988.

[2] Meggiolaro M., Scriffignano G., Dubowsky S., "Analysis and Optimization of Closed-Loop Manipulator Calibration with Fixed Endpoint", *Proceedings of the CONEM - National Mechanical E. Congress*, ABCM, Joao Pessoa, PB, Brazil, 2002.

[3] Daney D., Andreff N., Chabert C., Papegay Y., "Interval Method for Calibration of Parallel Robots: Vision-Based Experiments", *Mechanism and Machine Theory*, Elsevier, Vol. 41, 2006, pp. 926-944.

[4] Alici G., Shirinzadeh B., "A Systematic Technique to Estimate Positioning Errors for Robot Accuracy Improvement using Laser Interferometry Based Sensing", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 40, No. 8, 2005, pp. 879-906.

[5] Bennett D. J., Hollerbach J. M., "Identifying the Kinematics of Robots and their Tasks", *Proceedings IEEE In. Conf. on Robotics and Automation*, Scottsdale, Arizona, pp. 580-586, May, 1989.

[6] Ikits M., Hollerbach J. M., "Kinematics Calibration using a Plane Constraint", *IEEE In. Conf. on Robotics and Automation*, Albuquerque, NM, April, 1997, pp. 3191-3196.

[7] Tian L., Kui S., Zong-wu X., Hong L., "Optimal Measurement Configurations Forkinematic Calibration of Six-DOF Serial Robot", *J. Cent. South Univ. Technol.*, Vol. 18, 2011, pp. 618-626.

[8] Jinbo Sh., Chunhua Y., Zexiang L., "Kinematic Model Identification of Planar Delta Manipulator using Random Levenberg-Marquardt Algorithm", *Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Taipei, Taiwan, 21-25 June, 2011.

[9] In-Chul H., "Kinematic Parameter Calibration Method for Industrial Robot Manipulator using the Relative Position", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, 2008, pp. 1084-1090.

[10] John J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 3th Edition, USA, Prentice Hall, 2004.

Archive of SID

www.SID.ir