

آنالیز خطا و کالیبراسیون مکانیزم استوارت

آریا الستی^۱، علی عظیمی^۲

قطب علمی طراحی، رباتیک و اتوماسیون

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

E-mail: Aalasti@sharif.edu

چکیده

امروزه مکانیزم‌های موازی نظیر مکانیزم استوارت، علاوه بر شبیه‌سازهای پرواز، در ربات‌های جراح و ماشین‌های ابزار نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین آنالیز خطا و حساسیت مجموعه برای دستیابی به دقت لازم در ساخت و همچنین به جهت انتخاب حسگرها، برای دستیابی به دقت مطلوب در خروجی مجموعه، امری کاملاً ضروری است. بنابراین مدلی که خطاهای ناشی از اندازه‌گیری و ساخت را بتوان در آن در نظر گرفت، برای حالت کاملاً عمومی مکانیزم استوارت به دست آمده و در به دست آوردن آن از حل سینماتیکی هر کدام از مجموعه‌های سری مکانیزم استوارت استفاده شده است. برای اثبات اعتبار کار انجام شده نیز یک مدل با در نظر گرفتن انواع خطاها در نرم‌افزار ویژوال نستر (Visual Nastran) ساخته شده است. نهایتاً با یک الگوریتم شناسایی نیز، برای مدل کاهش یافته و مدل کامل، شناسایی انجام شده و پارامترهای خطا به دست آمده‌اند.

واژه‌های کلیدی: مکانیزم استوارت - آنالیز خطا - آنالیز حساسیت - شناسایی

مقدمه

مکانیزم استوارت یکی از معروف‌ترین انواع مکانیزم‌های موازی است. این مکانیزم که اولین بار در سال ۱۹۶۵ توسط دی. استوارت (D. Stewart) برای یک شبیه‌ساز پرواز استفاده شد، یکی از پرطرفدارترین عنوان‌های تحقیقاتی دهه ۱۹۸۰ در زمینه رباتیک بوده است. در دهه ۱۹۹۰ تحقیقات در زمینه مکانیزم‌های موازی به طور عمده و مکانیزم استوارت به طور خاص افزایش یافت تا جایی که تنها در سال ۱۹۹۵ بیش از پنجاه مقاله در این زمینه عرضه شدند [۱]. در زمینه مدل‌سازی خطا، وانگ (Wang) و ماسوری (Masory) [۲] مدلی را با استفاده از تحلیل هر کدام از مجموعه‌های سری مکانیزم به دست آوردند که در آن بعضی از خطاهای ناشی از ساخت را مد

نظر قرار داده بودند. راپونن (Ropponen) و آرای (Arai) [۳]، مدل خطایی را با استفاده از مشتق‌گیری معادلات سینماتیکی به دست آوردند. پتل (Patel) و امان (Ehmann) [۴] نیز در مدل خود بدون توجه به منابع ایجاد خطا، از بردارهای خطای مختلفی استفاده نمودند در حالی که پیدا کردن این بردارهای خطا، میزان دقت مورد نیاز در ساخت را مشخص نمی‌کند. کیم (Kim) و چوی (Choi) [۵] نیز روشی را برای تعیین محدوده‌های خطای مجاز به صورت مستقیم و معکوس ارائه دادند. در حل مستقیم، میزان خطای خروجی با در دست داشتن خطاهای ساخت حاصل می‌شود و در حل معکوس نیز هدف تعیین میزان تolerانس مجاز در ساخت با داشتن دقت مورد نیاز در خروجی بوده است ولی به دلیل اینکه برای مدل‌سازی از مدل راپونن و آرای استفاده شده است؛ به صورت مجزا، تolerانس ماشین کاری را مشخص نمی‌کند. مدلی که در مقاله حاضر از مکانیزم ارائه شده است ادامه

۱- استادیار

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد طراحی کاربردی

$H_s(i)$: ارتفاع مفصل کرووی

$d_5(i)$: طول مرده عملگر خطی

در بدست آوردن مدل نامی فرضیات ساده کننده زیر در نظر گرفته شده‌اند:

کلیه مفاصل ایده آل فرض شده‌اند. بدین معنی که محورهای دوران آنها بر یکدیگر عمود بوده و در یک نقطه متقاطع باشند که به این نقطه، مرکز مفصل گفته می‌شود. عملگرها به گونه‌ای به مفاصل متصل شده‌اند که خط مرکزی آنها از مرکز مفاصل کرووی و یونیورسال بگذرد. مفاصل دقیقاً در همان موقعیت فرض شده قرار گرفته‌اند. طول عملگرهای خطی به طور دقیق قابل اندازه‌گیری است و خطایی در اندازه‌گیری وجود ندارد.

با این فرضیات، مفاصل کرووی و یونیورسال را می‌توان به صورت نقاطی در نظر گرفت که به وسیله یک خط (عملگر خطی) به هم متصل شده‌اند. (شکل ۱)

به جهت اینکه بتوان انواع مختلف منابع خطایی را که ممکن است در موقع ساخت و استفاده از مکانیزم پیش آید، در مدل در نظر گرفت، مدل دقیق مجموعه معرفی می‌شود. به جهت اینکه بتوان اثر هر یک از منابع خطا را هم به صورت مجزا و هم توأمان در نظر گرفت، هر یک از عملگرها همراه با مفاصل آن، یک مجموعه شش درجه آزادی سری در نظر گرفته می‌شود (یک روبات 2R-P-3R همراه با سه تبدیل اضافی که برای ارتباط بین P و B اضافه شده‌اند (شکل ۲)). برای تحلیل هر یک از این مجموعه‌های سری نیز از استاندارد دناویت-هارتنبگ (Denavit-Hartenberg) [۶] استفاده می‌شود. بنابراین ابتدا مدل نامی مورد بررسی قرار می‌گیرد و دستگاه‌های مختصات به کار رفته در آن مطابق زیر هستند:

دستگاه مختصات B که دستگاه پایه است؛ دستگاه (۱) که یک دستگاه واسطه بین B و محل مفصل یونیورسال است؛ دستگاه‌های (۲) و (۳) که مربوط به دو محور مفصل یونیورسال هستند (شکل ۳)؛ دستگاه (۴) که مربوط به عملگر است و متغیر آن نیز طول افزوده شده عملگر است؛ دستگاه (۵) اتصال بین عملگر و مفصل کرووی را نشان می‌دهد و بیانگر محور اول دوران مفصل کرووی است؛ دستگاه‌های (۶) و (۷) محورهای دوم و سوم دوران مفصل کرووی را نشان می‌دهند؛ دستگاه (۸) یک دستگاه واسطه

کار وانگ و ماسوری است و در به دست آوردن آن، هر یک از منابع خطا به صورت مجزا در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین به راحتی می‌توان علاوه بر مشاهده تأثیر مجموعه‌ای از خطاها، تأثیر هر یک از خطاها را در خروجی نیز بررسی کرد و از طریق آن می‌توان برای هر یک از منابع خطا (خطا در ساخت صفحه پایه، ساخت لینک، ساخت مفاصل، مونتاژ و ...) آنالیز حساسیت انجام داد.

مدل‌سازی مکانیزم استوارت

همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده، یک مکانیزم استوارت از شش عملگر خطی، یک صفحه ثابت و یک صفحه متحرک ساخته شده است. هر کدام از عملگرها، توسط یک مفصل یونیورسال و یک مفصل کرووی، به ترتیب به صفحات ثابت و متحرک متصل شده‌اند. برای واقعی‌تر شدن مدل، فرض شده که مفاصل یونیورسال و کرووی، با یک فاصله نسبت به صفحات خود (که مربوط به ساخت این مفاصل و اتصال آنها بر روی این صفحات است) قرار گرفته باشند. برای لینک‌ها یک طول مرده نیز در نظر گرفته شده است و فاصله بین مراکز مفاصل کرووی و یونیورسال را در حالتی که لینک تا حد ممکن جمع شده است، نشان می‌دهد. موقعیت مفاصل بر روی صفحات نیز با مختصات قطبی بیان شده است. دستگاه مختصات B بر روی صفحه ثابت چسبانده شده و محور Z آن بر صفحه عمود می‌باشد. دستگاه مختصات P نیز بر روی صفحه متحرک چسبانده شده و محور Z آن بر صفحه عمود می‌باشد. بنابراین با توجه به شکل (۱)، مشخصات هندسی مدل نامی مکانیزم استوارت در نظر گرفته شده، مطابق زیر است:

$R_B(i)$: فاصله محل مفصل یونیورسال شماره i از مبدا

دستگاه مختصات B

$R_P(i)$: فاصله محل مفصل کرووی شماره i از مبدا دستگاه

مختصات P

$\alpha_{B0}(i)$: زاویه قرارگیری مفاصل یونیورسال بر روی

صفحه پایه

$\alpha_P(i)$: زاویه قرارگیری مفاصل کرووی بر روی صفحه

متحرک

$H_u(i)$: ارتفاع مفصل یونیورسال

است و شبیه دستگاه (۱) می باشد؛ دستگاه P نیز به صفحه متحرک چسبانده شده است. بنابراین جدول شامل پارامترهای سینماتیکی مدل نامی مکانیزم استوارت، بر اساس استاندارد دناویت-هارتنبرگ مطابق جدول (۱) است. بر این اساس هر یک از ماتریس های تبدیل T_i به صورت زیر به دست می آید [۶]:

است و شبیه دستگاه (۱) می باشد؛ دستگاه P نیز به صفحه متحرک چسبانده شده است. بنابراین جدول شامل پارامترهای سینماتیکی مدل نامی مکانیزم استوارت، بر اساس استاندارد دناویت-هارتنبرگ مطابق جدول (۱) است. بر این اساس هر یک از ماتریس های تبدیل T_i به صورت زیر به دست می آید [۶]:

$$T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن c بیانگر کسینوس و s بیانگر سینوس زاویه است. نهایتاً از دستگاه (۸) به دستگاه P نیز یک ماتریس تبدیل به صورت زیر به دست می آید:

$$T_P = \begin{bmatrix} \cos \alpha_p(i) & \sin \alpha_p(i) & 0 & -R_p \\ -\sin \alpha_p(i) & \cos \alpha_p(i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & H_s(i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

بنابراین ماتریس تبدیل بین B و P به ترتیب زیر به دست می آید:

$${}^P_B T = T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_P \quad (3)$$

تعمیم مساله به مدل دقیق

در مدل سازی دقیق مجموعه، یعنی حالتی که خطاهای احتمالی نیز باید در سینماتیک مساله وارد شوند، از همان دستگاه های مختصات توضیح داده شده استفاده می شود؛ با این تفاوت که مقادیری تحت عنوان خطاهای مختلف، در جدول مربوط به پارامترهای دناویت-هارتنبرگ نیز وارد می شوند. این خطاها عبارتند از:

$\alpha_{B1}(i)$ خطای جهت گیری مفصل یونیورسال شماره i را روی صفحه پایه نشان می دهد. (شکل ۴)

$\delta R_B(i)$ خطای مونتاژ مفصل یونیورسال بر روی صفحه پایه است. (شکل ۴)

$\gamma_B(i)$ خطای قرارگیری زاویه ای مفصل یونیورسال بر روی صفحه پایه است. (شکل ۴)

عمودی دو محور مفصل را نشان می دهد. (شکل ۵)

مقدار انحراف دو محور مفصل یونیورسال از حالت عمودی را نشان می دهد. (شکل ۵)

$d_1(i)$ و $a_1(i)$ خطاهای مربوط به مونتاژ مفصل یونیورسال به عملگر است.

$\delta d_4(i)$ خطای طولی عملگر است. یک بخش این خطا مربوط به سنسوری است که طول عملگر را نشان می دهد و بخش دیگر مربوط به اختلاف طول مرده واقعی با طول مرده نامی است.

$a_2(i)$ خطای مونتاژ بین مفصل کروی و عملگر است.

$\delta R_p(i)$ خطای قرارگیری مفصل کروی در روی صفحه متحرک است.

$\gamma_p(i)$ خطای قرارگیری زاویه ای مفصل کروی در روی صفحه متحرک است.

$\delta H_u(i)$ خطای مربوط به ارتفاع مفصل یونیورسال است.

$\delta H_s(i)$ خطای مربوط به ارتفاع مفصل کروی است.

پارامترهای نامی مکانیزم نیز در قسمت قبل توضیح داده شدند. متغیرهای مفصلی نیز شامل موارد زیر هستند:

$\theta_2(i)$ و $\theta_3(i)$ مقدار دوران در محورهای مفصل یونیورسال را نشان می دهند و بین 90° و -90° می توانند تغییر کنند.

$d_4(i)$ افزایش طول عملگر را نشان می دهد.

$\theta_5(i)$ اولین دوران در مفصل کروی را نشان می دهد.

$\theta_6(i)$ و $\theta_7(i)$ دو دوران دیگر در مفصل کروی را نشان می دهند و بین 90° و -90° می توانند تغییر کنند.

لازم به ذکر است که در به دست آوردن مدل فوق، فرض شده است که هر مفصل کروی از یک کره کامل تشکیل شده و خطایی از این نظر در معادلات در نظر گرفته نشده است. خطاهایی که برای مفصل کروی در نظر گرفته شده اند، شامل خطای اتصال به عملگر، خطای ارتفاعی مفصل و خطای قرارگیری بر روی صفحه متحرک است. بنابراین بر اساس استاندارد دناویت-هارتنبرگ، مشخصات سینماتیکی مجموعه مطابق جدول (۲) است. که در آن:

حول محور Y و γ دوران حول محور Z را نشان دهند و d_x و d_y و d_z نیز مکان مرکز مختصات P نسبت به B را بیان کنند، ماتریس تبدیل بین P و B به صورت زیر به دست می‌آید:

$${}^P_B T = \begin{pmatrix} c\beta c\gamma & -c\beta s\gamma & s\beta & d_x \\ s\alpha s\beta c\gamma + c\alpha s\gamma & -s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & -s\alpha c\beta & d_y \\ -c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma & c\alpha s\beta s\gamma + s\alpha c\gamma & c\alpha c\beta & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

بنابراین با در نظر گرفتن پارامترهای نامی (جدول ۱) و استفاده از معادلات (۳) و (۷)، معادلات مربوط به سینماتیک وارون به دست آمده و از آنها پارامترهای مفصلی محاسبه می‌شوند که به دلیل طولانی بودن عبارات، از آوردن آنها خودداری شده است. برای سینماتیک وارون کلی نمی‌توان حل تحلیلی ارائه کرد بنابراین از روش‌های حل عددی استفاده شده است. الگوریتم حل به صورت زیر است:

- به دست آوردن تخمین اولیه با استفاده از حل سینماتیک وارون

- اعمال تخمین اولیه به عنوان ورودی به معادلات سینماتیک وارون کلی و حل معادلات با استفاده از تابع `fsolve` در نرم‌افزار `MATLAB`.

استفاده از مدل نامی برای به دست آوردن تخمین اولیه باعث می‌شود که علاوه بر سریع‌تر همگرا شدن، از همگرایی الگوریتم نیز اطمینان حاصل شود.

سینماتیک مستقیم مکانیزم استوارت

در این حالت طول واقعی لینک‌ها و پارامترهای نامی و واقعی مساله داده شده‌اند و باید موقعیت واقعی عملگر نهایی را یافت. در این قسمت نیز از روش‌های عددی برای حل استفاده می‌شود. روشی که در اینجا از آن بهره گرفته می‌شود، یک روش گرادیان است که تابع وزن زیر را کمینه می‌کند [۷ و ۲].

$$Q(x) = \sum_{i=1}^6 |d_i^a - f_i(x, u)| \quad (8)$$

در این معادله، d_i^a طول واقعی عملگر شماره i ، $f_i(x, u)$ تابع سینماتیک وارون مساله، x موقعیت صفحه متحرک و u شامل پارامترهای واقعی و نامی مساله است.

$$d_0(i) = (R_B(i) + \delta R_B(i)) \frac{\sin \alpha_{B1}(i)}{\cos \beta(i)} \quad (4)$$

$$a_B(i) = (R_B(i) + \delta R_B(i)) \cos \alpha_{B1}(i)$$

$$d_{B1}(i) = (R_B(i) + \delta R_B(i)) \sin \alpha_{B1}(i) \tan \beta(i) - H_u(i) - \delta H_u(i)$$

هر یک از ماتریس‌های تبدیل T_i نیز بر اساس معادله (۱) به دست می‌آیند. نهایتاً مشابه قبل، از دستگاه (۸) به P نیز یک ماتریس تبدیل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T_p = \begin{bmatrix} \cos A & \sin A & 0 & -R_p(i) - \delta R_p(i) \\ -\sin A & \cos A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & H_s(i) + \delta H_s(i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

که در آن:

$$A = \alpha_p(i) + \gamma_p(i) \quad (6)$$

بنابراین ماتریس تبدیل بین B و P از معادله (۳) به دست می‌آید.

سینماتیک وارون مکانیزم استوارت

در سینماتیک وارون مساله، موقعیت واقعی عملگر نهایی، پارامترهای نامی و پارامترهای واقعی معلوم می‌باشند و باید مقادیر واقعی متغیرهای مفصلی شامل طول لینک‌ها و زوایای هر یک از مفاصل، تعیین شوند. برای حل نیز از حل سینماتیک وارون هر یک از سری‌ها استفاده می‌شود (شکل ۲). برای اکثر روبات‌های صنعتی، روش‌های حل تحلیلی در مساله سینماتیک وارون نامی موجود است اما لزوماً یکتا نیست. اما برای سینماتیک وارون هر یک از مجموعه‌های سری مکانیزم استوارت با در نظر گرفتن مدل نامی، حل تحلیلی وجود داشته و یکتا می‌باشد. یکتایی جواب نیز به علت وجود محدودیت‌های فیزیکی است که مفاصل کروی و یونیورسال ایجاد می‌کنند و بیشتر توضیح داده شدند. برای در نظر گرفتن موقعیت زاویه‌ای صفحه متحرک، از زوایای اولر XYZ استفاده شده است زیرا نهایتاً برای بررسی اعتبار مدل شبیه‌سازی شده توسط این روش، کل مجموعه در نرم‌افزار ویزوال نسترن نیز مدل شده و در این نرم‌افزار موقعیت زاویه‌ای صفحه با این زوایا نشان داده می‌شود. بنابراین اگر α دوران حول محور x ، β دوران

شبیه سازی

با توجه به مطالب گفته شده، برای حل سینماتیک مجموعه، برنامه‌هایی به زبان MATLAB نوشته شده‌اند. برای اطمینان از صحت مطالب گفته شده و مدل‌سازی انجام گرفته، مدل واقعی دیگری (همراه با انحراف از مدل نامی) در نرم‌افزار ویژوال نسترن ساخته شد (شکل ۶) و خروجی‌ها مقایسه و تأیید شدند.

تأثیر منابع خطایی مختلف در خروجی

به جهت بررسی تأثیر هر یک از خطاها در خروجی مجموعه و تعیین میزان حساسیت مجموعه نسبت به هر یک از خطاها، نمودارهای شکل (۷) به ترتیب زیر رسم شده‌اند:

۱- رباتی که در آن یک منبع خطایی وجود دارد، در نظر گرفته می‌شود.

۲- با استفاده از حل سینماتیک وارون نامی، به ازای یک موقعیت فرضی خروجی، طول لینک‌ها محاسبه می‌گردد.

۳- به ازای طول لینک‌های محاسبه شده و سینماتیک مستقیم کلی، خروجی (موقعیت صفحه متحرک) به دست می‌آید.

۴- از تفاضل خروجی به دست آمده و خروجی اولیه فرض شده، مقادیر خطای مربوط به مکان و جهت صفحه به دست می‌آیند.

در رسم این نمودارها، موقعیت اولیه فرض شده $z = 0.6 \text{ m}$ و $x = y = \alpha = \beta = \gamma = 0$ است و در هر کدام از نمودارها، یک مختصه تغییر کرده و بقیه همان مقادیر فوق هستند.

همچنین خطاهای α_{B1} و β و α_0 در خروجی اثری ندارند. d_1 و a_1 نیز تأثیر بسیار کمی می‌گذارند. بنابراین می‌توان تعیین کرد که مجموعه نسبت به کدام پارامترها حساس است و میزان حساسیت را نیز می‌توان به وسیله رسم نمودارها تحقیق کرد. مشخصات مکانیزم استوارت شبیه سازی شده:

$$R_B = 500\text{mm}, R_P = 300\text{mm}, d_5 = 300\text{mm}$$

$$H_s = 30\text{mm}, H_u = 50\text{mm}$$

$$\alpha_{B0} = (30, 90, 150, 210, 270, 330) \text{ deg}$$

$$\alpha_P = (15, 105, 135, 225, 255, 345) \text{ deg}$$

پارامترهای خطای به کار رفته نیز عبارتند از:

$$\delta R_B = \delta R_P = (3, 1, -4, 0, 4, -4) \text{ mm}$$

$$\gamma_B = (1, -1, 0.5, 0, -0.5, -1) \text{ deg}$$

$$\delta d_4 = (1, -1, -0.5, 0.3, 0, -0.8) \text{ mm}$$

$$a_0 = (-0.5, 0, 0.4, 0.2, -0.2, 0.5) \text{ mm}$$

$$a_1 = d_1 = (-1, 2, 0, -3, 1, 3) \text{ mm}$$

$$\alpha_{B1} = (5, 0, -3, 4, -5, -2) \text{ deg}$$

کالیبراسیون

الگوریتم کالیبراسیونی که در ادامه می‌آید، در حقیقت به شناسایی پارامترهای خطا بر اساس مدل خطای معرفی شده می‌پردازد. یعنی پردازشگر روبات باید به جای استفاده از مدل نامی، از مدل واقعی به دست آمده بهره بگیرد و پارامترهای خطا را با استفاده از این الگوریتم شناسایی پیدا کند. با توجه به مرحله قبل، منابع خطایی که بر خروجی تأثیری ندارند از مدل خطا حذف شده‌اند. برای انجام کالیبراسیون فرض می‌شود که به تعداد m پارامتر خطا در مدل وجود داشته باشد، بنابراین الگوریتم حل مطابق زیر است [۸]:

n موقعیت خروجی ($n \geq m$) برای مجموعه در نظر گرفته می‌شود. سپس یک مقدار اولیه برای خطاها فرض می‌شود. به ازای مقادیر خطاها و طول عملگرها، با استفاده از سینماتیک مستقیم کلی، موقعیت خروجی به دست می‌آید. سپس δX_k که یک بردار $6n \times 1$ است و از بردارهای 6×1 δX_{ik} ساخته شده، بر اساس معادله (۹) به دست می‌آید.

$$\delta X_k = [\delta X_{1k}^T \quad \delta X_{2k}^T \quad \dots \quad \delta X_{nk}^T]^T \quad (9)$$

در حقیقت از تفاضل خروجی‌های واقعی و خروجی‌های مرحله k به دست می‌آید. در این مرحله، نرم حساب می‌شود که اگر از یک مقدار ε کمتر باشد، شناسایی انجام شده است. سپس ماتریس ژاکوبی شناسایی (J_k) تعیین می‌شود و از طریق آن ضریب تصحیح δu_k بر اساس معادله (۱۰) به دست می‌آید.

$$\delta u_k = [(J_k^T J_k)^{-1} J_k^T] \delta X_k \quad (10)$$

تعیین ماتریس ژاکوبی شناسایی

1. B., Dasgupta, T. S., Mruthyunjaya, "The Stewart Platform Manipulator: a review", Mechanism and Machine Theory, 35, 15-40, 2000.

2. J., Wang, O., Masory, "On the Accuracy of Stewart Platform - Part I, The Effect of Manufacturing Tolerances", Proceedings IEEE Int. Conference on Robotic and Automation, 1, 114-120, 1993.

3. T., Ropponen, T., Arai, "Accuracy Analysis of a Modified Stewart Platform Manipulator", Proceeding IEEE Int. Conference on Robotic and Automation, 1, 521-525, 1995.

4. A. J., Patel, K. F., Ehmman, "Volumetric Error Analysis of of a Stewart Platform Based Machine Tool", Annals of the CIRP, 46, 287-290, 1997.

5. H. S., Kim, Y. J., Choi, "The Kinematic Error Bound Analysis of the Stewart Platform", Journal of Robotic Systems, 17(1), 63-73, 2000.

۶. ج. کریگ؛ ترجمه ع. مقداری، ف. میرفخرایی، مکانیک و کنترل در رباتیک، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۷.

7. C. C., Nguyen, S. S., Antrazi, Z. L., Zhou, "Adaptive Control of a Stewart Platform Based Manipulator", Journal of Robotic Systems, 10(5), 657-687, 1993.

8. O., Masory, J., Wang, H., Zhuang, "On the Accuracy of Stewart Platform - Part II", Proceedings IEEE Int. Conference on Robotic and Automation, 1, 725-731, 1993.

جداول، منحنی‌ها و شکل‌ها

جدول (۱) - پارامترهای نامی مکانیزم استوارت

T_i	a_{i-1}	d_i	α_{i-1}	θ_i
1	0	$H_u(i)$	0	$\alpha_{B0}(i)$
2	$R_B(i)$	0	90	$90 + \theta_2(i)$
3	0	0	90	$90 + \theta_3(i)$
4	0	$d_4(i)$	90	0
5	0	$d_5(i)$	0	$\theta_5(i)$
6	0	0	90	$90 + \theta_6(i)$
7	0	0	90	$90 + \theta_7(i)$
8	0	0	90	$180 + \alpha_p(i) - \alpha_{B0}(i)$

این ماتریس، یک ماتریس $6n \times m$ است که به صورت زیر به دست می‌آید:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\delta X_{11}}{\delta u_1} & \frac{\delta X_{21}}{\delta u_2} & \dots & \frac{\delta X_{m1}}{\delta u_m} \\ \frac{\delta X_{12}}{\delta u_1} & & & \vdots \\ \vdots & & & \\ \frac{\delta X_{1n}}{\delta u_1} & \dots & & \frac{\delta X_{mn}}{\delta u_m} \end{bmatrix} \quad (11)$$

هر کدام از عناصر $J_{ij} = \frac{\delta X_{ji}}{\delta u_j}$ ، یک بردار 6×1 است و

به ترتیب زیر به دست می‌آید:

در نقطه شماره i در نظر گرفته شده، یک تغییر در پارامتر خطای شماره j (u_j) اعمال می‌شود و سپس خروجی محاسبه می‌گردد. در همان نقطه، یک بار نیز بدون اعمال این تغییر، خروجی حساب می‌شود. از تفاضل دو مقدار به دست آمده، δX_{ji} و در نتیجه $\frac{\delta X_{ji}}{\delta u_j}$ به دست می‌آید. دقت کنید که برای هر بار محاسبه ماتریس J ، باید $(n+1)m$ دفعه، سینماتیک مستقیم کلی مجموعه را حل کرد.

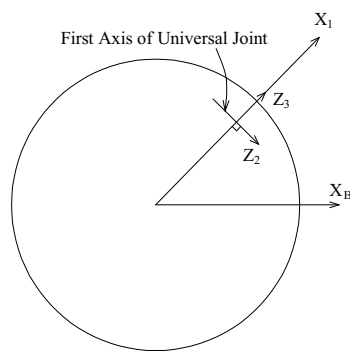
نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل دقیق از مکانیزم استوارت که انواع خطاهای ساخت و اندازه‌گیری را در بر می‌گیرد، ارائه شد. از روی نتایج به دست آمده و منحنی‌های شکل (۷) مشخص است که خطاهای ساخت صفحات پایه و متحرک، خطا در ساخت مفصل یونیورسال (فاصله بین دو محور در مفصل) و خطا در اندازه‌گیری عملگرها، از منابع اصلی ایجاد خطا در خروجی می‌باشند. همچنین میزان خطایی که در خروجی ایجاد می‌شود، تقریباً برابر با دقت حسگرهای به کار گرفته شده در عملگرها و نیز برابر با مقدار تolerانس در نظر گرفته شده در ساخت است. در ادامه با توجه به الگوریتم کالیبراسیون به کار گرفته شده، می‌توان کلیه خطاهای ساخت هندسی را جبران کرد و بنابراین مهمترین عامل در تعیین میزان دقت خروجی، دقت عملگرهای به کار گرفته شده است.

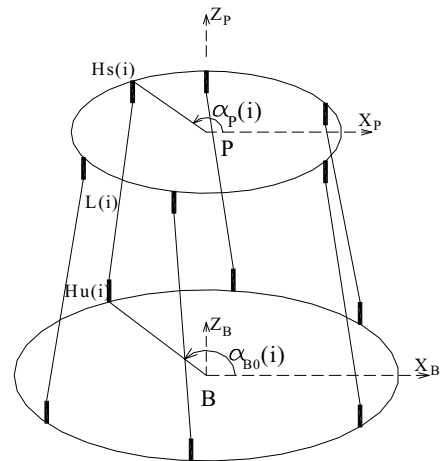
مراجع

جدول (۲) - پارامترهای واقعی مکانیزم استوارت

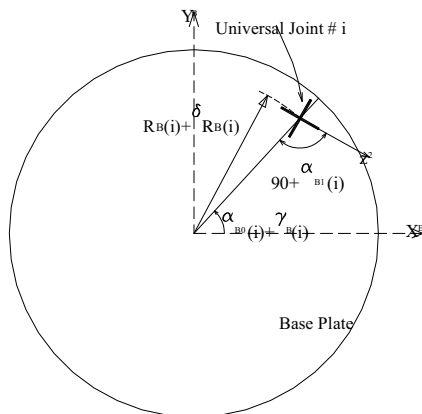
T_i	a_{i-1}	d_i	α_{i-1}	θ_i
1	0	$-d_{B1}(i)$	0	$-\alpha_{B1}(i) + \alpha_{B0}(i) + \gamma_B(i)$
2	$a_B(i)$	$-d_0(i)$	$90 + \beta(i)$	$90 + \theta_2(i)$
3	$a_0(i)$	$d_1(i)$	$90 + \alpha_0(i)$	$90 + \theta_3(i)$
4	$a_1(i)$	$d_4(i) + \delta d_4(i)$	90	0
5	$a_2(i)$	$d_5(i)$	0	$\theta_5(i)$
6	0	0	90	$90 + \theta_6(i)$
7	0	0	90	$90 + \theta_7(i)$
8	0	0	90	$180 + \alpha_p(i) + \gamma_p(i) + \alpha_{B1}(i) - \alpha_{B0}(i) - \gamma_B(i)$



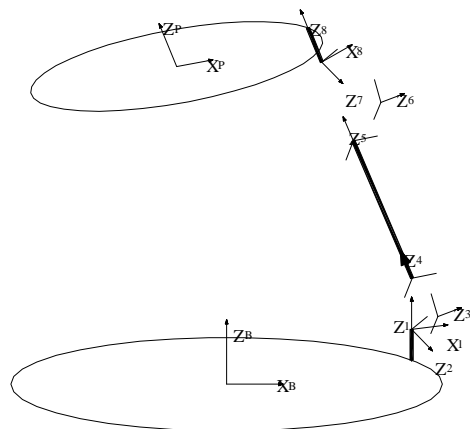
شکل ۳- موقعیت دستگاههای مختصات روی صفحه پایه در حالت نامی



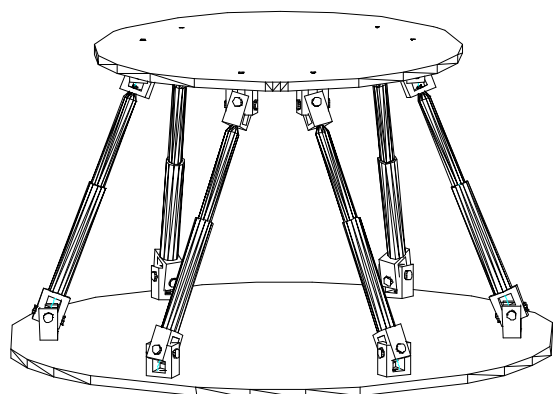
شکل ۱- مدل نامی مکانیزم استوارت



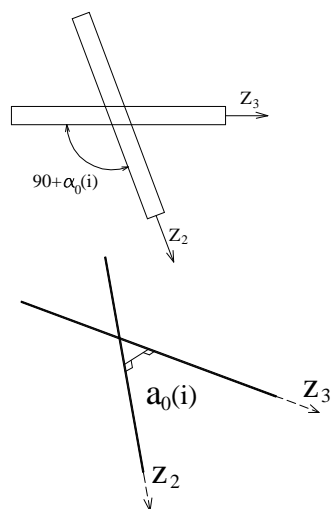
شکل ۴- خطاهای در نظر گرفته شده برای موقعیت مفصل یونیورسال



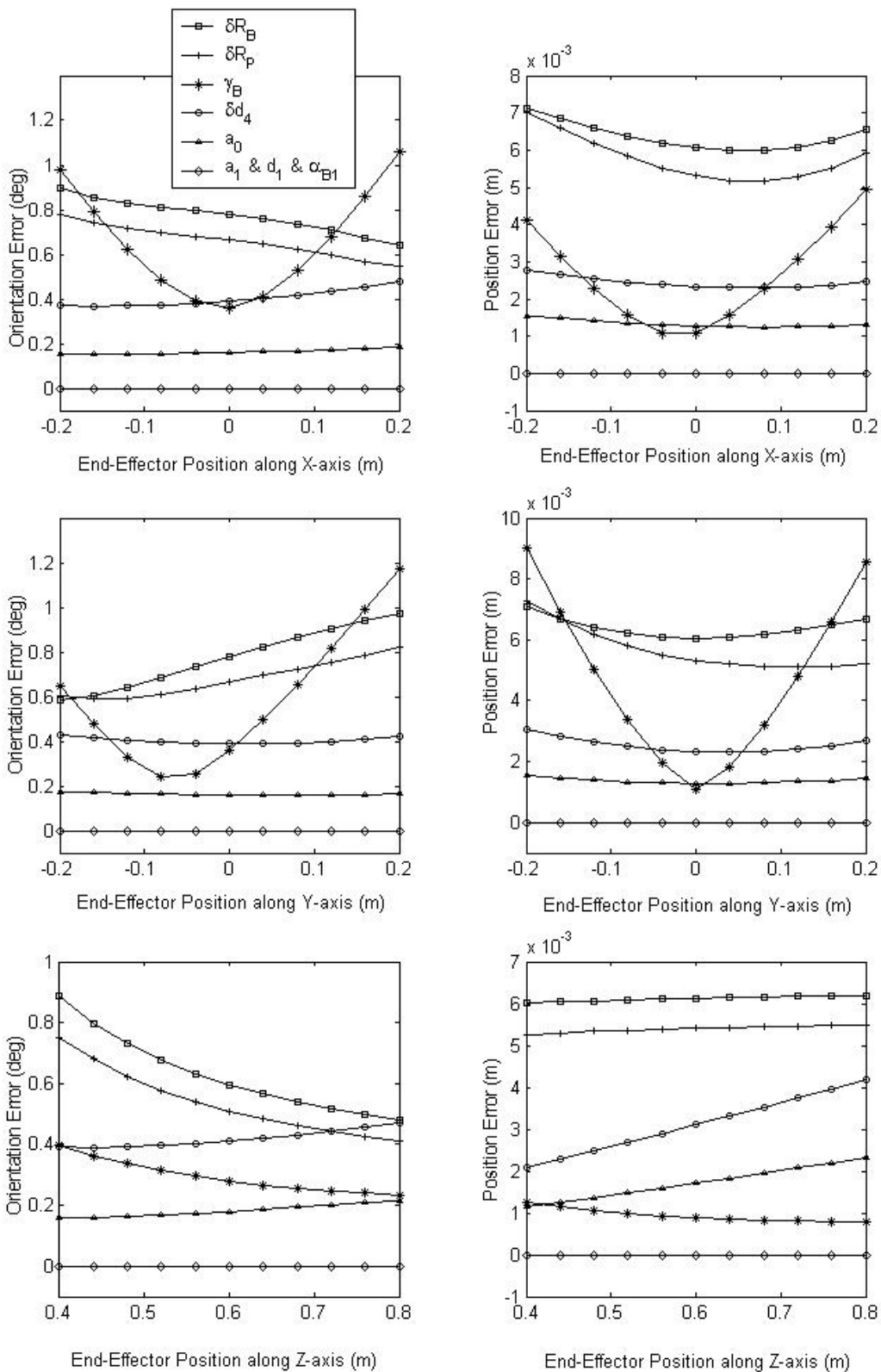
شکل ۲- یکی از مجموعه‌های سری مکانیزم و دستگاههای مختصات به کار رفته



شکل ۶- مدل مکانیزم استوارت ساخته شده در ویژوال نسترن



شکل ۵- خطاهای موجود در ساخت مفصل یونیورسال



شکل ۷- مقایسه خطای ایجاد شده در خروجی در اثر منابع مختلف خطا