



## بهبود دقت ردیابی مسیر برای ربات های صنعتی با کمک سیستم ردیابی نوری

نجات دریجانی<sup>۱</sup>

۱- دانشگاه آزاد واحد شهر مجلسی اصفهان darijani.nejat2020@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹-۱۱-۰۲ تاریخ دریافت: ۱۳۹۹-۱۰-۱۵

چکیده: دقت موقعیت یابی ربات نقش مهمی در کاربردهای اتوماسیون صنعتی ایفا می کند. در این مقاله، روشی برای بهبود دقت ربات با یک سیستم ردیابی نوری پیشنهاد شده است که یک الگوریتم عددی حداقل مربع را برای شناسایی پارامترهای سینماتیکی ادغام می کند. در فرآیند ایجاد مدل سینماتیک سیستم، خطاهای موقعیت یابی ابزار و پایه ربات و خطاهای پارامترهای Denavit-Hartenberg همه در نظر گرفته می شوند. علاوه بر این، وابستگی خطی بین پارامترها تحلیل می شود. شبیه سازی عددی بر اساس یک ربات UR 6 محوره برای تایید اثربخشی روش پیشنهادی انجام شده است. سپس این روش بر روی ربات واقعی پیاده سازی می شود و نتایج تجربی نشان می دهد که ربات ها می توانند با دقت  $\pm 0.35$  میلی متر برای موقعیت و  $\pm 0.07$  درجه برای جهت یابی به موقعیت های مورد نظر برسند. با بهره مندی از سیستم ردیابی نوری، روش پیشنهادی را می توان به راحتی خودکار کرد تا دقت ربات را برای کاربردهایی که نیاز به دقت موقعیت یابی بالا مانند پرچ کردن، مته و مونتاژ دقیق دارند، بهبود بخشد.

واژه های کلیدی: ربات، شناسایی پارامترهای سینماتیک، سیستم ردیابی نوری

### ۱. مقدمه

ربات های صنعتی به دلیل ویژگی های تکرارپذیری خوب کار، به طور گسترده برای اتوماسیون تولید در تولیدات با حجم بالا استفاده شده اند. در یک سناریوی رایج استفاده از این ماشین ها، یک اپراتور انسانی به ربات آموزش می دهد تا به موقعیت دلخواه حرکت کند. ربات این موقعیت را ثبت می کند و سپس مسیر آموزش داده شده را برای تکمیل کار تکرار می کند. با این حال، آموزش ربات معمولاً برای کاربردهای کم حجم زمان بر است (گالسیکی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۸) اگرچه برنامه نویسی آفلاین می تواند حجم کار آموزش ربات را به میزان قابل توجهی کاهش دهد، مسیرهای ربات تولید شده بر اساس مدل سینماتیکی اسمی ربات است و بنابراین، اینکه آیا ربات می تواند کار را با موفقیت از طریق برنامه نویسی آفلاین انجام دهد به دقت مطلق آن بستگی دارد. سازندگان ربات مقادیر اسمی پارامترهای  $(D-H^2)$  ربات را ارائه می دهند (لین و چانگ<sup>۳</sup>، ۲۰۱۷) با این حال، مقادیر واقعی این پارامترها می تواند از مقادیر اسمی خود به دلیل خطاهای در ساخت، مونتاژ و غیره انحراف داشته باشد که بر این اساس باعث ایجاد خطاهای موقعیت یابی به پایانه ربات می شود. در نتیجه، دقت مطلق ربات های صنعتی در مقایسه با بسیاری از انواع دیگر تجهیزات تولیدی مانند ماشین ابزارهای CNC نسبتاً پایین است (لین و ژائو<sup>۴</sup>، ۲۰۱۷) در نتیجه، ربات های صنعتی هنوز در بسیاری از کاربردهای کم حجم که در آن ها به دقت مطلق بالا (با خطای موقعیت یابی کمتر از ۰.۵۰ میلی متر برای یک ربات صنعتی با اندازه متوسط تا بزرگ) نیاز است، مانند فرز، حفاری و دقیق با چالش هایی مواجه هستند. مونتاژ.

<sup>1</sup> Galicki et al

<sup>2</sup> Denavit-Hartenberg

<sup>3</sup> Lin & Chang

<sup>4</sup> Lin & Zhao

کالیبراسیون سینماتیک یک راه قابل توجه برای بهبود دقت مطلق روبات‌ها است (نگیوان و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۸). دو نوع روش کالیبراسیون بر اساس روش‌های اندازه‌گیری موجود است. یکی کالیبراسیون حلقه باز است که در آن موقعیت مطلق و جهت‌گیری نهایی ربات اندازه‌گیری می‌شود. دیگری کالیبراسیون حلقه بسته است که در آن موقعیت و جهت‌گیری نهایی اثر نسبت به بخش مرجع یا گیج دیگر اندازه‌گیری می‌شود.

برای کالیبراسیون حلقه باز، ردیاب‌های لیزری به عنوان دستگاه اندازه‌گیری با الگوریتم‌های کالیبراسیون مختلف به کار گرفته شده‌اند. با استفاده از یک ردیاب لیزری در مطالعات نوبیولا و همکاران<sup>۶</sup>، (۲۰۱۹) دقت موقعیت‌یابی مطلق ربات می‌تواند به حدود ۰٫۳۰-۰٫۱۰ میلی‌متر برسد. در میان آنها، تکنیک حداقل مربعات اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد، که هدف آن به حداقل رساندن مجموع مجذور باقیمانده است. در مطالعه وو و همکاران<sup>۷</sup>، (۲۰۱۸) یک روش کالیبراسیون سینماتیک جدید با استفاده از الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF) و فیلتر ذرات (PF) ارائه شده است که می‌تواند به طور قابل توجهی دقت موقعیت‌یابی ربات را بهبود بخشد. به لطف اصل مدل‌سازی مبتنی بر داده، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) کاربرد امیدوارکننده‌ای در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده مانند کالیبراسیون دارد. در گاو و همکاران<sup>۸</sup>، (۲۰۱۸) یک روش شناسایی مبتنی بر مدل از خطاهای هندسی ربات و یک شبکه عصبی مصنوعی را برای به دست آوردن یک راه حل موثر برای اصلاح پارامترهای ربات ترکیب کرد. در مطالعه جیانگ و همکاران<sup>۹</sup>، (۲۰۱۷) یک شبکه عصبی انتشار برگشتی (BPNN) و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای شناسایی پارامترهای سینماتیکی ربات‌های صنعتی با پاسخ همگرایی افزایش‌یافته استفاده شده‌اند. ماشین‌های اندازه‌گیری مختصات (CMM) نیز در کالیبراسیون روبات‌های حلقه باز استفاده شده‌اند. به عنوان مثال در مطالعه بوم و همکاران<sup>۱۰</sup>، (۲۰۱۶)، پارامترهای هندسی و انعطاف‌پذیری ربات‌ها را برای دستیابی به کاهش قابل توجهی از خطاهای موقعیت‌یابی سیستماتیک تعیین کرده است. در مطالعه درلیس و همکاران<sup>۱۱</sup>، (۱۹۹۳)، یک CMM نوری و یک ردیاب لیزری برای کالیبره کردن ربات صنعتی ABB IRB 120 ترکیب شده‌اند، به طوری که میانگین و حداکثر خطای موقعیت را می‌توان از بیش از ۳٫۰۰ میلی‌متر و ۵٫۰۰ میلی‌متر به حدود ۰٫۱۵ میلی‌متر و ۰٫۵۰ میلی‌متر کاهش داد. ، به ترتیب.

برای کالیبراسیون حلقه بسته، مدل‌های کالیبراسیون با ترکیب انواع مختلفی از محدودیت‌های سینماتیکی ناشی از قطعات مرجع یا گیج‌های اضافی ایجاد می‌شوند. با استفاده از گیج‌ها در مطالعه لیتکاپ و همکاران<sup>۱۲</sup>، (۲۰۰۸)، دقت موقعیت‌یابی مطلق ربات نیز می‌تواند به حدود ۰٫۳۰-۰٫۱۰ میلی‌متر برسد. در مطالعه نوبیولا و همکاران<sup>۱۳</sup>، (۲۰۱۴)، از محدودیت‌های نقطه‌ای برای بهبود دقت ربات‌های صنعتی شش محوره استفاده کرده است. پارامترهای ربات با کنترل یک ربات برای رسیدن به یک مکان در موقعیت‌های مختلف کالیبره می‌شوند. در مطالعه هی و همکاران<sup>۱۴</sup>، (۲۰۱۹)، یک روش کالیبراسیون غیر سینماتیکی برای بهبود دقت یک ربات صنعتی شش محوره، با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی خطی بر اساس رویکرد کالیبراسیون حلقه بسته با محدودیت‌های مسطح متعدد، توسعه داده شده است. در مطالعه جوبیار و همکاران<sup>۱۵</sup>، (۲۰۱۸)، یک روش کالیبراسیون سینماتیک را با استفاده از محدودیت‌های فاصله و کره ارائه کرده است که به طور موثری دقت موقعیت‌یابی ربات را بهبود می‌بخشد. در دسته دیگری از روش‌های کالیبراسیون حلقه بسته، محدودیت‌های سینماتیکی توسط سیستم‌های بینایی القا می‌شوند. به عنوان مثال، در مطالعه دو و همکاران<sup>۱۶</sup>، (۲۰۱۹)، یک روش کالیبراسیون ربات صنعتی مبتنی بر بینایی را توسعه داده است که فقط به چندین تصویر مرجع نیاز دارد و میانگین خطای موقعیت‌یابی از ۵-۷ میلی‌متر به کمتر از ۲ میلی‌متر کاهش یافت.

<sup>5</sup> Nguyen et al.

<sup>6</sup> Nubiola et al.

<sup>7</sup> Wu et al.

<sup>8</sup> Gao et al.

<sup>9</sup> Jiang et al.

<sup>10</sup> Borm et al.

<sup>11</sup> Driels et al.

<sup>12</sup> Lightcap et al.

<sup>13</sup> Nubiola et al.

<sup>14</sup> He et al.

<sup>15</sup> Joubair et al.

<sup>16</sup> Du et al.

روش کالیبراسیون معمولاً برای یک کار خاص خاص نیست، تأثیر نهایی ربات را در نظر نمی گیرد و اصلاح خطاهای ناشی از تغییر شکل الاستیک ساختاری و سایر عوامل دشوار است. سایر کارهای تحقیقاتی بر جبران خطای موقعیت یابی آنلاین متمرکز هستند، به عنوان مثال، تصحیح خطای موقعیت یابی به طور مستقیم با ادغام یک سیستم اندازه شناسی خارجی. جبران خطای موقعیت یابی آنلاین معمولاً وظیفه محور است و به یک مدل سینماتیک دقیق نیاز ندارد. به عنوان مثال، در مطالعه وانگ و همکاران<sup>۱۷</sup>، (۲۰۱۴)، یک روش جبرانی تکراری برخط را پیشنهاد کرده است که با یک روش جبران پیش خور ترکیب می شود تا دقت مونتاژ یک سیستم روباتی (MIRS) را با ادغام یک سیستم اندازه گیری ۶-DoF (T-Mac) افزایش دهد. ( برای ردیابی حرکت ربات در زمان واقعی. در مطالعه ژانگ و همکاران<sup>۱۸</sup>، (۲۰۱۷)، یک روش جبران آنلاین بر اساس ردیاب لیزری برای افزایش دقت ربات بدون کالیبراسیون دقیق ارائه شده است. در مطالعه منگ و همکاران<sup>۱۹</sup>، (۲۰۰۷)، یک روش جبران خطای حرارتی دینامیکی بلادرنگ را برای یک سیستم بازرسی بصری روباتیک توسعه داده است. این روش به گونه ای طراحی شده است که در خط تولید اعمال شود و خطای حرارتی را در طول عملیات سیستم رباتیک تصحیح کند. در مطالعه ساوند و همکاران<sup>۲۰</sup>، (۲۰۱۹)، یک الگوریتم بلادرنگ تعبیه شده برای جبران انحراف ابزار جانبی برای یک سیستم جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روباتیک ارائه شده است. در مطالعه جیانگ و همکاران<sup>۲۱</sup>، (۲۰۱۶)، یک طرح ردیابی مسیر پویا ارائه کرده است که می تواند وظایف از پیش برنامه ریزی شده خودکار را تحقق بخشد و دقت ردیابی را با بازخورد اندازه گیری فتوگرامتری چشم به دست بهبود بخشد.

به طور خلاصه، روش های مختلف کالیبراسیون آفلاین و جبران آنلاین برای بهبود دقت مطلق روبات ها در ادبیات گزارش شده اند. با این حال، برای دستیابی به دقت بالا (تا ۰.۳۰-۰.۵۰ میلی متر)، این روش ها دارای اشکالاتی هستند. برای کالیبراسیون حلقه باز، آن روش ها معمولاً به سیستم های اندازه شناسی خارجی مانند ردیاب های لیزری و CMM نیاز دارند که پرهزینه و فاقد انعطاف پذیری برای اتوماسیون تولید هستند. (بین ۲۰۱۴، ۲۲) برای کالیبراسیون حلقه بسته، استفاده از گنج ها برای کالیبراسیون نیاز به آموزش دستی دارد و خودکار کردن آن دشوار است، که بر راندمان کالیبراسیون تأثیر می گذارد. استفاده از سیستم های بینایی برای کالیبراسیون می تواند برای کالیبراسیون مستقل کاملاً انعطاف پذیر باشد، اما خطای موقعیت یابی می تواند به چند میلی متر محدود شده توسط دقت سیستم های بینایی باشد. برای جبران آنلاین، اکثر روش ها یک ردیاب لیزری را به عنوان یک سیستم اندازه شناسی خارجی با یک هدف لیزری نصب شده بر روی سیستم کالیبره شده استفاده می کنند که هزینه بر است و می تواند تحت تأثیر دید هدف لیزری قرار گیرد. علاوه بر این، اکثر روش های فوق تأثیر دقت موقعیت یابی ناشی از ابزارها را در نظر نمی گیرند. به این دلایل، بهبود دقت مطلق همچنان یک چالش برای کاربردهای روباتیک در کارهای با حجم کم و با دقت بالا است. (شی ۲۰۱۶، ۲۳)

برای غلبه بر مسائل فوق، در این پژوهش رویکردی برای تصحیح مقادیر پارامترهای سینماتیکی از طریق اندازه گیری موقعیت های واقعی نهایی از طریق یک سیستم ردیابی نوری پیشنهاد می کنیم. این رویکرد یک سیستم ردیابی نوری و یک نشانگر بدنه سفت و سخت (با اهداف نشانگر متعدد) نصب شده بر روی افکتور کالیبره شده برای جبران آنلاین خطای موقعیت یابی ربات را ادغام می کند. سیستم ردیابی نوری اندازه گیری آنلاین حرکت ۶-DOF پایانه ربات را امکان پذیر می کند. در فرآیند شناسایی پارامتر، تأثیر ابزار، خطای موقعیت یابی پایه ربات و خطا در پارامترهای D-H همگی در نظر گرفته می شوند. سپس از یک الگوریتم عددی حداقل مربع برای تصحیح خطاهای این پارامترهای سینماتیکی ربات استفاده می شود. در مقایسه با ردیاب های لیزری، هزینه سیستم ردیابی نوری به طور قابل توجهی کمتر از سیستم ردیابی لیزری است. همچنین، سیستم ردیابی نوری می تواند به طور همزمان موقعیت چندین نشانگر متصل به جسم اندازه گیری شده را اندازه گیری کند، که دید خوب جسم و انعطاف پذیری را برای ادغام با سیستم ردیابی نوری به ارمغان می آورد. در مقایسه با کالیبراسیون حلقه بسته با گنج، سیستم ردیابی نوری برای بهبود کارایی

<sup>17</sup> Wang et al.

<sup>18</sup> Meng et al.

<sup>19</sup> Zhang et al.

<sup>20</sup> Saund et al.

<sup>21</sup> Jiang et al.

<sup>22</sup> Yin et al.

<sup>23</sup> Shi et al.

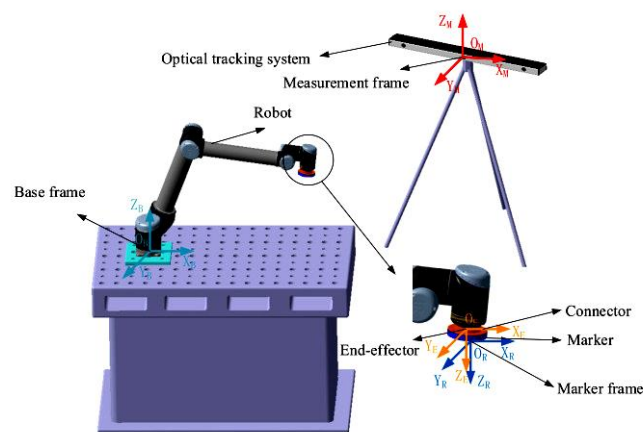
کالیبراسیون راحت و خودکار است. در مقایسه با جبران آنلاین با ردیاب های لیزری، این روش مقرون به صرفه تر است و می تواند دید بهتری از ابزار ربات ارائه دهد. به طور خلاصه، سهم این کار پیشنهاد یک روش جامع برای اصلاح نه تنها خطاها در پارامترهای DH بلکه خطاهای موقعیت یابی در قاب پایه و ابزار برای مدل سینماتیکی است که با اتخاذ سیستم ردیابی نوری می تواند منجر شود. به کالیبراسیون کارآمد و خودکار سیستم رباتیک برای کاربران ربات.

در ادامه مقاله، تنظیم سیستم همانطور که در بخش ۲ توضیح داده شد، توسعه نظری دقیق در بخش بعدی به ترتیب برای سینماتیک ربات و کالیبراسیون پارامترهای سینماتیک ارائه شده است و سپس شبیه سازی و نتایج تجربی ارائه می شود.

## ۲- توضیحات سیستم

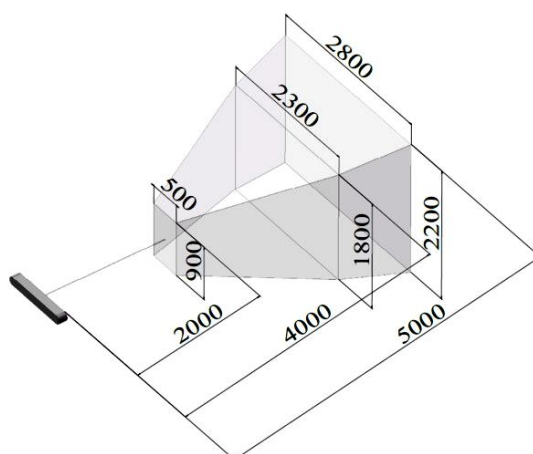
### ۲-۱- راه اندازی سیستم

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، سیستم مورد مطالعه از یک ربات صنعتی، یک ابزار نصب شده بر روی ربات و یک سیستم ردیابی نوری تشکیل شده است. ربات را می توان طوری برنامه ریزی کرد که ابزار را برای حرکت در مسیر مشخصی هدایت کند. موقعیت (موقعیت و جهت) ابزار را می توان از طریق سیستم ردیابی نوری به دست آورد.



شکل ۱- پیکربندی سیستم کالیبراسیون ربات صنعتی

به طور خاص، یک سیستم ردیابی نوری Camsense S (Shenzhen, Camsense) کشور چین) در این سیستم به کار گرفته شده است. این یک دستگاه ردیابی پویا با دقت بالا است که برای کاربردهای رباتیک دقیق سفارشی شده است که می تواند موقعیت های ۳-DOF نشانگرهای تک نقطه ای و موقعیت های ۶-DOF (موقعیت و جهت) نشانگرهای بدنه صلب را که در فضا در حال حرکت در زمان واقعی هستند، بومی سازی کند. سیستم ردیابی نوری با اندازه گیری یک شی نصب شده بر روی یک CMM کالیبره شده است. محدوده اندازه گیری این سیستم ردیابی نوری ۲ تا ۵ متر است که در شکل ۲ ترسیم شده است. دقت موقعیت یابی در محدوده های اندازه گیری ۲ تا ۳ متر، ۳ تا ۴ متر و ۴ تا ۵ متر ۰٫۰۸ میلی متر، ۰٫۱۴ میلی متر و ۰٫۲۱ میلی متر است. به ترتیب، سیستم ردیابی نوری از دو دوربین CCD مادون قرمز استفاده می کند که با نرخ فریم ۴۰ هرترز کار می کنند. دوربین و نشانگرها از طریق شبکه بی سیم ۲٫۴G همگام سازی می شوند، بنابراین نشانگرها را قادر می سازند در حالت پالس کار کنند و نسبت نویز سیگنال را بیشتر کنند. نشانگر بی سیم است و حاوی چندین منبع نور فعال با دیودهای مادون قرمز است که نور را در فرکانس های تعیین شده ساطع می کنند، بنابراین می توان آنها را به راحتی شناسایی کرد و به شرایط نور خارجی حساس نیستند. یک منبع تغذیه با نشانگر یکپارچه شده است و می توان ارتباط بی سیم بین نشانگر و کنترل کننده سیستم ردیابی نوری برقرار کرد. علاوه بر این، نشانگرها سبک و فشرده هستند، به عنوان مثال، نشانگرهای بدنه صلب با جرم حدود ۴۰۰ گرم، قطر ۱۳۶ میلی متر و ارتفاع ۱۶٫۵ میلی متر هستند.



شکل ۲- محدوده اندازه گیری سیستم ردیابی نوری مورد استفاده در این کار (واحد: میلی متر).

با بهره مندی از این واقعیت که نشانگرهای سیستم ردیابی نوری سبک، فشرده و مجهز به منبع انرژی داخلی هستند، این نشانگرها را می توان به راحتی در حین اندازه گیری بر روی پایانه ربات نصب کرد. به این ترتیب، تأثیر سیستم نهایی بر دقت ربات را می توان با استفاده از این رویکرد در نظر گرفت. همچنین، سیستم ردیابی نوری می تواند به طور همزمان موقعیت های نشانگرهای متعددی را که بر روی افکتور کالیبره شده متصل شده اند اندازه گیری کند تا دید نهایی را توسط سیستم ردیابی تضمین کند.

در مقایسه با سیستم های ردیابی لیزری، سیستم ردیابی نوری حجم اندازه گیری کمتری را ارائه می دهد و کمی دقت کمتری دارد، اما برای اتوماسیون بسیار ارزان تر و انعطاف پذیرتر هستند. همچنین، ردیابی نوری می تواند دقت کافی را برای کارهای ماشین کاری و مونتاژی که در این کار مورد هدف قرار گرفته اند با دقت موقعیت یابی حدود ۰,۳۰ تا ۰,۵۰ میلی متر فراهم کند. علاوه بر این، از آنجایی که تکرارپذیری یک ربات صنعتی با اندازه متوسط تا بزرگ برای وظایف مورد نظر حدود ۰,۱۰-۰,۲۰ میلی متر است، بهبود دقت ربات بهتر از تکرارپذیری آن با کالیبراسیون حتی با سیستم ردیابی لیزری دشوار خواهد بود.

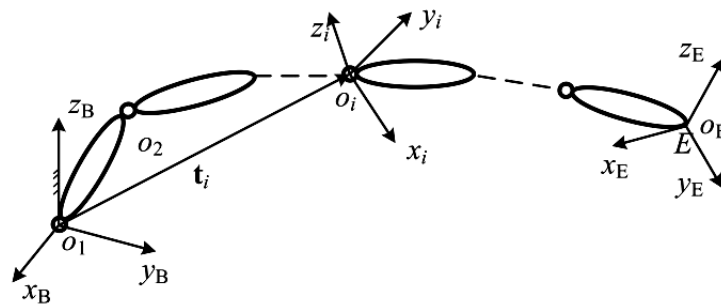
#### ۲-۲-۲- یکپارچه سازی سیستم

ادغام سیستم ردیابی نوری با ربات UR مورد استفاده در این کار در شکل ۳ نشان داده شده است. با پروتکل ارتباطی TCP/IP، کامپیوتری که روی سیستم عامل ربات (ROS) کار می کند می تواند با کنترل کننده ربات ارتباط برقرار کند و دستوراتی را برای حرکت دادن ربات ارسال کند. ربات در حالت کنترل موقعیت هنگامی که ربات به یک سری از نقاط کالیبراسیون حرکت می کند، موقعیت و جهت نشانگر بدنه صلب نصب شده بر روی افکتور کالیبره شده توسط سیستم ردیابی نوری برای هر نقطه اندازه گیری می شود و زوایای اتصال ربات به طور همزمان ثبت می شود. سپس از این داده ها برای محاسبه پارامترهای سینماتیکی واقعی سیستم رباتیک استفاده می شود. در نهایت، این پارامترهای واقعی را می توان خروجی و برای محاسبه سینماتیکی ربات برای کنترل حرکت ربات استفاده کرد. روش فوق را می توان بدون دخالت انسان تکمیل کرد و بنابراین امکان کالیبراسیون مستقل با ابزار نصب شده روی ربات را فراهم کرد.

#### ۳- مدلسازی سینماتیکی

##### ۳-۱- خطا در پارامترهای D-H

طرح حرکتی یک ربات صنعتی معمولی با پیوندهای  $m$  و مفاصل چرخشی در شکل ۴ نشان داده شده است. بردار موقعیت مفصل  $i$ th در قاب پایه  $\{O\_XBYBZB\}$  با  $t_i$  نشان داده شده است. یک قاب محلی  $\{oi\_xiyizi\}$  روی هر یک از پیوندها با مبدأ در مفصل  $i$  برقرار می شود. نوک ابزار نصب شده بر روی آخرین پیوند با  $E$  نشان داده می شود و بردار موقعیت آن در قاب پایه به صورت  $tE$  نوشته شده است.



شکل ۴- طرح سینماتیک یک ربات صنعتی.

ماتریس همگن قاب بدنه یکم  $\{O_i-x_iy_izi\}$  نسبت به قاب بدنه  $(i-1)$  را می توان به صورت زیر ارائه کرد:

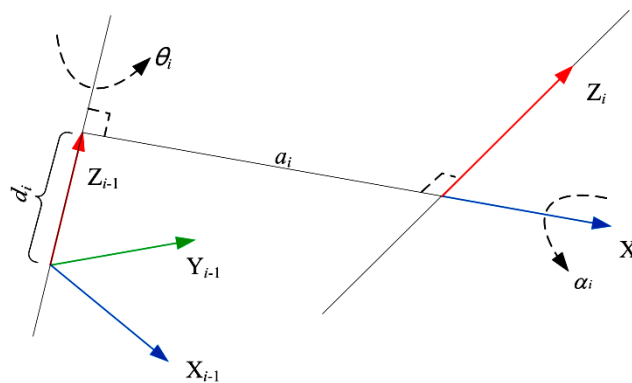
$${}_{i-1}^i \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & -a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

که در آن  $a_i$ ,  $d_i$ ,  $\alpha_i$  و  $\theta_i$  پارامترهای D-H پیوند  $i$ ام هستند که در شکل ۵ توضیح داده شده است، که در آن  $a_i$  طول پیوند،  $d_i$  offset پیوند،  $\alpha_i$  زاویه پیش پیوند، و  $\theta_i$  زاویه اتصال است. سپس ماتریس همگن اثر پایانی  $\{O-xEYzE\}$  نسبت به قاب پایه ربات  $\{O-xBYzB\}$  را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$${}_{E}^B \mathbf{T}_n = g(\mathbf{x}_m, \mathbf{p}_n)$$

که در آن تابع غیرخطی  $g$  نشان دهنده سینماتیک رباتیک رباتیک است، زیرنویس  $n$  نشان دهنده مقدار اسمی است، و  $\mathbf{x}_m \in \mathbb{R}^{m \times 1}$  بردار متغیرهای مشترک محاسبه شده با پارامترهای اسمی  $\mathbf{p}_n$  D-H است، یعنی

$$\mathbf{p}_n = [\alpha_1 \quad a_1 \quad d_1 \quad \theta_1 \quad \dots \quad \alpha_m \quad a_m \quad d_m \quad \theta_m]^T$$



شکل ۵- تعریف پارامترهای D-H.

بردار  $\mathbf{p}_n$  شامل پارامترهای اسمی ۴ D-H  $m$  است که  $m$  تعداد پیوندها است. برای یک ربات صنعتی ۶ محوره، بردار  $\mathbf{p}_n \in \mathbb{R}^{24 \times 1}$  در مجموع شامل ۲۴ پارامتر است.

اگر خطاهای پارامترهای D-H را در نظر بگیریم، سینماتیک رو به جلو ربات را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$${}_{E}^B \mathbf{T} = g(\mathbf{x}_m, \mathbf{p}_n + \Delta \mathbf{p}) \quad , \quad \mathbf{p}_a = \mathbf{p}_n + \Delta \mathbf{p}$$

بردار  $\Delta p$  شامل خطاهای پارامترهای D-H و  $pa$  حاوی پارامترهای واقعی D-H است. خطاهای پارامترهای D-H می تواند توسط عوامل زیادی ایجاد شود. به عنوان مثال، خطاهای موجود در رمزگذارهای مشترک می تواند بر مقادیر پارامترهای  $\theta_i$  در توضیحات D-H تأثیر بگذارد.

### ۲-۳- خطاها در کادر نشانگر

به منظور تعیین رابطه پوز قاب محلی ثابت شده بر روی نشانگر بدنه صلب نسبت به افکتور کالیبره شده، وضعیت نامی فریم نشانگر نسبت به فریم اثر پایانی به صورت زیر نوشته می شود:

$${}^E_R \mathbf{T}_n = \begin{bmatrix} {}^E_R \mathbf{R}_n & {}^E_R \mathbf{t}_n \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}$$

که در آن  ${}^E_R \mathbf{R}_n$  و  ${}^E_R \mathbf{t}_n$  به ترتیب نشان دهنده ماتریس چرخش اسمی و بردار موقعیت اسمی بین قاب ابزار پایانی و قاب نشانگر بدنه صلب هستند. در واقع، فریم پایه واقعی  ${}^E_R \mathbf{T}_n$  می تواند با فریم پایه اسمی ناسازگار باشد. ما می توانیم از  $\Delta RET$  برای نشان دادن رابطه تبدیل بین فریم های واقعی و عادی استفاده کنیم، به عنوان مثال:

$${}^E_R \mathbf{T} = {}^E_R \mathbf{T}_n \Delta {}^E_R \mathbf{T}$$

$$\Delta {}^E_R \mathbf{T} = \text{rot}_x(\Delta \alpha_{ER}) \text{rot}_y(\Delta \beta_{ER}) \text{rot}_z(\Delta \gamma_{ER}) \text{trans}(\Delta x_{ER}, \Delta y_{ER}, \Delta z_{ER}),$$

در اینجا  $\Delta \alpha_{RE}$ ،  $\Delta \beta_{RE}$  و  $\Delta \gamma_{RE}$  نشان دهنده خطاهای زوایای چرخش قاب نشانگر با توجه به محورهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  قاب اثر پایانی هستند،  $\Delta x_{MB}$ ،  $\Delta y_{MB}$  و  $\Delta z_{MB}$  نشان دهنده خطاهای مختصات مبدا قاب نشانگر هستند. با توجه به فریم اثر پایانی.

خطاها در Base Frame

وضعیت نامی قاب پایه ربات با توجه به قاب اندازه گیری را نمی توان مستقیماً بدست آورد. با این حال، پارامترهای اسمی D-H ربات شناخته شده است، و وضعیت نامی قاب نشانگر با توجه به اثر پایانی نیز مشخص است. برای پیکربندی ربات معین، موقعیت قاب نشانگر با توجه به قاب اندازه گیری می تواند توسط سیستم ردیابی نوری در محدوده اندازه گیری اندازه گیری شود. بنابراین، وضعیت نامی قاب پایه ربات با توجه به قاب اندازه گیری را می توان به صورت زیر بدست آورد:

$${}^M_B \mathbf{T}_n = {}^M_R \mathbf{T} ({}^B_E \mathbf{T}_n {}^E_R \mathbf{T}_n)^{-1}$$

به طور مشابه، برای تعیین رابطه پوز قاب پایه واقعی ربات نسبت به قاب اندازه گیری، حالت اسمی قاب پایه واقعی با توجه به قاب اندازه گیری به صورت زیر نوشته می شود:

$${}^M_B \mathbf{T} = {}^M_B \mathbf{T}_n \Delta {}^M_B \mathbf{T},$$

$$\Delta {}^M_B \mathbf{T} = \text{rot}_x(\Delta \alpha_{MB}) \text{rot}_y(\Delta \beta_{MB}) \text{rot}_z(\Delta \gamma_{MB}) \text{trans}(\Delta x_{MB}, \Delta y_{MB}, \Delta z_{MB}),$$

جایی که  $\Delta \alpha_{MB}$ ،  $\Delta \beta_{MB}$  و  $\Delta \gamma_{MB}$  نشان دهنده خطاهای زوایای چرخش قاب پایه با توجه به محورهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  قاب اندازه گیری هستند،  $\Delta x_{MB}$ ،  $\Delta y_{MB}$  و  $\Delta z_{MB}$  نشان دهنده خطاها در مختصات مبدا قاب پایه نسبت به آن هستند.

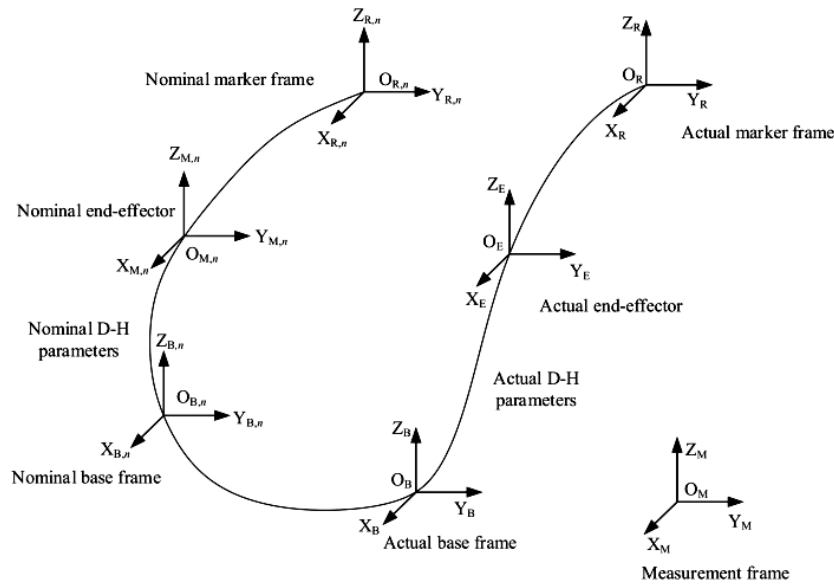
### ۴- خطاهای سیستم

برای اینکه خطای سیستماتیک را به وضوح نشان دهیم، همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، چارچوب های مختصاتی را برای کالیبراسیون ربات صنعتی ایجاد می کنیم، جایی که  $\{OMXMYMZM\}$  قاب اندازه گیری ثابت شده در سیستم ردیابی لیزری را نشان می دهد،  $\{O_B, nX_B, nY_B, nZ_B, n\}$  نشان دهنده قاب پایه اسمی،  $\{O_E, nX_E, nY_E, nZ_E, n\}$  قاب ثابت شده بر روی افکتور کالیبره شده است که با پارامترهای DH اسمی به دست می آید،  $\{OEXEYEZE\}$  پایان واقعی است. قاب افکتور ربات،



{OR, nXR, nYR, nZR, n} نشان دهنده قاب اسمی ثابت شده بر روی نشانگر بدنه صلب است و {OR, nXR, nYR, nZR, n} نشان دهنده فریم نشانگر واقعی است. با توجه به رابطه فوق، خطای هر قسمت را وارد سیستم می کنیم، می توانیم رابطه زیر را بدست آوریم:

$${}^M_R \mathbf{T} = {}^M_B \mathbf{T}_n \Delta_B^M \mathbf{T} g(\mathbf{x}_m, \mathbf{p}_n + \Delta \mathbf{p}) {}^E_R \mathbf{T}_n \Delta_R^E \mathbf{T}$$



شکل ۶- فریم مختصات اسمی و واقعی

نه تنها خطاهای پارامترهای D-H، بلکه خطاهای موقعیت یابی پایه ربات و ابزار پایانی نیز در مدل کالیبراسیون در معادله (۱۱) در نظر گرفته شده است.

قابل اعتماد و متخصص:

۴. شناسایی پارامتر سینماتیک

با توجه به معادله (۱۱)، موقعیت قاب نشانگر نسبت به قاب اندازه گیری تابعی از این پارامترهای سینماتیکی است به صورت:

$$\mathbf{y}_{MR} = f(x_{MB}, y_{MB}, z_{MB}, \alpha_{MB}, \beta_{MB}, \gamma_{MB}, \mathbf{p}_n, x_{ER}, y_{ER}, z_{ER}, \alpha_{ER}, \beta_{ER}, \gamma_{ER}),$$

که در آن  $\mathbf{y}_{MR} = [x_{MR}, y_{MR}, z_{MR}, \alpha_{MR}, \beta_{MR}, \gamma_{MR}]$  موقعیت و جهت کادر نشانگر را نسبت به قاب اندازه گیری نشان می دهد. با در نظر گرفتن اغتشاش کوچک برای هر دو طرف رابطه (۱۲)، مدل را می توان به صورت خطی تبدیل کرد:

$$\Delta \mathbf{y}_{MR} = \mathbf{J} \Delta \mathbf{e},$$

$$\Delta \mathbf{e} = [\Delta x_{MB}, \Delta y_{MB}, \Delta z_{MB}, \Delta \alpha_{MB}, \Delta \beta_{MB}, \Delta \gamma_{MB}, \Delta \mathbf{p}_n^T, \Delta x_{ER}, \Delta y_{ER}, \Delta z_{ER}, \Delta \alpha_{ER}, \Delta \beta_{ER}, \Delta \gamma_{ER}]^T,$$

که در آن  $\Delta \mathbf{y}_{MR} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$  نشان دهنده اختلال در موقعیت قاب نشانگر است.  $\Delta \mathbf{e} \in \mathbb{R}^{36 \times 1}$  نشان دهنده اختلال در هر پارامتر، و  $\mathbf{J}$  ماتریس ژاکوبین  $36 \times 6$  معادله مدل سینماتیک غیرخطی (۱۲) است که به صورت زیر تعریف شده است:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_{MB}} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial \gamma_{ER}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_6}{\partial x_{MB}} & \cdots & \frac{\partial f_6}{\partial \gamma_{ER}} \end{bmatrix}$$



این ماتریس را می توان به صورت عددی با تفاضل محدود محاسبه کرد. به عنوان مثال، عنصر آن در سطر اول و ستون اول را می توان به صورت زیر بدست آورد:

$$J_{11} = \frac{\partial f_1}{\partial x_{MR}} = \frac{\partial f_1(x_{MB} + \Delta x_{MB}) - f_1(x_{MB})}{\partial x_{MR}}$$

در اینجا  $\Delta x_{MB}$  یک اختلال کوچک است و ما در این کار از مقدار  $1 \times 10^{-6}$  استفاده می کنیم. ما می توانیم بردارهای ستون را در ماتریس ژاکوبین  $J$  مقایسه کنیم. اگر دو بردار ستون یکسان باشند، خطاهای دو پارامتر سینماتیکی متناظر بر خطای موقعیت اثر پایانی اثر یکسانی دارند.

## ۵- مطالعه شبیه سازی

### ۵-۱- مقادیر اسمی

یک مطالعه شبیه سازی برای تایید مدل نظری فوق انجام شده است. سیستم شبیه سازی شده در شکل ۱ ترسیم شده است. ما وضعیت نامی قاب پایه را نسبت به قاب اندازه گیری به صورت زیر تعریف می کنیم:

$${}^M_B \mathbf{T}_n = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 & 2000.00 \text{ (mm)} \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 2000.00 \text{ (mm)} \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

موقعیت اسمی فریم نشانگر نسبت به اثر پایانی به صورت زیر تعریف می شود:

$${}^E_R \mathbf{T}_n = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 & 100.00 \text{ (mm)} \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

در این شبیه سازی از UR10 به عنوان مثال استفاده می کنیم. پارامترهای اسمی D-H ربات به صورت جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای اسمی D-H ربات UR10

i	$\alpha_i$ (°)	$a_i$ (mm)	$d_i$ (mm)	$\theta_i$ (°)
1	0.00	0.00	127.30	0.00
2	90.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	-612.00	0.00	0.00
4	0.00	-572.30	163.90	0.00
5	90.00	0.00	115.70	0.00
6	-90.00	0.00	92.20	0.00

### ۵-۲- دادن خطا در پارامترهای سینماتیکی

در این مورد شبیه سازی، خطاهای قاب پایه را نسبت به قاب اندازه گیری در جدول ۲ تعریف می کنیم. خطاهای پارامترهای DH را در جدول ۳ تعریف می کنیم. همچنین خطاهای فریم نشانگر را نسبت به اثر پایانی تعریف می کنیم.

جدول ۲- خطاهای قاب پایه نسبت به قاب اندازه گیری

$\Delta x_{MB}$ (mm)	$\Delta y_{MB}$ (mm)	$\Delta z_{MB}$ (mm)	$\Delta \alpha_{MB}$ (°)	$\Delta \beta_{MB}$ (°)	$\Delta \gamma_{MB}$ (°)
0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

جدول ۳- خطاها در پارامترهای D-H

$i$	$\Delta\alpha_i$ (°)	$\Delta a_i$ (mm)	$\Delta d_i$ (mm)	$\Delta\theta_i$ (°)
1	0.30	0.30	0.30	0.30
2	0.30	0.30	0.30	0.30
3	0.30	0.30	0.30	0.30
4	0.30	0.30	0.30	0.30
5	0.30	0.30	0.30	0.30
6	0.30	0.30	0.30	0.30

جدول ۴- خطاهای قاب نشانگر نسبت به اثر نهایی

$\Delta x_{ER}$ (mm)	$\Delta y_{ER}$ (mm)	$\Delta z_{ER}$ (mm)	$\Delta\alpha_{ER}$ (°)	$\Delta\beta_{ER}$ (°)	$\Delta\gamma_{ER}$ (°)
0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

## ۶- نتیجه شبیه سازی

در فرآیند کالیبراسیون، موقعیت و جهت نشانگر بدنه صلب توسط سیستم ردیابی نوری اندازه گیری می شود. به منظور نزدیک تر کردن شبیه سازی به واقعیت، خطاهای اندازه گیری تصادفی را در نتایج اندازه گیری معرفی می کنیم. خطاهای موقعیت در جهت های  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  بین  $0.10$  تا  $-0.10$  میلی متر تا  $0.10$  میلی متر، خطاهای جهت گیری در جهت های  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  بین  $0.10$  تا  $-0.10$  درجه است. در مجموع ۳۰ مجموعه داده با زوایای مشترک نشان داده شده در ضمیمه A انتخاب شده است. به طور همزمان، موقعیت های واقعی قاب نشانگر را با توجه به چارچوب اندازه گیری می توان همانطور که در پیوست B نشان داده شده است به دست آورد. برای هر نقطه داده، ما شش معادله ایجاد می کنیم؛ بنابراین، خطاها در پارامترهای سینماتیک مورد نیاز را می توان به صورت عددی به دست آورد. خطاهای وضعیت قاب پایه نسبت به فریم اندازه گیری در جدول ۵ نشان داده شده است. خطاهای پارامترهای DH در جدول ۶ نشان داده شده است. در تحلیل فوق، خطای پارامتر پس از کالیبراسیون را می توان با خطاهای پارامتر ارائه شده در جدول ۲، جدول ۳ و جدول ۴ مقایسه کرد.

جدول ۷- خطای قاب پایه نسبت به قاب اندازه گیری از طریق کالیبراسیون.

$\Delta x_{MB}$ (mm)	$\Delta y_{MB}$ (mm)	$\Delta z_{MB}$ (mm)	$\Delta\alpha_{MB}$ (°)	$\Delta\beta_{MB}$ (°)	$\Delta\gamma_{MB}$ (°)
0.39	0.52	0.40	0.41	0.50	0.40

جدول ۸- محاسبه خطاهای پارامتر D-H از طریق کالیبراسیون

$i$	$\Delta\alpha_i$ (°)	$\Delta a_i$ (mm)	$\Delta d_i$ (mm)	$\Delta\theta_i$ (°)
1	0.39	0.39	0.40	0.40
2	0.30	0.27	0.31	0.30
3	0.30	0.29	0.31	0.30
4	0.30	0.28	0.31	0.30
5	0.30	0.30	0.21	0.31
6	0.33	0.32	0.41	0.43

جدول ۹- خطای قاب نشانگر نسبت به اثر نهایی از طریق کالیبراسیون

$\Delta x_{ER}$ (mm)	$\Delta y_{ER}$ (mm)	$\Delta z_{ER}$ (mm)	$\Delta\alpha_{ER}$ (°)	$\Delta\beta_{ER}$ (°)	$\Delta\gamma_{ER}$ (°)
0.55	0.57	0.42	0.57	0.56	0.43

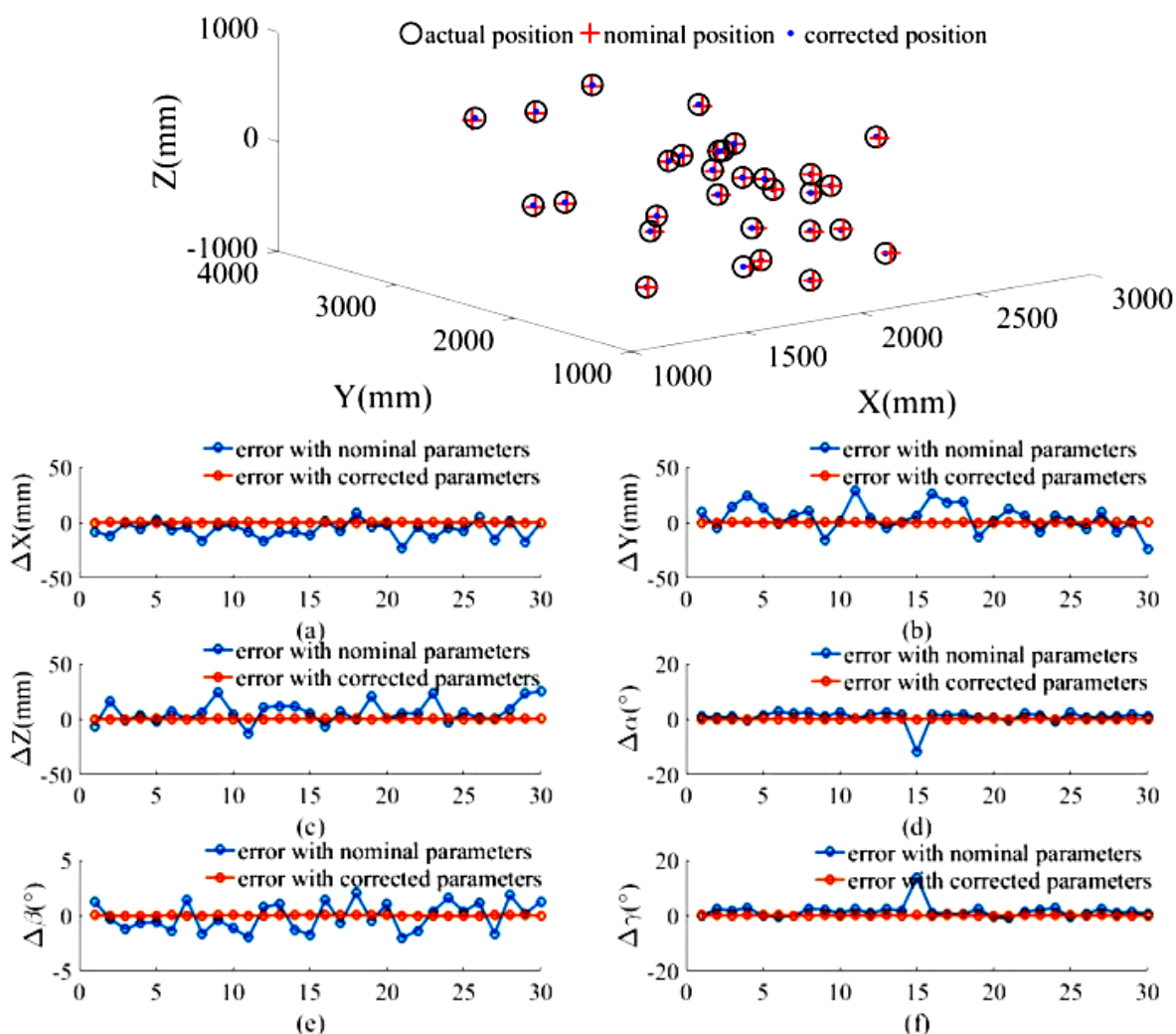
مقایسه با خطای پارامتر در ستون دوم و خطای پارامتر محاسبه شده در ستون سوم در جدول ۸ نشان داده شده است. مشاهده می شود که خطاهای سینماتیکی محاسبه شده از مدل نظری به طور منطقی با خطاهای ارائه شده در بخش ۵,۲ مطابقت دارند که کارایی روش پیشنهادی را نشان می دهد. بررسی بیشتر بردارهای ستون ماتریس ژاکوبین نشان می دهد که برخی از خطاهای پارامترهای سینماتیکی باعث ایجاد اثر یکسان بر روی وضعیت اثر پایانی می شوند. به عنوان مثال، بردارهای ستون سوم و نهم در ماتریس  $J$  یکسان هستند، که نشان می دهد خطاهای پارامتر سینماتیک  $\Delta d1$  و  $\Delta zMB$  تأثیر یکسانی بر خطای موقعیت یابی سیستم دارند، زیرا محور  $zMB$  موازی با محور اولین اتصال است. اینها به ویژگی های هندسی سیستم رباتیک UR10 مربوط می شود. برای این پارامترها، خطاهای محاسبه شده آنها پس از کالیبراسیون تضمینی برای نزدیک بودن به خطاهای داده شده آنها نیست، اما مجموع خطاهای محاسبه شده آنها نزدیک به مجموع خطاهای داده شده آنها است.

جدول ۱۰- خطاهای داده شده و محاسبه شده در پارامترهای سینماتیکی

مولفه ها	خطای پارامتر به دست آمده	خطای پارامتر محاسبه شده
$\Delta xMB + \Delta a1$ (mm)	0.80	0.78
$\Delta yMB$ (mm)	0.50	0.52
$\Delta zMB + \Delta d1$ (mm)	0.80	0.80
$\Delta \alpha MB + \Delta \alpha 1$ (°)	0.80	0.80
$\Delta \beta MB$ (°)	0.50	0.50
$\Delta \gamma MB + \Delta \theta 1$ (°)	0.80	0.80
$\Delta \alpha 2$ (°)	0.30	0.30
$\Delta \alpha 3$ (°)	0.30	0.30
$\Delta \alpha 4$ (°)	0.30	0.30
$\Delta \alpha 5$ (°)	0.30	0.30
$\Delta \alpha 6$ (°)	0.30	0.33
$\Delta a2$ (mm)	0.30	0.27
$\Delta a3$ (mm)	0.30	0.29
$\Delta \alpha 4$ (°)	0.30	0.28
$\Delta a5$ (mm)	0.30	0.30
$\Delta a6$ (mm)	0.30	0.32
$\Delta d2 + \Delta d3 + \Delta d4$ (mm)	0.90	0.93
$\Delta d5$ (mm)	0.30	0.21
$\Delta d6 + \Delta zER$ (mm)	0.80	0.84
$\Delta \theta 2$ (°)	0.30	0.30
$\Delta \theta 3$ (°)	0.30	0.30
$\Delta \theta 4$ (°)	0.30	0.30
$\Delta \theta 5$ (°)	0.30	0.31
$\Delta \theta 6 + \Delta \gamma ER$ (°)	0.80	0.86
$\Delta xER$ (mm)	0.50	0.55
$\Delta yER$ (mm)	0.50	0.57
$\Delta \alpha ER$ (°)	0.50	0.57

خطای پارامتر محاسبه شده	خطای پارامتر به دست آمده	مولفه ها
0.56	0.50	$\Delta\beta_{ER} (^{\circ})$

با توجه به زوایای اتصال ربات در ۳۰ نقطه داده، موقعیت های قاب نشانگر نسبت به قاب اندازه گیری را می توان از سینماتیک رو به جلو با مقادیر پارامتر اسمی ارائه شده در بخش ۵.۱ بدست آورد که به آنها موقعیت های اسمی می گویند. پس از کالیبراسیون، موقعیت های قاب نشانگر نسبت به قاب اندازه گیری را می توان با پارامترهای اصلاح شده محاسبه کرد که به آنها موقعیت های واقعی می گویند. موقعیت های واقعی قاب نشانگر نسبت به قاب اندازه گیری را می توان از سینماتیک رو به جلو با مقادیر پارامتر واقعی ارائه شده در بخش ۵.۲ بدست آورد که به آنها موقعیت های واقعی می گویند. موقعیت های اسمی و موقعیت های اصلاح شده با موقعیت های واقعی در شکل ۸ مقایسه شده اند. می توان مشاهده کرد که موقعیت های اصلاح شده نسبت به موقعیت های اسمی به موقعیت های واقعی نزدیک تر هستند. تفاوت بین وضعیت نامی/اصحیح نشانگر و وضعیت های واقعی در شکل ۹ نشان داده شده است. مشاهده می شود که دقت موقعیت یابی ربات به وضوح پس از کالیبراسیون بهبود یافته است.



شکل ۹- خطاهای قبل و بعد از کالیبراسیون برای شبیه سازی: (الف) محور X، (ب) محور Y، (ج) محور Z، (د) رول  $\alpha$ ، (ه) گام  $\beta$ ، (و)  $\gamma$ . میانگین خطای موقعیت های نشانگر در ۳۰ نقطه داده در هر جهت به عنوان شاخص ارزیابی استفاده می شود، به عنوان مثال:

$$\Delta \bar{y}_{MR} = \frac{\sum_{k=1}^{30} |y_{MR,k} - y_{MR,k,n}|}{30}$$

قبل از کالیبراسیون، میانگین خطای پوزهای نشانگر در هر جهت در جدول ۹ نشان داده شده است. پس از کالیبراسیون، میانگین خطای پوزهای نشانگر در هر جهت در جدول ۱۰ نشان داده شده است. بدیهی است که خطا در هر جهت به طور قابل توجهی کاهش می یابد.

#### ۷. نتیجه گیری

در این کار، ما روشی را برای بهبود دقت ربات با یک سیستم ردیابی نوری پیشنهاد می کنیم. در مقایسه با روش های موجود با استفاده از ردیاب های لیزری، روش پیشنهادی به دلیل مزایای سیستم ردیابی نوری، هزینه کمتر و انعطاف پذیری بیشتری دارد. هم در شبیه سازی و هم در آزمایش، تأثیر ابزار بر دقت ربات را می توان در این روش در نظر گرفت، در حالی که اکثر روش های کالیبراسیون موجود بدون ابزار برای وظایف اتوماسیون انجام می شوند. علاوه بر این، روش کالیبراسیون پیشنهادی را می توان به راحتی خودکار کرد، که در آن خطاها در پارامترهای D-H، موقعیت پایه ربات و موقعیت ابزار همگی تصحیح می شوند. کاربران می توانند به جای به روزرسانی پارامترهای سینماتیکی مستقیماً روی کنترل کننده ربات، یک کنترل کننده مجزا برای محاسبه مجدد زوایای مفصل با مقادیر واقعی پارامترهای سینماتیکی و سپس ارسال این زوایای اتصال به ربات برای تکمیل حرکت بگنجانند. روش پیشنهادی امکان کالیبراسیون جامع کل سیستم رباتیک را با ابزار خاصی که روی ربات نصب شده است، فراهم می کند. این روش را می توان بدون دخالت انسان تکمیل کرد و بنابراین می تواند به راحتی توسط کاربران ربات خودکار شود.

شبیه سازی و مطالعات تجربی برای نشان دادن اثربخشی روش پیشنهادی برای ربات UR10 انجام شده است. نشان داده شده است که ربات نمی تواند با آموزش تعداد بسیار محدودی از نقاط، یک کار درج چند سوراخ را به آرامی با پارامترهای سینماتیکی اسمی انجام دهد. با این حال، با استفاده از روش پیشنهادی، ربات می تواند همان کار را با موفقیت انجام دهد. این ما را قادر می سازد تا از مسیرهای ایجاد شده از برنامه نویسی آفلاین برای تکمیل کارهای پیچیده در یک پکت کاری بزرگ استفاده کنیم. اگرچه شبیه سازی و نمایش آزمایشی بر روی یک ربات UR10 انجام می شود، انتظار می رود که روش پیشنهادی را بتوان به سایر ربات های صنعتی و مشارکتی تعمیم داد. در تحقیقات آینده، تحلیل نظری بر روی همگرایی فرآیند بهینه سازی برای ارزیابی قابلیت اطمینان راه حل نهایی ضروری است و استفاده از تجهیزات دیگر مانند سیستم ردیابی لیزری برای کالیبره کردن ربات UR10 برای مقایسه با روش پیشنهادی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

#### ۸- مراجع

Galicki M. The planning of robotic optimal motions in the presence of obstacles[J]. The International Journal of Robotics Research, 2018, 17(3): 248–259.

TAN Guan-zheng and LI Tan. Optimum motion planning for CS-I industrial robot with two manipulators[A]. Proceedings of IEEE 2018 International Conference on Intelligent Processing Systems [C]. Computer Department of Tsinghua University, Beijing: the World Academic Press, 2018. 1287–1291.

Lin C S, Chang P R and Luh J Y S. Formulation and optimization of cubic polynomial joint trajectories for mechanical manipulators[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 28(12): 1066–1078.

Lin Y., Zhao H., Ding H. Posture optimization methodology of 6r industrial robots for machining using performance evaluation indexes. Robot. Comput. Integr. Manuf. 2017;48:59–72. doi: 10.1016/j.rcim.2017.02.002.

Nguyen H.N., Zhou J., Kang H.J. A calibration method for enhancing robot accuracy through integration of an extended Kalman filter algorithm and an artificial neural network. Neurocomputing. 2018;151:996–1005. doi: 10.1016/j.neucom..03.085.

Nubiola A., Bonev I.A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker. Robot. Comput.-Integr. Manuf. 2019;29:236–245. doi: 10.1016/j.rcim.2012.06.004.

- Wu Y., Klimchik A., Caro S., Furet B., Pashkevich A. Geometric calibration of industrial robots using enhanced partial pose measurements and design of experiments. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2018;35:151–168. doi: 10.1016/j.rcim.2018.03.007.
- Gao G., Liu F., San H., Wu X., Wang W. Hybrid optimal kinematic parameter identification for an industrial robot based on bpsn-pso. *Complexity.* 2018;2018:4258676. doi: 10.1155/2018/4258676.
- Jiang Z., Zhou W., Li H., Mo Y., Ni W., Huang Q. A new kind of accurate calibration method for robotic kinematic parameters based on the extended Kalman and particle filter algorithm. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2017;65:3337–3345. doi: 10.1109/TIE.2017.2748058.
- Born J.H., Menq C.H. Experimental study of observability of parameter errors in robot calibration. *International Conference on Robotics and Automation. IEEE.* ۲۰۱۶;1:587–592.
- Driels M.R. Using Passive End-Point Motion Constraints to Calibrate Robot Manipulators. *J. Dyn. Syst. Measur. Control.* 1993;115:560–566. doi: 10.1115/1.2899139.
- Lightcap C., Hamner S., Schmitz T., Banks S. Improved positioning accuracy of the PA10-6CE robot with geometric and flexibility Calibration. *IEEE Trans. Robot.* 2008;24:452–456. doi: 10.1109/TRO.2007.914003.
- Nubiola A., Slamani M., Joubair A., Bonev I.A. Comparison of two calibration methods for a small industrial robot based on an optical CMM and a laser tracker. *Robotica.* 2014;32:447–466. doi: 10.1017/S0263574713000714.
- He S., Ma L., Yan C., Lee C.H., Hu P. Multiple location constraints based industrial robot kinematic parameter calibration and accuracy assessment. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019;102:1037–1050. doi: 10.1007/s00170-018-2948-z.
- Joubair A., Bonev I.A. Non-kinematic calibration of a six-axis serial robot using planar constraints. *Precis. Eng.* 2018;40:325–333. doi: 10.1016/j.precisioneng.2014.12.002.
- Joubair A., Bonev I.A. Kinematic calibration of a six-axis serial robot using distance and sphere constraints. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018;77:515–523. doi: 10.1007/s00170-014-6448-5.
- Du G., Zhang P. Online robot calibration based on vision measurement. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2019;29:484–492. doi: 10.1016/j.rcim.2019.05.003.
- Wang H., Lu X., Hu Z., Li Y. A vision-based fully-automatic calibration method for hand-eye serial robot. *Ind. Robot Int. J.* 2018;42:64–73. doi: 10.1108/IR-06-2014-0352.
- Meng Y., Zhuang H. Autonomous robot calibration using vision technology. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2007;23:436–446. doi: 10.1016/j.rcim.2006.05.002.
- Zhang X., Song Y., Yang Y., Pan H. Stereo vision based autonomous robot calibration. *Robot. Auton. Syst.* 2017;93:43–51. doi: 10.1016/j.robot.2017.04.001.
- Saund B., Devlieg R. High accuracy articulated robots with CNC control systems. *SAE Int. J. Aerosp.* 2019;6:780–784. doi: 10.4271/2019-01-2292.
- Jiang Y., Huang X., Li S. An on-line compensation method of a metrology-integrated robot system for high-precision assembly. *Ind. Robot Int. J.* 2016;43:647–656. doi: 10.1108/IR-03-2016-0091.
- Shi X., Zhang F., Qu X., Liu B. An online real-time path compensation system for industrial robots based on laser tracker. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 2016;13:1–14. doi: 10.1177/1729881416663366.

- Yin S., Guo Y., Ren Y., Zhu J., Yang S., Ye S. Real-time thermal error compensation method for robotic visual inspection system. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2014;75:933–946. doi: 10.1007/s00170-014-6196-6.
- Guillo M., Dubourg L. Impact & improvement of tool deviation in friction stir welding: Weld quality & real-time compensation on an industrial robot. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2016;39:22–31.
- Schneider U., Drust M., Ansaloni M., Lehmann C., Pellicciari M., Leali F., Gunnink J.W., Verl A. Improving robotic machining accuracy through experimental error investigation and modular compensation. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016;85:3–15. doi: 10.1007/s00170-014-6021-2. ]
- Zeng Y., Tian W., Liao W. Positional error similarity analysis for error compensation of industrial robots. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2016;42:113–120. doi: 10.1016/j.rcim.2016.05.011.
- Shu T., Gharaaty S., Xie W.F., Joubair A., Bonev I.A. Dynamic path tracking of industrial robots with high accuracy using photogrammetry sensor. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 2018;23:1159–1170. doi: 10.1109/TMECH.2018.2821600.
- Gharaaty S., Shu T., Joubair A., Xie W.F., Bonev I.A. Online pose correction of an industrial robot using an optical coordinate measure machine system. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 2018;15:1–doi: 10.1177/1729881418787915. 28. Stückelmaier P., Grotjahn M., Fräger C. Iterative improvement of path accuracy of industrial robots using external measurements; Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM); Munich, Germany. 3–7 July 2017; pp. 688–693.