

## استفاده از یک چرخ غیرفعال برای بهبود ژایرودومتری در مکان‌یابی یک ربات متحرک

سید محمد مهدی دهقان بنادکی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد گروه مهندسی برق و کامپیوتر - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

مجید نیلی احمدآبادی

استادیار گروه مهندسی برق و کامپیوتر - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

طه کوثری

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد گروه مهندسی برق و کامپیوتر - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۱/۴/۱۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۲/۱/۱۶، تاریخ تصویب ۸۲/۳/۳)

### چکیده

در این مقاله یک روش ساده و دقیق برای افزایش دقت اطلاعات مکان‌یابی نسبی ربات متحرک با استفاده از ترکیب اطلاعات ژایروسکوپ، ادومتری و یک چرخ غیرفعال<sup>۱</sup> که در نقطه میانی محور چرخهای فعال<sup>۲</sup> قرار گرفته، ارائه گردیده است. برای تصحیح نتایج مکان‌یابی نسبی<sup>۳</sup> ربات روشهای متعددی پیشنهاد شده است: استفاده از فیلتر کالمن در تصحیح خروجی ژایروسکوپ، استفاده از فیلتر کالمن در ترکیب اطلاعات ادومتری و ژایروسکوپ، ژایرودومتری و استخراج مدلی برای خطاهای غیرسیستماتیک نمونه‌هایی از این روشها می‌باشد. این روشها عمدتاً تنها به کاهش خطای زاویه پرداخته‌اند. از آنجا که بردار سرعت نقطه میانی محور چرخهای فعال (نقطه غیرهولونومیک<sup>۴</sup> ربات) در هر لحظه صرفاً در امتداد ربات بوده و تصویری در جهت محور چرخها ندارد، می‌توان از یک چرخ غیرفعال برای محاسبه سرعت این نقطه استفاده کرد. برابر بودن این مقدار با سرعت خطی محاسبه شده برای این نقطه توسط چرخهای فعال نمایانگر این است که ربات با منابع خطای غیرسیستماتیک مواجه نشده است. این مقاله با استفاده از این قابلیت و پرهیز از استفاده مستقیم از خروجی ژایروسکوپ در محاسبه سرعت زاویه‌ای ربات سعی در بهبود نتایج روشهای مکان‌یابی خاصه ژایرودومتری و افزایش دقت آنها در تعیین مکان و زاویه ربات دارد.

واژه های کلیدی: ربات متحرک، مکانیابی، ترکیب اطلاعات، ادومتری

### مقدمه

روشها براساس مکان تقریبی که ربات برای خود در نظر گرفته سعی در تطابق نقشه اصلی محیط و آنچه فعلاً در حال مشاهده آن است کرده و بدین وسیله مکان خود را تصحیح می‌کنند [۳-۹]. در این خانواده از روشها ربات ممکن است از راهنماهای مشخصی در محیط مانند دربها [۱۰] و یا درختها [۱۱] برای تصحیح مکان خود استفاده کند.

مکان‌یابی نسبی ربات DeadReckoning نامیده می‌شود [۱۲]. در بسیاری از شرایط و خصوصاً در محیطهای پیچیده بکارگیری علائم ایجاد شده بطور مصنوعی و یا علائم موجود در محیط امری بسیار مشکل و یا غیرممکن می‌باشد. در چنین شرایطی از سنسورهای اندازه‌گیری درونی برای مکان‌یابی نسبی استفاده می‌شود. مکان‌یابی

یکی از مهمترین مسائل در رباتهای متحرک، مشخص کردن مکان و زاویه ربات است که اصطلاحاً مکان‌یابی<sup>۵</sup> نامیده می‌شود. مشخص کردن مکان و زاویه ربات (که در ادامه با عنوان وضعیت ربات از آن یاد خواهد شد) به دو صورت مطلق و نسبی صورت می‌گیرد.

برای مکان‌یابی مطلق<sup>۶</sup> ربات روشهای متعددی وجود دارد. استفاده از علائم فعال یا غیر فعال<sup>۷</sup> [۱]، استفاده از الگوهای منظمی که در محیط وجود دارند و یا بطور مصنوعی ایجاد می‌شوند [۲]، استفاده از نقشه موجود محیط و استفاده از سیگنالهای ماهواره‌ای عناوین نمونه‌هایی از این روشها می‌باشند. استفاده از نقشه موجود از محیط در ربات برای مکان‌یابی به روشهای متعددی تقسیم می‌گردد. این

مستقیم از آن خطای انباشته شده زیادی روی زاویه ایجاد خواهد کرد و بنابراین استفاده پیوسته از خروجی آن ممکن نیست. ژایروادومتری [۱۶] با ترکیب اطلاعات ادومتری و ژایروسکوپ در بازه‌های زمانی کوچک تا حد زیادی این مشکل را حل کرده است ولی این روش نیز محدودیتها و نقایص خاص خود را دارد که در ادامه و با جزئیات بیشتر بررسی خواهد شد.

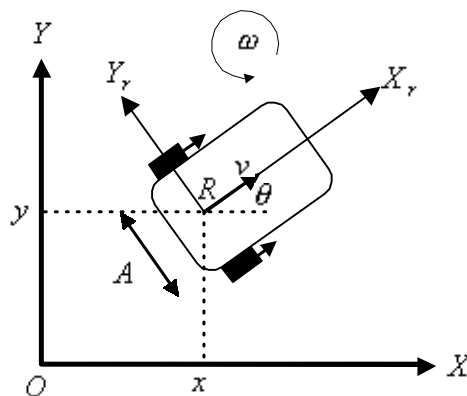
پیشنهاد این مقاله افزودن یک چرخ غیرفعال در نقطه میانی محور چرخهای فعال یک ربات متحرک با دو موتور رانش هم‌محور<sup>۱۲</sup> (نقطه R در شکل ۱) می‌باشد که علاوه بر محاسبه دقیق سرعت خطی (که در پژوهشهای پیشین اصلا مورد توجه قرار نگرفته است)، در محاسبه سرعت زاویه‌ای نیز استقلال زیادی از خروجی ژایروسکوپ فراهم خواهد کرد. بکارگیری این چرخ در ترکیب اطلاعات سنسوری برای افزایش دقت مکان‌یابی ربات محور اصلی الگوریتم پیشنهادی می‌باشد که در کاربردهای پیشین اصلا بکار گرفته نشده است.

در ادامه، ابتدا مشخصات خطاهای ادومتری و دلایل آنها در دو قالب منابع خطاهای سیستماتیک و منابع خطاهای غیرسیستماتیک بیان می‌شود، پس از آن ژایروادومتری به عنوان یکی از بهترین پیشنهادات برای تصحیح زاویه ربات با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار گرفته و نقایص آن برشمرده خواهد شد. الگوریتم پیشنهادی این مقاله، ابتدا با فرضهای "کوچکتر بودن تصویر سرعت خطی چرخ در سطح افق نسبت به مقداری که انکودر نشان می‌دهد." و "با احتمال بالا، در هر لحظه تنها یک چرخ با یک منبع خطای غیرسیستماتیک (به عنوان مثال یک ناصافی) مواجه می‌گردد." ارائه گردیده است. توسعه الگوریتم با این فرضها علاوه بر فراهم کردن شرایط طرح الگوریتم نهایی چگونگی استفاده از پیشنهاد این مقاله در شرایط محیطی ساده‌تر را نشان می‌دهد. در نهایت تمامی این فرضها حذف گردیده و الگوریتم در حالت کلی بیان می‌شود. در انتها نیز نتایج آزمایشات آورده شده است.

### مشخصات خطاهای ادومتری

همانطور که بیان گردید منابع خطاهایی که بر نتایج ادومتری تاثیر می‌گذارد به دو نوع سیستماتیک و

نسبی به دو صورت انجام می‌گیرد: ناوبری اینرسی<sup>۸</sup> که در آن از شتاب‌سنج و ژایروسکوپ استفاده می‌گردد [۱۵، ۱۴] و ادومتری<sup>۹</sup> که عبارت است از تعیین میزان جابجائی ربات نسبت به یک نقطه معلوم با شمارش تعداد دورهای چرخها.



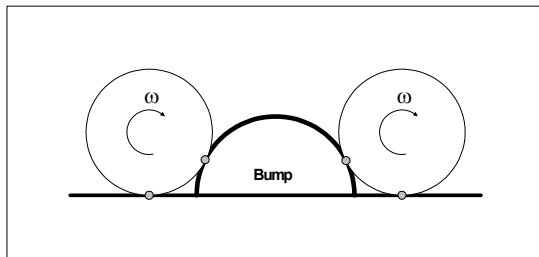
شکل ۱: مکان و زاویه یک ربات متحرک.

در ادومتری محاسبه سرعت زاویه‌ای چرخها الزاما معادل با بدست آوردن سرعت خطی و سرعت زاویه‌ای دقیق ربات نیست و عوامل سیستماتیک و غیرسیستماتیک [۱۶] متعددی در این عدم تساوی دخالت دارند. برای رفع اثرات این خطاها پیشنهادات متعددی ارائه گردیده است.

برای تصحیح خطاهای سیستماتیک در رباتهای متحرک روشهای کالیبراسیون بکار گرفته می‌شوند که به عنوان یک نمونه می‌توان از الگوریتم UMBmark نام برد [۱۷]. البته الگوریتمی که در ادامه برای تصحیح اطلاعات ادومتری ارائه خواهد شد قابلیت این را خواهد داشت که یک الگوریتم کالیبراسیون نیز از آن استخراج گردد.

در عمده کاربردهای ربات متحرک محاسبه دقیق زاویه ربات از اهمیت بیشتری نسبت به مکان آن برخوردار است، چرا که خطای در زاویه در طول حرکت باعث ایجاد خطای زیادی در مکان می‌گردد. بنابراین عمده تلاشها در تصحیح نتایج ادومتری بر تصحیح و محاسبه دقیق تر زاویه ربات متمرکز گردیده است [۱۳، ۱۲]. براین اساس در تصحیح خطاهای غیرسیستماتیک نیز عمده تلاشها در جهت تصحیح زاویه ربات می‌باشد و برای این منظور عمدتا ژایروسکوپ بکار گرفته می‌شود. به دلیل طبیعت ژایروسکوپ که دارای مشکلات انحراف<sup>۱۰</sup> خروجی، غیرخطی بودن ضریب تبدیل<sup>۱۱</sup>، وابستگی شدید به دما و تغییرات خروجی در سرعت زاویه‌ای صفر می‌باشد، انتگرال‌گیری

موانع با ابعاد مختلف صادق می‌باشد. انکودر چرخ از تغییرات سرعت مطلع بوده و اطلاعات صحیحی از اتفاقی که افتاده است، تهیه می‌کند. اما از فاصله عمودی طی شده مطلع نیست. ربات به دلیل فاصله عمودی طی شده به جهت اولیه خود (جهت پیش از مواجه شدن با مانع) باز نخواهد گشت و تغییری بصورت  $\Delta\theta \approx \Delta D / A$  در زاویه ربات رخ خواهد داد [۱۶]. تغییری که ربات قادر به تشخیص آن نیست (A فاصله بین دو چرخ می‌باشد). (شکل ۱).



شکل ۳: انتقال نقطه تماس هنگام بالا رفتن یا پایین آمدن چرخ از مانع.

نکته قابل توجه اینکه وقتی چرخ روی مانعی قرار گیرد، تصویر سرعت در راستای افق (سرعتی که باعث تغییر مکان ربات در سطح افق می‌گردد) کوچکتر از مقداری است که توسط انکودر نشان داده می‌شود. برای این اساس می‌توان چنین نتیجه گرفت که اگرچه در اکثر حالات، تصویر مقدار واقعی سرعت خطی چرخ در سطح افق کوچکتر یا مساوی مقداری است که انکودر مربوطه نشان می‌دهد، اما در شرایطی نیز ممکن است این مقدار بزرگتر باشد.

### ژایروادومتری، فواید و نقایص آن

در الگوریتم ارائه شده در مقاله [۱۶]، در مرحله اول با استفاده از اطلاعات ژایروسکوپ سعی شده است تا ایرادهای موجود در نتایج حاصل از ادومتری چرخ‌ها تشخیص داده شده و سپس جایگزین مناسبی برای اطلاعات ادومتری انتخاب گردد. در این الگوریتم برابر نبودن اطلاعات ژایروسکوپ با اطلاعات حاصل از انکودرها به معنای نادرست بودن اطلاعات چرخ‌ها می‌باشد. در چنین مواردی سرعت زاویه‌ای ربات همان سرعت زاویه‌ای محاسبه شده توسط ژایروسکوپ بوده ولی برای سرعت خطی ربات نمی‌توان مقداری را مشخص کرد. شبه‌کد الگوریتم ژایروادومتری به صورت زیر می‌باشد:

غیرسیستماتیک تقسیم می‌گردند. این مقاله به بررسی اثرات خطاهای غیرسیستماتیک می‌پردازد. دلایل ایجاد خطاهای غیرسیستماتیک را می‌توان چنین برشمرد:



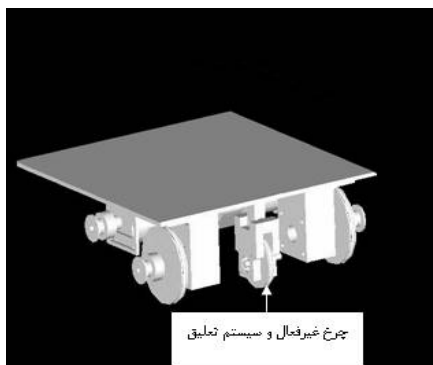
شکل ۲: شکل ربات بکار گرفته شده در آزمایش.

- عبور ربات از سطوحی که کاملاً صاف نیستند (موانعی با ابعاد بسیار کوچک).  
- عبور ربات از روی موانع موجود بر سطح زمین (موانعی با ابعاد قابل توجه نسبت به اندازه چرخ ربات).  
- لیز خوردن چرخ‌های ربات به دو صورت در جا چرخیدن (گیر کردن به موانع) و یا سرخوردن (حرکت خطی چرخ بدون حرکت دورانی) و....  
در مجموع در اثر اینگونه از خطاها سرعت خطی و سرعت زاویه‌ای محاسبه شده برای ربات متفاوت از سرعت‌های واقعی می‌باشد. به عبارت دقیق‌تر هنگام عبور یک چرخ از روی یک دست‌انداز کوچک<sup>۳</sup>، ربات هنگام بالا رفتن چرخ از مانع به سمت آن و هنگام پایین آمدن از مانع در جهت دور شدن از آن خواهد چرخید. اما در مجموع به دلیل طی شدن فاصله عمودی ناشی از وجود مانع ربات قدری به سمت مانع می‌چرخد. تفاوت فاصله خطی طی شده توسط دو چرخ  $\Delta D$  نامیده می‌شود. مقاله [۱۶] این اتفاقات را براساس تغییرات انرژی‌های جنبشی و پتانسیل توجیه کرده است که به نظر کامل نمی‌آید. توجیح ارائه شده در این مقاله با توجه به نتایج آزمایشات آن است که هنگامی که چرخ از ربات با مانعی مواجه می‌گردد، علاوه بر ضربه وارده حین بالارفتن و سرخوردن چرخ هنگام پائین آمدن، تغییر مکان ناگهانی نقطه تماس چرخ با سطح (شکل ۳) باعث متفاوت بودن مقدار واقعی سرعت خطی و مقداری که توسط انکودر قرائت می‌گردد، می‌شود. این نکته در مورد

## توصیف مکانیزم چرخ غیرفعال و محل قرار گرفتن آن

در ربات‌های متحرک مدل شکل نقطه میانی محور چرخهای فعال، عمدتاً نمایانگر مکان ربات فرض شده و دنبال کردن یک مسیر به معنای قرار گرفتن این نقطه روی منحنی مورد نظر می‌باشد. سرعت خطی این نقطه نیز سرعت خطی ربات در نظر گرفته می‌شود. بردار سرعت این نقطه در هر لحظه صرفاً در امتداد ربات بوده و تصویری در جهت جانبی ندارد. این نقطه محدودیت غیرهولونومیک ربات را به خوبی بیان می‌کند و نماینده مناسبی برای رفتار سیستم می‌باشد.

با این توصیف، این نقطه برای نصب یک چرخ غیرفعال مناسب خواهد بود که با استفاده از آن می‌توان سرعت خطی ربات را محاسبه کرد (شکل ۴). از آنجا که این چرخ در اثر حرکت ربات و وجود اصطکاک بین چرخ و زمین به چرخش درمی‌آید، اثرات لیز خوردن در آن بسیار کمتر بوده و اطلاعات حرکت آن مرجع مناسبتری برای محاسبه سرعت خطی ربات می‌باشد. به عنوان مثال اگر ربات به مانعی گیر کند، چرخهای فعال درجا خواهند چرخید ولی چرخ غیرفعال بدون حرکت خواهد ماند.



شکل ۴: نمای شماتیک ربات با چرخ غیرفعال.

با این توصیف، چرخ غیرفعال یک چرخ مجهز به انکودر و سیستم تعلیق می‌باشد که سیستم تعلیق آن وظیفه برقراری تماس دائم بین چرخ و سطح را برعهده دارد. ابعاد این چرخ متناسب با ابعاد چرخهای فعال ربات انتخاب می‌گردد و اندازه دقیق آنرا محدودیت‌های ساخت ربات تعیین می‌نماید.

$$\text{if } (|\omega_{gyro,i} - \omega_{odo,i}| > \omega_{thres})$$

$$\text{then } \theta_i = \theta_{i-1} + \omega_{gyro,i} * T_s$$

$$\text{else } \theta_i = \theta_{i-1} + \omega_{odo,i} * T_s$$

(۱)

که  $\omega_{thres}$ ،  $\omega_{odo}$ ،  $\omega_{gyro}$ ،  $T_s$  به ترتیب فاصله زمانی نمونه‌برداری، سرعت زاویه‌ای ربات محاسبه شده توسط ژایروسکوپ و چرخهای فعال و آستانه برابری مقادیر سرعت‌های زاویه‌ای می‌باشند.

در مجموع الگوریتم ژایروادومتری نقایص زیر را دارد:

۱- راهی برای محاسبه سرعت خطی ربات در حالتیکه الگوریتم به درست و یا اشتباه بر غلط بودن داده‌های انکودر صحنه می‌گذارد وجود ندارد. محاسبه صحیح سرعت خطی ربات، یکی از منابع خطای موجود در راه محاسبه مکان درست ربات را برطرف می‌کند. دانستن مکان دقیق ربات در وظایفی که ربات باید به محیط نیرو وارد کند ضروری می‌باشد [۱۹، ۱۸].

۲- این الگوریتم اطلاعات سرعت زاویه‌ای ژایروسکوپ را همواره درست می‌داند و با استفاده از انکودرها سعی در رفع مشکل انحراف ژایروسکوپ دارد. بنابراین فرض می‌کند که اطلاعات ژایروسکوپ صرفاً در بازه‌های زمانی کوچک بکار گرفته شده است. این فرض با توجه به طبیعت ژایروسکوپ و دلایل متعدد وجود خطا در خروجی آن پذیرفته نمی‌باشد.

۳- فرض بکارگیری اطلاعات ژایروسکوپ در بازه‌های زمانی کوچک، ابعاد موانعی که الگوریتم قادر به از بین بردن اثر آنها در مکان‌یابی نسبی است را محدود می‌کند (باید در فاصله زمانی کوچک از آنها عبور کرد).

۴- فرض ترکیبی از خطوط مستقیم بودن مسیر مطلوب ربات به موثر بودن الگوریتم بسیار کمک کرده است، فرضی که در حالت کلی چندان پذیرفته نمی‌باشد [۲۰].

۵- در حالت کلی فرض کوچکتر بودن سرعت خطی واقعی ربات از سرعت خطی محاسبه شده توسط انکودرها برقرار نیست. حتی هنگام عبور از موانعی با ابعاد کوچک نیز ممکن است ربات در اثر رفتاری شبیه سرخوردن در سراسیمی این فرض را باطل کند.

به ندرت رخ می‌دهد که سیستم از این فرض تخطی می‌کند (البته این فرض در تمامی مقالاتی که سعی در تصحیح نتایج ادومتری داشته‌اند، وجود دارد). فرض می‌شود که هیچکدام از چرخها در اثر هیچ عامل غیرسیستماتیکی، سرعت خطی بیش از سرعت خطی محاسبه شده توسط انکودر مربوطه را پیدا نکنند. در واقع فرض می‌شود که حالت لیز خوردن هنگام ترمز وجود ندارد. در اینصورت در مقایسه سرعت خطی ربات محاسبه شده توسط دو چرخ کناری با سرعت خطی محاسبه شده توسط چرخ وسط می‌توان گفت که هر کدام از این دو عدد که کوچکتر باشد درست خواهد بود.

با این توصیف شبه کد بیان کننده الگوریتم به صورت زیر خواهد بود.  $V_M$  سرعت خطی ربات محاسبه شده توسط چرخ غیرفعال،  $V_{RL}$  سرعت خطی ربات محاسبه شده توسط چرخهای فعال،  $V_{thres}$  آستانه‌ای برای مساوی بودن دو مقدار سرعت خطی،  $V$  و  $\omega$  به ترتیب سرعتهای خطی و زاویه‌ای پذیرفته شده برای ربات می‌باشند.

$$\begin{aligned} & \text{if } |V_M - V_{RL}| < V_{thres} \\ & \quad V = V_M, \omega = \omega_{RL} \\ & \text{elseif } V_M > V_{RL} \\ & \quad V = V_{RL}, \omega = \omega_{grov} \\ & \text{elseif } V_M < V_{RL} \\ & \quad V = V_M, \omega = \omega_{grov} \end{aligned} \quad (2)$$

#### مقایسه الگوریتم یک و الگوریتم ژایروادومتری

قبل از تعمیم الگوریتم و رفع نقایص موجود بهتر است مقایسه‌ای بین این الگوریتم و ژایروادومتری صورت گیرد. با توجه به نقاط ضعفی که برای ژایروادومتری بر شمرده شد، می‌توان برتریهای این الگوریتم را چنین بیان کرد:

۱- مرجع رفتار درست سیستم، "یکسان بودن مقادیر محاسبه شده برای سرعت خطی ربات از دو روش موجود" می‌باشد و خروجی ژایروسکوپ برای بررسی رفتار صحیح سیستم استفاده نمی‌شود.

۲- در این الگوریتم، سرعت خطی ربات کاملاً درست و یا به قدر کافی نزدیک به مقدار واقعی محاسبه می‌گردد.

۳- رفتار این الگوریتم در مسیرهای منحنی شکل مانند مسیرهای خط مستقیم مطلوب خواهد بود.

سرعت خطی نقطه اتصال چرخ سوم به بدنه می‌تواند توسط دو انکودر نصب شده روی چرخهای فعال نیز محاسبه گردد. برابر بودن سرعت محاسبه شده برای ربات از این دو روش، به معنای رفتار صحیح سیستم و لیز نخوردن چرخها می‌باشد.

آنچه در این ساختار اهمیت ویژه‌ای دارد این است که اگر یک یا دو چرخ از این سه، روی مانعی قرار گرفتند، تماس سایر چرخها از زمین قطع نشود. به عبارت دیگر، ربات در هر وضعیتی که قرار بگیرد، هر سه چرخ باید در تماس با زمین باشند. این مسئله در مورد چرخ وسط اهمیت بیشتری دارد چرا که اصطکاک بین چرخ و زمین است که چرخ را به چرخش در می‌آورد. برای حل این مشکل، از یک سیستم تعلیق ساده برای چرخ وسط استفاده شده است.

#### ترکیب اطلاعات ادومتری، ژایروسکوپ و چرخ غیرفعال

در این قسمت، هدف آن است که با استفاده از چرخ غیرفعال نصب شده روی ربات و اطلاعات حاصل از ادومتری و ژایروسکوپ، مرجع مناسبی برای تعیین مکان و زاویه دقیق ربات تعیین گردد. در ابتدا ایده اولیه الگوریتم توضیح داده خواهد شد. سپس به بررسی چگونگی بهبود خروجی ژایروسکوپ پرداخته می‌شود و با توصیف شرایط متفاوت سیستم زمینه برای ارائه الگوریتم نهایی فراهم می‌گردد.

#### ایده اولیه الگوریتم ترکیب اطلاعات

در اولین قدم، اگر سرعت خطی ربات محاسبه شده توسط دو انکودر کناری با سرعت خطی محاسبه شده توسط انکودر نصب شده روی چرخ غیرفعال برابر بود، می‌توان گفت سیستم دچار خطای غیرسیستماتیکی نشده است و هیچکدام از چرخها، داده‌های نادرستی فراهم نکرده‌اند. بنابراین هم برای محاسبه سرعت خطی و هم در محاسبه سرعت زاویه‌ای از سرعت چرخها استفاده می‌گردد (اولین لایه استقلال از ژایروسکوپ و محاسبه سرعت خطی درست ربات).

برای بیان ایده اولیه الگوریتم، فرضی در نظر گرفته می‌شود که بطور مطلق درست نمی‌باشد و حالاتی هر چند

با توجه به رفتار گسسته سیستم، فرض بر این است که الگوریتم پیشنهادی این مقاله در نمونه قبل با استفاده از خروجی سه انکودر و ژایروسکوپ سرعت زاویه‌ای درست ربات را محاسبه کرده است. در اینصورت سیگنال بازسازی شده ژایروسکوپ در این لحظه برابر با مجموع سرعت زاویه‌ای نمونه قبل و تغییرات دو نمونه متوالی اخیر خروجی ژایروسکوپ خواهد بود. با این روش چنانچه در ادامه و در نمودارها می‌آید، سیگنالی به دست خواهد آمد که نماینده خوبی برای رفتار ژایروسکوپ می‌باشد و تا میزان زیادی مشکلات ژایروسکوپ را برطرف می‌کند.

نکته بعدی که در الگوریتم نهایی نهفته خواهد شد، از بین بردن اثرات ناپیوسته بودن یا به تعبیر دیگر تغییرات بیش از حد انتظار در دو نمونه متوالی سیگنال ژایروسکوپ می‌باشد. این مورد در الگوریتم بررسی خواهد شد و در صورت اتفاق افتادن آن - مثلاً در اثر وارد شدن ضربه‌ای به ربات - از میان یکی از سه سرعت زاویه‌ای محاسبه شده از طریق انکودرها، یکی انتخاب خواهد شد. پیشنهاد این مقاله با توجه به آزمایشات، استفاده از نمونه‌ای است که کمترین اختلاف را با سرعت زاویه‌ای نمونه قبلی دارد.

### الگوریتم نهایی

با بررسی حالات فوق زمینه بررسی کلی روش ترکیب اطلاعات ادمتری، ژایروسکوپ و چرخ وسط فراهم گردیده است. آنچه به عنوان نتیجه بررسی‌های قبل می‌توان بیان کرد این است که اثرات متقابل زمین و چرخها در شرایط مختلف، غیرمنتظره و پیچیده می‌باشد. لذا بهتر است از تحلیل موردی آنها صرفنظر شده و رفتار سیستم بصورت ریاضی بررسی شود و تمام حالات ممکن، مستقل از احتمال وقوع در الگوریتم نهفته گردد.

هرکدام از شبه‌کدهای قبل متناسب با کاربرد ربات و شرایط محیطی می‌توانند رفتار مطلوبی از خود نشان دهند و ضرورتی برای استفاده از الگوریتم پیچیده نهایی وجود ندارد. در الگوریتم نهایی هیچگونه محدودیتی روی مسیر و محیط در نظر گرفته نشده است. لذا افزودن هر قیدی به سیستم (مانند محدود کردن مسیر ربات به مسیره‌های مستقیم و چرخش درجا) الگوریتم را ساده‌تر خواهد ساخت. فلوچارت قسمت اصلی الگوریتم نهایی در شکل (۶) آمده است.

### افزایش استقلال مقدار محاسبه شده سرعت زاویه‌ای از خروجی ژایروسکوپ

با استفاده از قاعده کلی "اگر یک چرخ دچار خطا شده باشد از دو چرخ دیگر می‌توان سرعت زاویه‌ای ربات را محاسبه کرد" می‌توان جملات دوم و سوم شبه‌کد ارائه شده را تصحیح نمود. لذا بایستی حالتیکه تنها یک چرخ دچار ایراد شده است - یعنی شایعترین حالت دچار خطا شدن سیستم - را تشخیص داده و سرعت زاویه‌ای ربات را از دو چرخ بدون خطا محاسبه کرد. براین اساس، الگوریتم به صورت شکل در خواهد آمد که در آن  $\omega_{RM}$  سرعت زاویه‌ای محاسبه شده توسط چرخهای راست و وسط و  $\omega_{ML}$  سرعت زاویه‌ای محاسبه شده توسط چرخهای چپ و وسط می‌باشند.

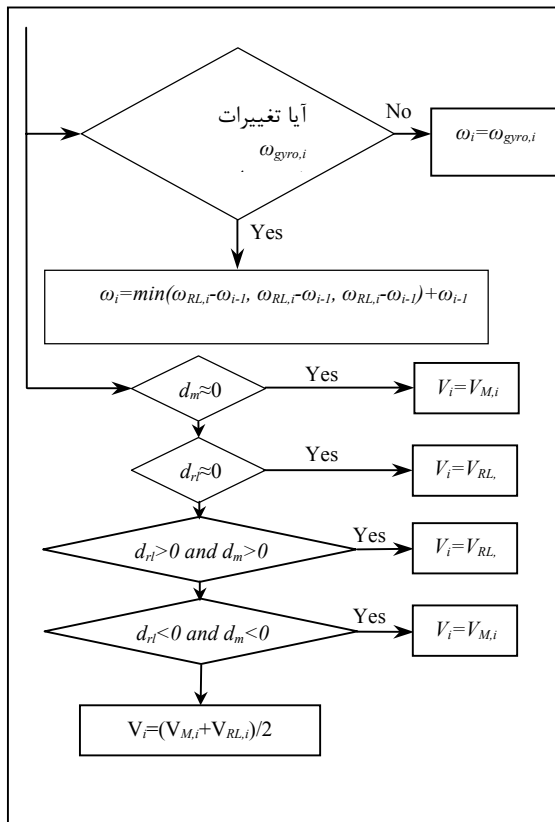
### بهبود سرعت زاویه‌ای خروجی ژایروسکوپ

پس از کالیبره کردن سیستم در آزمایشات متوالی، رفتار سیگنال ژایروسکوپ بسیار شبیه به سرعت زاویه‌ای واقعی سیستم بود ولی تغییرات دامنه آن با واقعیت تطابق نداشت و از سوی دیگر این تغییرات از قاعده مشخصی نیز تبعیت نمی‌کرد که بتوان آن قاعده را در کالیبراسیون ربات گنجاند. براین اساس پیشنهاد بازسازی خروجی ژایروسکوپ طرح گردید.

$$\begin{aligned}
 & \text{if } |V_M - V_{RL}| < V_{thres} \\
 & \quad V = V_M, \omega = \omega_{RL} \\
 & \text{elseif } V_M > V_{RL} \\
 & \quad V = V_{RL}, \omega = \omega_{RL} \\
 & \text{elseif } V_M < V_{RL} \\
 & \quad \{ \\
 & \quad \quad V = V_M \\
 & \quad \quad \text{if } |\omega_{gyro} - \omega_{RM}| < \omega_{thres} \\
 & \quad \quad \quad \omega = \omega_{RM} \\
 & \quad \quad \text{elseif } |\omega_{gyro} - \omega_{ML}| < \omega_{thres} \\
 & \quad \quad \quad \omega = \omega_{ML} \\
 & \quad \quad \text{else} \\
 & \quad \quad \quad \omega = \omega_{gyro} \\
 & \quad \quad \}
 \end{aligned}$$

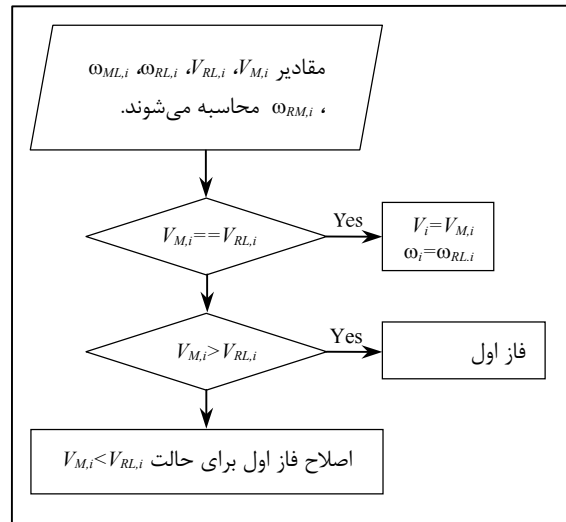
شکل ۵: شبه‌کد الگوریتم با فرض استفاده حداقل از خروجی ژایروسکوپ.

سرعت خطی کاملاً درست ممکن نخواهد بود و سعی خواهد شد تا از طریق چرخها نزدیکترین مقدار برای این سرعت محاسبه گردد. برای محاسبه سرعت زاویه‌ای نیز، اگر تغییرات خروجی ژایروسکوپ بیش از حد متداول  $(d\omega_{thres})$  نباشد، از خروجی ژایروسکوپ استفاده می‌گردد. در غیر اینصورت، الگوریتم از میان مقادیری که توسط چرخها بدست آمده هر کدام کمترین تفاوت را با سرعت زاویه‌ای در نمونه قبل دارد، به عنوان سرعت زاویه‌ای فعلی ربات انتخاب می‌کند (فاز دوم الگوریتم).



شکل ۷: فلوچارت فاز اول الگوریتم.

برای تعیین علامت  $d_m, d_{rl}$  با تقریب و با در نظر گرفتن آستانه‌های درست، می‌توان تغییرات سرعت‌های خطی  $V_M, V_{RL}$  در نمونه فعلی نسبت به سرعت خطی پذیرفته شده نمونه قبلی را بکار گرفت. به عنوان مثال  $d_m > 0$  تقریباً با  $(V_M - V) > dV_{thres}$  معادل می‌باشد. میزان متداول تغییرات سرعت خطی در دونمونه متوالی می‌باشد.



شکل ۶: فلوچارت قسمت اصلی الگوریتم نهایی.

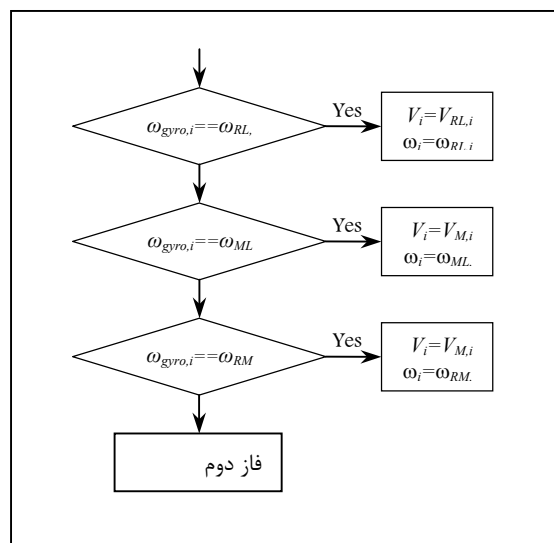
توجیه الگوریتم بر این قاعده استوار است که مقادیر انکودرهای هر سه چرخ ممکن است خطاهایی را نسبت به مقادیر واقعی از خود نشان دهند. این خطاها به ترتیب چرخهای راست، چپ و وسط با  $d_r, d_l, d_m$  نشان داده می‌شوند. هر کدام از این تفاوتها می‌تواند مثبت یا منفی باشند و در هر لحظه هر سه چرخ نیز ممکن است، دچار خطا گردند.

بررسی خطا در سیستم در دو حالت  $V_M > V_{RL}$  و  $V_M < V_{RL}$  صورت می‌گیرد. در الگوریتم نهایی اگر تنها یک چرخ دچار خطا شده باشد، سرعت خطی و سرعت زاویه‌ای صحیح از دو چرخ دیگر محاسبه می‌گردد (شکل ۷). آنچه در این حالت اهمیت دارد، تشخیص چرخ است که دچار خطا گردیده است. در سایر حالات امکان محاسبه سرعت زاویه‌ای از طریق چرخها وجود نخواهد داشت و باید به خروجی ژایروسکوپ رجوع کرد (شکل ۸). بنابراین در مواقعی که الگوریتم تشخیص می‌دهد که ربات دچار خطا شده است، اگر خروجی ژایروسکوپ با یکی از سرعت‌های زاویه‌ای  $\omega_{ML}, \omega_{RM}, \omega_{RL}$  برابر (با در نظر گرفتن آستانه  $\omega_{thres}$ ) باشد، سرعت خطی و سرعت زاویه‌ای درست ربات بدست خواهد آمد (فاز اول الگوریتم). در غیر اینصورت می‌توان به این نتیجه رسید که داده‌های بیش از یک چرخ با خطا همراه بوده است و یا سیگنال ژایروسکوپ رفتاری درست نداشته است. بنابراین محاسبه

نشان می‌دهد که سیگنال بازسازی شده خروجی ژایروسکوپ بسیار نزدیکتر از سیگنال اصلی آن به مقدار مرجع می‌باشد. مقدار مرجع توسط انکودرهای چرخهای فعال در حالت بدون خطا بودن سیستم بدست آمده است. باید توجه داشت که محاسبه سرعت زاویه‌ای ربات براساس خروجی دوربین به دلیل مشتفگیری از دقت خوبی برخوردار نیست.

شکل (۱۱) نتایج مکان‌یابی توسط دوربین، الگوریتم و انکودرهای نصب شده روی چرخهای فعال در حالتیکه سیستم با هیچ منبع خطای غیرسیستماتیکی مواجه نشده است را با یکدیگر مقایسه می‌کند. شکل (۱۱-الف) خطای موجود در محاسبه زاویه ربات توسط انکودرهای چرخهای فعال و الگوریتم این مقاله را مقایسه می‌کند. شکل (۱۱-ب) نیز تصویر مسیر طی شده ربات در راستای محور X ها را مقایسه می‌کند.

برای نمایش رفتار الگوریتم در مواقعی که ربات با منابع خطای غیرسیستماتیک مواجه شده است، ابتدا نتایج دوربین، الگوریتم و انکودرهای چرخهای فعال با یکدیگر مقایسه شده است. منابع خطای غیرسیستماتیکی که ربات در این آزمایشها با آنها مواجه شده است ناصافیهای با ابعاد ریز و طولانی، گیرکردن ربات در حین حرکت و سرخوردن هنگام چرخشهای سریع می‌باشد. الگوریتم نهایی در بیش از ۵۰ تست مختلف در مسیرهای مختلف روی میز ذکر شده با موانع مختلف تست گردید. موانع تست شده در محدوده وسیعی انتخاب گردیدند. کوچکترین مانع سیم‌های برق شماره ۵،۱ بود که با فاصله‌های تقریبی ۱۰ سانتی‌متری بر روی میز چسبانده شده بود و بزرگترین مانع ارتفاعی حدود ۳ سانتی‌متری داشته است. نکته قابل توجه در آزمایشات انجام شده آن است که در همه موارد نتایج بدست آمده از روش‌های پیشنهادی برتر از نتایج بدست آمده از روش‌های مشابه بررسی شده می‌باشد. از آنجا که نتایج گیرکردن ربات به موانع در بیان توانایی الگوریتم بسیار گویاتر بوده و بوضوح نقایص ژایروادومتری را نشان می‌دهد، منبع خطای نمودارهای ارائه شده از این سنخ می‌باشد. شکل (۱۲-الف) خطای موجود در محاسبه زاویه ربات توسط انکودرهای چرخهای فعال و الگوریتم این مقاله را مقایسه می‌کند. در شکل (۱۲-ب) نیز خطای محاسبه مختصات Y ربات توسط



شکل ۸: فاز دوم الگوریتم.

## نتایج آزمایشات

مکان‌یابی مطلق ربات توسط یک دوربین CCD با وضوح  $۷۶۸ \times ۵۷۶$  پیکسل که روی سقف و در فاصله ۲،۲ متری سطح آزمایش قرار گرفته انجام می‌گیرد. با زاویه دید حدود ۴۰-۵۰ درجه سطحی بالغ بر  $۱،۶ \times ۱،۶$  مترمربع در تصویر قرار می‌گیرد. این سطح یک میز چوبی سیاه‌رنگ است و هر گونه مانعی روی آن قرار داده می‌شود. مکان‌یابی ربات با جستجوی نقاط سیاه‌رنگی که در یک محدوده سفید قرار گرفته انجام می‌شود. این صفحه سفیدرنگ (ربات) نیز روی میز چوبی قرار گرفته که زمینه آنرا کاملا سیاه می‌نماید تا از خطاهای احتمالی مکان‌یابی اجتناب گردد. براین اساس پس از کالیبراسیون دوربین دقت مناسبی در محاسبه مکان و زاویه ربات بدست آمد. شکل (۹) خطای محاسبه زاویه ربات هنگامی که ربات بدون حرکت است را نشان می‌دهد. اندازه این خطا نشانگر دقت سیستم در محاسبه زاویه ربات می‌باشد. دقت اندازه‌گیری مکان دایره‌های سیاه حدود ۲،۸ میلی‌متر می‌باشد.

یکی از مشکلاتی که این سیستم با آن مواجه است، رفتار ژایروسکوپ می‌باشد. به عنوان نمونه‌ای از رفتار نامطلوب ژایروسکوپهای با قیمت مناسب شکل (۱۰-الف) سیگنال خروجی آنرا هنگامی که ربات بدون حرکت است نشان می‌دهد. در این شکل سیگنال بازسازی شده ژایروسکوپ نیز نمایش داده شده است. شکل (۱۰-ب) نیز



برای بکارگیری الگوریتم نهایی هیچ فرض محدودکننده‌ای باقی گذاشته نشد.

ایده اصلی برای تشخیص مواردی که ربات با خطای غیرسیستماتیک مواجه شده است، مساوی نبودن سرعت‌های خطی ربات، محاسبه شده از دو منبع چرخ‌های فعال و چرخ غیر فعال می‌باشد. الگوریتم پیشنهادی تاکید خود را بر پیدا کردن بهترین داده‌ها برای محاسبه سرعت خطی صحیح - که در مقاله‌های پیشین اصلا مورد توجه قرار گرفته نبود- و استفاده حداقل و در فاصله‌های زمانی بسیار کوچک از خروجی تصحیح شده ژایروسکوپ (سیگنالی که ناشی از ژایروسکوپ از آن حذف شده است) به عنوان سرعت زاویه‌ای ربات نهاده است. پیاده‌سازی این روش بسیار ساده بوده و تاثیر قابل توجهی در کاهش خطاهای غیرسیستماتیک ادومتری دارد.

آزمایشات انجام گرفته قابلیت مطلوب الگوریتم در کاهش خطاهای ادومتری حتی در مسیرهای غیرمستقیم و باوجود ژایروسکوپیهای ارزان قیمت با کیفیت پائین را نشان می‌دهد. در مجموع الگوریتم نهایی توانایی بسیار مطلوبی در مواجهه با هر منبع خطای غیرسیستماتیکی از خود نشان می‌دهد.

تحلیل ریاضی و دقیق دینامیک چرخ‌ها در شرایط متفاوت از جمله پیشنهاداتی است که بهبود قابل توجهی در نتایج الگوریتم بوجود خواهد آورد.

همچنین ایده افزودن یک چرخ غیرفعال می‌تواند مبنای ارائه یک روش جدید کالیبراسیون جدید برای رباتهای متحرک باشد. بعلاوه، بسیاری از تحقیقات انجام گرفته روی رباتهای متحرک چرخدار، قابل تعمیم به سیستم پیشنهادی بوده و بررسی اثرات این تعمیم از دیگر جهت‌های تحقیقات در این زمینه می‌باشد.

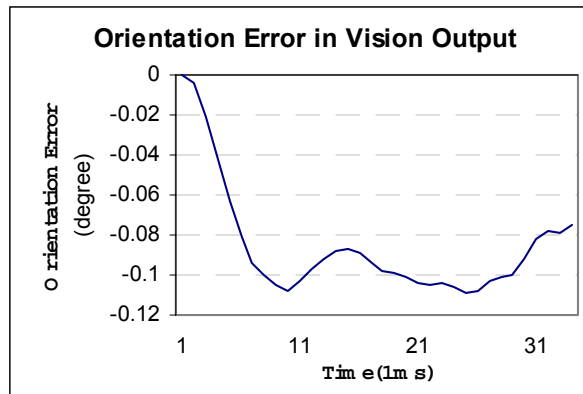
این دو مرجع نمایش داده شده است .

پس از نمایش توانایی الگوریتم می‌بایست نتایج آن با روشهای موجود مقایسه گردد. مقایسه ژایروادومتری به عنوان یکی از بهترین روشهای موجود با این الگوریتم میزان مطلوبیت الگوریتم را نشان می‌دهد. در شکل (۱۳-الف) خطای محاسبه زاویه ربات توسط ژایروادومتری و الگوریتم پیشنهادی این مقاله مقایسه شده‌اند. شکل (۱۳-ب) نیز خطای محاسبه تصویر مسیر ربات روی محور X توسط این دو روش را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که ژایروادومتری در مواردیکه داده‌های انکودرهای چرخهای فعال را خطادار تشخیص می‌دهد، مقداری برای سرعت خطی ربات مشخص نمی‌کند. مواردیکه در شکل (۱۳-ب) توسط ژایروادومتری مکانی برای ربات مشخص نشده است متناظر با این حالات می‌باشد. در تمامی آزمایشات انجام گرفته به دلیل رفتار ژایروسکوپ و عدم امکان تعیین آستانه مناسب برای مقایسه سرعت زاویه‌ای محاسبه شده توسط انکودرها و ژایروسکوپ، حتی اگر ربات با خطایی مواجه نشده بود، ژایروادومتری رفتار بسیار نامطلوبی از خود نشان داد.

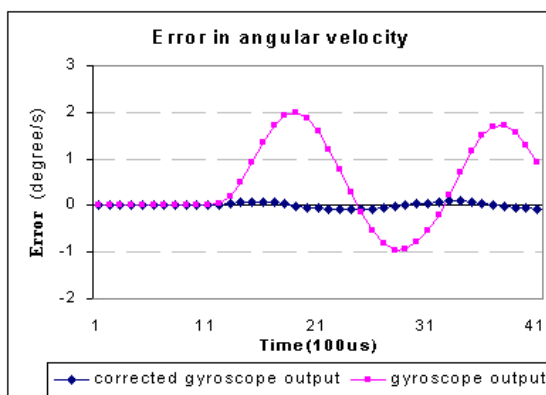
در صورتیکه الگوریتم ژایروادومتری با سیگنال بازسازی شده ژایروسکوپ بازنویسی گردد، رفتار آن در حالتیکه سیستم دچار خطا نشده باشد، قابل مقایسه با الگوریتم این مقاله است. اما هنگامی که ربات با منابع خطای غیرسیستماتیک مواجه گردد، در بسیاری از حالات مقداری برای سرعت خطی ربات مشخص نخواهد شد.

## نتیجه گیری

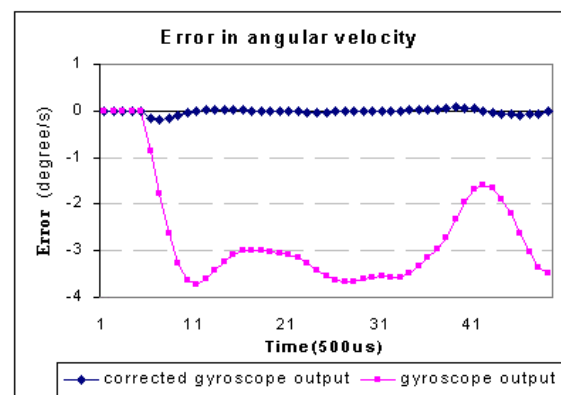
در این مقاله روشی جدید برای افزایش دقت مکان‌یابی ربات متحرک ارائه گردید. تاکید الگوریتم بر ارائه روشی برای محاسبه سرعت خطی و روشی برای بهبود محاسبه سرعت زاویه‌ای ربات در حالتیکه با منابع خطای غیرسیستماتیک مواجه شده است می‌باشد. این مهم با ترکیب اطلاعات بدست آمده از چرخ غیرفعال مجهز به سیستم تعلیق که در نقطه میانی چرخ‌های ربات نصب می‌گردد با ژایروادومتری بدست می‌آید. برای توضیح ایده اولیه الگوریتم ابتدا فرض شد که تنها یک چرخ با خطا مواجه می‌گردد. با کامل کردن الگوریتم در مراحل مختلف،



شکل ۹: دقت دوربین در محاسبه زاویه ربات در حالتیکه بدون حرکت است.

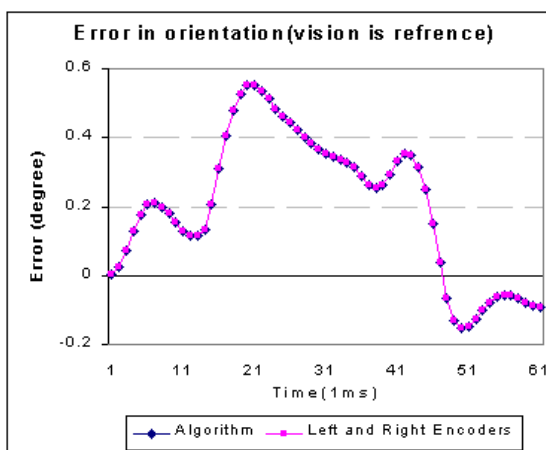


(الف)

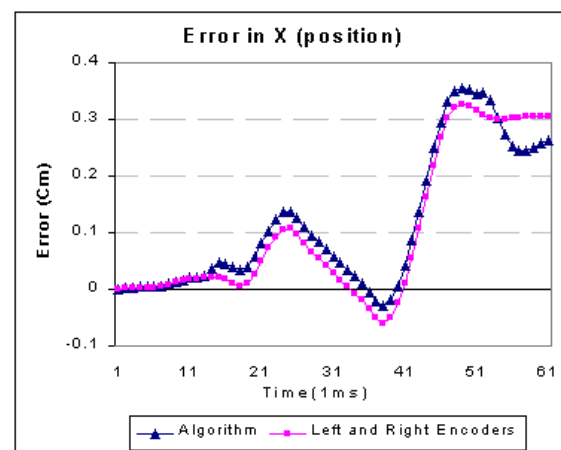


(ب)

شکل ۱۰: نمایش رفتار نامطلوب ژایروسکوپ (الف) - صفر نبودن خروجی ژایروسکوپ و خروجی تصحیح شده آن برای ربات بدون حرکت (ب) - مقایسه خطای سیگنال اصلی ژایروسکوپ با خطای سیگنال بازسازی شده ژایروسکوپ برای ربات در حال حرکت مستقیم.

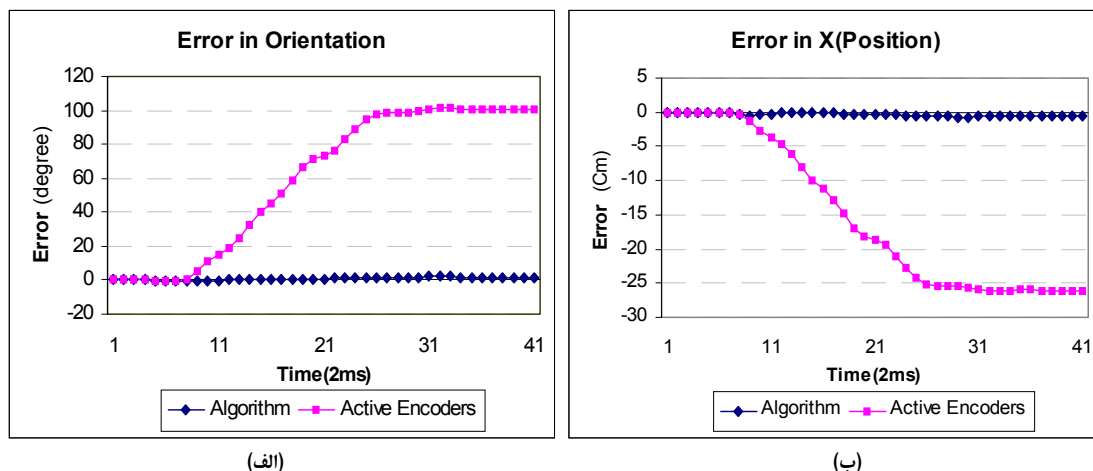


(الف)

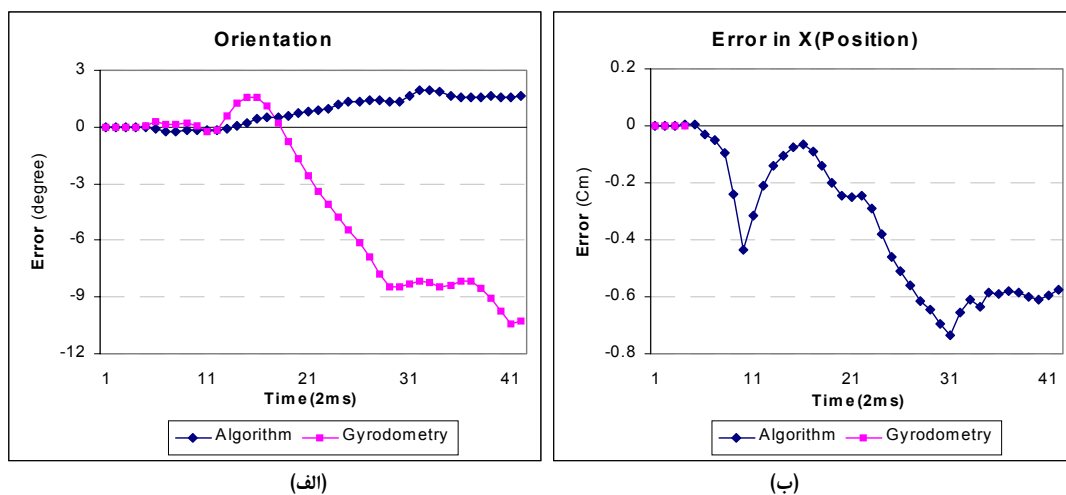


(ب)

شکل ۱۱: بررسی الگوریتم پیشنهادی در حالت عدم وجود منابع خطا (الف) - خطای موجود در محاسبه زاویه ربات توسط انکودرهای چرخهای فعال و الگوریتم ارائه شده در این مقاله یکسان می باشد. (ب) - خطای موجود در محاسبه تصویر مسیر ربات در راستای محور X توسط این دو روش.



شکل ۱۲: بررسی رفتار الگوریتم این مقاله با حضور منابع خطای غیرسیستماتیک (الف) - مقایسه خطای موجود در محاسبه زاویه ربات توسط انکودرهای چرخهای فعال و الگوریتم این مقاله (ب) - مقایسه خطای محاسبه مختصات Y ربات توسط انکودرهای چرخهای فعال و الگوریتم این مقاله .



شکل ۱۳: مقایسه رفتار الگوریتم پیشنهاد شده و ژایروادومتري (الف) - خطای محاسبه زاویه ربات توسط این دو روش (ب) - خطای محاسبه مختصات X ربات توسط الگوریتم این مقاله و ژایروادومتري (ژایروادومتري از نمونه پنجم مقداری را مشخص نمی کند).

## مراجع

- 1 - Giuffrida, F., Morasso, P., Vercelli, G. and Zaccaria, R. (1996). "Active localization technique for mobile robots in the real world." *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and System(IROS96)*, Vol. 3, PP. 1312-1318.
- 2 - Leonard, J. and Durrant-Whyte, H. F. (1991). "Mobile robot localization by tracking geometric beacons." *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 3, PP. 376-382.

- 3 - Adam, A., Rivlin, E. and Rotstein, H. (1999). "Fusion of fixation and odometry for vehicle navigation." *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA99)*, PP. 1638-1643.
  - 4 - Schultz, C. and Adams, W. (1998). "Continuous localization using evidence grids plan." *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA98)*, PP. 2833-2839.
  - 5 - Olson, F. and Matthies, H. (1998). "Maximum likelihood rover localization by matching range maps." *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA98)*, PP. 272-277.
  - 6 - Deans, M. and Hebert, M. (2000). "Invariant filtering for simultaneous localization and mapping." *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA00)*, PP. 1042-1047.
  - 7 - Lee, S., Amato, N. and Fellers, J. (2000). "Localization based on visibility sectors using range sensors." *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA00)*, PP. 3505-3611 .
  - 8 - Yagi, Y., Nishizawa, Y. and Yachida, M. (1995). "Map based navigation for mobile robot with omnidirectional image sensor: COPIS." *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 11, No. 5.
  - 9 - Moshiri, B., Asharif, M. R. and HoseinNezhad, R. (2002). "Pseudo information measure: a new concept for extention of Bayesian fusion in robotic map building." *Information Fusion*, No. 3, PP. 51-68.
  - 10 - Weckesser, P., Appenzeller, G., Essen, A. V. and Dillmann, R. (1996). "Exploration of the Environment with an active and intelligent optical sensor system." *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and System(IROS96)*, PP. 664-669.
  - 11 - Maeyama, S., Ohya, A. and Yuta, S. (1996). "Outdoor landmark map generation through human assisted route teaching for mobile robot navigation." *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and System(IROS96)*, PP. 957-962.
  - 12 - Borenstein, J. (1998). "Experimental evaluation of a fiber optics gyroscope for improving dead-reckoning accuracy in mobile robots." *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA98)*, PP. 3456-3461.
  - 13 - Chung, H., Ojeda, L. and Borenstein, J. (2001). "Accurate mobile robot dead reckoning with a precision-calibrated fiber-optic gyroscope." *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 1.
  - 14 - Barshan, B. and Durrant-Whyte, H. F. (1994). "Orientation estimate for mobile robots using gyroscope information." *1994 Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems(IROS94)*, Munich, Germany, Sept. 12-16, PP. 1867-1874.
  - 15 - Barshan, B. and Durrant-Whyte, H. F. (1995). "Inertial navigation systems for mobile robots." *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 11, No. 3, PP. 328-342.
  - 16 - Borenstein, J. and Feng, L. (1996). "Gyrodometry: a new method for combining data from gyros and odometry in mobile robots." *IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA96)*, PP. 423-428.
  - 17 - Borenstein, J. and Feng, L. (1995). "UMBmark: a benchmark test for measuring odometry errors in mobile robots." *SPIE Conf. on Mobile Robots*, Philadelphia, PP. 22-26.
-

- 18 - Nili Ahmadabadi, M. and Nakano, E. (1996). "A cooperation strategy for a group of object lifting robots." *Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems(IROS96)*, PP. 125-130.
- 19 - Nili Ahmadabadi, M. and Nakano, E. (1998). "A unified distributed cooperation strategy for multiple object handling robots." *IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA98)*, PP. 3625-3630.
- 20 - Borenstein, J. and Koren, Y. (1995). "Motion control analysis of a mobile robot." *Transactions of ASME, Journal of Dynamics, Measurement and Control*, Vol. 109, No. 2, PP. 73-79.

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Passive
- 2 - Active
- 3 - Dead Reckoning
- 4 - Nonholonomic
- 5 - Positioning
- 6 - Localization
- 7 - Active or Passive Landmarkes
- 8 - Inertial Navigation
- 9 - Odometry
- 10 - Drift
- 11 - Scale Factor
- 12 - Differential Drive
- 13 - Bump