

طراحی و توسعه یک ربات همه‌جهته هولونومیک با استفاده از مکانیزم رانش تفاضلی

سید محمد مهدی دهقان بنادکی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد هوش ماشین و رباتیک مرکز تحقیقات فضایی

مجید نیلی احمدآبادی

دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

بهرروز معاونی ثابت

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد بیو مکانیک

(تاریخ دریافت ۸۳/۷/۱۱، تاریخ تصویب ۸۴/۵/۸)

چکیده

ربات‌های متحرک متداول مانند مکانیزم رانش تفاضلی^۱ و شبه‌ماشین^۲ دارای محدودیت حرکتی می‌باشند. این محدودیت‌ها باعث می‌شود که اینگونه ربات‌ها برای محیط‌هایی که دارای محدودیت‌های مکانی می‌باشند، مناسب نباشند. به عنوان نمونه این ربات‌ها امکان حرکت از کنار را ندارند. ربات‌های همه‌جهته برای افزایش قابلیت‌های حرکتی ربات‌های متحرک پیشنهاد شدند. به یک ربات همه‌جهته هولونومیک در هر وضعیت دلخواه فعلی می‌توان هر بردار سرعتی را داد تا در جهت دلخواه به حرکت درآید. در این مقاله طراحی و ساخت یک مکانیزم هولونومیک مبتنی بر یک ربات متحرک غیرهولونومیک با مدل رانش تفاضلی مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله مباحث دیگر مطرح شده در این مقاله سینماتیک، مکان‌یابی، کنترل و ردیابی یک مسیر دلخواه ورودی درمورد این ربات است. ربات متحرک با ساختار رانش تفاضلی به‌عنوان واحد رانش ربات هولونومیک بکار گرفته می‌شود. یک رویه نیز که محور دوران آن بصورت خروج از مرکز نسبت به نقطه میانی محور چرخ‌های فعال واحد رانش نصب شده است، کنترل‌پذیری زاویه ربات را فراهم می‌سازد. از آنجا که ربات هولونومیک است خطای مکان فعلی آن در راستای محورهای دستگاه مختصات مرجع نسبت به مکان موردنظر با ضرایب ثابت به بردارهای سرعتی در همان راستاها تبدیل می‌گردد. با مشخص شدن بردارهای سرعت نقطه نماینده سیستم، مقادیر مرجع سرعت چرخ‌های فعال واحد رانش مشخص می‌گردد. یک کنترلر مستقل زاویه نیز دستیابی زاویه مطلوب در رویه ربات را تضمین می‌نماید.

واژه های کلیدی: ربات متحرک همه‌جهته، ربات هولونومیک، مکان‌یابی، سینماتیک، ردیابی مسیر، کنترل ربات

مقدمه

ممکن است پیش از دادن بردار سرعت دلخواه به یک ربات همه‌جهته غیرهولونومیک لازم باشد تا ربات توقف کامل نموده تا وضعیت چرخ‌ها را متناسب با بردار سرعت جدید تنظیم نماید. ربات‌های همه‌جهته هولونومیک در هر وضعیتی که باشند، بدون هرگونه تنظیم اولیه‌ای می‌توانند هر بردار سرعتی را دنبال کنند. ربات‌های هولونومیک را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. دسته اول ربات‌هایی می‌باشند که چرخ‌های آنها دارای مکانیزم خاص است. اما ربات‌های هولونومیک دسته دوم از چرخ‌های غیرهولونومیک ساده استفاده می‌کنند. چرخ‌های Universal [۲] مجهز به غلتک‌هایی بر روی محیط چرخ می‌باشند که امکان چرخش آزاد غیرفعال حول محورهای دورانی مماس بر سطح چرخ

ربات‌های متحرک متداول مانند ربات‌های دارای ساختارهای شبه‌ماشین و یا رانش تفاضلی با محدودیت‌هایی در حرکت مواجه می‌باشند. ربات متحرک شبه‌ماشین امکان حرکت از کنار (حرکت در راستای محور چرخ‌های محرک) و چرخش درجا را ندارد. یک ربات متحرک رانش تفاضلی امکان چرخش درجا را دارد ولی کماکان امکان حرکت از کنار برای این ربات نیز وجود ندارد. در ربات‌های متحرک همه‌جهته محدودیت‌های حرکتی فوق وجود ندارد و ربات امکان حرکت در هر جهتی را دارد. ربات‌های همه‌جهته غیر هولونومیک [۱] در ردیابی مسیری که منحنی انحناء آن پیوسته نیست، مجبور به توقف و تنظیم جهت چرخ‌ها پیش از ادامه مسیر می‌باشند. درواقع

گرفته می‌شود [۱۳، ۱۴]. با فرض ثابت بودن نقطه تماس چرخ با زمین هنگام وجود گشتاور فرمان، نقطه اتصال به بدنه یک نقطه هولونومیک خواهد بود.

براین اساس اولین ایده ساخت یک ربات هولونومیک استفاده از دو چرخ خروج از مرکز خواهد بود [۱۳]. با توجه به وجود یک موتور اضافی در این مکانیزم می‌بایست در تعیین گشتاور موتورها محدودیت اجسام صلب را رعایت کرد. از ضعف‌های این ربات می‌توان از لغزش فراوان و نبود روشی مناسب برای تعیین میزان لغزش نام برد. در چرخ‌های سنکرون [۱۵] محورهای رانش و فرمان به‌طور مکانیکی از یکدیگر دکوپل شده‌اند و رانش و تغییر زاویه چرخ به‌طور همزمان و توسط دو موتور مستقل انجام می‌گیرد. انتقال گشتاور به موتورها از بالا صورت می‌گیرد تا چرخ‌های سنکرون نصب شده روی شاسی دارای موتورهای مشترک باشند. نصب یک رویه مستقل نیز امکان کنترل زاویه ربات را فراهم می‌کند. این مکانیزم مستقل از نقص تئوریکی که در آن دیده می‌شود دارای مکانیزم پیچیده‌ای در چرخ‌ها می‌باشد. در کنار مشکلات سنکرون سازی چرخ‌ها، کالیبره و کاملاً مشابه بودن چرخ‌ها بر مشکلات ساخت می‌افزاید.

از دو ربات رانش تفاضلی نیز برای ساخت یک ربات هولونومیک استفاده می‌شود [۱۶، ۱۷، ۱۸]. این دو تراک مستقل قابلیت چرخش آزاد حول یک شافت عمودی نصب شده روی بدنه اصلی ربات را دارند. بین دو تراک نیز توسط یک بلبرینگ خطی، نرمی مکانیکی ایجاد شده است. این طراحی باعث می‌شود مکان‌یابی، مسیریابی و راهبری ربات ملاحظات پیچیده‌ای داشته باشد. ابعاد بزرگ، افزایش تعداد واقعی پارامترهای توصیف‌کننده سیستم و انتخاب نقطه اصلی بیانگر وضعیت ربات، از جمله مشکلات دیگر این سیستم است.

در این مقاله طراحی، ساخت، مکان‌یابی و ردیابی مسیر مکان- زمان در یک ربات همه‌جهته مورد بررسی قرار گرفته است. این ساختار تا حد زیادی مشابه ساختارهای ارائه شده در [۱۵، ۱۹] می‌باشد که دارای یک واحد رانش و یک رویه پوشاننده می‌باشد. واحد رانش این ربات دارای مکانیزم رانش تفاضلی می‌باشد که هر نقطه از آن غیر از نقاط قرار گرفته روی محور چرخ‌های رانش نقطای هولونومیک می‌باشند. بنابراین هر یک از این نقاط می‌تواند هر بردار سرعت دلخواه را دریافت دارد. در این صورت می‌توان

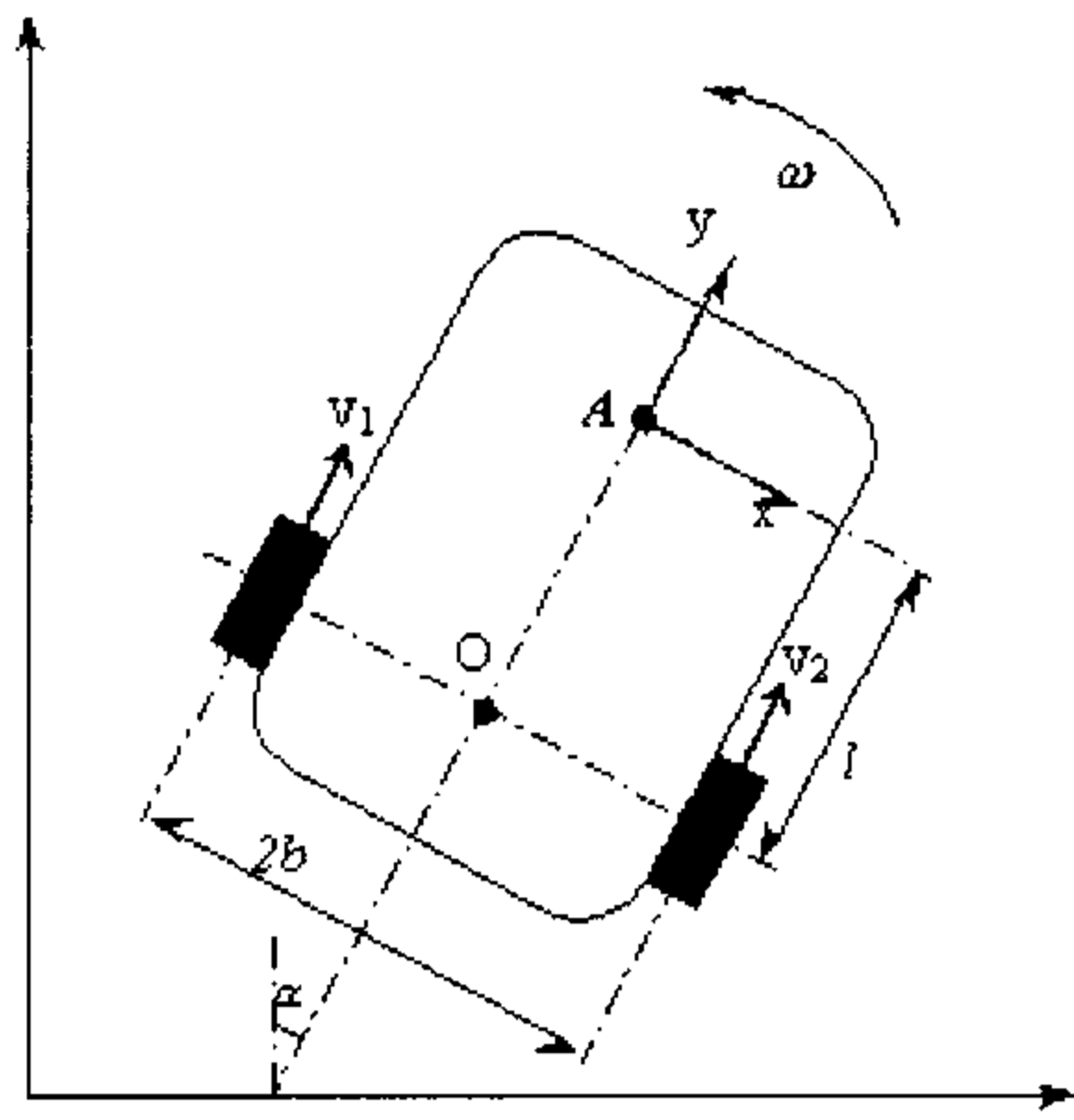
را فراهم می‌نمایند. در این صورت چرخ در برابر حرکت‌های عمود بر سطح چرخ مقاومتی از خود نشان نخواهد داد. استفاده از کره که محور دوران آن در هر لحظه می‌تواند تغییر کند، ایده اساسی گروه دیگری از چرخ‌های هولونومیک را تشکیل می‌دهد [۳، ۴، ۵، ۶، ۷]. تعدادی غلتک که در یک جهت کره را به چرخش در می‌آورند و در سایر جهات در برابر حرکت آن مقاومت ندارند، بر روی چرخ‌کروی نصب می‌گردند تا نیروی رانش آنها تامین نمایند. چرخ‌های Orthogonal [۸، ۹، ۱۰، ۱۱] از دو قسمت مشابه تشکیل شده‌اند که کره‌هایی از دو طرف برش خورده با محورهای چرخش عمود بر یکدیگر می‌باشند. این دو جزء مجموعه یک چرخ سعی می‌کنند یک مسیر منحنی را با تبدیل آن به حرکت‌های افقی و عمودی طی نمایند. برای ساخت یک ربات هولونومیک با استفاده از هر یک از مکانیزم‌های فوق، سه چرخ با چینش خاص بکار گرفته می‌شود.

چرخ‌های Mecanum [۱۲] ایده مشابهی با چرخ‌های Universal دارد. غلتک‌های توصیف‌شده در این چرخ با زاویه ۴۵ درجه نصب می‌گردند و عموماً چهارچرخ برای به حرکت درآوردن ربات بکار می‌رود.

مکانیزم‌های فوق دارای مشکلات مشترک محدودیت بار قابل حمل، بالا بودن میزان لغزش ربات، پیچیده بودن مکانیزم و مشکلات خاص مکان‌یابی نسبی می‌باشند [۱۳، ۱۴]. در مکانیزم‌های مبتنی بر چرخ‌های Universal لرزش‌های عمودی و محدود شدن ارتفاع موانع قابل عبور نیز وجود خواهد داشت. سعی در حل مشکلات لرزش عمودی مشکل دیگر لرزش‌های افقی را ایجاد خواهد کرد. امکان واژگون شدن سیستم بهنگام یک تغییر حرکت سریع نیز بالا می‌باشد [۱۲]. وجود افزونگی در ربات‌های مبتنی بر چرخ‌های Mecanum باعث لغزش فراوان می‌گردد. البته بسیاری از حرکت‌ها در این ربات در ذات خود لغزش را به همراه دارند و هولونومیک بودن با فرض لغزیدن فراهم گردیده است. از سوی دیگر در چرخ‌هایی که نقطه تماس آن با زمین مرتباً تغییر می‌کند، سیستم‌های کنترلی و اندازه‌گیری حرکت بسیار پیچیده و غیرقطعی خواهند بود [۱۳].

در اثر اشکالات فوق گرایش‌های فراوانی به استفاده از چرخ‌های خروج از مرکز بوجود آمد. در این چرخ‌ها بین محور دوران چرخ و محور فرمان آن فاصله‌ای افقی وجود دارد و دو موتور برای راندن^۳ و فرمان دادن^۴ به چرخ بکار

قرار می‌گیرد و وظیفه تنظیم زاویه ربات را بعهدده دارد (نقطه A در شکل ۱).



شکل ۱: نمایی از واحد رانش (شاسی) ربات.

در حالت کلی تمامی نقاط غیر از نقاط روی محور چرخهای فعال، هولونومیک می‌باشند و قابلیت پیدا کردن هر بردار سرعتی را دارند. بنابراین با نصب محور رویه بالایی در یکی از این نقاط، رویه بالایی امکان یافتن هر بردار سرعتی را خواهد داشت (شکل ۲). این محور در راستای طولی مرکز محور چرخهای فعال (روی محور طولی تقارن شاسی) قرار می‌گیرد. البته بهتر است این نقطه تا حد امکان به میانه مثلثی که رئوس آن نقاط اتصال دو چرخ فعال و یک چرخ آزاد - که در جلوی ربات نصب شده است - به بدنه می‌باشند، نزدیک گردد.

مکان نقطه A نماینده مکان ربات می‌باشد و زاویه‌ای که محور طولی این صفحه (شاسی) با محور yها می‌سازد بیانگر زاویه شاسی ربات خواهد بود. زاویه واقعی ربات نیز زاویه رویه بالایی آن خواهد بود که از زاویه شاسی اثر می‌پذیرد. بنابراین انتخاب نقطه A روی محور تقارن طولی ربات که سبب می‌شود روابط سینماتیکی ماهیت ساده‌تری داشته‌باشند، به سهولت مکان‌یابی این نقطه و در نتیجه ربات کمک خواهد نمود.

برای بهبود مکان‌یابی این ربات بصورتیکه لغزش تا حد زیادی مشخص گردد نیز روشی در [۲۴] ارائه شده است. در این الگوریتم با استفاده از یک چرخ غیرفعال نصب شده در نقطه میانی محور چرخهای فعال و یک ژایروسکوپ، تا حد زیادی میزان لغزش مشخص گردیده و در نتیجه مکان‌یابی سیستم بهبود قابل توجه‌ای پیدا کرده است.

این تعبیر را بکار گرفت که ربات امکان دنبال کردن هر بردار سرعت دلخواه را دارد ولی زاویه آن بصورت وابسته تعیین خواهد شد. برای رفع این مشکل نیز یک رویه به‌همراه یک موتور مستقل روی نقطه نماینده سیستم قرار می‌گیرد تا زاویه ربات نیز مطابق با مقدار دلخواه کنترل گردد. اگرچه زاویه ربات همه‌جهته به زاویه واحد رانش آن وابسته خواهد بود ولی جبران‌سازی انجام گرفته توسط موتور کنترل‌کننده زاویه رویه مانع از بروز این وابستگی می‌گردد.

در ادامه ابتدا مکانیزم این ربات به دقت مورد بررسی قرار گرفته و روابط سینماتیک آن استخراج می‌گردد. بخش بعدی به مکان‌یابی نسبی این ربات خواهد پرداخت و اشاره‌ای به روشی جدید برای تشخیص میزان لغزش و در نتیجه بهبود مکان‌یابی خواهد شد. سپس کنترل و ردیابی مکان در این ربات هولونومیک مورد توجه قرار گرفته و باتوجه به هولونومیک بودن سیستم روابط جدیدی برای ردیابی ارائه خواهد شد.

این ربات بطور کامل ساخته شده است و روش‌های بحث شده در رابطه با مکان‌یابی، کنترل و ردیابی مسیر در عمل مورد بررسی و تایید قرار گرفته‌اند. در پایان نتایج تست واقعی ربات در ردیابی مسیرهای مربعی، دایروی، شکسته و زاویه‌دار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

توصیف مکانیزم حرکتی ربات

می‌توان ربات‌های همه‌جهته را در سه دسته تقسیم‌بندی کرد. دسته اول ربات‌های همه‌جهته‌ای هستند که سعی در استفاده از چرخ‌های هولونومیک دارند. مبنای دسته دوم ربات‌های همه‌جهته، استفاده از چرخ‌های غیرهولونومیک با فاصله از مرکز می‌باشد که دارای دو محرک موتوری (دو درجه آزادی) هستند. دسته سوم که ربات طرح شده در این مقاله نیز در آن می‌گنجد مبتنی بر استفاده از یک واحد رانش با حداقل یک نقطه هولونومیک است که یک رویه در این نقطه نصب گردیده و یک حرکت هولونومیک در این رویه بوجود می‌آورد.

ربات توصیف‌شده در این مقاله از دو قسمت تشکیل شده است: قسمت اول یک ربات متحرک با مکانیزم رانش تفاضلی (بعنوان شاسی) می‌باشد. قسمت دوم نیز یک رویه دارای امکان تغییر زاویه است. موتور سوم با فاصله از نقطه میانی محور دو چرخ واحد رانش روی یک نقطه هولونومیک

$$V_{Ax} = -l\omega = l \frac{v_1 - v_2}{2b} \quad (۴)$$

مقادیر سرعت خطی در دستگاه نسبی ثابت شده در نقطه A می‌باشند. مقادیر مؤلفه‌های سرعت خطی این نقطه در دستگاه مطلق بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} V_{Ax} &= V_{Ax} \cos \alpha + V_{Ay} \sin \alpha \\ &= -l\omega \cos \alpha + V_O \sin \alpha \end{aligned} \quad (۵)$$

$$\begin{aligned} V_{Ay} &= -V_{Ax} \sin \alpha + V_{Ay} \cos \alpha \\ &= l\omega \sin \alpha + V_O \cos \alpha \end{aligned} \quad (۶)$$

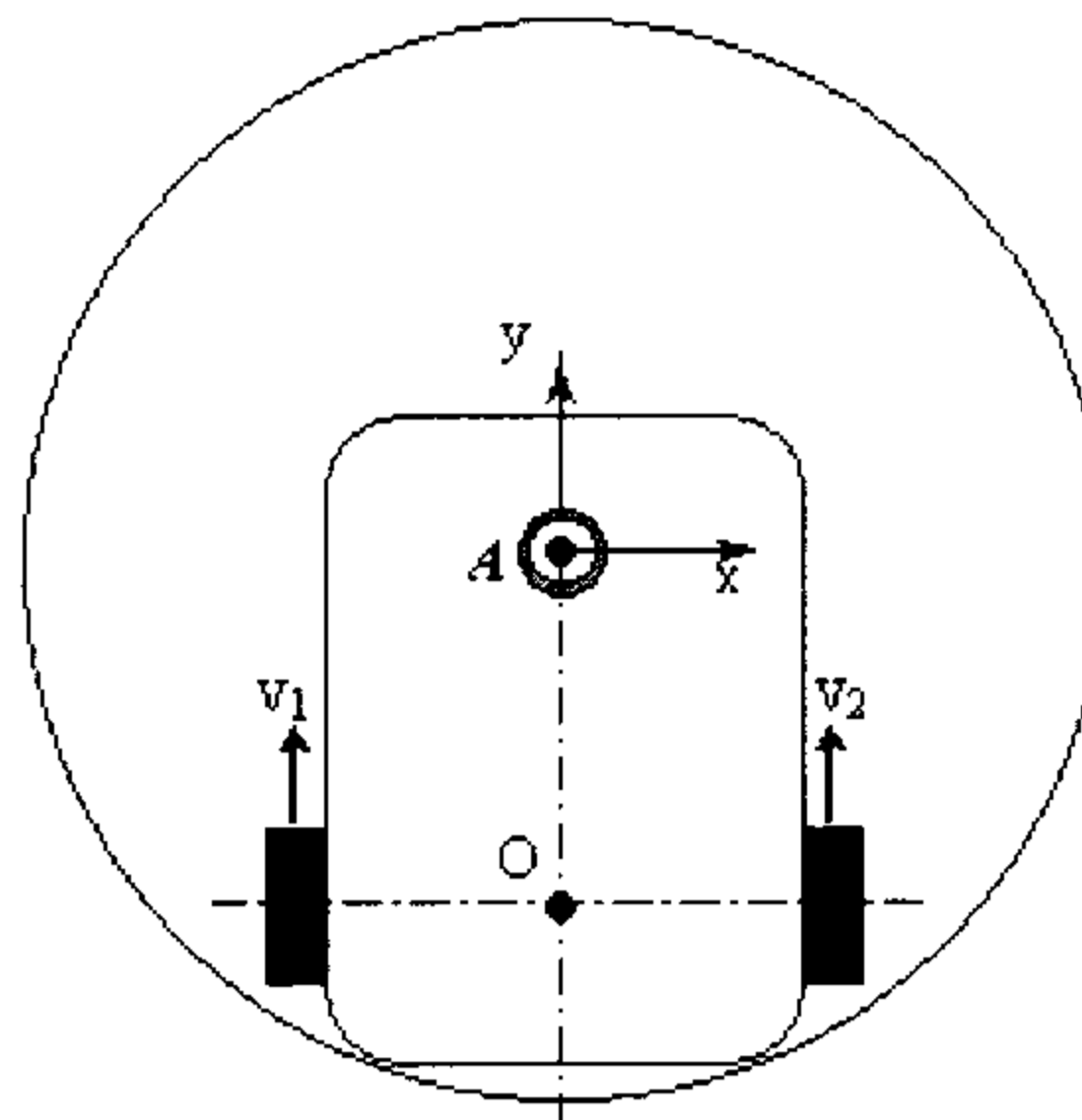
با توجه به روابط (۵) و (۶) می‌توان گفت که سه متغیر ω, V_{Ax}, V_{Ay} برحسب دو ورودی کنترلی (V_O, ω) یا به عبارت دیگر (v_2, v_1) تعیین می‌گردند. بنابراین مقدار یکی از این سه متغیر بصورت تابعی از دو متغیر دیگر تعیین خواهد شد. برای اثبات هولونومیک بودن نقطه A روابط (۵) و (۶) بصورت رابطه (۷) بازنویسی می‌گردد.

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \sin \alpha & -\cos \alpha \\ \cos \alpha & \sin \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_O \\ l\omega \end{pmatrix} \\ T &= \begin{pmatrix} \sin \alpha & -\cos \alpha \\ \cos \alpha & \sin \alpha \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (۷)$$

ماتریس T یک ماتریس دوران با زاویه $(\frac{\pi}{2} - \alpha)$ می‌باشد و بنابراین معکوس پذیر خواهد بود. نتیجه اینکه هر بردار مطلوب $[V_{Ax}, V_{Ay}]$ در صورت غیر صفر بودن l (فاصله نقطه O تا نقطه A) قابل دستیابی خواهد بود. بنابراین امکان رسیدن به هر نقطه دلخواه (x, y) برای نقطه A وجود دارد و ربات می‌تواند هر مسیری را ردیابی کند.

برای فراهم کردن امکان تعیین سرعت زاویه‌ای ربات (به عنوان یک پارامتر ورودی کنترلی)، یک رویه که متصل به یک موتور می‌باشد (طبق توضیحات ارائه شده) نصب می‌گردد. براین اساس ورودی کنترلی سرعت زاویه‌ای موتور سوم (ω_3) به سیستم افزوده می‌گردد و سرعت زاویه‌ای بدنه ربات (ω_B) بطور مستقل قابل کنترل خواهد بود. سرعت زاویه‌ای بدنه ربات مجموع جبری سرعت‌های زاویه‌ای شاسی و موتور سوم خواهد بود:

$$\omega_B = \omega_3 + \omega \quad (۸)$$



شکل ۲: شماتیک مکانیزم پیشنهادی.

فاصله بین نقطه O مرکز محور چرخ‌های فعال تا نقطه A مرکز اتصال رویه بالایی تاثیر واضحی روی بردار سرعت نقطه A خواهد داشت. بنابراین این فاصله نیز براساس روابط سینماتیکی ربات در انتخاب نقطه A (و طول ربات) تاثیر خواهد گذاشت.

تحلیل سینماتیکی ربات

براساس توصیف ارائه شده از این مکانیزم، انتظار می‌رود که با کنترل بردارهای سرعت v_1, v_2 بردار سرعت نقطه A قابلیت دستیابی به هر مقدار و جهتی را داشته باشد. بنابراین در قدم اول روابط سرعت مربوط به این نقطه مورد بررسی قرار می‌گیرد. براساس سینماتیک ربات رانش تفاضلی داریم (شکل ۱):

$$V_O = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (۱)$$

$$\omega = \frac{v_2 - v_1}{2b} \quad (۲)$$

به دلیل صلب بودن صفحه شاسی، تصاویر سرعت‌های هر دو نقطه از آن در راستای محور متصل کننده آن دو نقطه به یکدیگر برابر می‌باشند، بنابراین مؤلفه عمودی سرعت خطی نقطه A در دستگاه نسبی ثابت شده روی ربات در این نقطه بصورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$V_{Ay} = V_O = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (۳)$$

مؤلفه افقی سرعت خطی این نقطه نیز بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

کنترل و ردیابی مکان ربات

یکی از مسائل بسیار مهم در بحث ربات‌ها، یافتن مسیری^۵ است که ربات را از یک وضعیت آغازین به یک وضعیت مقصد برساند. اگر وضعیت ربات در هر لحظه اهمیت داشته باشد می‌بایست یک مسیر در فضای مکان-زمان^۶ برای ربات طراحی شود. اما در مقاله فرض بر این است که یک طراح مسیر^۷ [۲۲ و ۲۱] مسیری (معادله‌ای پارامتری از مکان و سرعت برحسب زمان) برای ربات طراحی کرده است و ربات می‌بایست این مسیر را با دقت دنبال نماید. بنابراین تمام ملاحظات مربوط به مسیریابی در طراحی مسیر در نظر گرفته می‌شود و ردیاب مسیر تنها موظف به دنبال کردن مسیر است.

ورودیهای ردیاب مسیر یا به عبارت دیگر کنترل‌کننده حرکت ربات، سیگنال‌های مرجع سرعت و موقعیت در مسیر مطلوب می‌باشند. کنترل‌کننده حرکت برحسب این سیگنال‌های مرجع و مقادیر واقعی آنها (نتایج مکان‌یابی ربات)، مقادیر گشتاور موتورهای موجود را تعیین می‌کند و کنترلی که روی هر موتور نصب شده است، وظیفه رسیدن به مقدار مطلوب را برعهده خواهد داشت.

بنابراین کنترل‌کننده حرکت از دو سطح تشکیل شده است، در لایه زیرین هر سه موتور موجود دارای کنترلر PID می‌باشند (دو کنترلر سرعت برای موتورهای رانش و یک کنترلر مکان روی موتور دوران رویه). در سطح دوم تولیدکننده سیگنال‌های مرجع این سه کنترلر (سیگنال‌های کنترلی) وجود دارد که برحسب مقادیر مطلوب سرعت خطی و زاویه‌ای ربات یا موقعیت مطلوب (که برحسب مسیر مکان-زمان مطلوب محاسبه می‌گردند) و سرعت و وضعیت فعلی ربات، این سیگنال‌ها را تولید می‌کند.

کنترل‌کننده حرکت در واقع یک ردیاب برای متغیرهای حالت (X_A, Y_A, φ) به منظور صفرشدن خطای آنها نسبت به پارامترهای مسیر مرجع می‌باشد. سیگنال‌های کنترلی، بردار سرعت خطی ربات $[V_{Ax}, V_{Ay}]$ و سرعت زاویه‌ای یا زاویه مطلوب ربات می‌باشد. بنابراین هدف، یافتن قوانین کنترلی مناسب برای ω, V_{Ay}, V_{Ax} برحسب خطای متغیرهای حالت می‌باشد که پایداری و حداقل شدن خطای ردیابی را تأمین کنند.

دینامیک سیستم و دینامیک خطا

از آنجا که کنترلر زاویه رویه ربات رفتاری کاملاً

بنابراین سینماتیک مستقیم ربات چنین خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} V_{Ax} \\ V_{Ay} \\ \omega_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \alpha & -l \cos \alpha & 0 \\ \cos \alpha & l \sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_O \\ \omega \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

با این توصیف رابطه سینماتیک وارون سیستم با شرط $l \neq 0$ بصورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} V_{Ax} \\ V_{Ay} \\ \omega_B \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} \sin \alpha + \frac{b}{l} \cos \alpha & \cos \alpha - \frac{b}{l} \sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha - \frac{b}{l} \cos \alpha & \cos \alpha + \frac{b}{l} \sin \alpha & 0 \\ \frac{1}{l} \cos \alpha & -\frac{1}{l} \sin \alpha & 1 \end{bmatrix}$$

در این رابطه سرعت زاویه‌ای ربات به‌عنوان یک ورودی کنترلی در نظر گرفته شد. در بیشتر موارد این زاویه ربات است که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و عمدتاً زاویه در یک مسیر مکان-زمان دارای مقدار تعیین شده‌ای می‌باشد. بنابراین ورودی‌های کنترلی، دو سرعت خطی در دستگاه مطلق برای نقطه $A (V_{Ax}, V_{Ay})$ و زاویه ربات خواهد بود. مسیر مکان-زمان ورودی ردیاب نیز مقادیر مطلوب $(X_A, Y_A, \varphi_{robot})$ می‌باشد.

مکان‌یابی نسبی ربات

مکان‌یابی این ربات بصورت نسبی، برحسب داده‌های انکودرهای نصب‌شده روی موتورها و با استفاده از معادلات سینماتیکی انجام می‌گیرد (ادومتری چرخ‌ها و محور دوران رویه) و در نتیجه آن مکان مرکز رویه ربات و زاویه آن نسبت به دستگاه مختصات مفروض مشخص می‌شود. از آنجا که مرکز رویه ربات در راستای نقطه هونولومیک A می‌باشد مکان‌یابی ربات، مکان‌یابی نقطه A روی شاسی خواهد بود. در ادومتری این ربات محاسبه سرعت زاویه‌ای چرخ‌ها الزاماً معادل با به دست آوردن سرعت خطی و زاویه‌ای دقیق ربات نیست و عوامل سینماتیک و غیرسینماتیک [۲۰] متعددی در این عدم دقت دخالت دارند و می‌بایست روشی برای حذف اثرات این عوامل از نتایج ادومتری بکار گرفت [۲۴].

بررسی قرار خواهد گرفت. در این مرحله صفرشدن خطای جهت گیری ربات اهمیت ندارد و α_e صرفاً به دلیل تأثیر در سایر معادلات حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

متغیرهای خطا در دستگاه نسبی مورد نظر $(x_{A_e}, y_{A_e}, \alpha_e)$ نامیده می‌شوند. توضیح اینکه متغیرهایی که با حروف بزرگ نشان داده می‌شوند (Y_A, X_A) در دستگاه مطلق و متغیرهایی با حروف کوچک نشان داده می‌شوند (y_A, x_A) در دستگاه نسبی نصب شده در نقطه A اندازه گیری می‌گردند. بر این اساس تغییر مختصات کانایاما بصورت زیر انجام می‌گیرد:

$$\begin{aligned} x_{A_e} &= (X_{A_r} - X_A) \cos \alpha - (Y_{A_r} - Y) \sin \alpha \\ y_{A_e} &= (X_{A_r} - X_A) \sin \alpha + (Y_{A_r} - Y) \cos \alpha \\ \alpha_e &= \alpha_r - \alpha \end{aligned} \quad (12)$$

با مشتق گیری و ساده کردن معادلات فوق، دینامیک خطا در دستگاه مختصات جدید به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{A_e} &= -\dot{\alpha}(X_r - X) \sin \alpha + (\dot{X}_r - \dot{X}) \cos \alpha \\ &\quad - \dot{\alpha}(Y_r - Y) \cos \alpha - (\dot{Y}_r - \dot{Y}) \sin \alpha \\ \dot{y}_{A_e} &= \dot{\alpha}(X_r - X) \cos \alpha + (\dot{X}_r - \dot{X}) \sin \alpha \\ &\quad - \dot{\alpha}(Y_r - Y) \sin \alpha + (\dot{Y}_r - \dot{Y}) \cos \alpha \end{aligned} \quad (13)$$

با جایگزین ساختن مقادیر $\dot{\alpha}, \dot{y}_A, \dot{x}_A, \dot{\alpha}_r, \dot{y}_{A_r}, \dot{x}_{A_r}$ (روابط دینامیک سیستم) در معادلات فوق، دینامیک خطای نقطه A و در نتیجه ربات همه‌جهته محاسبه خواهد شد. با این توصیف دینامیک خطای ربات همه‌جهته پس از اعمال تغییر مختصات Kanayama بصورت زیر خواهد بود و می‌بایست پایداری سیستم و صفرشدن این خطاها براساس قوانین کنترلی ارائه شده مورد بررسی قرار گیرد.

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= -\omega y_e + l\omega + V_r \sin \alpha_e - l\omega_r \cos \alpha_e \\ \dot{y}_e &= \omega x_e - V + V_r \cos \alpha_e + l\omega_r \sin \alpha_e \\ \dot{\alpha}_e &= \omega_r - \omega \end{aligned} \quad (14)$$

قوانین کنترل حرکت و تابع کاندید لیاپانوف

از آنجا که نقطه A هولونومیک می‌باشد می‌توان ضریب ثابتی از خطای مکان در راستاهای افقی و عمودی دستگاه نسبی روی ربات را به‌عنوان بردار سرعت مطلوب در راستاهای متناظر در نظر گرفت. بر این اساس قوانین کنترل

مستقل دارد (یک ورودی زاویه مطلوب ربات و یک ورودی زاویه فعلی شاسی را دریافت کرده و سعی در دستیابی به زاویه مطلوب خواهد داشت). در ادامه صرفاً کنترل شاسی برای رسیدن به بردار سرعت مطلوب اهمیت خواهد داشت (اثبات هولونومیک بودن ربات). در واقع در صورتیکه بتوان نقطه A را بر روی هر مسیر مطلوب کنترل کرد و مستقل از آن زاویه ربات را نیز برای رسیدن به مقدار مطلوب کنترل کرد هولونومیک بودن سیستم بطور کامل بکار گرفته شده است. با این توصیف می‌بایست به جای بررسی دینامیک ربات هولونومیک و استخراج دینامیک خطا در آن به بررسی این دو مطلوب در شاسی پرداخت و آنگاه نتایج را در تحلیل ربات نهایی بکار گرفت.

براساس دینامیک ربات رانش تفاضلی در یک کنترلر فیدبک حالت متغیرهای α, X_A, Y_A به عنوان پارامترهای فیدبک حالت در نظر گرفته می‌شوند، این مقادیر با متغیرهای مسیر مرجع مقایسه شده سیگنال‌های خطا را می‌سازند. مسیر مرجع با مقادیر $(X_{A_r}, Y_{A_r}, \alpha)$ مشخص گردیده و می‌بایست معادلات دینامیک ربات را برآورده سازند.

$$\begin{aligned} \dot{X}_{A_r} &= V_r \sin \alpha - l\omega_r \cos \alpha \\ \dot{Y}_{A_r} &= V_r \cos \alpha + l\omega_r \sin \alpha \\ \dot{\alpha}_r &= \omega_r \end{aligned} \quad (11)$$

در تعریف مسیر استاندارد، قابل دستیابی بودن سرعت‌های خطی و زاویه‌ای V, ω از پیش فرض‌های طراحی مسیر می‌باشد.

براساس پیشنهاد کانایاما [۲۳] در یک ربات متحرک با مکانیزم رانش تفاضلی خطای متغیرهای حالت می‌بایست مستقل از دستگاه مختصات مرجع باشد. این خطا در دستگاه متصل به ربات در نقطه میانی محور چرخ‌های عقب اندازه گیری می‌گردد. محور x‌های این دستگاه در راستای محور چرخ‌های عقب و محور y‌ها در راستای طولی ربات می‌باشد. به این ترتیب سیگنال‌های کنترلی برای تصحیح خطا در جهت حرکت ربات (y_e) ، خطا در جهت عمود بر حرکت (x_e) و خطای جهت گیری (α_e) محاسبه و اعمال می‌گردند.

در ربات همه‌جهته این پروژه نیز دینامیک خطا در دستگاه نسبی نصب شده در نقطه A نوشته خواهد شد و صفرشدن خطای مکان ربات نیز در این دستگاه مورد

بصورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} V_{A_x} &= k_1 \Delta x_A = k_1 x_{A_e} = k_1 (X_{A_e} \cos \alpha - Y_{A_e} \sin \alpha) \\ V_{A_y} &= k_2 \Delta y_A = k_2 y_{A_e} = k_2 (X_{A_e} \sin \alpha + Y_{A_e} \cos \alpha) \end{aligned} \quad (15)$$

تابع کاندید لیاپانوف بصورت زیر انتخاب می‌گردد:

$$V = \frac{1}{2} (X_{A_e}^2 + Y_{A_e}^2) \quad (16)$$

تابع V مثبت معین است و شرط پایداری جانبی لیاپانوف در چنین حالتی، منفی معین بودن \dot{V} براساس رابطه (۱۷) می‌باشد.

$$\dot{V} = X_{A_e} \dot{X}_{A_e} + Y_{A_e} \dot{Y}_{A_e} \quad (17)$$

اگر حالت تعادل سیستم $(X_{A_r}, Y_{A_r}, \theta_r) = (0, 0, 0)$ در نظر گرفته شود، دینامیک خطای سیستم در دستگاه مطلق بصورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \dot{X}_{A_e} &= X_{A_r} - X_A = -(V \sin \alpha - l\omega \cos \alpha) \\ \dot{Y}_{A_e} &= Y_{A_r} - Y_A = -(V \cos \alpha + l\omega \sin \alpha) \\ \dot{\theta}_e &= \dot{\theta}_r - \dot{\theta} = -\dot{\theta} = -\omega \end{aligned} \quad (18)$$

براساس روابط (۱۷) و (۱۸)، بصورت زیر در خواهد آمد:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -X_{A_e} (V \sin \alpha - l\omega \cos \alpha) \\ &\quad - Y_{A_e} (V \cos \alpha + l\omega \sin \alpha) \end{aligned} \quad (19)$$

براین اساس و باتوجه به مشخصه هولونومیک نقطه A قوانین کنترلی سیستم بصورت زیر پیشنهاد می‌گردد:

$$\begin{aligned} V_{A_x} &= k_1 \Delta x_A = k_1 x_{A_e} \\ &= k_1 (X_{A_e} \cos \alpha - Y_{A_e} \sin \alpha) \\ V_{A_y} &= k_2 \Delta y_A = k_2 y_{A_e} \\ &= k_2 (X_{A_e} \sin \alpha + Y_{A_e} \cos \alpha) \end{aligned} \quad (20)$$

از طرف دیگر براساس سینماتیک سیستم داریم:

$$\begin{aligned} V_{A_x} &= -l\omega \\ V_{A_y} &= V \end{aligned} \quad (21)$$

با استفاده از روابط (۲۰) و (۲۱) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} -l\omega &= k_1 (X_{A_e} \cos \alpha - Y_{A_e} \sin \alpha) \\ V &= k_2 (X_{A_e} \sin \alpha + Y_{A_e} \cos \alpha) \end{aligned} \quad (22)$$

بنابراین مشتق تابع لیاپانوف بصورت زیر خواهد بود.

$$\begin{aligned} V &= -[V (X_{A_e} \sin \alpha + Y_{A_e} \cos \alpha) \\ &\quad - l\omega (X_{A_e} \cos \alpha - Y_{A_e} \sin \alpha)] \\ &= -k_2 ((X_{A_e} \sin \alpha + Y_{A_e} \cos \alpha)^2 \\ &\quad - k_1 (X_{A_e} \cos \alpha - Y_{A_e} \sin \alpha)^2) \end{aligned} \quad (23)$$

برای منفی معین بودن \dot{V} و پایداری جانبی لیاپانوف سیستم می‌بایست ضرایب k_1, k_2 هر دو مثبت باشند.

$k_1, k_2 > 0$
مقادیر k_1, k_2 برای دستیابی به بهترین پاسخ تنظیم خواهند گردید. بنابراین شرط پایداری جانبی لیاپانوف برقرار است و سیستم 8 GAS می‌باشد ولی در مورد 9 GES یا 10 GUAS بودن آن نمی‌توان چیزی گفت. برای بررسی این پایداری‌ها براساس دینامیک حلقه بسته سیستم تحلیلی بر رفتار و شکل پاسخ ارائه می‌شود. براساس قوانین کنترلی پیشنهاد شده مقادیر ω, V در دینامیک خطای سیستم جایگزین می‌گردند تا دینامیک حلقه بسته سیستم بصورت زیر به دست آید:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{A_e} &= \frac{k_1}{l} x_{A_e} y_{A_e} - k_1 x_{A_e} + V_r \sin \alpha_e - l\omega_r \cos \alpha_e \\ \dot{y}_{A_e} &= -\frac{k_1}{l} x_{A_e}^2 - k_2 y_{A_e} + V_r \cos \alpha_e + l\omega_r \sin \alpha_e \\ \dot{\alpha}_e &= \omega_r + \frac{k_1}{l} x_{A_e} \end{aligned} \quad (24)$$

با بکارگیری روش خطی‌سازی تیلور، سیستم خطی متغیر با زمان زیر به دست خواهد آمد:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{A_e} \\ \dot{y}_{A_e} \\ \dot{\alpha}_e \end{bmatrix} = A_{3 \times 3} \begin{bmatrix} x_{A_e} \\ y_{A_e} \\ \alpha_e \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$A_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} -k_1 & 0 & V_r \\ 0 & -k_2 & l\omega_r \\ \frac{k_1}{l} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

رابطه دینامیک خطا در راستای x بصورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{A_e} &= -k_1 x_{A_e} + V_r \alpha_e \\ \dot{\alpha}_e &= \frac{k_1}{l} x_{A_e} \end{aligned} \quad (26)$$

خواهد کرد. بنابراین انتخاب k_2 نیز حدبالایی نخواهد داشت و با بزرگتر انتخاب شدن آن، سیستم سریعتر و خطا کمتر خواهد بود.

ردیاب نهایی مسیر

براساس توضیحات ارائه شده در بخش‌های قبل، قانون کنترلی ردیابی مسیر ربات بصورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} V_x^* &= k_1 \Delta x_A \\ V_y^* &= k_2 \Delta y_A \end{aligned} \quad (31)$$

که V_x^* ، V_y^* سرعت‌های مرجع ورودی به بخش کنترلر سطح موتور می‌باشد. از آنجا که مسیر مطلوب ربات در دستگاه مطلق بیان می‌گردد (X_A^*, Y_A^*) و نتیجه مکان‌یابی ربات نیز مکان نقطه A در دستگاه مطلق می‌باشد (X_A, Y_A) ، می‌بایست رابطه فوق در دستگاه مطلق بصورت زیر بازنویسی گردد:

$$\begin{aligned} V_x^* &= k_1 ((X_A^* - X_A) \cos \alpha - (Y_A^* - Y) \sin \alpha) \\ V_y^* &= k_2 ((X_A^* - X_A) \sin \alpha + (Y_A^* - Y) \cos \alpha) \end{aligned} \quad (32)$$

نکته بعد افزودن یک پیشخور سرعت مطلوب به روابط ردیاب می‌باشد. افزودن این پیشخور سرعت باعث می‌شود که در لحظه اول اعمال ورودی پله سرعت که خطای سرعت سیستم بالا است، سیستم سرعت بیشتری در از بین بردن خطا داشته باشد و در لحظات بعدی به مرور اثر این پیشخور کمتر خواهد شد. اگر ورودی سرعت مرجع به ردیاب مسیر در دستگاه مطلق با (V_x, V_y) مشخص شود، روابط ردیابی مسیر بصورت زیر تغییر خواهد کرد:

$$\begin{aligned} V_x^* &= k_1 ((X_A^* - X_A) \cos \alpha - (Y_A^* - Y) \sin \alpha) \\ &\quad + k_{1_ff} * (V_x \cos \alpha - V_y \sin \alpha) \\ V_y^* &= k_2 ((X_A^* - X_A) \sin \alpha + (Y_A^* - Y) \cos \alpha) \\ &\quad + k_{2_ff} * (V_x \sin \alpha + V_y \cos \alpha) \end{aligned} \quad (33)$$

نکته آخر اینکه افزودن نسبتی از خطای سرعت مطلوب در دستگاه نسبی می‌تواند نوسانات احتمالی حول مسیر مرجع را تا حد قابل توجهی کاهش دهد. در واقع با یک گین تناسبی، تفاوت سرعت مطلوب (در دستگاه نسبی) در نمونه قبل با فیدبک تهیه شده از آن در نمونه فعلی در تعیین مقدار مطلوب سرعت شرکت خواهند کرد.

بنابراین دینامیک خطای \dot{X}_{A_e} بصورت زیر خواهد بود:

$$\ddot{x}_{A_e} + k_1 \dot{x}_{A_e} - \frac{k_1}{l} V_r x_{A_e} = 0 \quad (27)$$

با فرض اینکه مسیر بطور پیوسته و با سرعت خطی ثابت V_r طراحی شده باشد خواهیم داشت

$$\begin{aligned} t_s &= \frac{4}{\zeta \omega_n} = \frac{8}{k_1} \\ \text{O.S.\%} &= e^{-\frac{\zeta \pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} : \zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_1 l}{V_r}} \end{aligned}$$

بنابراین به منظور سریع‌تر بودن پاسخ (کم‌شدن زمان نشست) می‌بایست k_1 تا حد امکان بزرگتر انتخاب گردد. اما برای قابل قبول بودن فراجش، در تعیین k_1 مصالحه خواهد شد.

دینامیک خطای مکان در راستای y نیز با دینامیک خطای جهت‌گیری و در نتیجه دینامیک خطای مکان در راستای x کوپل شده است.

$$\begin{aligned} \dot{y}_{A_e} &= -k_2 y_{A_e} + l \omega_r \alpha_e \\ \dot{\alpha}_e &= \frac{k_1}{l} x_{A_e} \end{aligned} \quad (28)$$

اگر α_e براساس روابط (۲۶) و (۲۷) محاسبه شود، رابطه (۲۸) بصورت یک معادله دیفرانسیل مرتبه اول در خواهد آمد. بنابراین دینامیک خطای y_{A_e} در هر لحظه تغییر خواهد کرد ولی شکل کلی آن یک معادله دیفرانسیل بصورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \dot{y}_{A_e} &= -k_2 y_{A_e} + C \\ C &= l \omega_r \alpha_{e_i} \end{aligned} \quad (29)$$

بنابراین پاسخ آن بصورت زیر خواهد بود:

$$y_{A_e} = e^{-k_2 t} + \frac{C}{k_2} \quad (30)$$

با توجه به شکل رابطه (۳۰) با بزرگتر انتخاب شدن k_2 پاسخ دینامیک y_{A_e} سریعتر به سمت صفر همگرا خواهد شد چراکه قسمت نمایی این پاسخ با ثابت زمانی $1/k_2$ میرا می‌گردد و قسمت در ظاهر ثابت پاسخ نیز اگرچه در هر نمونه زمانی متغیر است ولی در هر حال با بزرگتر انتخاب شدن k_2 سریعتر به سمت صفر میل

وضعیت فعلی ربات (البته با لحاظ محدودیت‌های گشتاوری موتورها) می‌باشد.

یکی از کامل‌ترین آزمون‌هایی که تمام قابلیت‌های سیستم را نشان می‌دهد، یک مسیر مربعی به معنای تغییر بردار سرعت مطلوب از $(V_x^*, V_y^*) = (a, 0)$ به $(V_x^*, V_y^*) = (0, b)$ و یا برعکس در نقاط شکستگی مسیر (راس‌های مربع) می‌باشد. توانایی ردیابی این ناپیوستگی‌ها در سرعت‌های مطلوب، نمونه‌ای کامل از امکان دستیابی به بردار سرعت دلخواه از هر وضعیت ربات می‌باشد. دقت ربات در ردیابی مسیر مربعی در شکل (۵) نشان داده شده است. در این شکل چگونگی حرکت ربات از منظر ناظر بیرونی هنگام ردیابی مسیر مربعی نشان داده شده است. شکل (۶) سرعت واقعی ربات را در کنار بردار سرعت مطلوب ردیابی این مسیر نشان می‌دهد. در این آزمون کنترلر زاویه رویه ربات نیز می‌بایست زاویه رویه را در تمام مسیر بدون تغییر حفظ نماید (حرکت ربات روی مسیر مربعی بدون تغییر زاویه).

شکل (۷) تغییرات زاویه ربات را در حالیکه زاویه مطلوب صفر است و حرکت روی یک مسیر مربعی انجام می‌گیرد، نشان می‌دهد. برای نمایش عدم تاثیر زاویه ربات از تغییرات زاویه شاسی، تغییرات زاویه شاسی نیز در این حرکت نشان داده شده است. همچنین شکل‌های (۸) و (۹) مسیر ربات را بر روی مسیری مورب و دایره ای نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی، ساخت و کنترل یک ربات هولونومیک براساس استفاده از یک واحد رانش دارای مکانیزم رانش تفاضلی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا سینماتیک این سیستم ارائه شد و بر این اساس یک روش نسبی برای مکان‌یابی ربات تعیین گردید. مسئله بعدی مورد بررسی قرار گرفته کنترل و ردیابی مسیر می‌باشد. از آنجا که سیستم هولونومیک می‌باشد می‌توان قانون کنترلی موردنیاز برای صفرکردن خطای وضعیت را ضریب ثابتی از خطای مکان در نظر گرفت.

نمونه ساخته شده و آزمون‌های انجام گرفته روی آن هولونومیک بودن و مزایای این سیستم را به خوبی نشان می‌دهد. طراحی مکانیزم و ارائه ردیاب مناسب آن نتایج بسیار خوبی را در مقایسه با مدل‌های مشابه فراهم کرده

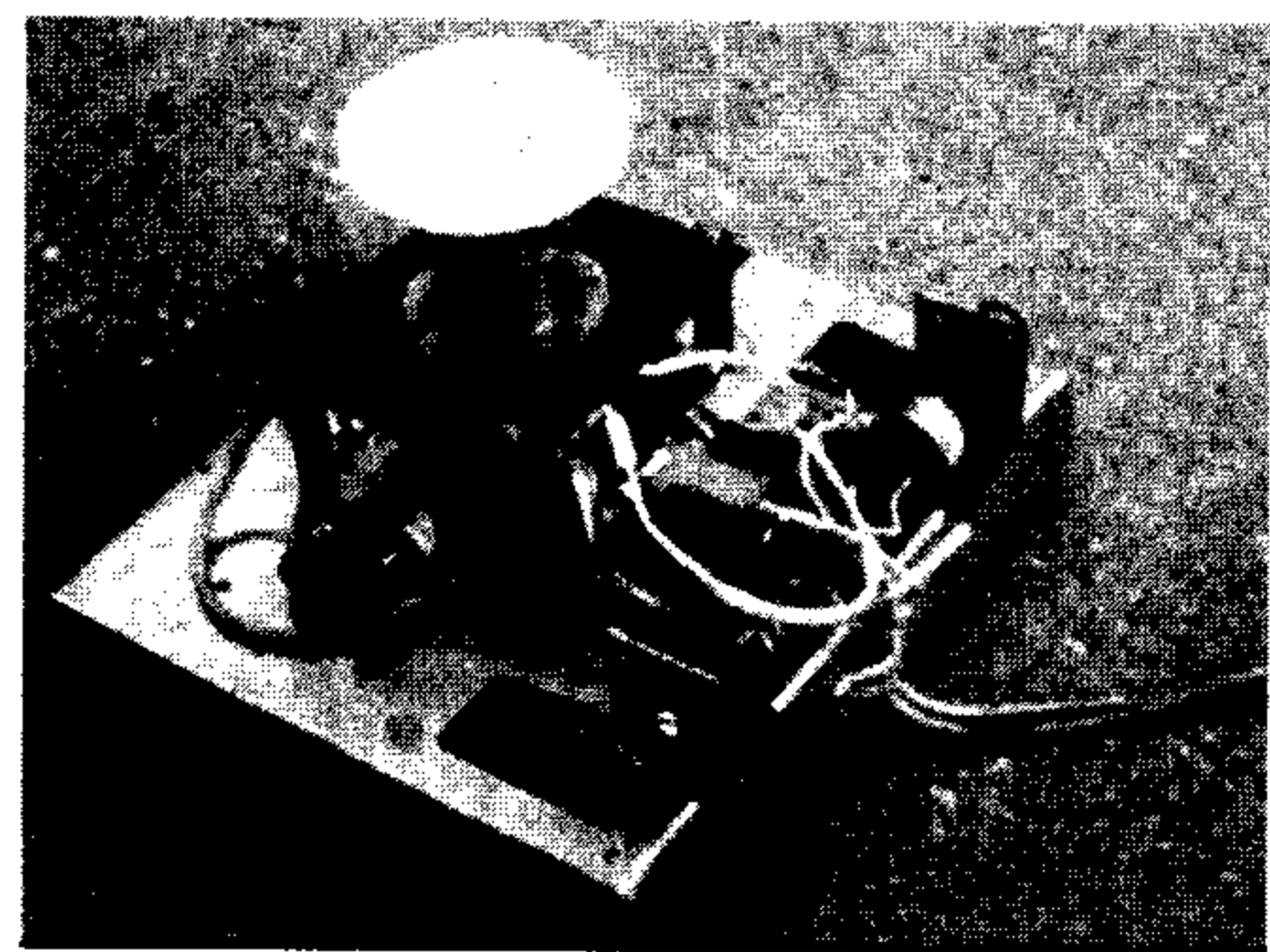
در این صورت روابط ردیاب بصورت زیر اصلاح خواهد شد:

$$V_x^* = k_1((X_A^* - X_A) \cos \alpha - (Y_A^* - Y) \sin \alpha) + k_{1_diff} * (V_x \cos \alpha - V_y \sin \alpha) + k_{1_diff} * (V_{x_{i-1}}^* - V_{x_i})$$

$$V_y^* = k_2((X_A^* - X_A) \sin \alpha + (Y_A^* - Y) \cos \alpha) + k_{2_diff} * (V_x \sin \alpha + V_y \cos \alpha) + k_{2_diff} * (V_{y_{i-1}}^* - V_{y_i})$$

نتایج تست

این ربات بطور کامل ساخته شده (شکل ۳ و ۴) و توسط یک واسط سخت‌افزاری به PC متصل گردیده است و کنترلر و ردیاب مسیر این ربات بصورت نرم‌افزاری در کامپیوتر پیاده‌سازی شده‌اند. سیستم عامل بکار گرفته شده Rt-Linux است تا قابلیت‌های بلادرنگ مناسبی برای کنترل سیستم فراهم گردد. یک واسط کاربر نیز امکان تعیین مسیر مطلوب را فراهم می‌کند.



شکل ۳: شاسی ربات.

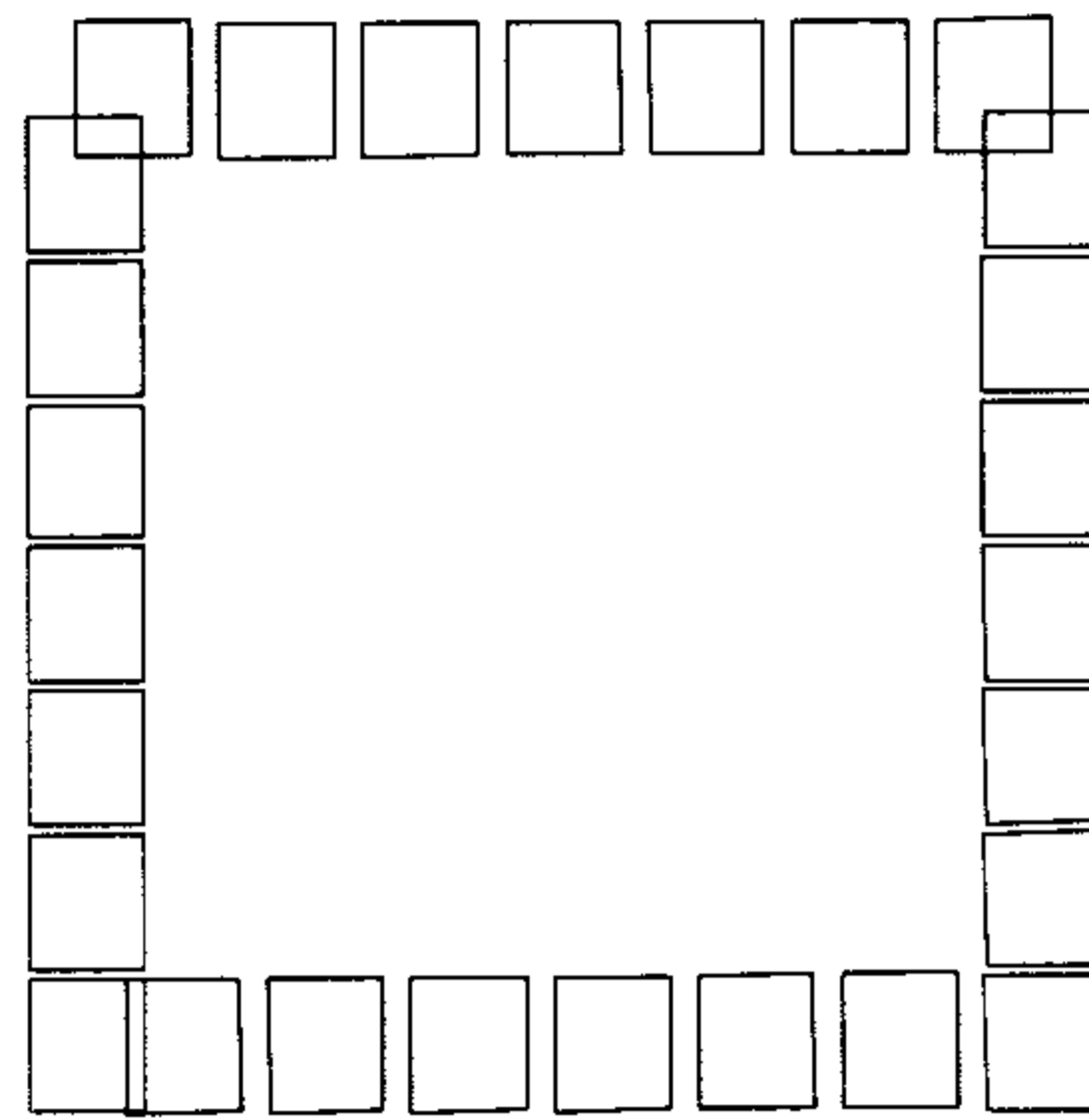
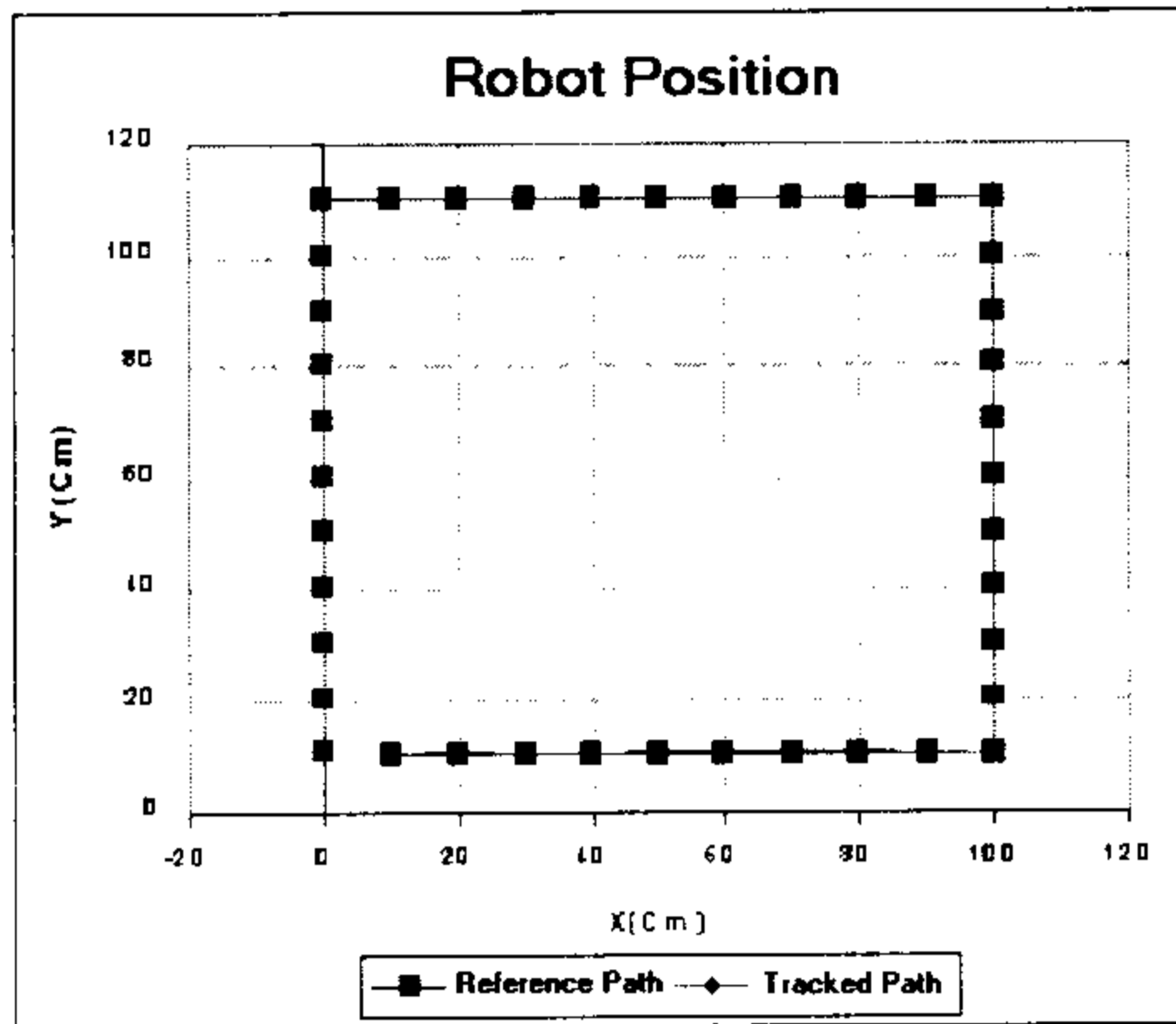


شکل ۴: نمونه نهایی ربات هولونومیک.

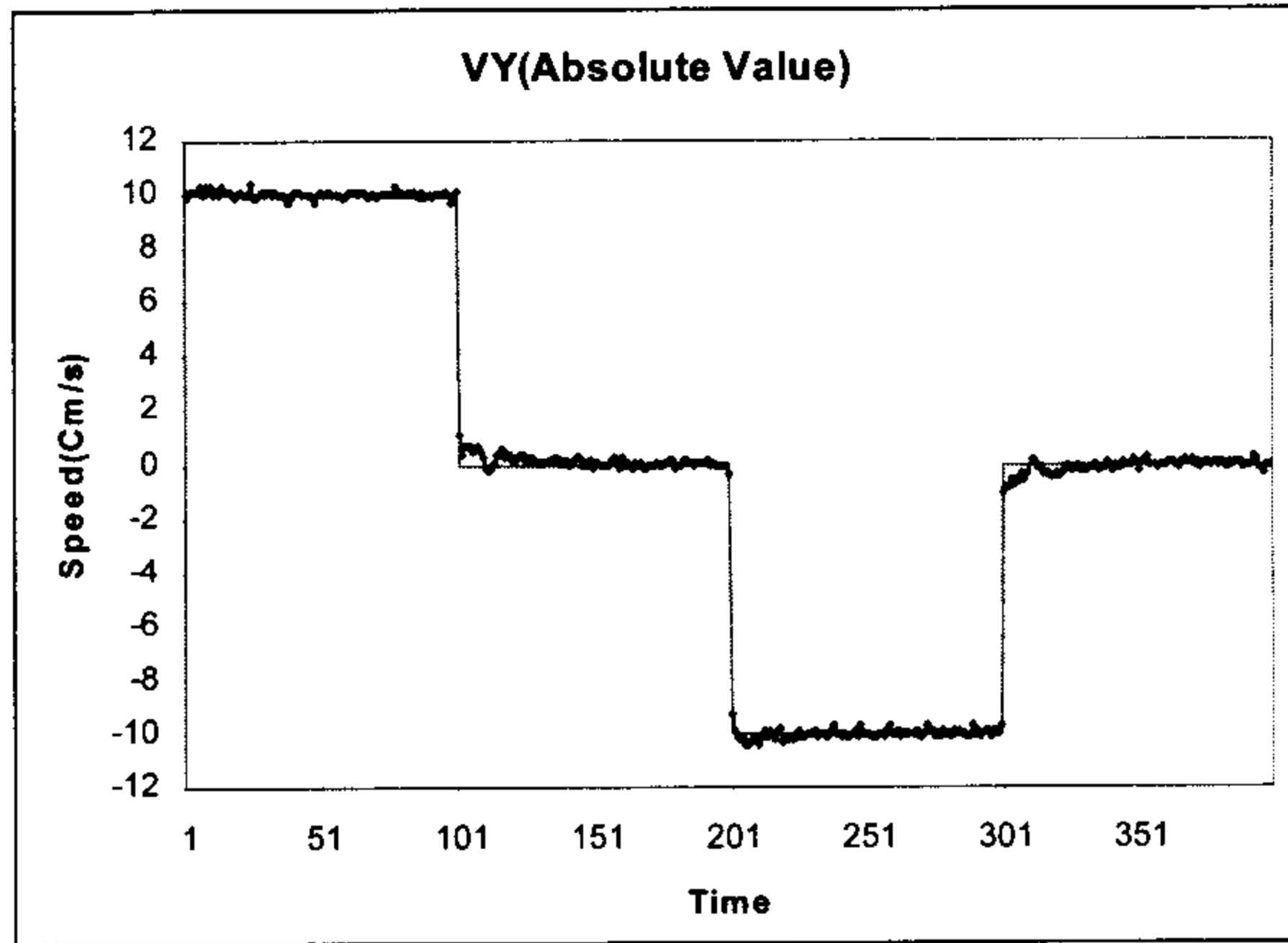
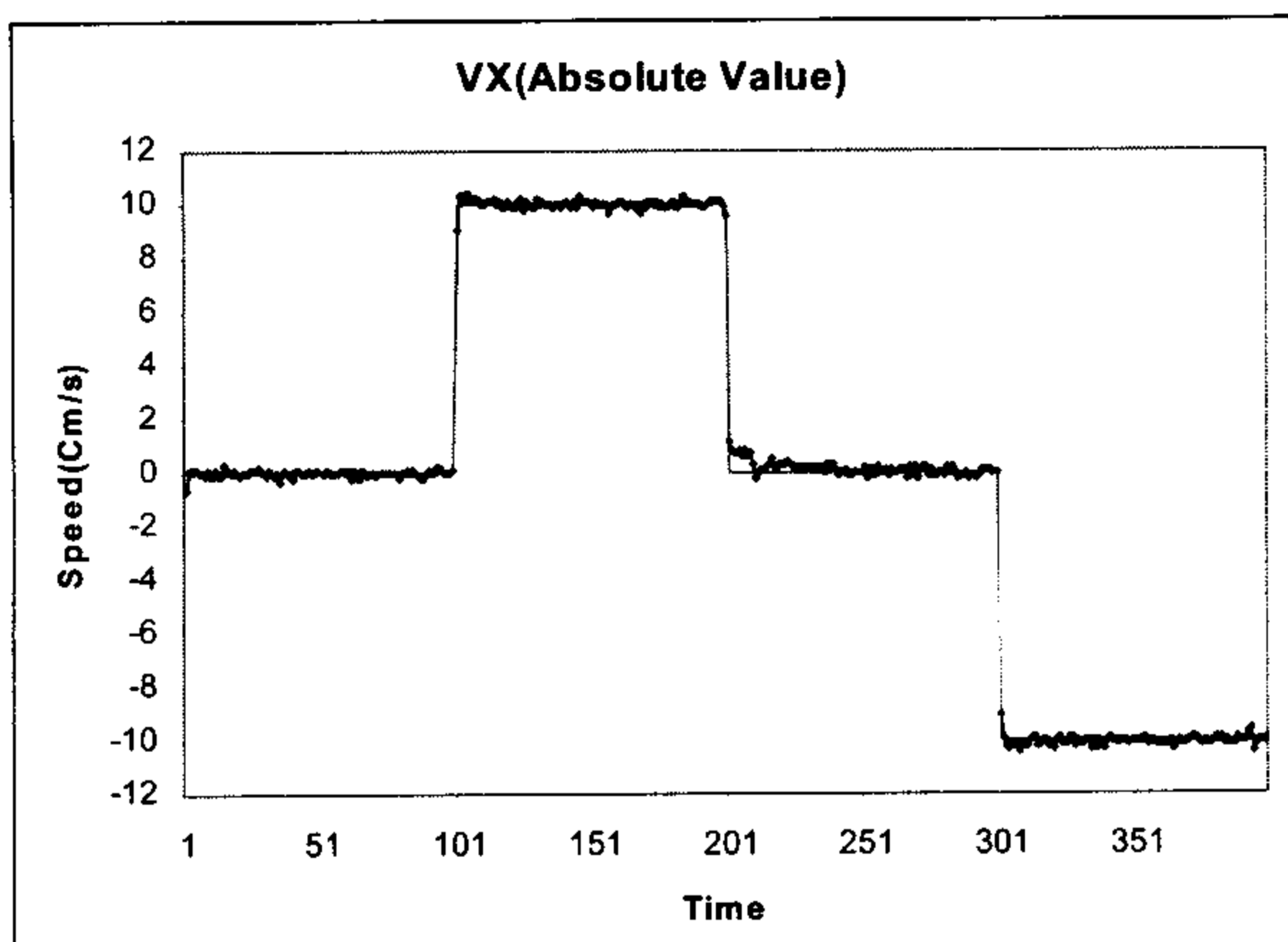
نتایج آزمون‌های انجام گرفته می‌بایست همه‌جته و هولونومیک بودن ربات را در عمل اثبات نماید. برای اثبات همه‌جته بودن ربات؛ ربات می‌بایست امکان حرکت روی هر مسیر ورودی را داشته باشد. هولونومیک بودن سیستم نیز قابلیت دستیابی به بردار سرعت مطلوب ورودی از هر

از قبیل لغزش‌های موجود در رویه بالایی ربات، لقی موجود در ادوات انتقال گشتاور (چرخ‌دنده‌ها و تسمه‌ها) و ... همگی در ساخت نمونه‌ای جدید به سادگی برطرف خواهد شد. در ادامه این پروژه و پس از ساخت نمونه‌ای دقیق از ربات می‌توان به طرح سایر مسائل مربوط به ربات‌های متحرک مانند راهبری و مسیریابی ربات پرداخت.

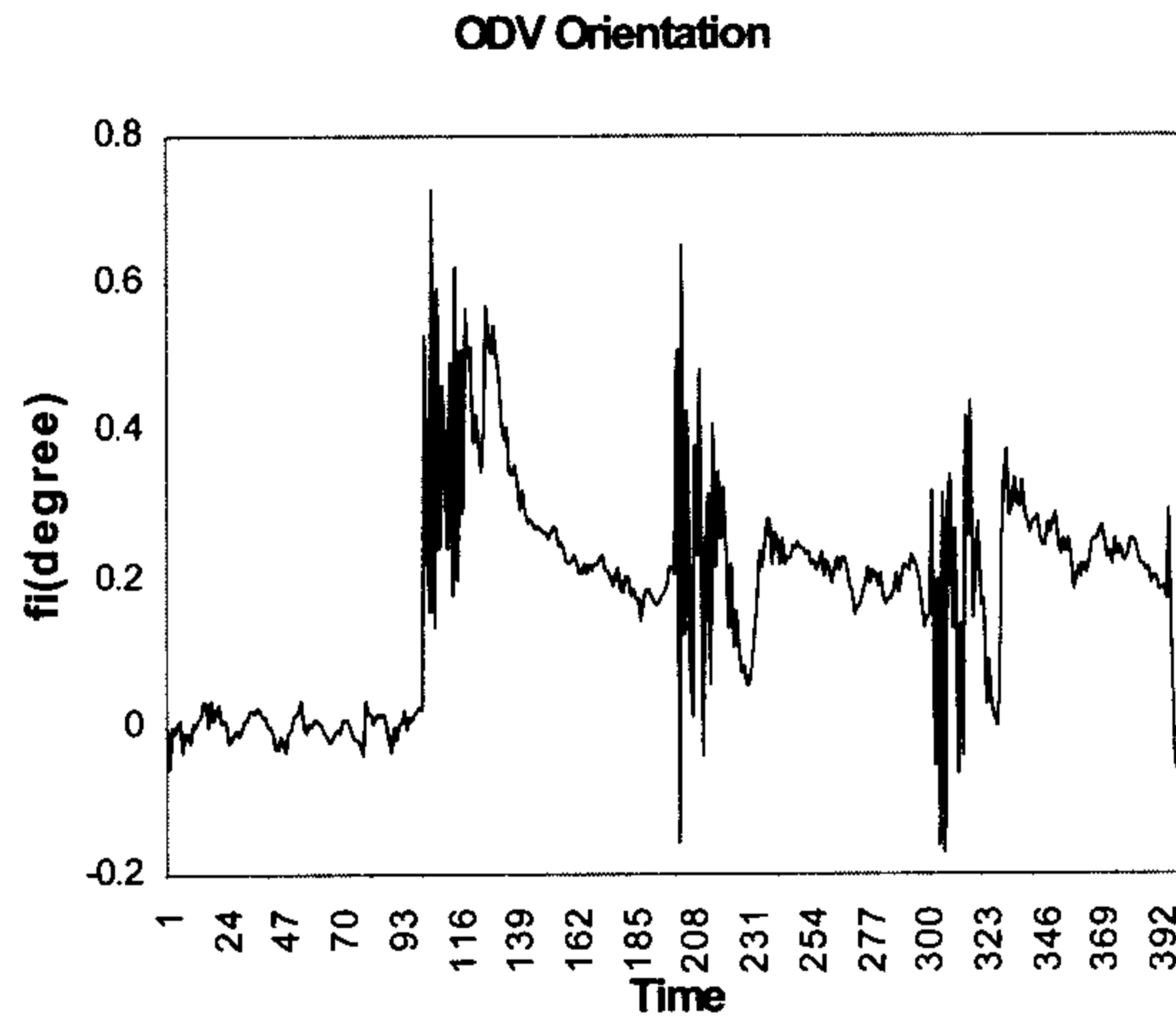
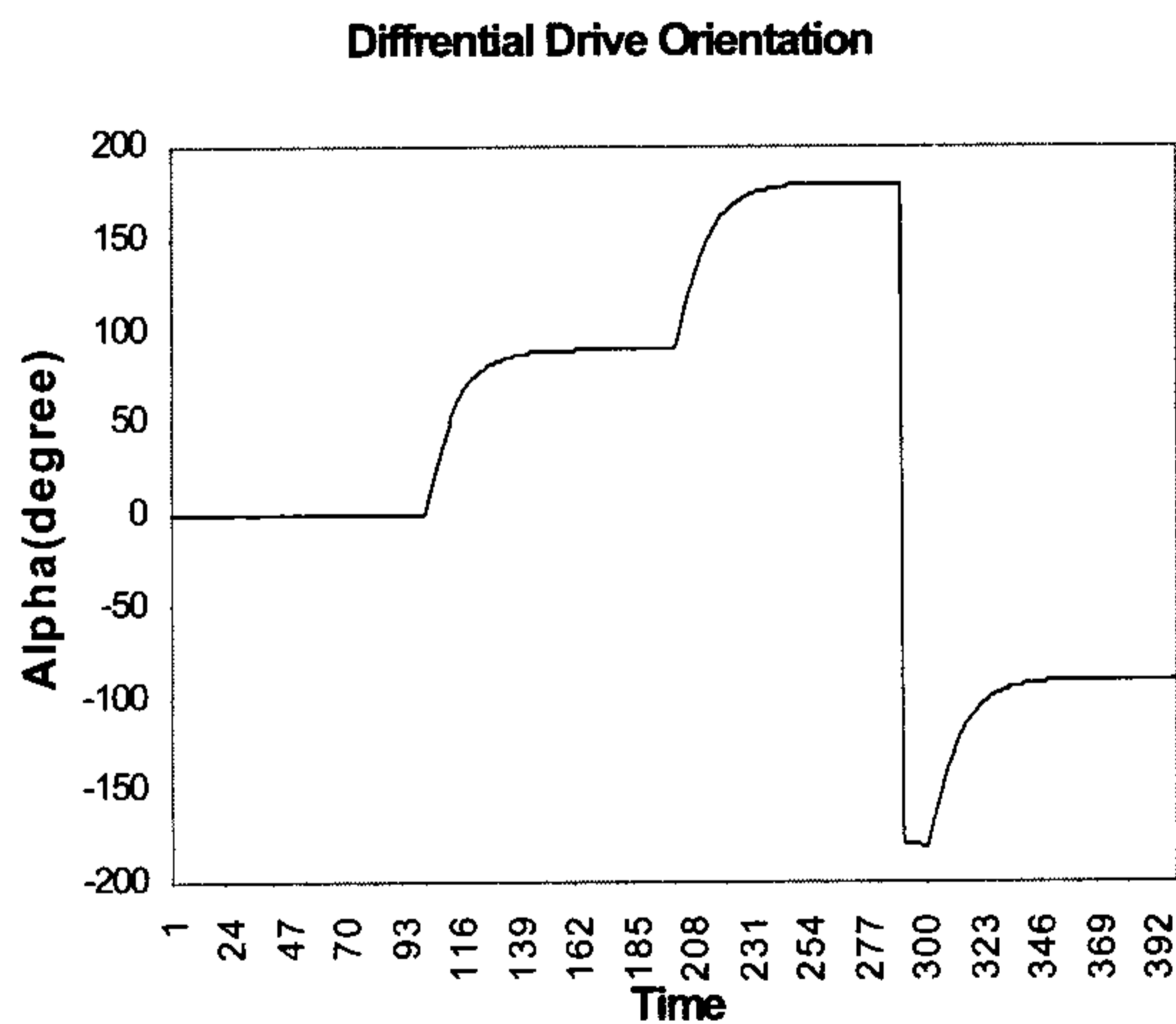
است. از سویی دیگر سیستم ساده بوده و در ساخت آن از مکانیزم‌های خاص و پیچیده اجتناب شده است. در ادامه، اولین قدم، ساخت نمونه‌ای دقیق‌تر که معایب ساختی این ربات را برطرف نموده و به افزایش دقت سیستم کمک قابل توجهی می‌کند، خواهد بود. معایبی



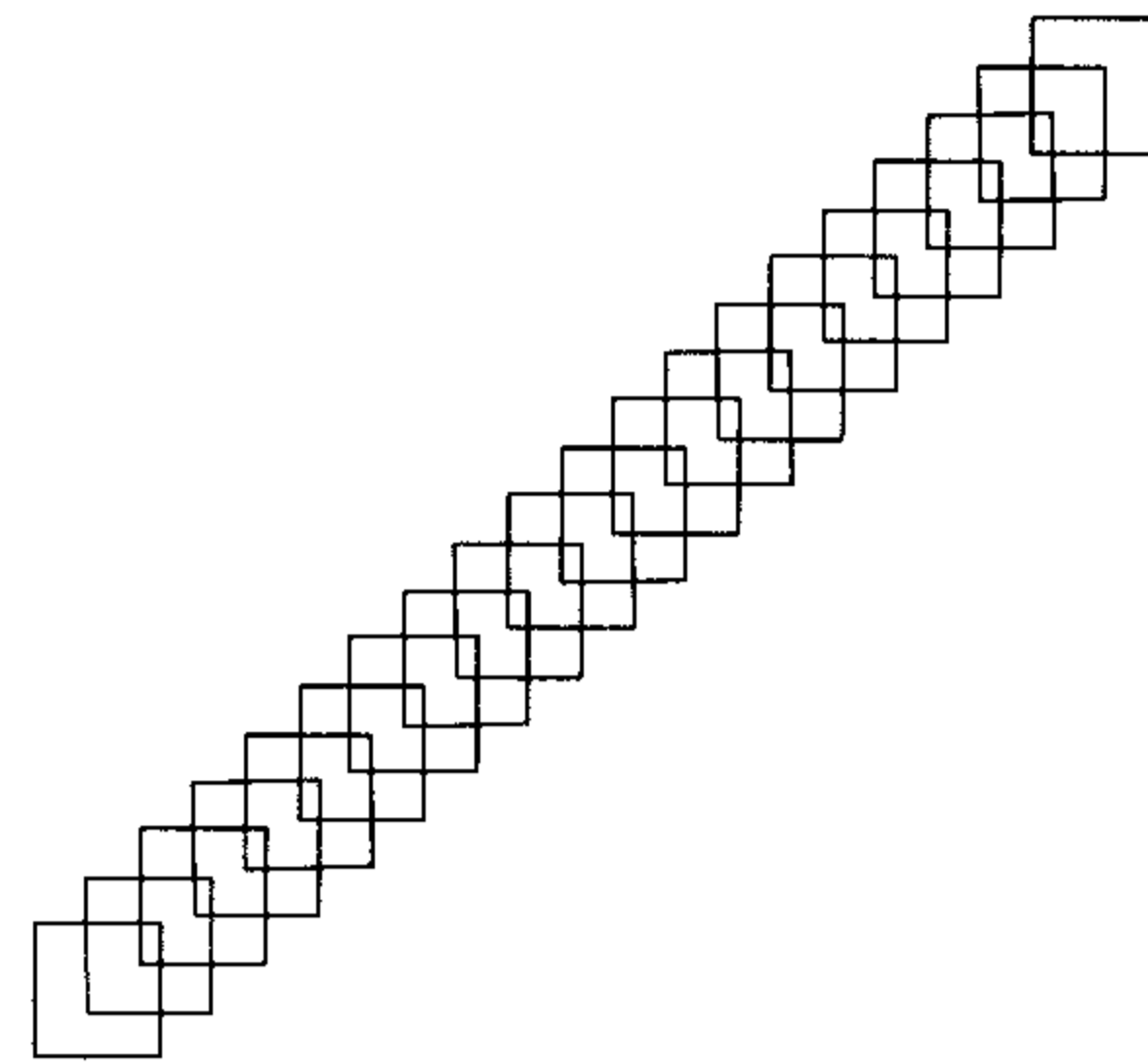
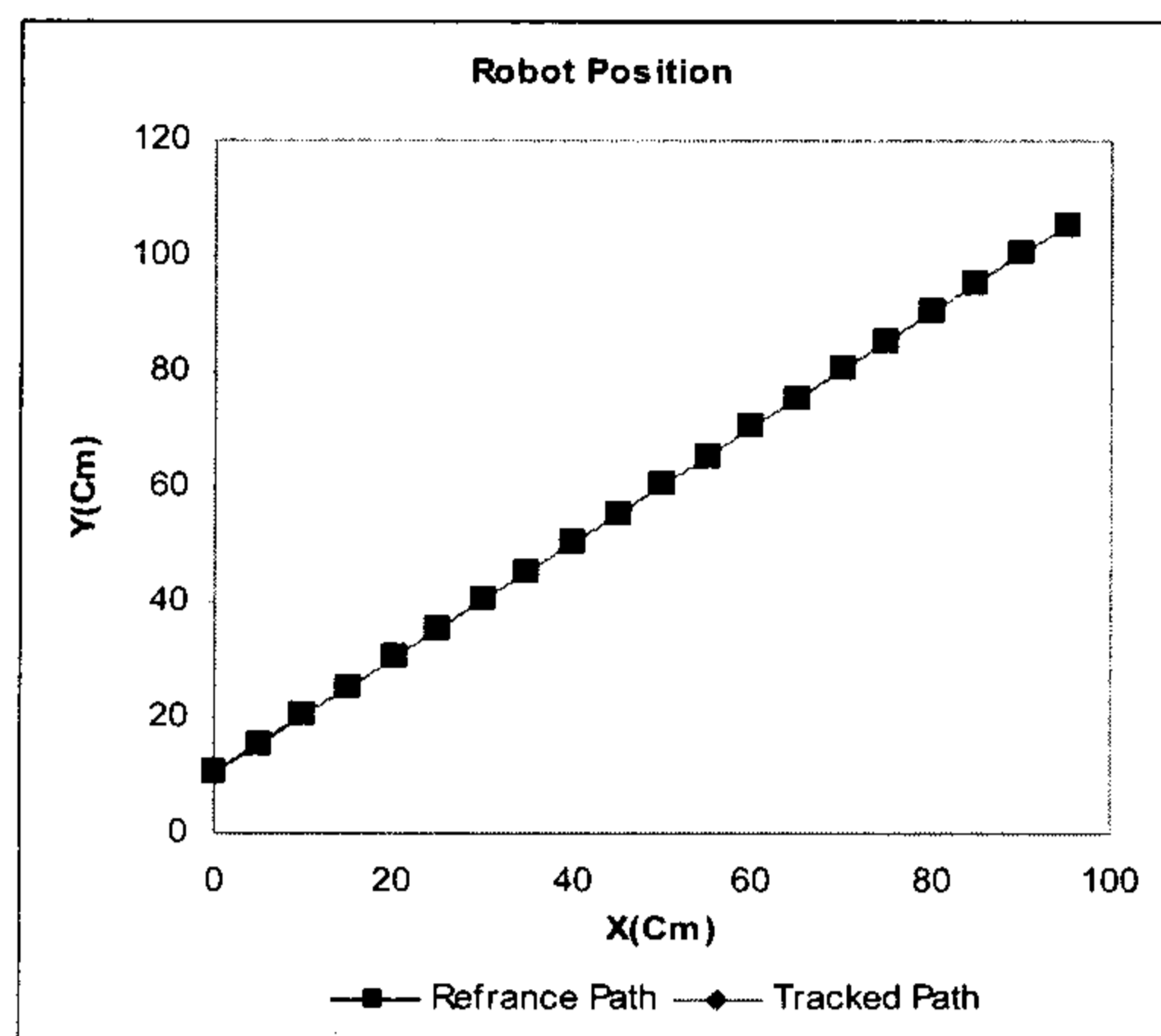
شکل ۵: مسیر و مکان ربات در ردیابی مسیر مربعی.



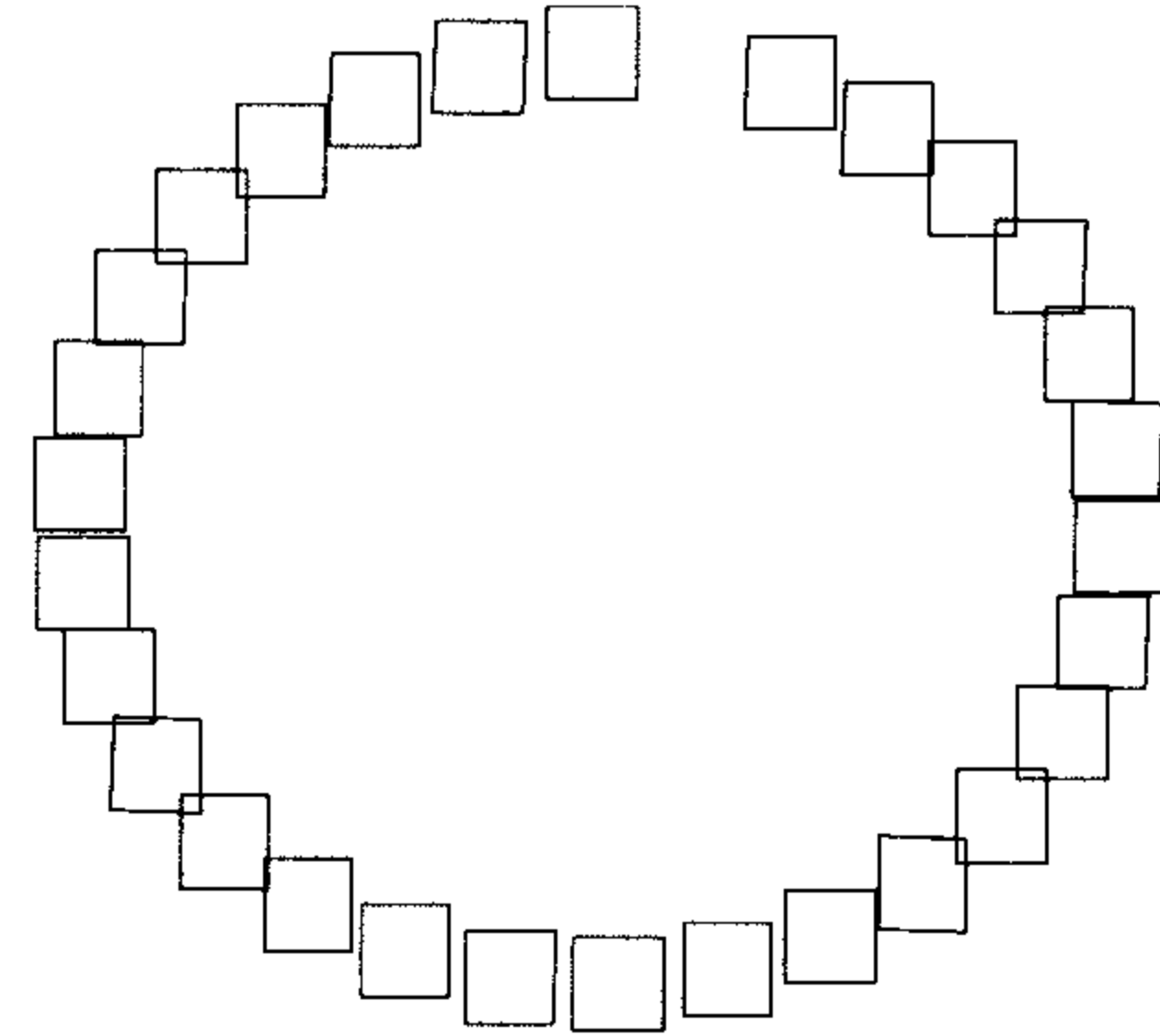
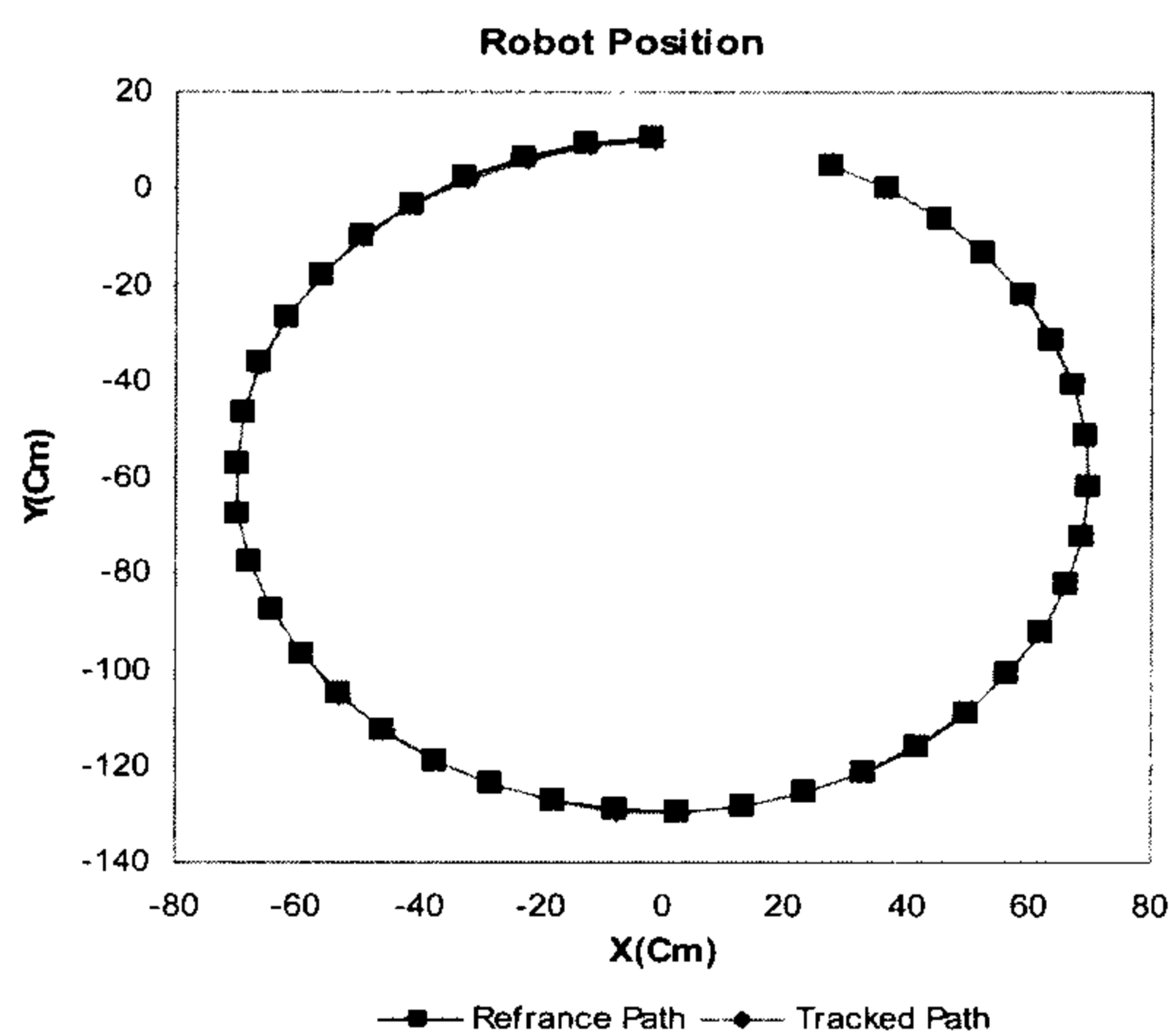
شکل ۶: مقادیر واقعی و مرجع سرعت ربات (سرعت نقطه A) در دستگاه مطلق.



شکل ۷: تغییرات زاویه شناسی در ردیابی مسیر مربعی (سمت چپ) و میزان تاثیر آن روی زاویه ربات.



شکل ۸: مسیر و مکان ربات در ردیابی یک مسیر مورب.



شکل ۹: مسیر و مکان ربات در ردیابی یک مسیر دایره ای.

مراجع

- 1 - Mori, Y., Nakano, E., Takahashi, T. and Takayama, K. *A Study on the Mechanism and Control of Omni-Directional Vehicle*. IROS96, PP. 52-59.
- 2 - Ferriere, L., Raucent, B. and Campion, G. *Design of Omni Mobile Robot Wheels*. ICRA96, PP. 3664-3670.
- 3 - Ferriere, L., Raucent, B. and Samin, J. *ROLLMOBS, A New Omni mobile Robot*. IROS97, PP. 913-918.
- 4 - Wada, M. and Asada, H. *A Holonomic Omni directional Vehicle with a Reconfigurable Footprint Mechanism and Its Application to Wheelchairs*. ICRA98, PP. 774-780.
- 5 - Fujisawa, S., Ohkubo, K., Yoshida, T., Satonaka, N. and Shidama, Y. (1977). "Improved moving properties of an omni directional vehicle using stepping motor." *The 36th Conference of Decision & Control*.
- 6 - Mascaro, S., Spano, J. and Asada, H. *A Reconfigurable Holonomic Omni directional Mobile Bed with Unified Seating (RHOMBUS) for Bedridden Patients*. ICRA97, PP. 1277-1282.
- 7 - West, M. and Asada, H. *Design and Control of Ball Wheel Omni directional Vehicles*. ICRA95, PP. 1931-1938.
- 8 - Tang, J., Watanabe, K. and Shiraishi, Y. *Design and Traveling Experiment of an Omni directional Holonomic Mobile Robot*. IROS96, PP. 66-73.

- 9 - Pin, G. and Killoigh, M. (1994). "A new family of omni directional and holonomic wheeled platforms for mobile robots." *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 4, PP. 480-489.
- 10 - Watanabe, K. "Control of an omni directional mobile robot." *1998 Second International Conference on Knowledge-Based Intelligent Systems*, PP. 51-60.
- 11 - Killough, S. M. and Pin, F. G. *Design of an Omni directional and Holonomic Wheeled Platform Prototype*. ICRA92, PP. 84-90.
- 12 - Chih Yenn Voo, Thomas Branul, *Low Level Driving Routines for the OMNI-Directional Robot*.
- 13 - Wada, M., Tominaga, Y. and Mori, S. *Omni directional Holonomic Mobile Robot Using Nonholonomic Wheels*. IROS95.
- 14 - Wada, M. and Mori, S. *Holonomic and Omni directional Vehicle with Conventional Tires*. ICRA96, PP. 3671-3678.
- 15 - Wada, M., Takagi, A. and Mori, S. *Caster Drive Mechanisms for Holonomic and Omnidirectional Mobile Platforms with no Over Constraint*. ICRA2000, PP. 1531-1538.
- 16 - Borenstein, J. *Control and Kinematic Design of Multi-Degree-of-Freedom Mobile Robots with Compliant Linkage*. ICRA95, PP. 21-35.
- 17 - Borenstein, J. and Wehe, D. K. (1997). "Internal correction of odometry errors with the omniMate." *Proceedings of the Seventh Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*, Augusta, Georgia, April 27-May 1st, PP. 323-329.
- 18 - Borenstein, J. (1993). "Multi-layered control of a four-degree-of-freedom mobile robot with compliant linkage." *Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, Georgia, May 2-7.
- 19 - Myung-Jin Jung, Hyun-Sik Shim, Heung-Soo Kim, Jong-Hwan Kim, (1999). "The miniature omni-directional mobile robot omniKity-I (OK-I)." *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Detroit, Michigan, PP. 2686-2691.
- 20 - 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)*.
- 21 - Latombe, J. C. (1991). *Robot Motion Planning*, Stanford University, Kluwer Academic Publishers.
- 22 - Kencheikh, C. A. and Seireg, A. (1994). *Optimized-motion planning (theory and implementation)*. Wiley-Interscience (John Wiley & Sons).
- 23 - Kanayama, Kimura, Miyazaki, Noguchi, (1990). *A stable Tracking control Method for an autonomous Mobile Robot*.

۲۴ - دهقان بنادکی، س. م. م.، نیلی احمدآبادی، م. و کوثری، ط. "استفاده از یک چرخ غیرفعال برای بهبود ژایروادومتری در مکان‌یابی یک ربات متحرک." نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۸، شماره ۱ صفحه ۱۳ تا ۲۵، اردیبهشت‌ماه (۱۳۸۳).

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Differential Drive	2 - Car Like	3 - Driving
4 - Steering	5 - Path	6 - Trajectory
7 - Trajectory Planner	8 - Globally Asymptotically Stable	
9 - Globally Exponentially Stable	10 - Globally Uniformly Asymptotically Stable	