مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۴۲-۳۳

طراحی و پیاده‌سازی سیستم کنترل دورزدن خودکار خودرو

احسان خلیلی[۱]، جعفر قیصری[۲]، محمد دانش[۳]

[۱] فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی اصفهان، Ehsan.khalili@ec.iut.ac.ir

[۲] دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپیوتر، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی اصفهان، Ghaisari@cc.iut.ac.ir

[۳] دانشیار ، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، گروه سیستم‌های دینامیکی و مکاترونیکی، دانشگاه صنعتی اصفهان، Danesh@cc.iut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۰۷ ویرایش اول: ۱۳۹۶/۱۲/۲۹ ویرایش دوم: ۱۳۹۶/۰۳/۱۲ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۱۳

چکیده: در این مقاله به طراحی یک سیستم کنترلی برای دورزدن خودکار خودرو پرداخته می‌شود. در ابتدا اطلاعات حاصل از بررسی آیین‌نامه‌ها و قوانین راهنمایی‌ورانندگی و نیز تحقیقات انجام شده ازآموزشگاه‌ها و پلیس راهنمایی‌ورانندگی در این خصوص جمع‌بندی و ارائه می‌گردد. سپس نتایج آزمایش‌های تجربی سیستم دورزدن بر روی خودروی واقعی در خیابان‌های با عرض مختلف ارائه و بررسی می‌شود. پس از آن، مسیرهای مناسب دورزدن خودکار خودرو با در نظرگرفتن محدودیت‌های غیرهولونومیک خودرو طراحی می‌شود. در نهایت کنترل‌کننده مد لغزشی مناسب برای کنترل سیستم دورزدن خودرو طراحی می‌گردد. طراحی سیستم فازی تصمیم‌گیری حرکت خودرو در هنگام دورزدن نیز نوآوری مهم صورت گرفته در این مقاله می‌باشد. جهت تایید صحت طراحی‌های صورت گرفته با نتایج عملی، یک ربات شبه‌خودرو بر اساس ابعاد در مقیاس کوچکتر یک خودروی واقعی طراحی و ساخته شده و سیستم دورزدن خودکار بر روی آن پیاده‌سازی گردیده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی صورت گرفته بر روی ربات شبه‌خودرو نشان از کارآمدی و دقت مناسب سیستم کنترلی طراحی شده دارد.

کلمات کلیدی: سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند، کنترل‌کننده مد لغزشی، سیستم دورزدن خودرو، ربات شبه‌خودرو.

Design and implementation of an automatic car turning system

Ehsan Khalili, jafar Ghaisari, Mohammad Danesh

Abstract: In this paper, a control system is designed for automatic car turning. At first, the necessary information of car turning that were collected from the traffic bylaw, car driving training centers and traffic police are explained. Then, car turning is studied experimentally on several streets with different widths. Afterward, a proper path is designed for the automatic car turning system considering traffic rules and nonholonomic constraint. Also, an appropriate sliding mode controller is designed and a novel fuzzy decision-making system is proposed for the automatic car turning system. A car like mobile robot is designed and manufactured based on small scale parameters of a sedan car. Finally, the automatic car turning system is implemented on this car like mobile robot. Simulation and experimental results of the designed control system confirm the effectiveness of the proposed control system.

Keywords: intelligent transportation system, sliding mode controller, automatic car turning, car like mobile robot.

۱- مقدمه

امروزه با افزایش تصادفات رانندگی و افزایش خسارات جانی و مالی ناشی از این حوادث، توجه به سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند شهری افزایش یافته است. این سیستم‌ها به عنوان یک روش کارآمد برای بهبود مسئله‌ی حمل‌ونقل بکار گرفته شده است. هوشمندسازی سیستم حمل‌ونقل را می‌توان به رانندگی خودکار، پارک گاراژ، پارک موازی و ... تعریف کرد. از آنجا که حدود ۵۰ درصد تصادفات رانندگی مربوط به اشتباهات شخص راننده می‌باشد، از این رو محققان به دنبال یافتن راهی جدید در جهت کاهش میزان تلفات رانندگی هستند. استفاده از سیستم‌های کنترلی هوشمند، باعث بهبود سیستم حمل‌ونقل شده و رانندگی بسیار ایمن‌تر و سریع‌تری را برای رانندگان فراهم می‌کند. مقالات متعددی در زمینه سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند نوشته شده که هر یک بر تکمیل و رفع مشکلات این سیستم‌ها گام برداشته‌اند. در [۱]-[۸] به انواع روش‌های پارک موازی خودرو و پیاده‌سازی عملی آن اشاره دارد. در [۹]، از راهبرد SLAM برای چرخش ربات شبه‌خودرو در محیط‌های محصور استفاده شده است. در [۱۰]، از الگوریتم کنترلی مدل مجازی و معادلات ساده شده دینامیکی خودرو برای تعقیب مسیر استفاده شده است و سپس بر روی یک ربات رادیوکنترل پیاده‌سازی گردیده است. در [۱۱] به طراحی کنترل‌کننده‌ی مد لغزشی برای تعقیب مسیر مرجع خودرو پرداخته است. با توجه به سرعت بالای خودرو در این شبیه‌سازی، از مدل دینامیکی ساده شده خودرو استفاده شده است. در [۱۲]، یک کنترل‌کننده‌ی فازی بر اساس مهارت‌های رانندگی و تعقیب مسیر طراحی شده است و توابع عضویت این کنترل‌کننده توسط الگوریتم ژنتیک بهینه شده‌اند. در [۱۳]، به تعقیب مسیر مرجع برای خودرو، هم با مدل دینامیک و هم مدل سینماتیک می‌پردازد و برای مسیریابی از روش RRT استفاده می‌کند. در [۱۴] طراحی یک کنترل‌کننده فازی برای وسایل نقلیه هوشمند انجام شده و بر روی یک وسیله نقلیه شبه‌خودرو پیاده‌سازی شده است. در [۱۵] با استفاده از الگوریتم ژنتیک، به پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر، با توجه به عوامل اقتصادی، ترافیکی، هزینه بنزین و... پرداخته شده است. در [۱۶] رفتار دینامیکی خودرو و پاسخ آن به انواع مانورهای تغییر مسیر مورد بررسی قرار گرفته و رفتار خودرو به دورزدن پیوسته و رد کردن یک مانع مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش مذکور، از مدل دوچرخه‌ای خودرو با دو و سه درجه آزادی استفاده شده است.

هدف اصلی این پژوهش تعمیم و افزایش کاربرد سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند به طور جزئی در زمینه حمل‌ونقل شهری می‌باشد. یعنی بتوان با الهام گرفتن از سیستم پارک خودکار خودرو، یک موضوع جدید به طور مجزا در زمینه هوشمندسازی خودرو تعریف گردد. هدف از طراحی سیستم پارک موازی خودرو دلایلی چون عدم توانایی رانندگان کم‌تجربه در اجرای صحیح آن، کمبود فضای پارک، ایجاد ترافیک ناشی از عدم تسلط بر اجرای صحیح آن در زمان مناسب و... دارد. حال تمامی عوامل فوق را می‌توان برای سیستم دورزدن خودکار خودرو نیز ذکر کرد. انجام دورزدن در هر مکان و زمان دلخواه توسط رانندگان خسارات جانی و مالی زیادی را با خود به همراه دارد. از طرفی چون در هنگام دورزدن، خودروی مذکور حکم فرعی را دارد، در صورت هر گونه تصادف مقصر محسوب می‌شود، پس نیاز است تا به صورت کاملا قانونی این عمل صورت گیرد. نوآوری اصلی این مقاله استخراج و پیاده‌سازی اطلاعات اصلی و قانونی برای دورزدن خودرو می باشد. در ادامه، طراحی مسیرهای مناسب با توجه به محدودیت‌های غیرهولونومیک خودرو مورد بررسی قرار می‌گیرد و مانند پارک موازی، مسیر خاصی برای این امر طراحی می‌گردد. طراحی سیستم فازی برای تشخیص زمان مناسب و قانونی برای سیستم دورزدن خودرو نیز در ادامه طراحی شده و نتایج طراحی این سیستم بر روی یک ربات شبه‌خودرو که در این پژوهش طراحی و ساخته شده است، پیاده‌سازی می‌گردد.

۲- جمع‌آوری اطلاعات دورزدن تک‌فرمان خودرو

در اولین مرجع به آیین‌نامه راهنمایی‌ورانندگی پرداخته و اطلاعات لازم برای این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش ششم آیین‌نامه راهنمایی‌ورانندگی به گردش خودرو پرداخته شده است. در ماده ۱۰۸، ۱۵۲، ۱۵۳، ۱۵۴ و ۱۶۳ نیز عوامل مربوط به گردش و توقف خودرو مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به کامل نبودن اطلاعات دریافتی برای طراحی سیستم کنترلی، علاوه بر آیین‌نامه راهنمایی‌ورانندگی، از چندین آموزشگاه راهنمایی‌ورانندگی در سطح استان اصفهان استفاده شده است. موضوعات جدیدی نسبت به آیین‌نامه مطرح شدند که عبارت‌اند از: پارک مناسب اولیه کنار خیابان، زمان مناسب و اجازه دورزدن اولیه خودرو، ضرورت توقف خودرو در وسط خیابان و محل توقف آن، مسیر حرکتی مناسب طبق قوانین راهنمایی‌ورانندگی، سرعت مناسب و استاندارد خودرو، زاویه مناسب خودرو در محل توقف برای دید مناسب، هوشیاری و عکس‌العمل راننده نسبت به رفتار سایر رانندگان و توجه به نوع خودروهای در حال حرکت. با توجه به عدم سابقه قبلی در پرداختن به این موضوع به عنوان یک سیستم کنترلی مستقل، هنوز هم اطلاعات کامل و جامعی برای طراحی سیستم کنترلی بطور کامل وجود ندارد. در قسمت نهایی جمع‌آوری اطلاعات این پژوهش، از طریق پلیس فرهنگ و ترافیک راهنمایی‌ورانندگی استان اصفهان، یک جمع‌بندی مناسب از قوانین دورزدن خودرو انجام شده است.

برای انجام دورزدن تک‌فرمان خودرو، در ابتدا با در نظرگرفتن ماده‌های مذکور آیین‌نامه راهنمایی‌ورانندگی مبنی بر اینکه مکان مورد نظر جز مکان‌های ممنوعه برای دورزدن نباشد، در ابتدا باید خودرو در منتهی‌الیه سمت راست خیابان با پارک ۳۰ تا ۴۵ سانتی‌متر متوقف شود.

شکل ۱: آزمایشات عملی دورزدن تک‌فرمان با خودروی سمند

شکل ۲: برازش اطلاعات مسیر خیابان ۱۲ متر

سپس مرحله خروج از پارک اولیه صورت می‌گیرد و در اصطلاح با حرکت لاک‌پشتی، خودرو ۵۰ سانتی‌متر به جلو حرکت کرده تا تقریبا زاویه‌ای ۳۰ درجه نسبت به راستای خیابان به دست آورد. در این مرحله با توجه به در نظر گرفتن خودروهای در حال حرکت در باند موافق، به آرامی و با سرعت مناسب اقدام به حرکت تا وسط خیابان می‌کند. خودرو با طی کردن مسیری مناسب بر طبق قوانین راهنمایی‌ورانندگی در پشت خط مقطع وسط خیابان متوقف می‌شود، بطوریکه سپر خودرو بر روی خط مقطع قرار گیرد و از آن عبور نکند. زاویه قرارگیری خودرو در وسط خیابان بسیار مهم می‌باشد چون این زاویه باید بگونه‌ای باشد تا راننده خودرو بیشترین دید را نسبت به طرف مقابل خیابان و خودروهای در حال حرکت داشته باشد و هم‌چنین در مرحله بعدی بتواند دورزدن خود را بطور صحیح انجام دهد. در ادامه خودرو باید در مسیر مناسب دیگر در منتهی‌الیه سمت راست طرف مقابل خیابان حرکت خود را ادامه دهد. در ضمن برای انجام دورزدن تک‌فرمان به عرض حداقل ۱۲ متر برای یک خودروی سواری معمولی نیاز است.

۳- پیاده‌سازی مسیر دورزدن تک‌فرمان خودرو

حال با توجه به اطلاعات دریافتی در بخش (۲) لازم است تا اطلاعات فوق بر روی یک خودرو پیاده‌سازی شود تا بتوان بطور عملی قوانین بدست آورده شده برای دورزدن را ثبت نمود. در این راستا سعی شد تا تمامی قوانین بیان شده برای دورزدن خودرو بر روی خودروی سمند اجرا و اطلاعات آزمایشات عملی ثبت گردد. در این قسمت اجرای صحیح دورزدن خودرو زیر نظر کارشناسان مربوطه اجرا شده و با ردیابی مسیر حرکتی خودرو، اطلاعات لازم برای دورزدن بدست می‌آید. سپس به کمک نرم‌افزار Table Curve 2D به طراحی یک مسیر مناسب برای این اطلاعات پرداخته شد (شکل-۲). این آزمایشات برای خیابان‌های ۱۲، ۱۴ و ۱۶ متر برای دورزدن تک‌فرمان خودرو انجام شد که نتایج آن بصورت جدول (۱) ارائه می‌گردد.

جدول ۱: اطلاعات مسیر دورزدن تک‌فرمان خیابان‌های ۱۲، ۱۴ و ۱۶ متر

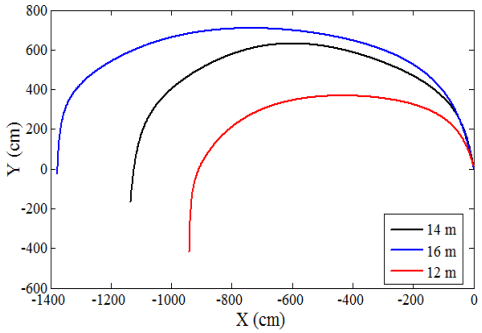
X-12	Y-12	X-14	Y-14	X-16	Y-16
۰	۰	۰	۰	۰	۰
-۲۲	۱۳۳	-۱۵	۱۳۵	-۲۰	۱۳۰
-۶۰	۱۹۷	-۴۲	۲۳۸	-۴۷	۲۶۴
-۱۳۰	۲۸۰	-۱۱۰	۳۶۷	-۱۰۶	۴۰۲
-۲۲۰	۳۳۳	-۲۴۳	۵۰۲	-۱۶۷	۴۸۵
-۲۵۴	۳۴۹	-۳۶۱	۵۷۵	-۲۴۹	۵۷۱
-۴۱۱	۳۶۸	-۵۱۸	۶۲۱	-۳۵۹	۶۳۱
-۶۱۲	۳۳۹	-۷۲۶	۶۱۰	-۴۹۰	۶۷۶
-۷۷۰	۲۵۴	-۹۲۷	۴۹۰	-۶۲۰	۷۰۱
-۸۶۰	۱۱۶	-۱۰۶۱	۲۹۱	-۸۰۸	۷۰۶
-۹۱۷	-۵۷	-۱۱۱۱	۹۳	-۹۷۵	۶۷۱
-۹۳۹	-۲۳۰	-۱۱۳۱	-۴۷	-۱۱۰۰	۶۱۳
-۹۴۱	-۴۰۰	-۱۱۳۵	-۱۲۱	-۱۲۲۲	۵۳۱
*	*	-۱۱۳۵	-۲۲۱	-۱۳۲۰	۳۸۱
*	*	*	*	-۱۳۵۷	۲۴۶
*	*	*	*	-۱۳۷۸	-۷۶

اعداد جدول (۱) مختصات (x,y) مسیر حرکتی خودرو بر حسب سانتی‌متر در دورزدن تک‌فرمان خیابان‌های ۱۲، ۱۴ و ۱۶ متر می‌باشند. حال با استفاده از جدول ۱ که بطور عملی بدست آورده شده و از طریق درون‌یابی با نرم‌افزار Table Curve 2D به طراحی یک معادله مسیر مناسب برای این اطلاعات پرداخته شده است (معادله‌ی (۱)). ضرایب این معادله برای خیابان‌های ۱۲، ۱۴ و ۱۶ متر در جدول (۲) نشان داده شده است. در شکل-۳، مسیر دورزدن تک‌فرمان خودرو در خیابان‌های مذکور رسم شده است.

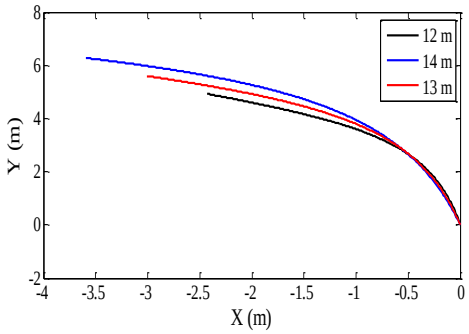
$$y = \frac{a + cx + ex^2 + gx^3}{1 + bx + dx^2 + fx^3 + hx^4} \quad (۱)$$

جدول ۲: ضرایب معادله مسیر دورزدن تک‌فرمان در خیابان‌های ۱۲، ۱۴ و ۱۶ متر

خیابان / ضرایب	۱۲m	۱۴m	۱۶m
a	۱۵/۲۵۲۸	۱۲/۲۹۱۹	۴/۶۲۶۷
b	۰/۰۱۱۱۶۹	۰/۰۱۵۶۸۷	-۰/۰۰۸۹۰۹
c	-۵/۷۶۸۲	-۹/۱۴۶۶	-۷/۷۹۰۸
d	-۲/۹۲۲۲e-۵	-۳/۵۹۰۶e-۵	-۱/۵۳۴e-۵
e	-۰/۰۱۲۳۶	-۰/۰۱۲۲۹۲	-۰/۰۱۰۳۲
f	-۲/۲۲۹۹e-۸	-۳/۲۶۵۸e-۸	-۸/۴۶۸۱e-۹
g	-۶/۶۰۰۹e-۶	-۳/۶۳۱۷e-۶	-۳/۳۸۴e-۶
h	-۵/۳۵۹e-۱۲	-۱/۲۰۵e-۱۱	-۱/۷۳۶e-۱۲



شکل-۳: دورزدن تک‌فرمان در خیابان‌های ۱۲، ۱۴ و ۱۶ متر



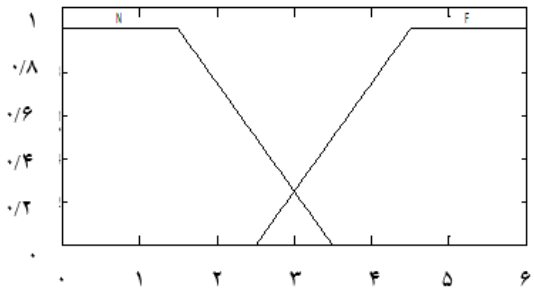
شکل-۴: درون‌یابی مسیر رفت دورزدن تک‌فرمان خیابان ۱۳ متر

مسئله دورزدن با بحث پارک موازی خودرو از لحاظ طراحی مسیر تفاوت دارد. در بحث طراحی مسیر برای پارک موازی خودرو نیاز است تا به ازای تغییری کوچک در مکان اولیه خودرو، مسیر جدیدی برای حرکت خودرو طراحی شود زیرا کوچکترین خطا ممکن است سبب ایجاد برخورد خودرو با خودروهای پارک شده گردد. در بحث دورزدن خودرو موضوع متفاوت است و تغییرات کوچک در طراحی مسیر اهمیت ندارد و نمی‌تواند تغییرات اساسی در طراحی مسیر ایجاد کند و می‌توان با نزدیک‌ترین مسیر موجود طراحی شده، دورزدن خودرو را انجام داد و یا مسیر مورد نظر را به کمک برازش منحنی همانند شکل-۴ درون‌یابی کرد.

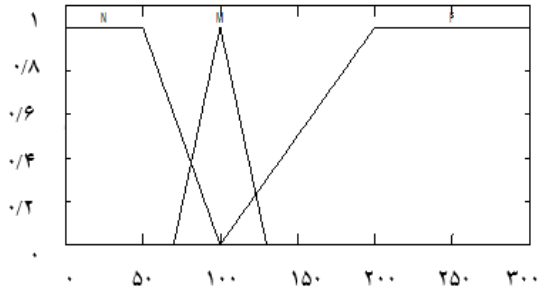
۳- طراحی سیستم فازی تصمیم‌گیری حرکت خودرو

در این بخش، موضوع مهم دیگری مورد بررسی قرار می‌گیرد و آن سیستم تصمیم‌گیری دورزدن خودکار خودرو می‌باشد. در رانندگی ممکن است رانندگان بدون توجه به خودروهای در حال حرکت، وارد مسیر دورزدن خود شوند و خودروهای در حال حرکت را مجبور به توقف کنند که این مسئله می‌تواند حوادث ناگواری را با خود به همراه داشته باشد. از این رو توجه و دقت در انجام شروع عمل دورزدن خودرو هم در قسمت اولیه حرکت و هم در وسط خیابان از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. انتخاب سیستم فازی با بهره‌گیری از تجربه انسان و با در نظر گرفتن قوانین راهنمایی‌ورانندگی می‌تواند یک سیستم مناسب برای بخش تصمیم‌گیری دورزدن خودرو باشد. با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده از مراجع موجود، یک سری عوامل اصلی در شروع عمل دورزدن دخیل هستند و در صورت برقراری شرایط مناسب در آن عوامل، می‌توان اقدام به دورزدن کرد. عوامل مهم در این قسمت عبارت‌اند از: فاصله خودروهای در حال حرکت تا خودروی مورد نظر، سرعت حرکت خودروها، ترافیک جاده‌ای، محل قرارگیری خودروها در خیابان، شتاب حرکتی خودروها، و نوع خودروها (بر حسب طول خودرو). دو عامل فاصله و سرعت حرکتی خودروها، از اهمیت بسیار بالایی نسبت به سایر عامل‌ها برخوردار هستند و سایر عوامل در شرایط خاص به کمک تصمیم‌گیری می‌آیند. در این موارد ذکر شده منظور از نوع خودرو این موضوع است که خودرو مورد نظر در حال حرکت جز کدام نوع خودروها می‌باشد. خودروی سواری، ون، اتوبوس، کامیون و .... جز این موارد هستند که بر اساس طول این خودروها توابع عضویت مشخص شده‌اند. یا برای خروجی این سیستم فازی نیز چهار حالت در نظر گرفته شده است. حالت تصادف‌بار، خطرناک، مناسب و ایمن، چهار تابع عضویت انتخاب شده در این سیستم فازی می‌باشند. خودرو تنها در حالت ایمن اجازه دورزدن را داشته و بقیه حالات صرفا برای اطلاع راننده خودرو از وضعیت خودرو می‌باشد. توابع عضویت سیستم فازی طراحی شده در شکل-۵ نمایش داده شده است. سیستم فازی طراحی شده در حالت اولیه شامل ۷۲۹ قانون فازی بوده که بر طبق اطلاعات قوانین راهنمایی‌ورانندگی کسب شده، طراحی گردیده است. این قوانین پس از بررسی دقیق اطلاعات دریافتی از کارشناسان حوزه راهنمایی و رانندگی برای سیستم فازی طراحی شده است. در ادامه با توجه به در نظر گرفتن اهمیت زیاد دو عامل فاصله و سرعت نسبت به سایر عوامل و

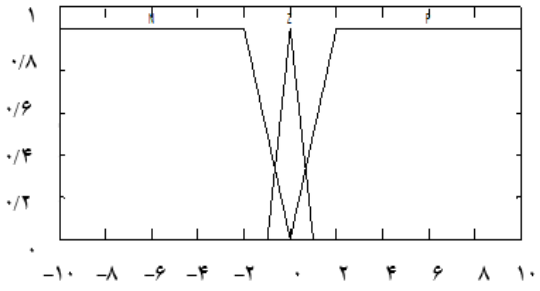
هم‌چنین حذف یک ورودی فازی با اهمیت کمتر، بسیاری از قوانین مشابه حذف گردیده است تا در نهایت به ۱۶ قانون کلی فازی کاهش یابد.



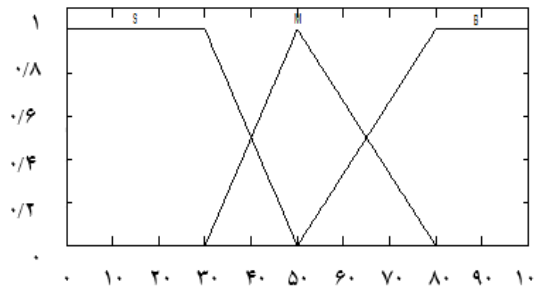
(الف) توابع عضویت محل قرارگیری خودروها در خیابان (m)



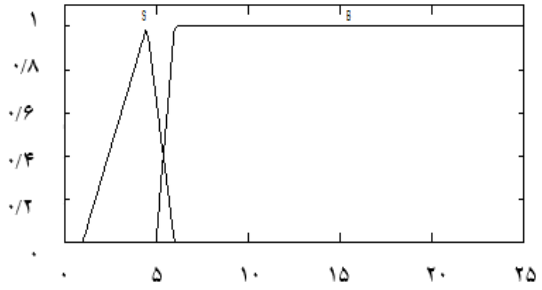
(ب) توابع عضویت فاصله خودروها تا خودرو مورد نظر (m)



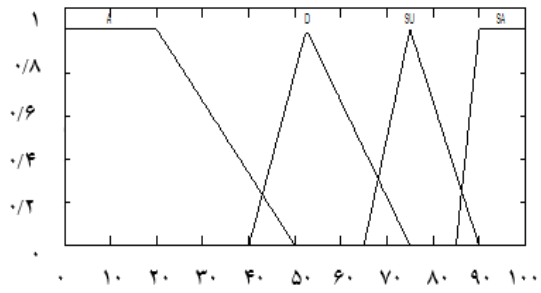
(پ) توابع عضویت شتاب خودروهای در حال حرکت (m/s^2)



(ت) توابع عضویت سرعت خودروهای در حال حرکت (m/s)

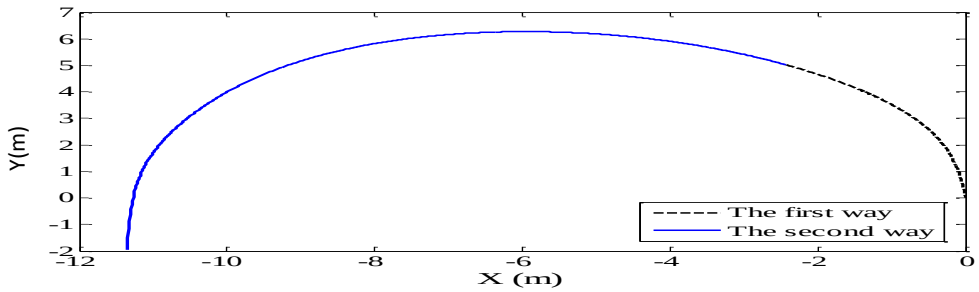


(ث) توابع عضویت نوع خودروهای در حال حرکت (طول خودرو بر حسب متر)



(ج) توابع عضویت خروجی سیستم فازی تصمیم‌گیری دورزدن

شکل-۵: توابع عضویت سیستم فازی تصمیم‌گیری دورزدن



شکل-۶: بررسی مسیر رفت و برگشت دورزدن تک‌فرمان خودرو در خیابان ۱۲ متر

٤- طراحی مسیرهای رفت و برگشت دورزدن تک فرمان

با توجه به لزوم توقف خودرو در وسط خیابان، مسیر حرکتی طراحی شده خودرو به دو قسمت رفت و برگشت تقسیم می‌شود. مسیر اول از پارک اولیه تا توقف وسط خیابان و مسیر ثانویه از توقف وسط خیابان تا انجام کامل دورزدن تک‌فرمان می‌باشد. این دو منحنی که در کنار هم، مسیر اصلی دورزدن خودرو را تشکیل می‌دهند، بطور مجزا تحلیل شده و چندجمله‌ای‌های مناسب برای مسیر رفت و برگشت دورزدن خودرو مطابق روابط (۲) و (۳) بدست می‌آید. این معادلات با استفاده از اطلاعات تجربی بدست آمده از خودرو مطابق جدول ۱ و تحلیل آن‌ها با نرم‌افزار Table Curve 2D بدست آمده که به طراحی یک مسیر مناسب برای این اطلاعات پرداخته شده است. در اصل می‌توان گفت معادلات زیر یک درونیابی از معادله اصلی بر اساس اطلاعات واقعی و نرم‌افزار مورد نظر است.

$$y = \frac{a + cx}{1 + bx + dx^2} \qquad (۲)$$

a=۰/۱۰۳۳, b=-۱/۹۹۹, c=-۷/۱۷۱, d=-۰/۱۲۹

$$y = \frac{a+cx+ex^2+gx^3}{1+bx+dx^2+fx^3} \qquad (۳)$$

a=۰/۵۹۶, b= -۰/۴۵۴ c=-۳/۴۷۲, d=۱۲۱, e=۰/۷۷۴, f=-۰/۰۰۷, g=۰۴۲

٥- کنترل کننده مد لغزشی

برای پیاده‌سازی سیستم دورزدن تک‌فرمان خودرو از کنترل‌کننده مد لغزشی استفاده می‌شود. این کنترل‌کننده در برابر نامعینی و عوامل غیرخطی در مدل‌سازی و تغییرات پارامترهای سیستم مقاوم بوده و عملکرد مطلوبی را دارد. در این سیستم کنترلی مطابق معادله (۴) از معادلات سینماتیک خودرو استفاده شده است. (x,y) مسیر حرکتی خودرو، θ زاویه خودرو با راستای خیابان و φ زاویه فرمان خودرو می‌باشد. (v,w) نیز به ترتیب بیانگر سرعت حرکت و سرعت فرمان خودرو هستند. برای توقف کامل خودرو در نقاط ابتدایی و انتهایی، حوزه زمان و مکان در طراحی کنترل‌کننده از هم جدا شده و کنترل‌کننده در حوزه قوانین زمانی خاص طبق معادله (۵) طراحی می‌شود.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ \frac{\tan\varphi}{l} \\ 0 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} w \qquad (۴)$$

$$P(t)=\begin{cases} \left(\frac{l}{2}-\frac{l}{2}\cos\left(\frac{\pi t}{T}\right)\right)+x_0 & t\in[0\ T]\ \ if\ v<0 \\ -\left(\left(\frac{l}{2}+\frac{l}{2}\cos\left(\frac{\pi t}{T}\right)\right)+x_0-l\right) & t\in[0\ T]\ if\ v>0 \end{cases} \qquad (۵)$$

P(t) همان قوانین زمانی بیان شده در بخش قبل می‌باشد. در قوانین زمانی معادله (۵)، x_0 طول نقطه شروع حرکت، l فاصله طولی نقطه ابتدایی و پایانی و T زمان حرکت می‌باشد. حال معادلات سینماتیک سیستم خودرو در حوزه این توابع زمانی بدست می‌آید و با انجام تعدادی اعمال ریاضی به صورت معادله (۶) می‌شود. مشتق در معادلات زیر بر حسب P می‌باشد.

$$I(\theta,\varphi)\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ \omega_1 \end{pmatrix} \qquad (۶)$$

که در آن

$$I(\theta,\varphi) = \begin{pmatrix} \cos\theta\cos^2\varphi & \sin\theta\cos^2\varphi & \frac{l}{2}\sin(2\varphi) & 0 \\ \sin\theta & -\cos\theta & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

در ادامه سطوح لغزش کنترل‌کننده مد لغزشی مطابق معادله (۷) تعریف می‌شود. در این سطوح لغزش، k_1 و k_2 پارامترهای طراحی کنترل‌کننده می‌باشند. سپس قانون کنترلی مد لغزشی که شرط رسیدن به سطوح لغزش را تضمین می‌کند، مطابق معادله (۸) بدست آورده شده است [۵].

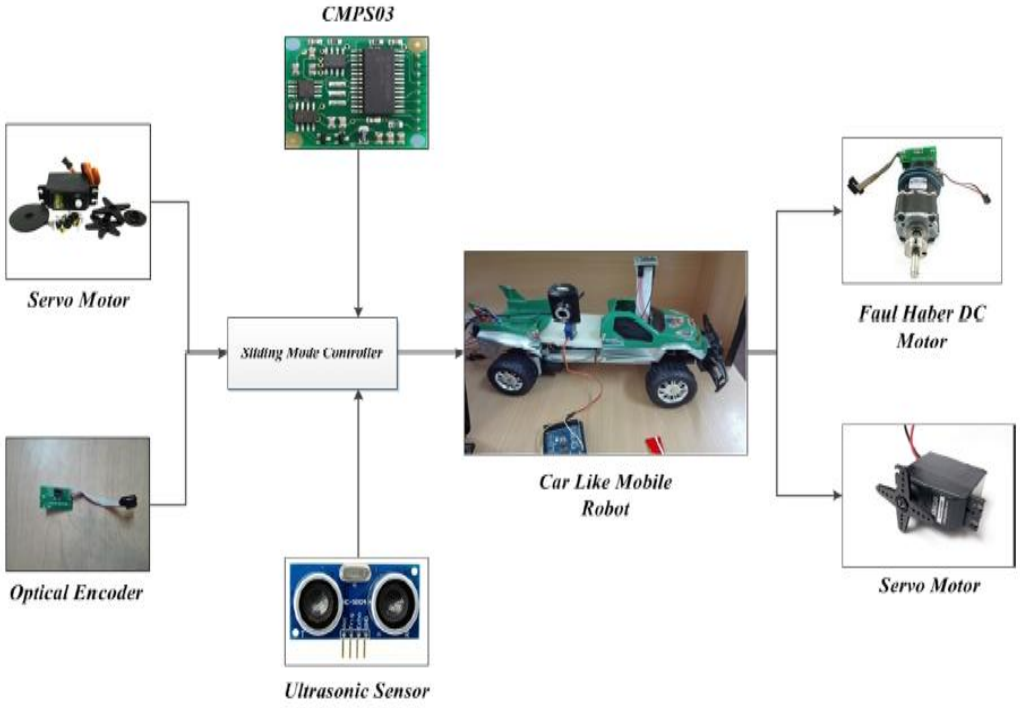
$$S = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} = I(\theta,\varphi)\begin{pmatrix} \dot{x}_e + k_1 x_e \\ \dot{y}_e + k_2 y_e \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = I(\theta,\varphi)\begin{pmatrix} S_x \\ S_y \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad (۷)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{v}_1 \\ \dot{\omega}_1 \end{pmatrix} = -R|S|^Q sign(S) + \dot{I}(\theta,\varphi)\begin{pmatrix} \dot{x}_r - k_1 x_e \\ \dot{y}_r - k_2 y_e \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix} + I(\theta,\varphi)\begin{pmatrix} \ddot{x}_r - k_1 \dot{x}_e \\ \ddot{y}_r - k_2 \dot{y}_e \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\varphi} \end{pmatrix} \qquad (۸)$$

٦- طراحی و ساخت ربات شبه خودرو

برای پیاده‌سازی سیستم کنترلی طراحی شده در بخش (۵)، نیاز به طراحی و ساخت یک ربات شبه‌خودرو می‌باشد. برای کنترل سیستم فرمان این ربات از یک سروموتور SG5010 استفاده شده است. این موتور قابلیت چرخش ۱۸۰ درجه را دارد. برای سیگنال کنترلی سرعت حرکتی ربات از موتور فالهابر ۱۱۰ دور ۲۰ وات استفاده شده است. این موتور با توجه به ویژگی‌هایی از جمله دقت حرکتی بالا، استفاده از گیربکس خورشیدی و ... بسیار مورد توجه در حوزه رباتیک می‌باشد. حال دو موتور فوق با طراحی و استفاده از چندین جاموتوری از جنس تفلون و بلبرینگ بر روی شاسی ربات نصب شده‌اند. هم‌چنین این ربات دارای فیدبک‌های سنسورهای آلتراسونیک، فیدبک داخلی سروموتور SG5010، قطب‌نمای دیجیتال CMPS03 و انکدر نوری برای دریافت

اطلاعات موقعیت و سرعت ربات شبه‌خودرو می‌باشد. پردازنده‌ی مورد استفاده در این سیستم کنترلی از نوع آردواینو Mega2560 می‌باشد. برای نزدیک شدن سیستم طراحی شده به یک خودروی واقعی، از ابعاد تقریبی مقیاس کوچک خودروی سمند بر روی ربات شبه‌خودرو استفاده شده است (جدول (۳)).



شکل-۷: قطعات بکار برده شده در ساخت ربات شبه‌خودرو

جدول ۳: مشخصات فیزیکی ربات شبه‌خودرو و خودروی سمند

نوع وسیله / ویژگی	ربات اولیه	خودرو سمند	ربات نهایی
حداکثر زاویه فرمان	۰/۴۴ رادیان	۰/۷۰ رادیان	۰/۷۰ رادیان
فاصله دومحور	۰/۱۵ متر	۲/۶۷۱ متر	۰/۳ متر
عرض	۰/۲۰ متر	۱/۹۰ متر	۰/۲۰ متر
طول	۰/۲۵ متر	۴/۵۰۲ متر	۰/۴۶ متر

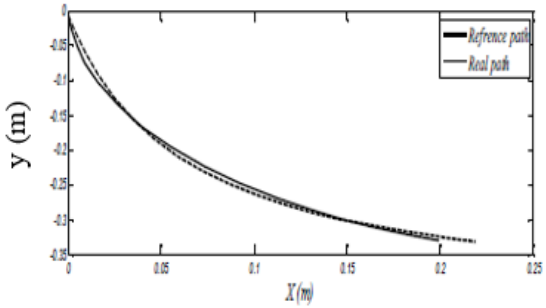
۷- نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی بر روی ربات شبه‌خودرو

در این بخش به شبیه‌سازی و پیاده‌سازی سیستم کنترلی طراحی شده برای دورزدن تک‌فرمان خودرو پرداخته می‌شود. فرض بر آن است که خودرو در منتهی‌الیه سمت راست خیابان متوقف است و قصد گردش به سمت چپ خیابان را دارد. در ابتدا مسیر حرکتی رفت و سپس مسیر برگشت دورزدن تک‌فرمان خودرو مورد بررسی قرار می‌گیرد.

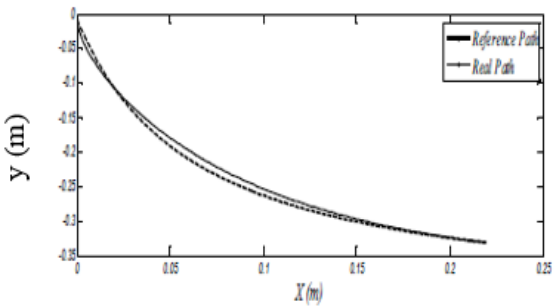
شبیه‌سازی و پیاده‌سازی حرکت ربات شبه‌خودرو بر روی مسیر مرجع و واقعی دورزدن تک‌فرمان خودرو به ترتیب در شکل-۸ (الف) و (ب) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است ربات مورد نظر توانسته است تا با دقت مناسبی مسیر مرجع را تعقیب نماید. خطای حرکتی ربات در راستای محور x و y به ترتیب در شکل-۸ (پ) و (ت) نشان داده شده است. زاویه هدایت فرمان ربات شبه‌خودرو نیز در شکل-۸ (ث) نشان داده شده است. زاویه هدایت فرمان ربات در حالت پیاده‌سازی در بیشترین مقدار خود قرار دارد که با توجه به خاصیت دورزدن تک‌فرمان، قرار گرفتن زاویه فرمان در بیشترین مقدار خود طبیعی است. سرعت مرجع و واقعی دورزدن تک‌فرمان ربات شبه‌خودرو با توجه به قوانین زمانی مطرح شده در طراحی کنترل‌کننده در شکل-۸ (ج) نشان داده شده است. صفر شدن سرعت ربات در نقاط ابتدایی و انتهایی هم در حالت شبیه‌سازی و هم پیاده‌سازی نشان از صحت قوانین زمانی مناسب در طراحی کنترل‌کننده دارد. سطوح لغزش کنترل‌کننده مد لغزشی نیز در شکل-۸ (چ) و (ح) نشان داده شده است.

همانند مسیر رفت، نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی مسیر برگشت دورزدن تک‌فرمان ربات شبه‌خودرو به ترتیب در شکل-۹ (الف) و (ب) نشان داده شده است. با توجه به فرمان‌پذیری کم ربات شبه‌خودرو نسبت

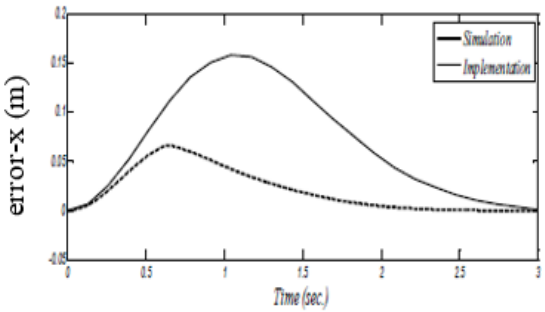
به یک خودروی واقعی، مقداری خطا در قسمت پایانی حرکت رخ داده است. خطای حرکتی ربات شبه‌خودرو در راستای محور x و y به ترتیب در شکل-۹ (پ) و (ت) نشان داده شده است. سرعت و زاویه فرمان ربات شبه‌خودرو نیز در شکل-۹ (ث) و (ج) نشان داده شده است. مجددا توابع زمانی تعریف شده سبب صفر شدن سرعت ربات در نقاط ابتدایی و انتهایی حرکت شده‌اند.



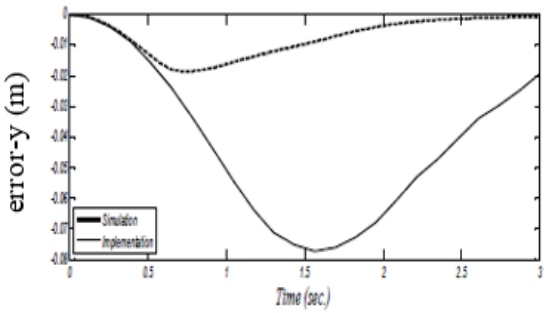
(الف) شبیه‌سازی مسیر مرجع و واقعی ربات



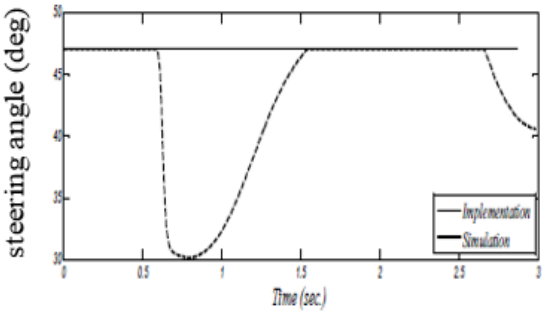
(ب) پیاده‌سازی مسیر مرجع و واقعی ربات



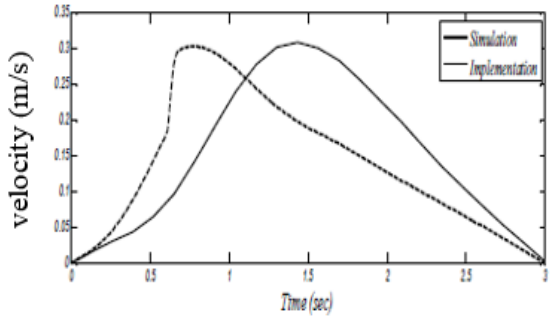
(پ) خطای حرکتی در راستای محور-x



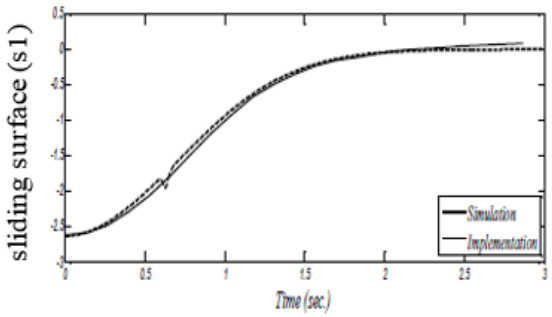
(ت) خطای حرکتی در راستای محور-y



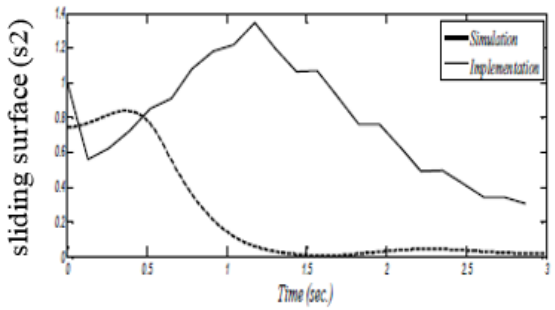
(ث) زاویه هدایت فرمان ربات شبه‌خودرو



(ج) سرعت فرمان ربات شبه‌خودرو

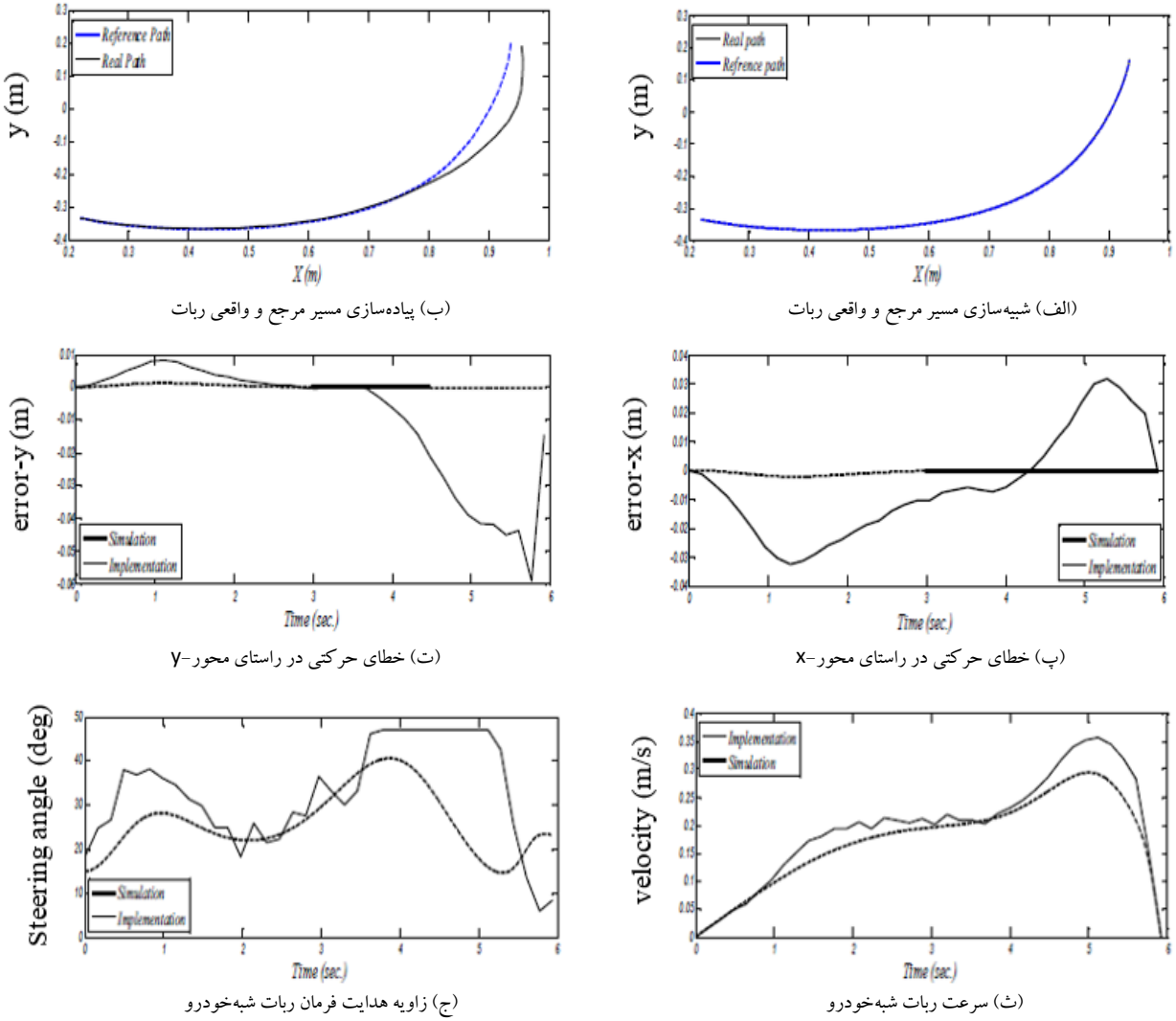


(چ) سطح لغزش کنترل‌کننده (S1)



(ح) سطح لغزش کنترل‌کننده (S2)

شکل-۸: شبیه‌سازی و پیاده‌سازی مسیر رفت دورزدن تک‌فرمان ربات شبه‌خودرو



(الف) شبیه‌سازی مسیر مرجع و واقعی ربات

(ب) پیاده‌سازی مسیر مرجع و واقعی ربات

(پ) خطای حرکتی در راستای محور-x

(ت) خطای حرکتی در راستای محور-y

(ث) سرعت ربات شبه‌خودرو

(ج) زاویه هدایت فرمان ربات شبه‌خودرو

شکل-۹: شبیه‌سازی و پیاده‌سازی مسیر برگشت دورزدن تک‌فرمان ربات شبه‌خودرو

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به کاربردی جدید در زمینه سیستم حمل‌ونقل شهری پرداخته شد و آن سیستم دورزدن خودکار خودرو می‌باشد. در ابتدا قوانین راهنمایی‌ورانندگی در رابطه با دورزدن خودرو از طریق مراجع معتبر بررسی گردید. در ادامه نتایج آزمایشات تجربی بر روی خودروی سمند جهت بدست آوردن اطلاعات لازم جهت طراحی مسیرها و سیستم کنترلی خودکار طراحی شد. سپس مسیرهای مناسب دورزدن تک‌فرمان و سیستم فازی تصمیم‌گیری حرکت خودرو طراحی گردیدند. در ادامه به طراحی سیستم کنترلی مناسب برای تحقق اهداف کنترلی سیستم دورزدن خودکار خودرو پرداخته شد. در نهایت به طراحی و ساخت یک ربات شبه‌خودرو برای پیاده‌سازی نتایج سیستم کنترلی پرداخته شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با پیاده‌سازی عملی این سیستم کنترلی نشان از دقت مناسب سیستم کنترلی طراحی شده دارد.

مراجع

[1] Fairus, M.A., Najib Sy, S., Jamaludin, I.W. and Kamarudin, M., "Development of an Automatic Parallel Parking System for Nonholonomic Mobile Robot," *Electrical, Control and Computer Engineering (INECCE)*, pp. 45-49, 2011.

[2] Vorobieva, H., Glaser, S., Enache, N. and Mammar, S., "Automatic Parallel Parking with Geometric Continuous-Curvature Path Planning," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*, pp. 465-471, 2014

[3] Guoqiang, Z. and Zhao, L.,"A Fuzzy Controller Based on Improved Ant Colony Algorithm for Parallel Automatic Parking," *International Journal of Applied Mathematics and Statistics*, no. 20, pp. 83-93, 2013.

[4] Dong, H., Jin, Sh. and Hou, Z., "Model Free Adaptive Control for Automatic Car Parking

Systems," *Intelligent Control and Automation (WCICA)*, pp. 1769-1774, 2014.

[5] Naderi Samani, N., Danesh, M. and Ghaisari, J., "Parallel Parking of a Car-Like Mobile Robot Based on the P-Domain Path Tracking Controllers," *IET Control Theory & Applications*, vol. 10, no. 5, pp. 564-572, 2016.

[6] Naderi Samani, N., Ghaisari, J. and Danesh, M., "Autonomous Parallel Parking of a Vehicle in a Limited Space Using a RBF Network and a Feedback Linearization Controller," *Computer and Knowledge Engineering (ICCKE)*, pp. 117-122, 2012.

[7] Zhang, S., Simkani, M. and Zadeh, M., "Automatic Vehicle Parallel Parking Design Using Fifth Degree Polynomial Path Planning," *Vehicular Technology Conference*, pp. 1-4, 2011.

[8] Vorobieva, H., Glaser, S., Enache, N. and Mammar, S., "Automatic Parallel Parking in Tiny Spots: Path Planning and Control," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 396-410, 2015.

[9] Cheein, A., Carelli, R., Cruz, C. and Bastos-Filho, T., "SLAM-Based Turning Strategy in Restricted Environments for Car-Like Mobile Robots," *Industrial Technology (ICIT)*, pp. 602-607, 2010.

[10] Egerstedt, M. and Stotsky, A., "Control of a Car-Like Robot Using a Dynamic Model," *IEEE International Conference*, vol. 4, pp. 3273-3278, 1998.

[11] Zhang, S.J. and Rachid, A., "Sliding Mode Controller for Automatic Steering of Vehicles," *The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, vol. 3, pp. 2149-2153, 2001.

[12] Azadi, S. and Taherkhani, Z.,"Autonomous Parallel Parking of a Car Based on Parking Space Detection and Fuzzy Controller," *International Journal of Automotive Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 30-37, 2012.

[13] Pepy, R., Lambert, A. and Mounier, H.,"Path Planning using a Dynamic Vehicle Model," *2nd International Conference on Information & Communication* vol. 1, pp. 781-786, 2006.

[14] Baturone, I., Moreno-Velo, F., Sanchez-solano, S. and Ollero, A., "Automatic design of fuzzy controllers for car-like autonomous robots," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 12, no. 4, pp. 447-465, 2004.

[۱۵] عیدی، ع، ۱۳۸۹، "استراتژی کوتاه‌ترین مسیر در هدایت پویای وسیله نقلیه مبتنی بر معیار سطح سرویس- رویکرد الگوریتم ژنتیک ترکیبی"، *نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید*، شماره ۳، جلد ۲۱.

[۱۶] رضایی، م، محبوب‌خواه، ر و مینایی، م، ۱۳۸۹، "بررسی رفتار دینامیکی خودرو و پاسخ آن به انواع مانورهای تغییر مسیر"، *یازدهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران*.