



ارائه یک الگوریتم جدید برای پارک موازی خودرو مبتنی بر طراحی مسیر با انحنای پیوسته کلو توئید

سحاب فرجاد باستانی^۱، علیرضا خدایاری^{۲*}

^۱ دانشکده مهندسی مکترونیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳ اردیبهشت ۱۳۹۵
بازنگری: ۲۱ شهریور ۱۳۹۵
پذیرش: ۴ مهر ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۹ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

پارک خودرو
پارک موازی
منحنی کلو توئید
طراحی مسیر حرکت
پیوسته سازی مسیر

چکیده: یکی از دستاوردهای صنعت خودرو در سال‌های اخیر اضافه نمودن سامانه انجام پارک خودوند خودرو می‌باشد. در این مقاله با ارائه یک الگوریتم جدید سعی شده تا با استفاده از خواص منحنی کلو توئید، مسیر قابل پیمایشی برای حرکت خودرو به سمت جایگاه پارک طراحی شود. حرکت خودرو در این مسیر هموار به صورت پیوسته، با سرعت ثابت و ایمن است. با استفاده از این مسیر سامانه قادر است خودرو را تنها با یک مانور در فضایی برابر با $1/6$ برابر طول خودرو پارک نماید. از مزایای الگوریتم پیشنهادی نحوه کنترل حرکت خودرو برای انجام عملیات پارک می‌باشد. بدین صورت که با تبدیل مسأله کنترل حرکت خودرو بر روی مسیر دلخواه به مسأله کنترل حرکت خودرو با سرعت معین، میزان خطای ایجاد شده در فرایند حرکت خودرو به سمت محل مورد نظر به حداقل ممکن رسیده است. با استفاده از این الگوریتم خودرو برای انجام عملیات پارک با سرعتی کاملاً یکنواخت و بر روی مسیری هموار حرکت خواهد نمود؛ بنابراین مسیر طراحی شده در مقایسه با روش‌های دیگر طراحی مسیر از راحتی سفر بیشتری برخوردار است. نتایج حاصل از پیاده سازی الگوریتم برای شرایط واقعی یک خودرو، دقت بالا و صحت عملکرد این الگوریتم را در مقایسه با سایر سامانه‌ها نشان می‌دهد.

این وظایف عبارت از تشخیص محل پارک، طراحی مسیر حرکت به سمت محل پارک و کنترل حرکت خودرو بر روی مسیر طراحی شده تا رسیدن به نقطه هدف می‌باشند.

در این میان، مرحله دوم فرآیند پارک خودرو که به عنوان طراحی مسیر حرکت مطرح شده است، دارای پیچیدگی‌ها و محدودیت‌هایی می‌باشد. این محدودیت‌ها غالباً به علت ساختار غیرهولونومیک^۳ حرکت خودروها و همچنین وجود قابلیت‌ها و محدوده‌هایی در طراحی اولیه خودرو توسط خودروسازها ایجاد می‌شود؛ همچنین می‌توان به محدودیت در زاویه چرخش فرمان، گشتاور متفاوت مورد نیاز برای حرکت دادن فرمان و به سبب آن سرعت‌های متفاوت برای چرخش فرمان و... اشاره نمود. از این‌رو در سال‌های گذشته پژوهش‌های زیادی برای طراحی و ایجاد مسیر حرکت خودرو انجام شده است. غالباً در این پژوهش‌ها روش‌های طراحی مسیر به سه دسته روش‌های طراحی هندسی^۴، مثلثاتی^۵ و جبری^۶ تقسیم‌بندی می‌شوند.

در سال ۱۹۹۰ ریدز و شپ مسیری بهینه را برای خودرویی که هم به سمت جلو و هم به سمت عقب می‌تواند حرکت نماید ارائه کردند [۷]. در طراحی این مسیر از کمان‌ها و خطوط استفاده شده بود و این مسیر بهینه‌ترین

۱- مقدمه

امروزه سامانه‌های هوشمند متنوعی برای فراهم نمودن راحتی و آرامش انسان‌ها به وجود آمده‌اند. یکی از زمینه‌های مورد توجه در سال‌های اخیر، سامانه‌های حمل و نقل زمینی و مخصوصاً فراهم شدن آسایش مسافران خودروهای سواری است. در این میان سامانه‌هایی برای کنترل حرکت خودرو در شرایط خاص از جمله هنگام پارک خودرو ارائه شده‌اند. سامانه‌های پارک خودوند خودرو^۱ به سامانه‌هایی اطلاق می‌شود که در آنها خودرو بدون دخالت راننده قادر خواهد بود محل پارک را تشخیص دهد، با ایمنی کامل به سمت محل پارک حرکت نموده و به درستی در جایگاه پارک قرار گیرد [۳-۱]. برای انجام عملیات پارک سامانه‌های دیگری نیز ارائه شده‌اند که در آنها خودرو با استفاده از راهنمایی راننده برای تشخیص محل پارک، قادر به حرکت به آن سمت به صورت خودوند می‌باشد [۴، ۵] و یا در آنها خودرو برای تنظیم سرعت خود به همکاری راننده نیاز دارد و سامانه تنها کنترل جهت‌گیری را بر عهده دارد [۶]، این‌گونه سامانه‌ها را سامانه‌های پارک نیمه خودوند^۲ می‌نامند. در پژوهش‌های دانشگاهی و فعالیتهای صنعتی، فرآیند اصلی در سامانه‌های پارک خودرو به سه مرحله کلی تقسیم‌بندی می‌شود.

3 Non holonomic

4 Geometric Path

5 Trigonometric Path

6 Polynomial Path

1 Autonomous Parking Assistant Systems - APAS

2 Semi APAS

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: khodayari@pardisiu.ac.ir

به منحنی مسیر کلوتوئید بود. در سال ۲۰۰۸ کاردوس و کیس با استفاده از پارامتر زمان در محاسبات کلوتوئید روابط مفیدی را برای محاسبه و رسم مسیر برای خودرو ارائه نمودند. این مدل برای طراحی مسیر از مسیرهای از پیش تعیین شده برای مدل سازی شرایط پارک خودرو استفاده می کند [۱۵]. روش های هندسی به دلیل نیاز به انجام محاسبات کم و قابلیت استفاده لحظه ای^۵ همواره مورد توجه محققان قرار گرفته اند. تنها مشکل در استفاده از این مسیرها، عدم پیوستگی حرکت بوده و در این شرایط خودرو ملزم به توقف در میانه مسیر برای تغییر جهت فرمان است. در صورت ارائه الگوریتم مناسب برای پیوسته سازی و تصحیح این روش ها، می توان مسیر ایمن و پیوسته ای را برای حرکت خودرو ایجاد نمود.

در قسمت دوم این مقاله الگوریتم جدیدی برای طراحی مسیر حرکت خودرو به سمت محل پارک ارائه شده است. در این الگوریتم با استفاده از خواص منحنی کلوتوئید خودرو بدون دخالت انسان به سمت محل پارک حرکت می نماید. در بخش سوم با استفاده از مشخصات فنی خودرو پژو ۲۰۶ و شبیه سازی کامپیوتری روند پارک خودرو در نرم افزار متلب^۶، کارایی الگوریتم پیشنهادی نشان داده شده است. در بخش چهارم با محاسبه مقدار خطای ایجاد شده در مسیر به وجود آمده صحت عملکرد سامانه مورد تایید قرار گرفته و در بخش نهایی نتایج عملکرد الگوریتم پیشنهادی با ۳ نمونه مشابه مقایسه شده است.

۲- الگوریتم پارک موازی مبتنی بر منحنی کلوتوئید

در الگوریتم پیشنهادی ابتدا مسیری ایمن و قابل پیمایش برای حرکت خودرو با توجه به مشخصات فنی آن طراحی می شود. این مسیر با استفاده از یک منحنی کلوتوئید ایجاد شده و به علت پیوستگی مسیر طراحی شده، خودرو قادر به حرکت یکنواخت بر روی آن می باشد. سپس با استفاده از مشخصه اصلی منحنی کلوتوئید، الگوریتم جدیدی برای حرکت خودرو به سمت محل پارک معرفی می شود. در این الگوریتم خودرو می تواند با هر فاصله ای نسبت به خودرو کناری عملیات پارک را شروع نماید و فقط با یک حرکت یکنواخت رو به عقب، به نقطه معین پارک برسد.

۲-۱- مدل سینماتیکی خودرو

در سال ۱۹۹۳ راشن و همکاران یک مدل سینماتیکی برای تحلیل رفتار حرکت یک خودرو همراه با کشنده ارائه نمودند [۱۶]. در مدل ایشان ورودی های حرکتی عبارت از سرعت خطی و سرعت فرمان دهی خودرو کشنده در نظر گرفته شده است. در سال ۲۰۰۸ کاردوس و کیس با ایجاد تغییراتی در مدل راشن به مدلی مطابق رابطه (۱) دست یافتند که در آن سرعت خطی خودرو و همچنین سرعت تغییرات انحنای مسیر حرکت خودرو، ورودی های حرکتی را تشکیل داده است [۶].

و کوتاه ترین مسیر حرکت هندسی بوده است. مشکل اساسی در این پژوهش، عدم پیوستگی مسیر می باشد که باعث توقف خودرو برای تغییر جهت فرمان شده و روند حرکت و کنترل را سخت می نماید. در سال ۱۹۹۶ لوگیر و همکاران مسیری بر مبنای روابط تانژانتی را طراحی و ارائه نمودند که با وجود پیوستگی، مسیر مناسبی را با توجه به ساختار غیرهولونومیک بودن حرکت خودروها فراهم نمی آورد [۸]. در سال ۲۰۱۲ ژاو و همکاران با استفاده از منحنی بزیر^۱ توانستند منحنی تانژانت را هموار نموده و با سامانه فرمان دهی خودرو مطابقت دهند و مسیری ایمن برای حرکت خودرو ایجاد نمایند [۹].

در سال های اخیر محققان با استفاده از منحنی های درجه پنج و همچنین روش های محاسباتی برای پیوسته سازی منحنی های هندسی، مسیرهای مناسب و کنترل پذیری را جهت حرکت خودروها به سمت محل پارک ارائه نموده اند. در سال ۲۰۱۱ شوئن و سیمخوانی با استفاده از قابلیت همواری و پیوستگی منحنی درجه پنج توانستند مسیر مناسبی برای حرکت ارائه نمایند [۱۰]. در مدل ارائه شده روشی به کار گرفته شده که در آن برای هر نقطه از مسیر، منحنی جدیدی برای پارک خودرو، با توجه به موانع اطراف یا خطاهای حرکت، ایجاد می شود. در سال ۲۰۱۴، ماراسیگان و همکاران روشی که در آن با استفاده از منحنی چند جمله ای درجه پنج، حالت های متعددی در شرایط اولیه متفاوت آزمایشگاهی به عنوان داده آموزشی برای الگوریتم طراحی مسیر تهیه شده بود ارائه نمودند [۲]. در انتها و در شرایط واقعی از الگوریتم شبکه عصبی برای انتخاب بهترین مسیر از میان مسیرهای ممکن استفاده می نمودند. در سال ۲۰۰۸ هسو و لیو با استفاده از کمان های دایروی^۲ روشی هندسی برای طراحی مسیر پارک ارائه نمودند [۵]. در این روش ابتدا زوایای فرمان در مراحل ابتدایی و انتهایی محاسبه شده و سپس خودرو با سرعت ثابت حرکت می نماید و سامانه با رؤیت موانع اطراف میزان تغییر زاویه فرمان را محاسبه می نماید. این روش مسیری غیر هموار را ایجاد می نماید. چنگ و ژانگ در سال ۲۰۱۳ یک روش هندسی ارائه کردند که بتواند مسیر پارک را از هر نقطه دلخواه شروع نماید [۱۱]. در این روش ایشان خاصیت هموار بودن مسیر طراحی شده را از دست داده اند. همچنین در سال ۲۰۱۳ مین و چوی با استفاده از کمان های دایروی، مسیری غیر پیوسته برای پارک خودرو ایجاد نمودند [۱۲]، تفاوت مسیر ایجاد شده با مسیر طراحی شده توسط ریدز و شپ در عدم استفاده از خطوط در میانه مسیر قوسی شکل بود. در سال ۲۰۰۴ فریچارد و شوور با استفاده از منحنی های کلوتوئید^۳ توانستند منحنی ارائه شده توسط ریدز و شپ را هموار و پیوسته نموده و برای حرکت ربات ماز^۴ از آن استفاده نمایند [۱۳]. در سال ۲۰۱۳ وربریا و همکاران توانستند با استفاده از منحنی کلوتوئید، مسیری هموار و پیوسته برای حرکت خودرو به سمت محل پارک ایجاد نمایند [۱۴]. مشکل اساسی این روش، ناتوانی در اجرای لحظه ای آن در شرایط حقیقی به علت لزوم محاسبات زیاد مربوط

1 Bezier

2 Circular Arcs

3 Clothoid Curves

4 Maze

این رابطه به عنوان رابطه اصلی محاسبه منحنی کلوئوئید استفاده شده که در آن α ضریب افزایش شعاع انحنا است و تندی یا ضریب کلوئوئید نامیده می‌شود. با توجه به رابطه منحنی کلوئوئید، هرچه مقدار عددی α بزرگ‌تر باشد، این منحنی زودتر خم شده و شکل نهایی ایجاد شده کوچکتر است. فرم کلی منحنی کلوئوئید در شکل ۲ نمایش داده شده است.

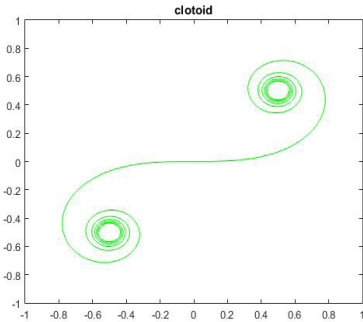


Fig. 2. Clothoid curvature

شکل ۲: فرم کلی منحنی کلوئوئید

اگر میزان تغییرات خمیدگی (k) و مسیر پیمایش شده (s) بر حسب زمان نوشته شود، رابطه (۲) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$k(t) = \alpha \cdot s(t) + k_0 \quad (3)$$

مقدار مسیر پیمایش شده به علت ثابت بودن سرعت حرکت برابر است با:

$$s(t) = v \cdot t \quad (4)$$

با جایگذاری (۴) در (۳) نتیجه می‌شود:

$$k(t) = \alpha \cdot v \cdot t + k_0 \quad (5)$$

از رابطه (۱) می‌توان نوشت:

$$k = \sigma \cdot t + k_0 \quad (6)$$

از مقایسه دو رابطه (۵) و (۶) و با صرف نظر از k_0 ، نتیجه می‌شود:

$$\alpha = \frac{\sigma}{v} \quad (7)$$

رابطه (۷) نشان می‌دهد که مقدار تندی مسیر کلوئوئید ایجاد شده برای حرکت خودرو (α) وابستگی مستقیم به سرعت فرمان‌دهی و نسبت معکوس با سرعت خودرو دارد.

این موضوع بیانگر این مسأله است که ورودی‌های در نظر گرفته شده برای ایجاد مسیر پارک و کنترل حرکت خودرو یکسان می‌باشند. با در نظر گرفتن مقدار مناسب برای v و همچنین در نظر گرفتن سرعت فرمان‌دهی مناسب که باعث به وجود آمدن σ مناسب می‌شود، می‌توان مسیر پارک مناسب را طراحی نمود.

۲-۳- قیود حرکتی خودرو

مسیر مناسب برای حرکت خودرو بستگی به قابلیت‌های حرکتی خودروی مورد نظر دارد. برای بیان این قابلیت‌های حرکتی از پارامترهایی به عنوان قیود حرکتی خودرو استفاده می‌شود. در جدول ۱ قیدهای ایجاد شده مربوط و روش محاسبه پارامتر بیان شده است.

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \\ \dot{k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) \\ \sin(\psi) \\ k \\ 0 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \sigma \quad (1)$$

در شکل ۱ خودرو V که با سرعت خطی ثابت v و در راستای ψ حرکت می‌نماید، نمایش داده شده است. تمامی متغیرهای حالت هنگام حرکت خودرو بر روی منحنی k ، برای نقطه وسط محور عقب خودرو که با حرف P مشخص شده است در نظر گرفته شده‌اند. مقدار زاویه جهت‌گیری خودرو در صفحه مختصات $x-y$ با حرف ψ و زاویه فرمان خودرو نیز با حرف ϕ مشخص شده است. با توجه به زاویه فرمان ϕ ، خودرو حول نقطه C در صفحه حرکت می‌نماید. میزان خمیدگی با پارامتر k نشان داده شده و برابر با معکوس شعاع دوران خودرو (R) حول نقطه C است. چرخش خودرو به صورت علامت‌دار نمایش داده می‌شود که بستگی به جهت چرخش خودرو به سمت راست یا چپ دارد.

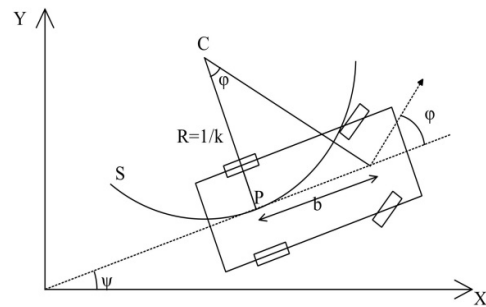


Fig. 1. Coordinates and orientations of car in X-Y plane

شکل ۱: نمایش جهت‌گیری و مختصات خودرو در صفحه X-Y

در این مدل، مقدار تغییرات خمیدگی مسیر حرکت خودرو نسبت به زمان که با حرف σ نمایش داده شده است، وابسته به مقدار سرعت فرمان‌دهی خودرو _ یعنی $\dot{\phi}$ _ می‌باشد. در الگوریتم ارائه شده، برای ایجاد مسیرهای حرکت متفاوت از تغییر مقدار سرعت فرمان‌دهی خودرو و تغییر شعاع انحنا استفاده شده است.

۲-۲- منحنی مسیر کلوئوئید

کلوئوئیدها منحنی‌هایی هستند که در آن‌ها با افزایش طول حرکت، مقدار شعاع انحنا به صورت خطی افزایش می‌یابد [۱۷]. طول مسیر منحنی کلوئوئید و میزان خمیدگی مسیر با k و S مشخص می‌شوند. با در نظر گرفتن ضریب ثابت α به عنوان ثابت کلوئوئید، رابطه میزان تغییرات خمیدگی منحنی بر حسب طول مسیر پیمایش شده، به صورت رابطه (۲) نوشته می‌شود [۱۷]:

$$k = \alpha \cdot s \quad (2)$$

جدول ۱: قیدهای ایجادشده و روش محاسبه هر کدام

Table 1. Calculations of movement constraints

روش محاسبه	قید ایجادشده	
اندازه‌گیری از روی خودرو	حداکثر زاویه چرخ‌ها	φ_{\max}
$\frac{b}{\tan(\varphi_{\max})}$	حداقل شعاع چرخش خودرو	R_{\min}
$\frac{1}{R_{\min}}$	بیشترین مقدار خمیدگی مسیر حرکت	k_{\max}
اندازه‌گیری از روی خودرو	حداکثر سرعت چرخش چرخ‌های خودرو	$\dot{\varphi}_{\max}$
$\sigma_{\max} = \frac{\dot{\varphi}_{\max}}{b \cdot \cos(\varphi_{\max})^2}$	حداکثر سرعت تغییرات خمیدگی بر حسب زمان	σ_{\max}

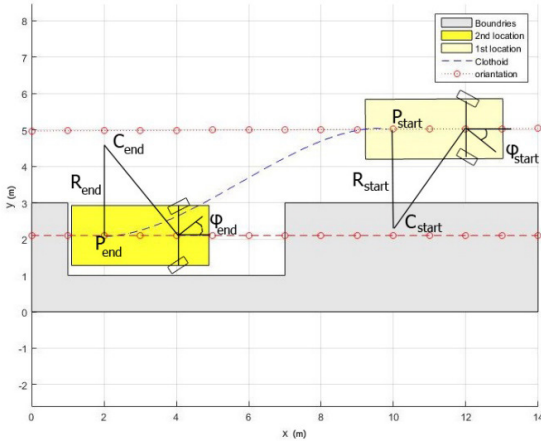


Fig. 3. Clothoid curvature path for park maneuver

شکل ۳: نمایش مسیر حرکت توسط منحنی کلوئوئید

و مقدار پارامترهای R_{end} و k_{end} را مطابق شکل ۳ به دست آورد. مقادیر R_{start} ، C_{start} ، ψ_{start} ، P_{start} و k_{start} با استفاده از اطلاعات به دست آمده از حسگرها و قیود حرکتی خودرو محاسبه می‌شوند. مسیر نهایی متشکل از یک منحنی کلوئوئید یکپارچه می‌باشد که خمیدگی آن برای پارک در سمت راست خیابان، از مقدار منفی $k_{start} = k(\varphi_{start})$ شروع شده و به مقدار نهایی مثبت $k_{end} = k(\varphi_{end})$ پایان می‌یابد. در ادامه ابتدا روش محاسبه متغیرهای حالت برای یک موقعیت و جهت‌گیری مشخص ارائه شده و سپس با محاسبه زمان حضور خودرو در هر نقطه از مسیر، چگونگی محاسبه مختصات تمام نقاط مسیر حرکت خودرو به سمت جایگاه پارک و جهت‌گیری خودرو در آن نقاط توضیح داده شده است. با حرکت خودرو روی منحنی کلوئوئید، مختصات حرکتی هر نقطه از مسیر با استفاده از روابط زیر [۱۵] محاسبه می‌شود:

$$x(t_i) = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} S_f \left(\frac{k(t_i)}{\sqrt{\pi\alpha}} \right) \quad (9)$$

$$y(t_i) = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} C_f \left(\frac{k(t_i)}{\sqrt{\pi\alpha}} \right) \quad (10)$$

$$\psi(t_i) = \frac{k(t_i)^2}{2\alpha} \quad (11)$$

$$k(t_i) = \frac{\tan(\varphi(t_i))}{b} \quad (12)$$

که مقادیر C_f و S_f برابر انتگرال فرسنل^۲ بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$C_f(x) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi}{2}u^2\right) du \quad (13)$$

$$S_f(x) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi}{2}u^2\right) du \quad (14)$$

با استفاده از روابط بالا می‌توان مختصات، جهت‌گیری و خمیدگی هر نقطه از مسیر را برحسب زمان حضور خودرو در آن نقطه محاسبه نمود.

علاوه بر پارامترهای بیان شده در جدول ۱، ساختار حرکتی غیرهولونومیک^۱ خودرو، قید جدیدی را برای حرکت ایجاد نموده است که با توجه به آن، خودرو نمی‌تواند در هر مختصات $X-Y$ دلخواه، دارای جهت‌گیری دلخواه ψ باشد. ارتباط بین مؤلفه‌های مختصات و جهت‌گیری خودرو در هر لحظه از رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$y \cos(\psi) - x \sin(\psi) = 0 \quad (8)$$

در الگوریتم ارائه شده با در نظر گرفتن این پارامترها برای خودرو، مسیری ایجادشده است که خودرو می‌تواند به راحتی بر روی آن حرکت نموده و در نهایت به موقعیت و جهت‌گیری دلخواه برسد.

۲-۴ طراحی مسیر

هدف از طراحی مسیر، ایجاد مسیری یکپارچه، پیوسته و ایمن برای حرکت خودرو می‌باشد. بدین معنا که مسیر مناسب برای حرکت به سمت جایگاه پارک اولاً مسیری است که شعاع انحنای آن به صورت پیوسته تغییر کند، ثانیاً حرکت خودرو بر روی آن مسیر ایمن بوده؛ به نحوی که از برخورد خودرو با موانع اطراف جلوگیری شود.

برای تأمین ایمنی مسیر لازم است ابتدا شرایط مرزهای دقیق جایگاه پارک، موقعیت و جهت‌گیری خودرو نسبت به آن محل توسط حسگرهای موجود مشخص شوند. بعد از مشخص شدن مرزهای محل پارک، موقعیت و جهت‌گیری خودرو در مختصات $X-Y$ باید مسیری یکپارچه مطابق با شکل ۳ طراحی شود. بدین منظور مختصات نقطه انتهایی قرارگیری خودرو که خودرو قرار است در نهایت آنجا قرار بگیرد (P_{end}) مشخص می‌شود، با دانستن مختصات نقطه P_{end} و جهت‌گیری نهایی خودرو در این نقطه - که برابر با $\psi_{end} = 0$ می‌باشد - و همین‌طور با در نظر داشتن φ_{end} می‌توان با استفاده از روابط حاکم بر قیود حرکتی خودرو (بخش ۲-۳)، مختصات C_{end}

2 Fresnel Integral

1 Nonholonomic

مسیر را در هر نقطه به ازای t متناظر آن نقطه ($t_i, i = 1, \dots, n$) به دست آورد. به طور خلاصه روند انجام محاسبات برای طراحی مسیر در شکل ۵ مشخص شده است.

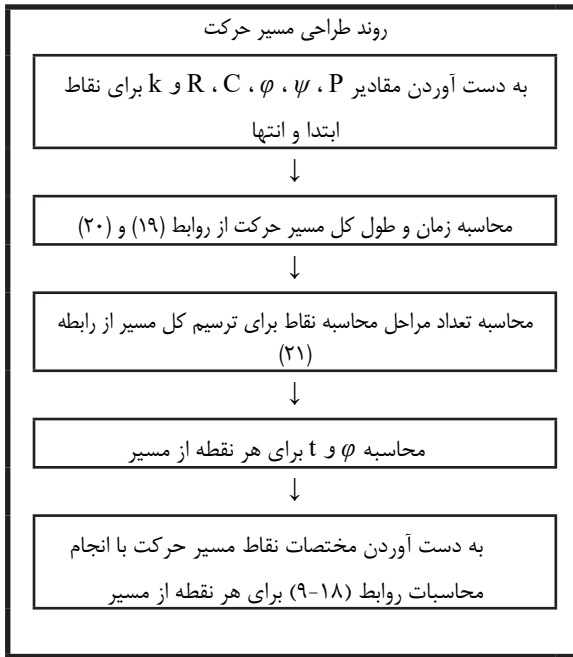


Fig. 5. Path planning flowchart

شکل ۵: روند انجام محاسبات برای ترسیم مسیر حرکت

۲-۵- الگوریتم جدید پارک خودرو

در این بخش به چگونگی حرکت خودرو برای پیدا کردن جایگاه مناسب برای پارک و سپس طراحی مسیر و حرکت روی آن پرداخته شده است. برای استفاده از الگوریتم ارائه شده در ابتدا لازم است راننده قبل از رسیدن به جایگاه پارک سامانه را فعال نموده و سپس با سرعت ثابت حرکت نماید. در این الگوریتم همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، هرگاه حسگر متصل شده در سپر جلوی خودرو به نقطه P_1 برسد، سامانه متوجه نقطه آغازین فضای خالی به فاصله W_r از کناره خودرو شده و شروع جایگاه پارک را تشخیص می‌دهد. با ادامه حرکت خودرو و رسیدن حسگر به نقطه P_2 ، با محاسبه مسافت طی شده، فاصله طولی جایگاه پارک (L_p) نیز تعیین می‌شود. حسگر مورد استفاده در سامانه قادر به اندازه‌گیری فاصله عرضی خودرو از خودروی جلوی جایگاه پارک (W_s) می‌باشد. سپس با توجه به دو اندازه فاصله طولی پارک (L_p) و فاصله عرضی خودرو (W_s) از مانع جلویی جایگاه پارک، مسیر مناسب طراحی می‌شود.

همانطور که در قبل بیان شد، با تغییر ضریب کلوئوئید (α) می‌توان سرعت خم شدن و در نتیجه اندازه منحنی کلوئوئید را تغییر داد. همچنین رابطه (۷) نشان می‌دهد که ضریب کلوئوئید به مقدار σ و وابسته است؛ بنابراین با کم و زیاد نمودن این مقادیر اندازه منحنی مسیر کلوئوئید تغییر می‌نماید. در الگوریتم ارائه شده از این ویژگی برای طراحی مسیر با شرایط اولیه متفاوت استفاده می‌شود.

برای محاسبه مقادیر φ ، k ، σ و α از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$\varphi(t_i) = \dot{\varphi} \cdot t_i + \varphi_{end} \quad (15)$$

$$k(\varphi(t_i)) = \frac{\tan(\varphi(t_i))}{b} \quad (16)$$

$$\sigma(\varphi(t_i)) = \frac{\dot{\varphi}}{b \cdot (\cos(\varphi(t_i)))^2} \quad (17)$$

$$\alpha(\varphi(t_i)) = \frac{\sigma(\varphi(t_i))}{v} \quad (18)$$

با در نظر گرفتن مقدار مناسب ثابت برای $\dot{\varphi}$ ، مدت زمان T لازم برای حرکت از وضعیت P_{start} به P_{end} از رابطه (۱۹) به دست می‌آید:

$$\varphi_{end} = \dot{\varphi} \cdot T + \varphi_{start} \rightarrow T = \frac{\varphi_{end} - \varphi_{start}}{\dot{\varphi}} \quad (19)$$

برای محاسبه مختصات و جهت‌گیری خودرو در تمام نقاط مسیر باید زمان حضور خودرو در هر نقطه محاسبه شود تا با استفاده از روابط (۱۲-۹) بتوان در هر لحظه مقادیر مربوط به مختصات، جهت‌گیری و خمیدگی مسیر را در هر نقطه محاسبه نمود. بدین منظور ابتدا با استفاده از رابطه (۱۹) مدت زمان لازم برای حرکت از P_{start} به P_{end} محاسبه شده و T نامیده می‌شود.

برای رسم کامل مسیر، محاسبات برای نقاطی به فاصله ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به ثابت بودن سرعت خودرو (v)، کل مسافت طی شده در مدت زمان T ثانیه برابر با L متر می‌باشد.

$$L = vT \quad (20)$$

بنابراین برای تعیین تعداد مراحل محاسبه داریم:

$$n = \frac{L}{0.1} = 10L \quad (21)$$

بنابراین با ۱۰ مرتبه محاسبه روابط (۱۸-۹) به ازای هر یک متر از طول مسیر می‌توان تمام نقاط مسیر را در صفحه مختصات $X-Y$ رسم نمود. برای این کار همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود با توجه به خطی بودن رابطه بین زاویه فرمان و زمان، کفایت بازه عددی $[\varphi_{end}, \varphi_{start}]$ به n قسمت تقسیم شده و مقادیر مربوط به مختصات، جهت‌گیری و خمیدگی

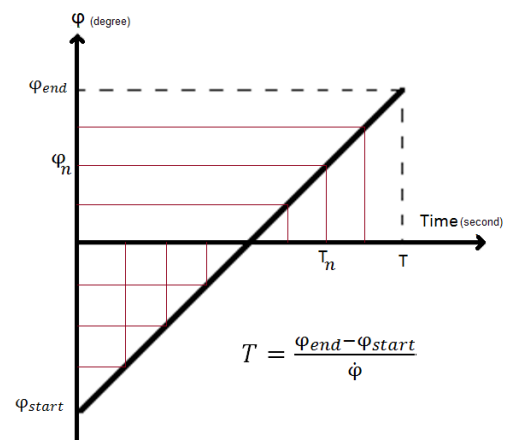


Fig. 6. Φ changes over time

شکل ۴: تغییرات φ نسبت به زمان

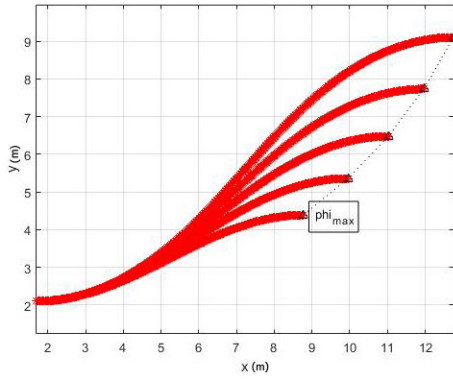


Fig. 8. paths whit different values of $\phi < \phi_{max}$

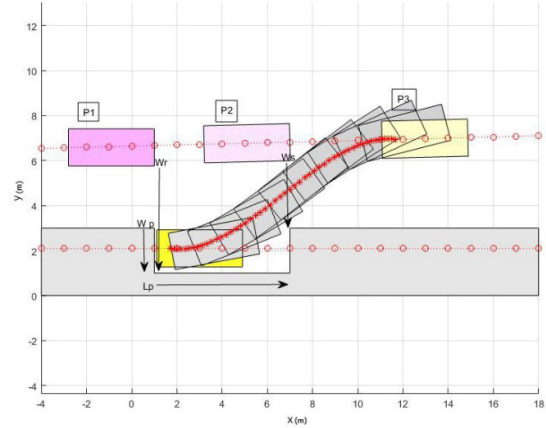


Fig. 6. parallel parking steps

شکل ۶: نمایش مراحل پارک خودرو

شکل ۸: مسیره‌های حرکت خودرو برای پارک با سرعت‌های فرمان‌دهی کمتر از ϕ_{max}

با توجه به مطالب بالا الگوریتم پارک به صورت زیر خلاصه می‌شود: در ابتدا و قبل از رسیدن خودرو به جایگاه پارک، راننده سامانه را فعال نموده و سپس با سرعت ثابت شروع به حرکت می‌نماید. بعد از رسیدن خودرو به نقطه P_2 و حصول اطمینان سامانه از مناسب بودن فاصله طولی فضای پارک، با توجه به فاصله عرضی خودرو از مانع جلویی جایگاه پارک، سامانه مکان اولیه مناسب (P_3) را برای حرکت به سمت جایگاه پارک با استفاده از منحنی درجه دوم برازش شده تعیین می‌نماید و به محض رسیدن به نقطه P_3 راننده را مطلع نموده و با انتخاب α مناسب کنترل حرکت به سمت محل پارک را به دست می‌گیرد. (شکل ۹)

مسیر ایجادشده بر مبنای حرکت خودرو با سرعت ثابت طراحی شده است. با در نظر گرفتن بیشترین سرعت فرمان‌دهی خودرو (ϕ_{max}) مسیر حرکت به صورت شکل ۷ ایجاد می‌شود. در این حالت خودرو با کمترین فاصله عرضی به محل پارک وارد می‌شود. همچنین در این حالت به بیشترین فاصله طولی جایگاه پارک نیاز است.

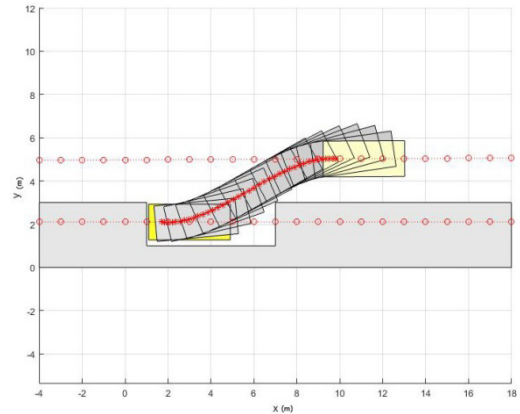


Fig. 7. Path designed by ϕ_{max}

شکل ۷: مسیر حرکت خودرو برای پارک با حداکثر سرعت فرمان‌دهی

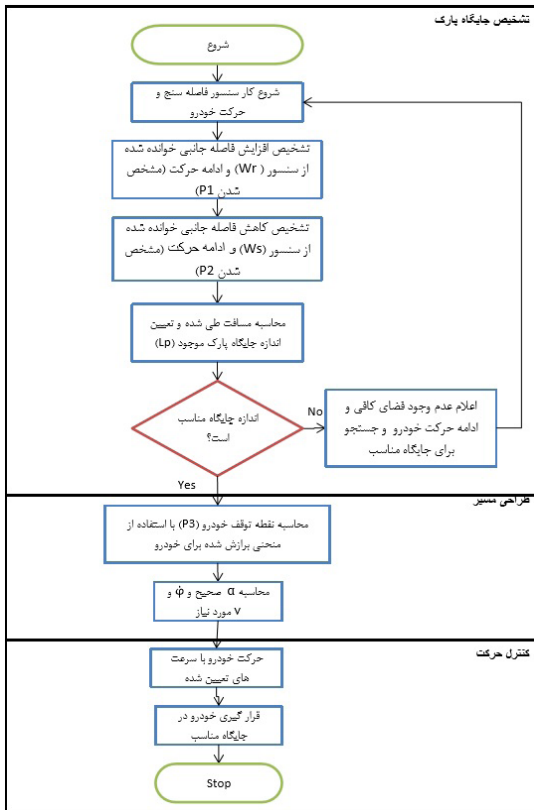


Fig. 9. Parking flowchart with new algorithm

شکل ۹: الگوریتم ارائه شده برای پارک موازی خودرو

حال اگر مقدار سرعت فرمان‌دهی خودرو کمتر در نظر گرفته شود، خودرو فاصله عرضی بیشتری نسبت به حالت قبل ($Wr_2 > Wr_1$) و همچنین به همین نسبت فاصله طولی کمتری ($Lp_2 < Lp_1$) برای انجام عملیات پارک نیاز دارد. در شکل ۸ نقطه‌چین مشکی رنگ نشان‌دهنده شرایط اولیه متفاوت به ازای ϕ های متفاوت است.

منحنی نقطه‌چین مشکی رنگ ارتباط بین ϕ و W_s خودرو را نشان می‌دهد. یعنی در الگوریتم پیشنهادی با استفاده از این منحنی، مقدار ϕ مطلوب برای پارک خودرو در مکان مناسب، به ازای فاصله W_s موجود بین خودرو و مانع کناری به دست می‌آید. این منحنی برای هر خودرو منحصر به فرد بوده و متناسب با قیود حرکتی خودرو تغییر می‌نماید. برای به دست آوردن ϕ مناسب به ازای هر W_s از برازش یک منحنی بر روی خط چین مشکی رنگ استفاده شده است.

۳- شبیه‌سازی کامپیوتری و نتایج شبیه‌سازی

در این پژوهش محاسبات طراحی مسیری با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام شده است. برای این منظور از ابعاد و مشخصات فنی خودرو پژو ۲۰۶ در آزمایشگاه سامانه‌های پیشرفته کنترلی خودرو دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی استفاده شده است. این خودرو برای پیشبرد اهداف تحقیقاتی آزمایشگاهی و صنعتی و ارائه خودرو کاملاً خودوند در آینده نزدیک در نظر گرفته شده است.



Fig. 10. We use a Peugeot 206 for this project

شکل ۱۰: خودرو پژو ۲۰۶ مورد استفاده در این پژوهش

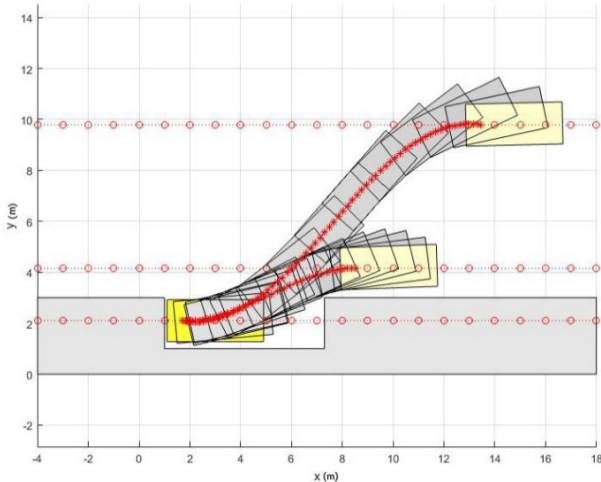


Fig. 11. Path planning for Peugeot 206

شکل ۱۱: نمایش فضای لازم برای پارک خودرو پژو ۲۰۶

برای پارک خودرو کمتر از ۱/۶ برابر طول خودرو می‌باشد.

بدیهی است که حداکثر فاصله عرضی خودرو از مانع جلویی به بیشترین مسافتی که حسگر خودرو قادر به تشخیص آن می‌باشد، بستگی دارد، یعنی بیشترین فاصله مجاز برای خودرو ۲۰۶ که به عرض جایگاه پارک ۲ متری نیاز دارد برابر است با:

$$WS_{Max} = 2 - \text{برد حسگر} \quad (22)$$

در ادامه، مسیر به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی و مسیر حقیقی خودرو که با استفاده از روابط سینماتیکی به دست آمده‌اند، مقایسه شده است. برای این منظور در ابتدا فرضی $WS = 1/1(m)$ برای فاصله عرضی خودرو ۲۰۶ از مانع کناری در نظر گرفته شده و با استفاده از منحنی درجه دوم به دست آمده، مقدار $\dot{\varphi}$ مناسب تعیین می‌شود. متغیرهای حالت $(x_d^i$ و y_d^i) برای $(i = 1, \dots, n)$ برای هر یک از نقاط مسیر طراحی شده، از روابط (۹-۱۸) محاسبه شده‌اند، سپس با استفاده از متغیر حالت w_d که از رابطه (۱۱) برای هر مرحله از مسیر به دست آمده و استفاده از انتگرال‌گیری عددی رابطه (۱) به روش آدامز - بشفورث مرتبه دوم مقادیر x_r^i و y_r^i برای $i = 1, \dots, n$

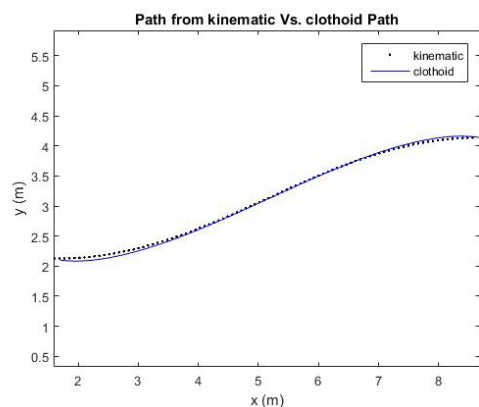


Fig. 12. Compare of path with clothoid curvature (blue) and path with kinematic equations (red)

شکل ۱۲: مقایسه مسیر طراحی شده با استفاده از منحنی کلوئوئید (منحنی آبی) و مسیر به دست آمده از روابط سینماتیکی (خط چین مشکی)

مقادیر در نظر گرفته شده برای اعمال در محاسبات مربوط به طراحی مسیری با توجه به مشخصه‌های خودرو واقعی در جدول ۲ آمده است:

جدول ۲: مشخصات خودرو پژو ۲۰۶

Table 2. Peugeot 206 dimensions and properties

مقدار	نماد	مشخصه خودرو
۱/۶۵ متر	W	عرض
۳/۸ متر	L	طول
۲/۴۵ متر	b	فاصله دو محور
± 30 درجه	φ_{max}	دامنه تغییرات زاویه چرخ جلو
۴ متر	R_{min}	کمترین شعاع چرخش
۱۵/۷۵ درجه بر ثانیه	$\dot{\varphi}_{max}$	حداکثر سرعت تغییر زاویه چرخ جلو

در شکل ۱۱ فضای لازم برای پارک خودروی پژو ۲۰۶ نشان داده شده است. شرایط اولیه لازم (فاصله عرضی اولیه WS) برای انجام مانور پارک موازی با استفاده از سرعت حرکت خطی رو به عقب ۱۰ کیلومتر بر ساعت و سرعت تغییر زاویه چرخ جلو به ازای مقادیر مابین $\dot{\varphi}_{max}$ و $\dot{\varphi}_{max}/2$ نشان داده شده که با توجه به ابعاد این خودرو مشاهده می‌شود، سامانه برای پارک خودرو از نزدیک‌ترین فاصله عرضی نسبت به مانع جلویی (WS_{min}) با استفاده از $\dot{\varphi}_{max}$ تنها به فضایی برابر با ۱/۶ برابر طول خودرو (یعنی ۶/۱ متر) نیاز دارد. همچنین در صورتی که در فاصله عرضی بیشتری نسبت به مانع جلویی فضای پارک ($WS > WS_{min}$) قرار گرفته باشد فضای مورد نیاز

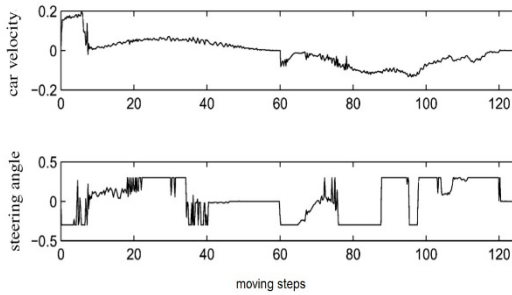


Fig. 15. Vehicle velocity (up) steering velocity (down)

شکل ۱۵: نمودار سرعت حرکت خودرو (بالا) نمودار سرعت زاویه‌ای چرخ‌های جلو (پایین) [۱۸]

در شکل ۱۵ نمودارهای سرعت حرکت خودرو و سرعت زاویه فرمان برای انجام مانور پارک که در سال ۲۰۰۵ توسط چپو و همکاران [۱۸] انجام شد، ملاحظه می‌شود. حرکت خودرو به سمت محل پارک با استفاده از کنترلر فازی و طراحی مسیر با منحنی درجه پنج صورت گرفته است، کاملاً مشخص است که کنترلر حرکت خودرو، برای تعقیب مسیر طراحی شده مجبور به اعمال تغییرات در اندازه سرعت حرکت خودرو به دفعات زیاد بوده است.

در مقایسه الگوریتم ارائه شده با روش‌های مشابه که از منحنی کلوئوئید استفاده کرده‌اند نیز مشاهده می‌شود؛ الگوریتم پیشنهادی سرعت یکنواخت‌تری را برای انجام مانور پارک ایجاد می‌نماید که به دلیل استفاده از منحنی کلوئوئید در تمام طول مسیر می‌باشد. دیگر پژوهشگران تنها برای هموارسازی بخش‌هایی از مسیر پارک خودرو از این منحنی استفاده نموده‌اند. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نمودارهای سرعت حرکت و چرخش فرمان برای انجام مانور پارک که به ترتیب در سال ۲۰۰۸ توسط کاردوس [۱۵] و در سال ۲۰۱۳ توسط وربیرا [۱۴] با استفاده از منحنی‌های کلوئوئید پیشنهاد شده‌اند مشاهده می‌شود.

دیگر مزیت استفاده از الگوریتم جدید کاهش تغییرات سرعت حرکت همراه با افزایش سرعت انجام فرآیند پارک خودرو می‌باشد. از مقایسه شکل ۱۴ با ۱۶ مشاهده می‌شود، تغییرات سرعت در الگوریتم ارائه شده به میزان

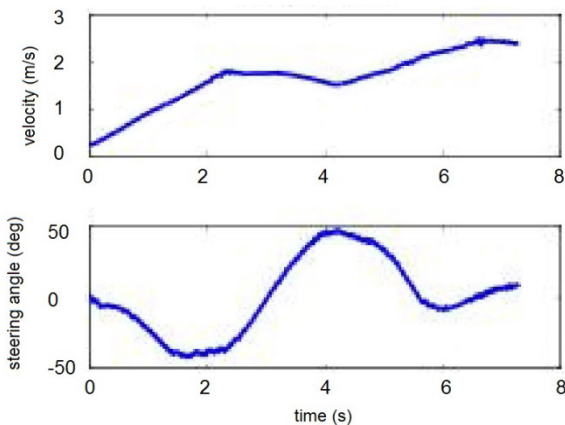


Fig. 16. Vehicle velocity (up) steering velocity (down)

شکل ۱۶: نمودار سرعت حرکت خودرو (بالا) نمودار سرعت زاویه‌ای چرخ‌های جلو (پایین) [۱۵]

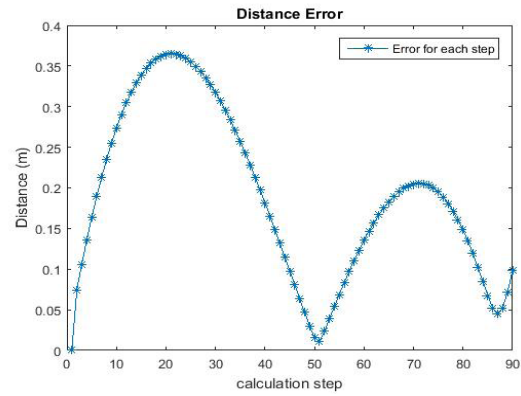


Fig. 13. Error values for designed path

شکل ۱۳: نمودار خطای مسیر طراحی شده

به عنوان مسیر اصلی پیمایش شده محاسبه شده‌اند. در شکل ۱۲ مسیر آبی رنگ با استفاده از مقادیر x_d و y_d و مسیر نقطه‌چین مشکی با استفاده از مقادیر x_r و y_r رسم شده‌اند.

خطای موجود میان دو مسیر، از طریق اندازه‌گیری اختلاف فاصله به وجود آمده در هر مرحله، محاسبه شده و در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، بیشترین مقدار خطا برابر با ۳۵ سانتی‌متر بوده که با توجه به ابعاد خودرو و طول مسیر پیمایش شده (۸/۵ متر) برابر با ۴ درصد و قابل قبول است.

۴- مقایسه و نتیجه‌گیری

همانطور که در بخش ۱ بیان شد یکی از دغدغه‌های طراحان در طراحی مسیر برای انجام پارک هوشمند، پیوستگی و هموار بودن مسیر طراحی شده می‌باشد. در بخش ۴ نشان داده شد که مسیر به‌دست آمده هموار و پیوسته بوده و با استفاده از یک کنترلر ساده برای تنظیم سرعت می‌توان به سادگی خودرو را بر روی این مسیر حرکت داد. شکل ۱۴ منحنی‌های سرعت حرکت و سرعت زاویه‌ای چرخ‌های جلوی خودرو را هنگام استفاده از الگوریتم پیشنهادی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، تغییرات این دو سرعت کاملاً یکنواخت بوده و باعث ایجاد حرکت نرم و یکنواخت خودرو می‌شود.

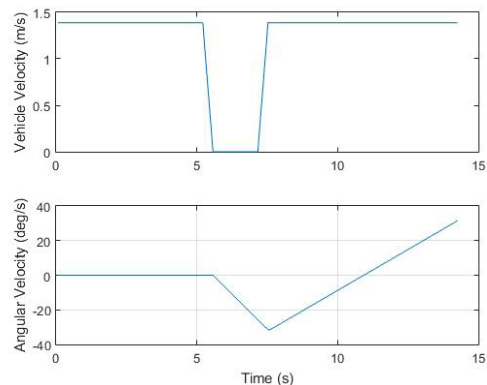


Fig. 14. Vehicle velocity (up) steering velocity (down)

شکل ۱۴: نمودار سرعت حرکت خودرو (بالا) نمودار سرعت زاویه‌ای چرخ‌های جلو (پایین)

مراجع

- [1] H. Vorobieva, S. Glaser, N. Minoiu-Enache, S. Mammam, Automatic Parallel Parking in Tiny Spots: Path Planning and Control, *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, PP(99) (2014) 1-15.
- [2] J.T. Marasigan, I.M.B. Saberon, D.P.B. San Jose, P.A.T. Sevilla, A.A. Bandala, Autonomous parallel parking of four wheeled vehicles utilizing adoptive Fuzzy-Neuro control system, in: *Region 10 Symposium, 2014 IEEE*, 2014, pp. 640-644.
- [3] H.T.N. Nejad, Q.H. Do, R. Sakai, H. Long, S. Mita, Real time localization, path planning and motion control for autonomous parking in cluttered environment with narrow passages, in: *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2012 15th International IEEE Conference on*, 2012, pp. 1357-1364.
- [4] J. Ho Gi, K. Dong Suk, Y. Pal Joo, K. Jaihie, Parking Slot Markings Recognition for Automatic Parking Assist System, in: *Intelligent Vehicles Symposium, 2006 IEEE*, 2006, pp. 106-113.
- [5] H. Tsung-Hua, L. Jing-Fu, Y. Pen-Ning, L. Wang-Shuan, H. Jia-Sing, Development of an automatic parking system for vehicle, in: *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE*, 2008, pp. 1-6.
- [6] E. Szádeczky-Kardoss, B. Kiss, Designing a tracking controller for passenger cars with steering input, *Electrical Engineering*, 52(3-4) (2008) 137-144.
- [7] J.A. Reeds, L. A. Shepp, Optimal paths for a car that goes both forward and backward, *Pacific J. Math*, 145-no2 (1990) 367-393.
- [8] I.E. Paromtchik, C. Laugier, Motion generation and control for parking an autonomous vehicle, in: *Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on*, 1996, pp. 3117-3122 vol.3114.
- [9] L. Zhao, Z. Guoqiang, L. Jishun, Automatic parking path optimization based on Bezier curve fitting, in: *Automation and Logistics (ICAL), 2012 IEEE International Conference on*, 2012, pp. 583-587.
- [10] Z. Shuwen, M. Simkani, M.H. Zadeh, Automatic Vehicle Parallel Parking Design Using Fifth Degree Polynomial Path Planning, in: *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011 IEEE*, 2011, pp. 1-4.
- [11] C. Kunpeng, Z. Ye, C. Hui, Planning and control for a fully-automatic parallel parking assist system in narrow parking spaces, in: *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013 IEEE*, 2013, pp. 1440-1445.
- [12] M. Kyoungwook, C. Jeongdan, A control system for autonomous vehicle valet parking, in: *Control*,

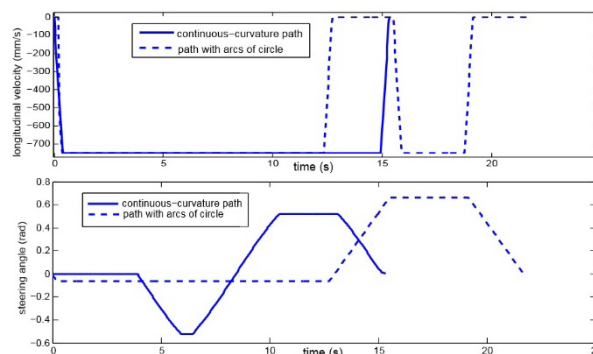


Fig. 12. Vehicle velocity (up) steering velocity (down)

شکل ۱۷: نمودار سرعت حرکت خودرو (بالا) نمودار سرعت زاویه‌ای چرخ‌های جلو (پایین) [۱۴]

قابل توجهی کاهش یافته است. همچنین در مقایسه با شکل ۱۷ زمان انجام عملیات پارک از ۲۰ به ۱۵ ثانیه کاهش یافته است که این موضوع بیانگر کاهش مصرف انرژی و هزینه در قبال استفاده از الگوریتم جدید ارائه شده است.

۵- جمع‌بندی

در این مقاله الگوریتم جدیدی برای انجام مانور پارک موازی خودرو ارائه شده است. با استفاده از الگوریتم پیشنهادی تنها با استفاده از فقط یک حسگر فاصله‌سنج، خودرو در فضایی برابر با $1/6$ برابر طول خود جای می‌گیرد. همچنین با استفاده از این الگوریتم مسیر حرکت خودرو به فاصله اولیه خودرو از مانع کناری بستگی نداشته و این الگوریتم قادر به تعیین مسیر مناسب برای تمام فاصله‌های اندازه‌گیری شده توسط حسگر مربوطه می‌باشد. همچنین حرکت خودرو بر روی این مسیر با استفاده از ایجاد سرعت خطی و سرعت فرمان‌دهی ثابت می‌باشد. با استفاده از این ویژگی، خودرو بر روی یک مسیر کلوئید پیوسته به صورت کاملاً یکنواخت حرکت می‌نماید و در صورت حصول اطمینان از صحت سرعت‌های ایجاد شده برای حرکت، به اندازه‌گیری جهت‌گیری و موقعیت خودرو برای اصلاح فرمان‌های کنترلی احتیاج نیست. بدین ترتیب مسأله کنترل حرکت خودرو بر روی مسیر تعیین‌شده، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی تنها به مسأله کنترل سرعت حرکت و سرعت فرمان‌دهی و ثابت نگه‌داشتن این سرعت‌ها در حین انجام عملیات پارک تبدیل می‌شود. با توجه به یکنواخت بودن سرعت حرکت خودرو و کاهش زمان صرف شده برای انجام عملیات پارک توسط سامانه ارائه شده نسبت به روش‌های مشابه، استفاده از این الگوریتم مقدار سوخت و انرژی مصرف شده را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد. همچنین استفاده از این روش به علت عدم نیاز به ابزارها و روش‌های اندازه‌گیری موقعیت و جهت‌گیری خودرو، ضمن فراهم نمودن شرایط ایمن، کم هزینه‌تر و به صرفه‌تر می‌باشد.

- in: *European Robotics Symposium 2008*, Springer, 2008, pp. 175-184.
- [16] P. Rouchon, M. Fliess, J. Levine, P. Martin, Flatness, motion planning and trailer systems, in: *Decision and Control, 1993., Proceedings of the 32nd IEEE Conference on*, 1993, pp. 2700-2705 vol.2703.
- [17] A. Krenz, H. Osterloh, *Clothoid Design and Setting Out Manual*, Bauverlag, 1975.
- [18] C. Chian-Song, L. Kuang-Yow, P. Liu, Fuzzy gain scheduling for parallel parking a car-like robot, *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 13(6) (2005) 1084-1092.
- Automation and Systems (ICCAS)*, 2013 13th International Conference on, 2013, pp. 1714-1717.
- [13] T. Fraichard, A. Scheuer, From Reeds and Shepp's to continuous-curvature paths, *Robotics, IEEE Transactions on*, 20(6) (2004) 1025-1035.
- [14] H. Vorobieva, N. Minoiu-Enache, S. Glaser, S. Mammarr, Geometric continuous-curvature path planning for automatic parallel parking, in: *Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 2013 10th IEEE International Conference on, 2013, pp. 418-423.
- [15] E. Szádeczky-Kardoss, B. Kiss, Path planning and tracking control for an automatic parking assist system,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

S. Farjad Bastani, A. Khodayari, A Novel Algorithm for Automatic Parallel Parking a Car Based On Continuous-Curvature Clothoid Path Planning, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(5) (2018) 1051-1060.
DOI: 10.22060/mej.2016.778

