



فصلنامه علمی
سال یازدهم، شماره ۱، شماره پیاپی ۴۱، بهار ۱۴۰۵
Vol. 11, No. 1 Issue No. 41
Autumn 2025, Quarterly
صفحه ۵-۱۵

Iran Polymer Technology;
Research and Development

واژه‌های کلیدی:

ربات نرم پلیمری،
الگوریتم مسیریابی،
هموارسازی مسیر،
محیط ایستا.

مسیریابی مبتنی بر الگوریتم‌های جست‌وجوی مسیر بهینه و هموارسازی برای ربات‌های نرم پلیمری در محیط ایستا

علی اسمعیلی، محمد حسین خالصی^{*}، محمدرضا دوست‌محمدیان
نسمنان، دانشگاه سمنان، گروه مهندسی مکانیک

چکیده ...

ربات‌های نرم پلیمری با بدنه انعطاف‌پذیر خود برای نوابری ایمن به مسیرهایی هموار با انحنای پیوسته نیاز دارند. با این حال، الگوریتم‌های کلاسیک مسیریابی نظیر دیکسترا و A^* صرفاً کوتاه‌ترین مسیر را با چرخش‌های تیز تولید می‌کنند که با سینماتیک این ربات‌ها ناسازگار است. در این پژوهش، روشی برای هموارسازی مسیر با جایگزینی پیچ‌های قائمه توسط کمان‌های دایره‌ای به شعاع متغیر ارائه و در محیط‌های شبکه‌ای با 250 تا 1000 مانع تصادفی ارزیابی شده است. تحلیل حساسیت نشان می‌دهد افزایش تراکم موانع، درصد افزایش طول مسیر را به شدت تشدید می‌کند؛ برای نمونه، در سناریوی 1000 مانع، طول مسیر با شعاع چهار متر تا 23% افزایش می‌یابد. نسبت بازده خمش از 90% در شعاع نیم متر به 20% در شعاع 4 متر نزول می‌کند و نسبت کارایی برای شعاع‌های کوچک‌تر از یک متر در تمامی سناریوها مقادیر دو رقمی حفظ می‌شود. همچنین میانگین فاصله ایمن از موانع در بدترین حالت حدود 17 متر باقی می‌ماند. از منظر محاسباتی، الگوریتم A^* ، به مراتب سریع‌تر از دیکسترا عمل می‌کند. یافته‌ها چارچوبی کمی برای انتخاب شعاع خمش متناسب با الزامات ربات‌های نرم پلیمری فراهم می‌آورد. این رویکرد می‌تواند مبنایی برای طراحی مسیر بلادرنگ ربات‌های نرم پلیمری در محیط‌های ایستا با تراکم بالای مانع قرار گیرد.

^{*}پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

mhkhalesi@semnan.ac.ir

۱ مقدمه

در عصر حاضر، ربات‌های متحرک با قابلیت جابه‌جایی قطعات، انتقال مواد میان ایستگاه‌های کاری، انجام مستقل عملیات و ساخت قطعات بزرگ و پیچیده، به یکی از ارکان اصلی تحول در صنعت بدل شده‌اند [۱]. با وجود این، ربات‌های صلب سنتی که از دیرباز به واسطه دقت و تکرارپذیری بالا مورد توجه بوده‌اند، به سبب ساختار خشک و مفاصل غیرقابل انعطاف، در محیط‌های پویا و پیش‌بینی‌ناپذیر و به‌ویژه در تعامل ایمن با انسان، با محدودیت‌های ذاتی روبه‌رو هستند. همین نارسایی‌ها، پژوهش‌های معاصر را به سمت توسعه ربات‌های نرم با پیکره‌ای سازگار و انعطاف‌پذیر رهنمون ساخته است که اساساً از این کاستی‌ها مبرا هستند [۲].

تفاوت بنیادین این دو رویکرد را می‌توان در مدیریت درجات آزادی جست‌وجو کرد؛ ربات‌های صلب با مفاصل گسسته از شمار محدودی درجه آزادی برخوردارند، درحالی‌که ربات‌های نرم به واسطه پیوستگی مواد سازنده، به‌طور نظری از درجات آزادی بی‌شماری بهره می‌برند که موجب گذر از فضاها تنگ و پرمناغ می‌شود [۳].

بنیان ربات‌های نرم پیشرفته، پیکره‌ای یکپارچه و انعطاف‌پذیر است که اغلب از پلیمرهای الاستومری، سیلیکون‌ها و مواد هایپرالاستیک ساخته می‌شود [۴]. الاستومرهای سیلیکونی که از جمله مصالح بنیادین در ساخت ربات‌های نرم به‌شمار می‌روند، تحت تغییرشکل‌های بزرگ از خود رفتاری هایپرالاستیک همراه با اثرات گرانش و کشسان بروز می‌دهند. برای توصیف این رفتار، لازم است برای پیش‌بینی پاسخ ماده، از توابع انرژی کرنشی غیرخطی بهره گرفته شود [۵]. در این زمینه، مدل‌های هایپرالاستیک نتوهوکی، اگدن، مونی-ریولین و یئو برای توصیف رفتار الاستومرهای متداول در رباتیک نرم به‌کار گرفته شده‌اند [۶].

تنوع مواد پلیمری، بستری برای توسعه طیف گسترده‌ای از روش‌های تحریک فراهم آورده است. عملگرهای پنوماتیک شبکه‌ای با بهره‌گیری از فشار سیال، کماکان رایج‌ترین سازوکار برای ایجاد خمش و انبساط در ربات‌های نرم به‌شمار می‌روند. در کنار آن، نسل نوینی از عملگرهای الکترواستاتیک مبتنی بر الاستومرهای دی‌الکتریک و سیال، با ترکیب وزن سبک، کرنش بالا، چگالی انرژی زیاد و پاسخ سریع، افق‌های تازه‌ای را در این عرصه گشوده‌اند [۷]. تکامل این سامانه‌ها با ادغام حسگری در ساختار عملگر، مسیر تحقق ربات‌های نرم هوشمندی را هموار ساخته است که قادر به درک و تعامل با محیط پیرامون خود هستند [۸]. در سطح طراحی، روش‌های ریخت‌شناسی محاسباتی

با بهینه‌سازی توأمان شکل و عملکرد، امکانات بی‌سابقه‌ای برای مهندسی پیکره ربات‌های نرم ارائه می‌دهند [۹]. با وجود این پیشرفت‌ها، هدایت تغییرشکل‌های پیوسته در طول بدنه کماکان چالشی اساسی به‌شمار می‌آید. در این راستا، ربات‌های پیوسته چندبخشی با قابلیت تنظیم سختی، از طریق طراحی ساختاری مبتنی بر بریدگی‌های بیضوی و قفل‌شوندگی اصطکاکی بادی، به زوایای خمشی تا ۱۲۰ درجه برای هر قطعه دست یافته‌اند [۱۰]. هم‌زمان، مدل‌سازی سینماتیک مبتنی بر فرض انحنا ثابت، به‌عنوان رهیافتی کارآمد برای توصیف حرکت این ربات‌ها و پیاده‌سازی سامانه‌های کنترل حلقه‌بسته به‌کار گرفته شده است [۱۱]. مجموع این قابلیت‌ها، ضرورت بازاندیشی در طراحی مسیرهای حرکتی متناسب با محدودیت‌های سینماتیکی ربات‌های نرم را برجسته می‌سازد.

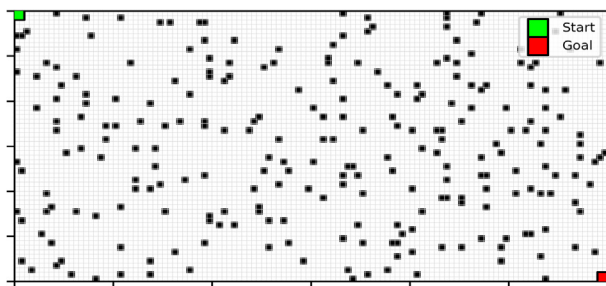
در کنار پیشرفت‌های صورت‌گرفته در طراحی و تحریک ربات‌های نرم، مسیریابی ایمن و بدون برخورد با موانع، به‌عنوان نیازی بنیادین در ناوبری خودمختار این سامانه‌ها مطرح است [۱۲]. الگوریتم‌های کلاسیک مسیریابی مبتنی بر گراف، به دلیل کارایی اثبات‌شده در یافتن سریع و قطعی کوتاه‌ترین مسیر، سنگ‌بنای ناوبری در محیط‌های ایستا به‌شمار می‌روند [۱۳]. با این حال، ماهیت ذاتاً صلب و چندضلعی مسیرهای حاصل از این الگوریتم‌ها، که با چرخش‌های ناگهانی نود درجه همراه است، با الزامات حرکتی پیوسته و نیاز به انحنا هموار در ربات‌های نرم ناسازگار است [۱۴]. از این‌رو، تبدیل این مسیرهای صلب به مسیرهایی هموار و با انحنا پیوسته، که با قیود سینماتیکی ربات نرم سازگار باشند، گامی در تکمیل زنجیره طراحی، ساخت و به‌کارگیری عملی این ربات‌ها به‌شمار می‌آید [۱۵]. مطالعه حاضر نیز، به مسئله نرم‌سازی مسیر ربات‌های نرم در محیط‌های پرمناغ می‌پردازد.

تانگ (Tang) و همکاران [۱۶] در یک بررسی جامع، الگوریتم‌های مسیریابی مرسوم را تحلیل کرده و دریافت‌اند که مسیرهای تولیدشده توسط روش‌های کلاسیک نظیر دیکسترا و A*، اگرچه کوتاه‌ترین مسیر را می‌یابند، اما از همواری کافی برخوردار نبوده و نیازمند پس‌پردازش با توابع هندسی مانند منحنی‌های بزیه، چندجمله‌ای و بی-اسپلاین هستند تا مسیرهایی پیوسته با کاهش زوایای تند حاصل شود.

احمد (Ahmad) و آب و هاب (Ab Wahab) [۱۷] چارچوبی تلفیقی با نام تخصیص پویای نقاط راه و منحنی‌های بزیه مکعبی قطعه‌ای (DWAPCBC) ارائه کرده‌اند. در این روش، ابتدا مسیر اولیه‌ای توسط الگوریتم دیکسترا تولید شده، سپس با تخصیص تطبیقی نقاط راه بر اساس پیچیدگی محیط، مسیر

را در آن قلمرو نیز به کار بندند، لیکن اعتبارسنجی نهایی این تعمیم، پژوهش‌های مستقل را طلب می‌کند که خارج از گستره تحقیق کنونی تعریف می‌شود. در این مدل‌سازی، به منظور فراهم آوردن بستری برای مقایسه علمی معتبر، تأکید صرفاً بر سنجش کارایی الگوریتم‌ها در کشف مسیر در محیط‌های ایستا معطوف شده است. بر این مبنا، برای کاهش پیچیدگی‌های زائد مدل، موانع به گونه‌ای ثابت تعریف و به کار گرفته شده‌اند. اتخاذ این رویکرد با این استدلال همراه است که در شرایط پایدار، حرکت و جابه‌جایی موانع تأثیری بر نتایج مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها از منظر انتخاب مسیر بهینه نخواهد داشت. برای تضمین تکرارپذیری (Reproducibility) و اعتبارسنجی فنی نتایج، تمامی الگوریتم‌های مسیریابی مطالعه‌شده به صورت کامل در بستر برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی و اجرا شدند. عملیات شبیه‌سازی بر روی سامانه محاسباتی با مشخصات سخت‌افزاری معین شامل پردازنده Intel Core i3 با بسامد ۲/۴ گیگاهرتز و حافظه دسترسی تصادفی ۱۲ گیگابایت انجام پذیرفت. به منظور حصول اعتبار در مقایسه‌های زمانی، زمان اجرای ثبت شده صرفاً به هسته منطق جست‌وجوی الگوریتم منحصر شد؛ از این رو، هرگونه سربار محاسباتی ناشی از مصورسازی گرافیکی خروجی‌ها از فرایند زمان‌بندی نهایی حذف شد. افزون بر این، موقعیت شبکه و موانع در هر بار اجرای الگوریتم ثابت نگاه داشته شد. این تمهید فنی تضمین می‌کند که هر دو الگوریتم تحت بررسی، در هر تکرار، با چالش محیطی یکسان مواجه شده‌اند که خود تأمین‌کننده مقایسه منصفانه و علمی به شمار می‌آید.

در شکل ۱، محیط با ۲۵۰ مانع و محل قرارگیری نقطه شروع مسیر و محل مقصد نمایش داده شده است. برای ایجاد بستر گسسته و کارآمد در شبیه‌سازی مسیریابی، محیط مستطیلی به شبکه‌ای از سلول‌های مربعی با ابعاد دو متر در دو متر تقسیم شد. این تقسیم‌بندی به تولید ۱۲۰ ستون در طول و ۶۰ ردیف در عرض انجامید که مجموعاً ۷۲۰۰ سلول را



شکل ۱: محیط کلی شبیه‌سازی با ۲۵۰ مانع.

بازبینی و توسط منحنی‌های بزیه مکعبی هموار می‌شود. نتایج تجربی نشان می‌دهد که این رویکرد در مقایسه با روش‌های سنتی هموارسازی نظیر بی-اسپلاین، مسیریابی با ۷۹ درصد فاصله ایمن‌تر از موانع و ۳۲ درصد همواری بیشتر تولید می‌کند و برای ناوبری ایمن ربات‌های متحرک در محیط‌های ایستای شلوغ بسیار مناسب است.

شکل (Şelek) و سدر (Seder) [۱۸] روشی هموار برای برنامه‌ریزی حرکت ربات‌های متحرک غیرهولونومیک در محیط‌های پویا ارائه کرده‌اند که از دو بخش اصلی تشکیل شده است: یک برنامه‌ریز مسیر و یک برنامه‌ریز مسیر حرکتی. این روش مسیرهایی پیوسته، بدون برخورد و نزدیک به زمان بهینه تولید می‌کند و با بهره‌گیری از قاعده نسبت طلایی، هم‌راستایی جهت ربات را بدون نیاز به چرخش درجا انجام می‌دهد. نتایج پیاده‌سازی روی ربات Husky نشان‌دهنده کاهش طول مسیر، زمان سفر و زمان برنامه‌ریزی مسیر نسبت به روش‌های مشابه است.

روش شبیه‌سازی

در مطالعه‌ی حاضر، شبیه‌سازی فرایند تعیین مسیر ربات متحرک از طریق زبان برنامه‌نویسی پایتون انجام شده است. محیط شبیه‌سازی به شکل مستطیلی تعریف شده است که ابعاد آن در طول ۲۴۰ متر و در عرض ۱۲۰ متر است. درون این محیط، مجموعه‌ای از موانع به صورت تصادفی توزیع شده‌اند و به منظور مطالعه و بررسی بهتر اثرگذاری شرایط، تراکم آن‌ها در سناریوهای مختلف از ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ مانع متغیر در نظر گرفته شده است. برای آن‌که الگوی توزیع موانع در اجراهای مکرر شبیه‌سازی دستخوش تغییر نشود، از یک دانه تصادفی ثابت (Random Seed) بهره گرفته شد. مبدأ حرکت ربات در گوشه فوقانی-چپ و به مختصات (۰، ۶۰) تعبیه شده است که با مربعی به رنگ سبز و نقطه هدف نیز در گوشه تحتانی-راست و مختصات (۱۲۰، ۰) قرار داده شده و با مربعی قرمز رنگ مشخص می‌شود. از آن‌رو که پردازش‌های فضایی در محیط‌های سه‌بعدی بار محاسباتی قابل‌توجهی را بر منابع سخت‌افزاری تحمیل کرده و مستلزم صرف زمان اجرایی چشمگیری است و با تلفات به هدف کانونی مطالعه حاضر که بر ارزیابی تطبیقی الگوریتم‌های مسیریابی متمرکز است، بستر دوبعدی برای مدل‌سازی برگزیده شد. این گزینش، امکان تمرکز کامل بر هسته اصلی پژوهش را فراهم می‌آورد. اگرچه بخش عمده الگوریتم‌های نوین ناوبری که در فضای دوبعدی و در مجاورت موانع عمل می‌کنند، قابلیت تعمیم به محیط سه‌بعدی را دارا بوده و می‌توانند مبانی خود

به تمامی گره‌های دیگر در گراف‌های وزن‌دار با اوزان نامنفی است. در این الگوریتم، اولویت بسط گره‌ها تنها بر اساس هزینه تجمعی واقعی طی شده از مبدأ تا آن گره تعیین می‌شود. هنگامی که الگوریتم از گره جاری u به همسایه v حرکت می‌کند، هزینه جدید برای گره v به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$g_{\text{new}}(v) = g(u) + w(u, v)$$

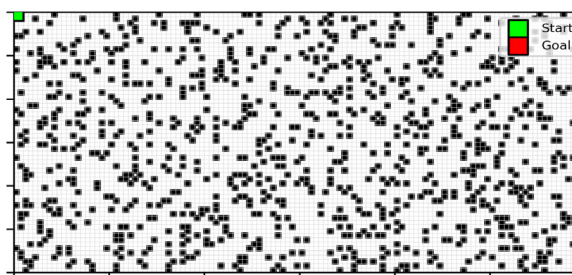
در این رابطه، $g(u)$ هزینه تجمعی از مبدأ تا گره u ، $w(u, v)$ وزن یال میان u و v و $g_{\text{new}}(v)$ هزینه پیشنهادی برای رسیدن به گره v است. چنانچه $g_{\text{new}}(v)$ از مقدار ذخیره شده پیشین $g(v)$ کمتر باشد، مسیر آن گره به روزرسانی می‌شود. در پیاده‌سازی حاضر، وزن تمامی یال‌ها برابر با اندازه هر سلول (۲ متر) منظور شده و الگوریتم فاقد هرگونه مؤلفه هیوریستیک است؛ بنابراین صف اولویت صرفاً بر اساس $g(n)$ مرتب می‌شود [۱۹].

الگوریتم A^* که توسط هارت، نیلسون و رافائل ارائه شد، توسعه یافته الگوریتم دیکسترا با افزودن یک تابع هیوریستیک برای هدایت جست‌وجو به سمت هدف است. در این الگوریتم، ترتیب بسط گره‌ها بر اساس تابع ارزیابی زیر تعیین می‌شود:

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

در این عبارت، $f(n)$ اولویت کلی گره n را مشخص می‌سازد. مؤلفه $g(n)$ همان هزینه واقعی پیموده شده از مبدأ تا گره n و $h(n)$ برآوردی هیوریستیک از هزینه باقی‌مانده از گره n تا هدف است. تابع هیوریستیک در این پژوهش، بر مبنای فاصله منتهی انتخاب شده که برای حرکات محدود به چهار جهت اصلی در شبکه، برآوردی بهینه محسوب می‌شود [۲۰]. شرط $h(n) \leq h^*(n)$ تضمین کرده و در نتیجه الگوریتم A^* نیز کوتاه‌ترین مسیر را با تعداد گره‌های بسط یافته کمتر نسبت به دیکسترا می‌یابد.

در کاربردهای عملی رباتیک، کیفیت هر مسیر صرفاً به یافتن بودن آن محدود نمی‌شود؛ بلکه مشخصه‌هایی نظیر طول مسیر و هزینه صرف شده برای محاسبه آن، هر یک به نوبه خود بر کارایی کلی سامانه اثر می‌گذارند. طول مسیر مستقیماً با زمان پیمایش و میزان انرژی مصرفی ربات نسبت مستقیم دارد و افزایش آن، به‌ویژه در مأموریت‌های طولانی مدت یا منابع انرژی محدود، می‌تواند چالش آفرین باشد. از سوی دیگر، هزینه محاسباتی الگوریتم که در دو شاخص تعداد گره‌های کاوش شده



شکل ۲: محیط کلی شبیه‌سازی با ۱۰۰۰ مانع.

برای مدل‌سازی و جست‌وجوی مسیر فراهم آورد. در شکل ۲، با افزایش تعداد موانع به ۱۰۰۰ عدد در محیط، مسیرهای صاف و کم شکست تقریباً بسته شده‌اند و الگوریتم برای یافتن مسیر تا نقطه هدف مجبور به یافتن مسیرهای پر شکست است.

در طراحی سناریوهای شبیه‌سازی، شرط عدم همپوشانی موانع با موقعیت‌های مبدأ و مقصد به عنوان محدودیت بنیادین اعمال شد؛ به نحوی که هیچ مانعی اجازه نیافت در همسایگی بی‌واسطه سلول‌های شروع و هدف قرار گیرد. این شرط، مسدود نبودن مسیر در گام نخست جست‌وجو را تضمین کرده است.

به منظور انطباق با ابعاد فیزیکی ربات که سطحی معادل چهار سلول (دو سلول در طول و دو سلول در عرض) را پوشش می‌دهد، این تابع وضعیت هر گره را پیش از ورود به فرایند جست‌وجو اعتبارسنجی می‌کند. این تابع، چهار خانه شامل خود گره، همسایه چپ، همسایه زیرین و همسایه مورب پایین-چپ را بررسی می‌کند و در صورت وجود مانع در هر یک از این موقعیت‌ها، گره مورد نظر را ممنوعه اعلام می‌دارد. چنین سازوکاری، ضمن رعایت حریم ایمنی پیرامون موانع، از عبور بدنه ربات از مجاورت خطرناک جلوگیری به عمل می‌آورد.

مسیریابی

پس از مدل‌سازی محیط و تعریف موانع، گام بعدی یافتن مسیری پیوسته، ایمن و کوتاه‌ترین میان نقطه مبدأ و هدف در شبکه مفروض است. از آنجا که شبکه از یال‌هایی با وزن یکسان تشکیل شده، مسئله به جست‌وجوی کوتاه‌ترین مسیر در گرافی وزن‌دار تقلیل می‌یابد. بدین منظور، دو الگوریتم برجسته و کلاسیک، یعنی دیکسترا و A^* ، در محیط برنامه پیاده‌سازی و کارایی آن‌ها به صورت تطبیقی تحلیل شده است. در ادامه، سازوکار هر یک تشریح می‌شود.

الگوریتم دیکسترا که نخستین بار توسط ادسخر دیکسترا معرفی شد، روشی سیستماتیک برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر از گره مبدأ

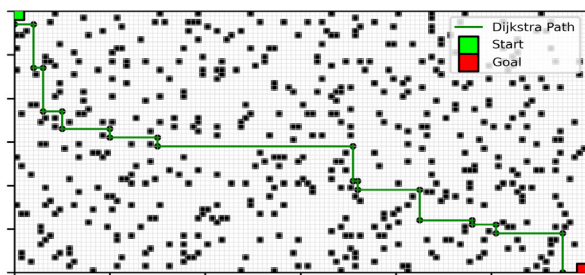
فرایند شناسایی بدین ترتیب صورت می‌پذیرد که تمام گره‌های میانی مسیر یعنی همه گره‌ها به جز مبدأ و مقصد یک به یک پیمایش می‌شوند. برای هر گره میانی، دو پاره‌خط جهتی تعریف می‌شود: یکی از گره پیشین به گره جاری و دیگری از گره جاری به گره پسین. چنانچه این دو پاره‌خط هم‌جهت باشند، به این معناست که ربات در آن نقطه تغییر راستا نداشته و مسیر کماکان مستقیم ادامه یافته است. در مقابل، اگر دو پاره‌خط مزبور زاویه‌ای غیرصفر با هم بسازند که در شبکه چهارجهته منحصراً نود درجه خواهد بود، آن گره به‌عنوان یک نقطه پیچ علامت‌گذاری می‌شود. بدیهی است که این ارزیابی نیازی به محاسبه زاویه نداشته و صرفاً با مقایسه مقادیر مؤلفه‌های بردارهای جابه‌جایی قابل انجام است؛ اگر مؤلفه‌های دو بردار یکسان نباشند، پیچ رخ داده است. این روش سبک‌بار، یک گذر و با مرتبه زمانی خطی نسبت به طول مسیر عمل می‌کند. شیوه شناسایی پیچ‌های نود درجه توصیف‌شده در این بخش، به‌دلیل سادگی، عدم وابستگی به مقیاس شبکه و قابلیت پیاده‌سازی سریع، می‌تواند به‌عنوان روش استاندارد در پژوهش‌های آتی نیز مورد استناد قرار گیرد. با افزایش تعداد موانع، احتمال به‌وجود آمدن نقاط شکست نیز افزایش می‌یابد، که در شکل ۴ نقاط شکست به‌صورت دایره‌ای شکل در مسیر پیشنهادی برای تعداد ۵۰۰ مانع نشان داده شده است.

با اتمام این فرایند پیمایش، شمار نهایی گره‌هایی که در آن‌ها تغییر جهت رخ داده است، به‌عنوان پارامتر تعداد کل پیچ‌ها مستخرج می‌شود. اهمیت این عدد صرفاً در گزارش یک کمیت آماری خلاصه نمی‌شود، بلکه ضرورت آن از دو منظر کاملاً متمایز و حیاتی ناشی می‌شود. نخست آن‌که این عدد، مبنای کمی و تنها ورودی لازم در این پژوهش برای محاسبه افزایش طول مسیر پس از فرایند هموارسازی است؛ بدون در دست داشتن این پارامتر، امکان تخمین هزینه هندسی هموارسازی به هیچ وجه میسر نخواهد بود. دوم آن‌که این عدد به‌خودی‌خود مقیاسی مستقیم از ناهمواری و گسستگی‌های مسیر صلب اولیه

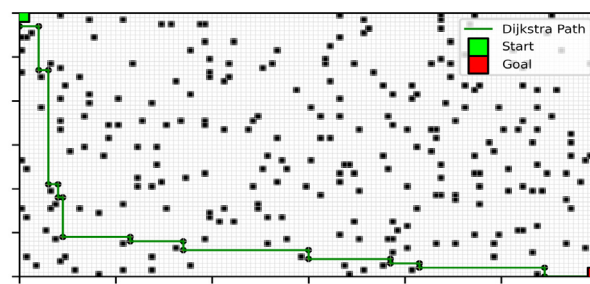
و زمان اجرا تبلور می‌یابد، تعیین‌کننده سرعت واکنش سامانه به تغییرات محیطی و امکان به‌کارگیری آن در شرایط بی‌درنگ است. الگوریتمی که گره‌های کمتری را بسط می‌دهد، حافظه کمتری مصرف نموده و در سخت‌افزارهای نه‌چندان قدرتمند نیز می‌تواند در بازه زمانی معقول به جواب برسد.

بر این مبنای دو الگوریتم دیکسترا و A^* از هر دو منظر مورد ارزیابی قرار گرفتند. از حیث طول مسیر، به‌دلیل ثابت بودن وزن یال‌ها و کامل بودن هر دو الگوریتم، راه‌حل نهایی در تمامی سناریوها یکسان به‌دست خواهد آمد. بنابراین، وجه افتراق اصلی به هزینه محاسباتی معطوف شد. برای زدودن اثر نوسانات آنی سامانه از داده‌های زمانی، هر سناریو ۲۰۰ مرتبه اجرا شد و با بهره‌گیری از معیار انحراف معیار، مقادیر پرت شناسایی و کنار گذاشته شدند. با حذف مشاهدات واقع در فاصله‌ای فراتر از انحراف معیار از میانگین، مقادیر برآمده از اغتشاشات لحظه‌ای سامانه از مجموعه داده‌های تحلیلی زدوده شده تا میانگین‌های نهایی، قابل اتکا از عملکرد ذاتی الگوریتم‌ها باشند. در شکل ۳، کوتاه‌ترین مسیر توسط الگوریتم دیکسترا برای حالت ۲۵۰ مانع در محیط مستطیلی نمایش داده شده است.

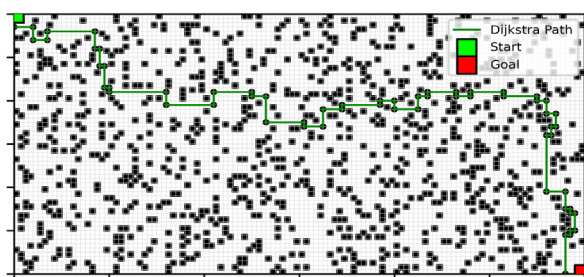
حرکت ربات در محیط شبکه‌ای، محدود به چهار جهت اصلی و گام‌هایی به طول ثابت یک سلول است. از این رو، مسیر صلب حاصل از الگوریتم، مجموعه‌ای از گره‌های متوالی است که هر سه گره پشت‌سرهم، یا بر روی یک خط راست قرار دارند یا زاویه قائمه می‌سازند. در حالت نخست، ربات مسیری مستقیم را می‌پیماید و در حالت دوم، ناگزیر از تغییر جهت ناگهانی به اندازه نود درجه خواهد بود. اگرچه چنین مسیری برای برخی ربات‌های ساده قابل اجراست، اما برای ربات‌های نرم که حرکت آن‌ها ذاتاً مستلزم انحنای پیوسته و بدون گسستگی است، عبور از این گوشه‌های تیز مستلزم توقف و چرخش درجا بوده که خود افزایش زمان پیمایش، مصرف انرژی بیشتر، استهلاک قطعات مکانیکی و ناپایداری ساختار شکل‌پذیر را در پی دارد. بنابراین، گام نخست در تبدیل این مسیر صلب به مسیری هموار، شناسایی دقیق همین نقاط چرخش است.



شکل ۴: نمایش مسیر و نقاط شکست برای حالت ۵۰۰ مانع در محیط شبیه‌سازی.



شکل ۳: مسیریابی الگوریتم دیکسترا در حالت ۲۵۰ مانع در محیط.



شکل ۵ نقاط شکست و مسیر اصلی در محیط شبیه‌سازی برای حالت ۱۰۰۰ مانع.

اشاره شد ربات‌های نرم که عموماً از جنس پلیمرهای الاستومری یا سیلیکون‌ها ساخته می‌شوند، فاقد مفاصل صلب و محورهای چرخش گسسته هستند و تغییر شکل آن‌ها به‌طور ذاتی به‌صورت خمش‌های تدریجی با انحنای پیوسته رخ می‌دهد. اعمال تغییر جهت ناگهانی نود درجه بر پیکره چنین رباتی، مستلزم تمرکز موضعی تنش، ناپایداری ساختاری و حتی گسیختگی ماده نرم خواهد بود. بر همین اساس، ضرورت می‌یابد که هر یک از گوشه‌های تیز مسیر با یک خم پیوسته جایگزین شود تا سازگاری کامل با دینامیک سازه‌ای ربات‌های نرم برقرار شود. در این پژوهش، برای تحقق این مقصود، از قوس‌های دایره‌ای به‌عنوان جایگزین پیچ‌های نود درجه و از منحنی‌های بزیه برای مصورسازی بصری مسیر نرم‌شده استفاده شده است. فرایند نرم‌سازی با این منطق پایه‌ای صورت می‌پذیرد که در هر نقطه‌ای که مسیر صلب دچار تغییر جهت نود درجه شده، کمان دایره‌ای به شعاع R جانشین دو پاره‌خط متعامد می‌شود. هندسه این جایگزینی به این ترتیب است که گویی ربات به‌جای آن‌که تا گوشه تیز پیش برود، از فاصله معینی پیش از آن شروع به چرخش کرده و پس از طی یک ربع دایره، بر روی مسیر بعدی خروج می‌یابد. شعاع R در این سازوکار، نماینده قابلیت خم‌شوندگی ربات نرم پلیمری تلقی می‌شود: هر چه شعاع کمتر باشد، ربات توانایی انجام خم‌های تندتر را داراست که این ویژگی مستقیماً با جنس ماده سازنده و ساختار مورفولوژیک بدنه نرم مرتبط است. پلیمرهای حافظه‌دار، الاستومرهای ناهمسانگرد، هریک حداقل شعاع خمش متفاوتی را مجاز می‌شمارند.

یکی از پیامدهای این جایگزینی، افزایش طول مسیر نسبت به مسیر صلب اولیه است. طول کمان دایره‌ای با زاویه نود درجه برابر با نصف حاصل ضرب عدد پی در شعاع R است. در مقابل، مسیر صلب در همان ناحیه، دو قطعه مستقیم را شامل می‌شود که مجموع طول آن‌ها عددی ثابت و معادل دو برابر پهنای سلول است. اختلاف میان این دو مقدار، افزایش خالص طول در هر پیچ را رقم می‌زند. بر اساس محاسبات تحلیلی، این افزایش

به دست می‌دهد و هرچه بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده مسیری با چرخش‌های بیشتر و در نتیجه نامطلوب‌تر برای ربات‌های با قید سینماتیکی است.

با این وصف، تکیه صرف بر تعداد مطلق پیچ‌ها نمی‌تواند برای مقایسه ساختاری میان مسیرهایی با طول‌های متفاوت کافی باشد. چه‌بسا مسیری بلند با پیچ‌های پراکنده، تعداد پیچی برابر با مسیری کوتاه اما متراکم از چرخش داشته باشد، حال آن‌که ماهیت این دو مسیر کاملاً متمایز است. برای پر کردن این خلأ تحلیلی و ایجاد بستری برای مقایسه عادلانه میان سناریوهای گوناگون، دو شاخص ثانویه از ویژگی تعداد پیچ استخراج شده است.

نخستین شاخص تحت عنوان پیچیدگی مسیر (Path Complexity) تعریف می‌شود که حاصل تقسیم تعداد پیچ‌ها بر شمار کل سلول‌های پیموده شده است. این شاخص، تراکم چرخش‌ها را در کسری از طول مسیر نمایان ساخته و مفهوم پیچیدگی را مستقل از مقیاس طولی مسیر بیان می‌دارد. هرچه این نسبت بزرگ‌تر باشد، به معنای آن است که مسیر در ازای هر واحد پیمایش، دستخوش چرخش‌های بیشتری شده است.

دومین شاخص، همواری مسیر (Path Smoothness) نام گرفته است. تعریف این شاخص، با مفهوم متداول نرمی در ادبیات برنامه‌ریزی مسیر هم‌سو است؛ مفهومی که در آن، معیار کمی نرمی مسیر عموماً از طریق وارون تعداد تغییر جهات یا میزان انحنای مسیر حاصل می‌شود [۲۱]. برای محاسبه آن، یک واحد به تعداد کل پیچ‌ها افزوده و سپس عدد یک بر این مجموع تقسیم می‌شود. این ساختار سبب می‌شود که مسیر کاملاً مستقیم و فاقد هرگونه پیچ، به بیشینه مقدار یعنی یک دست یابد و با افزایش تدریجی چرخش‌های نود درجه، این شاخص به سمت صفر نزول کند. مزیت این شاخص در آن است که سطح همواری مسیر را در بازه‌ای بسته و قابل مقایسه میان سناریوهایی با پیچیدگی‌های متفاوت کمی‌سازی می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۵ نمایان است، در سناریوی با ۱۰۰۰ مانع، مسیر به‌دلیلی وجود موانع زیاد مجبور به عبور از مسیرهای باریک‌تر و شکست بیشتر مسیر اصلی شود.

در ربات‌های نرم پلیمری، حرکت پیوسته و انعطاف‌پذیر، مستلزم مسیرهایی با انحنای ملایم و بدون تغییر شکل‌های ناگهانی است؛ از این رو، گوشه‌های تند مسیر صلب می‌بایست با کمان‌هایی هموار جایگزین شوند تا سازگاری کامل با دینامیک پیوسته و ساختار شکل‌پذیر این ربات‌ها حاصل شود.

مسیر صلب حاصله از الگوریتم‌های جست‌وجو، باوجود برخورداری از کوتاه‌ترین طول ممکن، برای ربات‌های نرم با بدنه انعطاف‌پذیر و حرکت پیوسته مناسب نیست. همان‌طور که

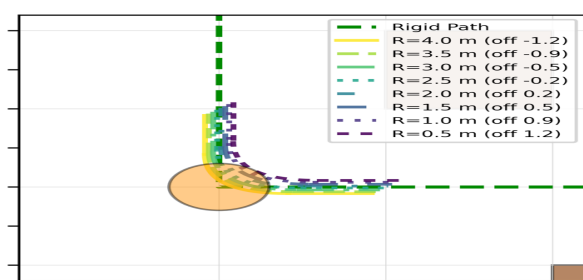
از منحنی‌ها به اندازه اندکی در جهت عمود بر نیمساز زاویه پیچ جابه‌جا شده‌اند. این جابه‌جایی که با محاسبه بردار نیمساز و استخراج راستای عمود بر آن صورت می‌پذیرد، صرفاً یک تدبیر نمایشی است و تأثیری بر محاسبات طول، ارزیابی فاصله از مانع یا دیگر سنج‌های کمی ندارد. بدین‌سان، تمامی مسیرهای نرم‌شده به صورت دسته‌ای از کمان‌های رنگی متمایز و بدون هم‌پوشانی در کنار مسیر صلب اصلی قابل رویت می‌شوند و بیننده می‌تواند اثر کاهش شعاع خمش را در کوتاه‌تر شدن کمان‌ها و نزدیک‌تر شدن مسیر به مسیر صلب مستقیماً مشاهده کند که در شکل ۶ نمایش یافته است.

برای آن‌که اثر شعاع خمش R بر کیفیت مسیر نرم‌شده به شکل نظام‌مند ارزیابی شود، سه سنج مستقل تعریف و در تمامی سناریوها محاسبه شده است. انتخاب این سه معیار با التفات به ماهیت ربات‌های نرم صورت پذیرفته است.

نخستین سنج به عنوان نسبت بازده خمش (BER) معرفی می‌شود. ضرورت تعریف این شاخص از آن‌جا ناشی می‌شود که هر ربات نرم با بدنه پلیمری، بسته به جنس پلیمر سازنده و ساختار مورفولوژیک خود، آستانه‌ای برای حداقل شعاع خمش قابل تحمل دارد و نمی‌توان از آن انتظار چرخش‌های بی‌نهایت تند را داشت. شاخص نشان می‌دهد که شعاع خمش مشخص، چه کسری از توانایی خمشی بالقوه ربات را به کار می‌گیرد.

$$- \text{BER} = 1$$

دومین سنج به عنوان نسبت کارایی (ER) تعریف شده است. در فرایند نرم‌سازی، همواره مصالح‌های میان دو هدف متعارض برقرار می‌شود: از یک سو میل به افزایش شعاع خمش برای کاهش تنش و هموارسازی مسیر وجود دارد و از سوی دیگر، افزایش طول ناشی از بزرگ‌شدن R می‌تواند زمان ماموریت و مصرف انرژی را بالا ببرد. این نسبت از تقسیم BER بر افزایش طول نسبی مسیر حاصل می‌شود. تعیین مقدار ۵ متر برای بیشینه شعاع خمش، برخاسته از ابعاد 4×4 متری ربات



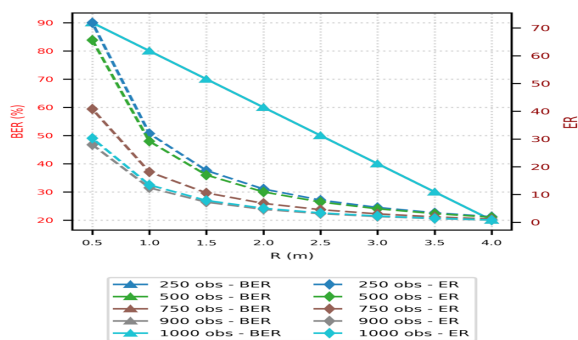
شکل ۶ نمایش انواع شعاع خمش مسیر در یکی از نقاط شکست.

برای هر پیچ منفرد نود درجه دقیقاً برابر با حاصل R در ضریب ثابتی بالغ بر 0.429 به دست آمده است. این ضریب از کسر نصف عدد پی از عدد دو حاصل می‌شود و بازتاب‌دهنده آن است که چه میزان مسافت اضافی به علت پیروی از انحنا به مسیر تحمیل می‌شود. بدین ترتیب، طول کلی مسیر نرم‌شده از رابطه ساده مجموع طول صلب اولیه با حاصل ضرب تعداد پیچ‌ها در R در ضریب 0.429 قابل محاسبه خواهد بود. اهمیت این رابطه خطی در آن است که بدون نیاز به شبیه‌سازی مجدد و صرفاً با دانستن تعداد پیچ‌های مسیر، می‌توان طول نهایی را برای هر شعاع خمش دلخواه پیش‌بینی کرد.

دامنه مقادیر برگزیده برای شعاع خمش در این مطالعه، بازه 0.5 تا 4 متر را در بر می‌گیرد. کران پایین این بازه، تقریباً معادل یک‌چهارم اندازه هر مانع انتخاب شده است و کمینه شعاعی را بازنمایی می‌کند که در آن ربات پلیمری نرم همچنان قادر به گردش ایمن بدون برخورد با لبه‌های مانع است. کران بالای 4 متر نیز دقیقاً برابر با بزرگ‌ترین بعد ربات در نظر گرفته شده است. در دینامیک ربات‌های نرم، چرخش با شعاعی معادل طول مشخصه بدنه، مانور سازگار و کم‌تنش تلقی می‌شود که از تمرکز موضعی کرنش جلوگیری کرده و ایمنی سازه‌ای را تأمین می‌کند. همچنین این شعاع به گونه‌ای انتخاب شده که حتی در عریض‌ترین دالان‌های عبوری (حدود 8 متر) کمان‌های نرم‌شده از محدوده فضای آزاد خارج نشوند. بدین ترتیب، این بازه طیفی پیوسته از چابک‌ترین تا ایمن‌ترین رفتار حرکتی ربات نرم با بدنه پلیمری را پیش روی تحلیل قرار می‌دهد.

شایان ذکر است که محاسبه تحلیلی افزایش طول در این مطالعه، کاملاً مستقل از بازنمایی بصری مسیرها صورت پذیرفته است. برای مصورسازی، از رویکردی مجزا بهره گرفته شده که در آن، هر گوشه با یک منحنی درجه دوم بزیه جایگزین می‌شود. در این شیوه، سه نقطه کنترل برای هر منحنی تعریف می‌شود: نقطه آغازین بر روی میانه پاره‌خط ورودی به پیچ قرار می‌گیرد، نقطه پایانی بر روی میانه پاره‌خط خروجی از پیچ واقع می‌شود، و نقطه کنترل میانی نیز همان گره گوشه صلب انتخاب می‌شود. این ساختار سه نقطه‌ای، منحنی را وامی‌دارد که از گوشه عبور کرده و دو قطعه مستقیم مجاور را با یک کمان نرم به هم پیوند دهد. اگرچه شکل حاصله لزوماً بر یک دایره به شعاع R منطبق نیست، اما پیوستگی بصری مطلوب و مماس بودن بر امتداد قطعات مستقیم در نقاط اتصال را تأمین می‌کند که برای نمایش کیفی اثر نرم‌سازی کفایت می‌کند.

افزون بر این، برای آن‌که امکان مقایسه بصری مسیرهای متناظر با شعاع‌های گوناگون در یک نمودار واحد فراهم آید، هریک



شکل ۸ نسبت بازده خمش و نسبت کارایی بر حسب تغییرات شعاع برای انواع موانع.

افزایش طول نسبت به مسیر صلب، بر حسب شعاع خمش برای سناریوهای ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ مانع در قالب دو محور عمودی مجزا رسم شده است.

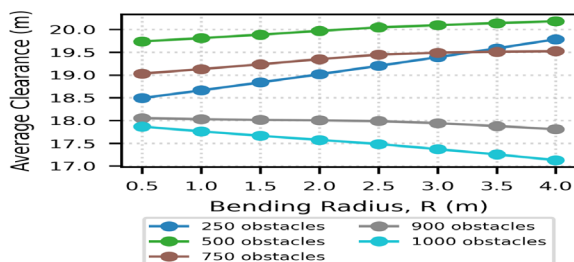
در شکل ۸، نسبت بازده خمش BER و نسبت کارایی ER بر حسب R نمایش داده شده‌اند که در آن منحنی BER برای همه سناریوها یکسان و منحنی‌های ER به‌ازای پنج تراکم مختلف و در شکل ۹، میانگین فاصله نقاط قوس‌های نرم‌شده از نزدیک‌ترین مانع برای سناریوهای ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ مانع بر حسب شعاع به تصویر کشیده شده است.

در شکل ۱۰، میانگین زمان اجرا و انحراف معیار هر دو الگوریتم بر حسب تعداد موانع در دو محور عمودی جداگانه مقایسه شده و چهار منحنی مجزا برای هر یک از این کمیت‌ها رسم شده است.

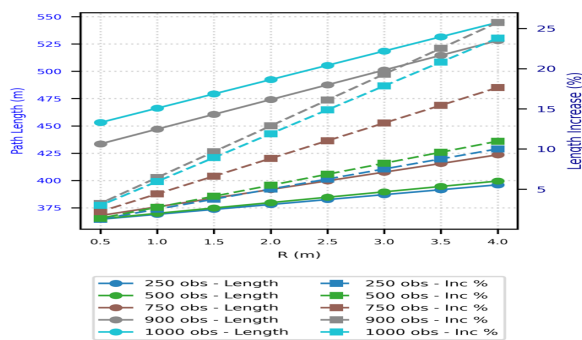
در شکل ۱۱، شاخص همواری مسیر (PS) و شاخص پیچیدگی مسیر (PC) بر حسب تعداد موانع ارائه شده است.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با مدل‌سازی محیط شبکه‌ای تصادفی و جایگزینی هر پیچ نود درجه با کمان دایره‌ای به شعاع R، تأثیر این شعاع را



شکل ۹ میانگین فاصله قوس‌های نرم‌شده از نزدیک‌ترین مانع بر حسب تغییرات شعاع برای انواع موانع.



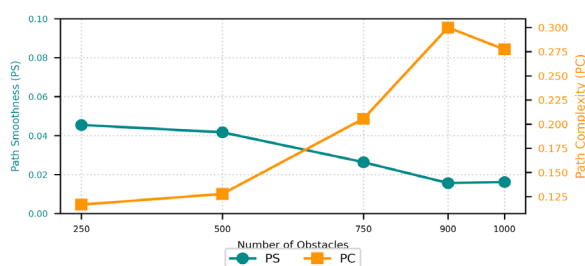
شکل ۷ طول مسیر نرم‌شده و درصد افزایش طول برای انواع شعاع در تعداد موانع مختلف.

پلیمری نرم است؛ شعاعی بزرگ‌تر از این کرانه، خمش را به حرکتی شبه‌خطی بدل کرده و مفهوم نرم‌سازی را منتفی می‌سازد. افزون‌بر آن، این مقدار با عرض دالان‌های عبوری (۴ تا ۸ متر) نیز سازگار بوده و تضمین می‌کند کمان‌های نرم‌شده در تمامی سناریوها از محدوده فضای آزاد خارج نشوند. بدین ترتیب، ۵ متر مرز بالایی معقولی است که هم‌زمان با مشخصه‌های هندسی ربات و توپولوژی محیط هم‌خوانی دارد.

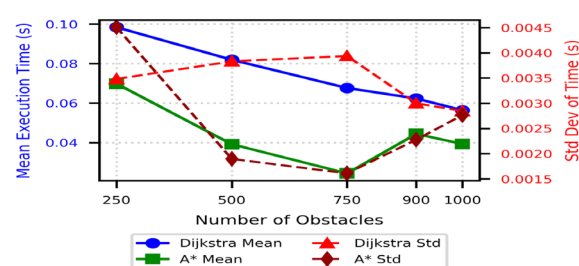
وجود سازوکاری برای ارزیابی ریسک و تضمین فاصله ایمن از موانع، از الزامات در ناوبری ربات‌های متحرک است. در رویکردهای اولیه نیز ریسک، به‌طور معمول، تابعی از حداقل فاصله تا مانع تعریف می‌شد [۲۲]. بنابراین، برگزیدن شاخص ایمنی از موانع (Clearance) به منزله معیار سوم، انتخابی است که با چارچوب‌های تثبیت‌شده ارزیابی ریسک انطباق کامل دارد. ربات‌های نرم به‌دلیل بدنه انعطاف‌پذیر، بیش از ربات‌های صلب در معرض خطر برخورد با موانع قرار دارند؛ از این رو، تضمین حفظ حاشیه امن در طول مسیر اهمیت مضاعف می‌یابد. برای محاسبه این سنجه، در هر پیچ مسیر صلب، کماتی دایره‌ای به شعاع R مفروض و هجده نقطه با توزیع یکنواخت روی آن نمونه‌برداری می‌شود. سپس برای هر یک از این نقاط، فاصله اقلیدسی تا مرکز نزدیک‌ترین سلول مانع اندازه‌گیری و میانگین این فواصل به‌عنوان نماینده فاصله ایمن آن کمان ثبت می‌شود. با میانگین‌گیری از تمامی پیچ‌های مسیر، مقدار واحد برای هر R به‌دست می‌آید که نشان می‌دهد مسیر نرم‌شده به‌طور میانگین چه اندازه از موانع فاصله دارد.

نتایج

پس از اجرای کامل الگوریتم‌ها، یافتن مسیرهای مناسب و محاسبه کامل شاخص‌ها امکان مقایسه بهتر ویژگی‌های مختلف ربات فراهم می‌شود. در شکل ۷، طول مسیر نرم‌شده و درصد



شکل ۱۱ شاخص همواری مسیر و شاخص پیچیدگی مسیر بر حسب تعداد موانع.



شکل ۱۰ میانگین زمان اجرا و انحراف از معیار الگوریتم‌ها بر حسب تعداد موانع.

شلوغ، انتخاب شعاع بزرگ‌تر از دو متر توجیه اقتصادی (هزینه طولی) ندارد مگر آن‌که الزام سینماتیکی ربات نرم پلیمری چنین حکمی کند.

در شکل ۹، داده‌های Clearance نشان می‌دهند که این سنجه ایمنی با کاهش شعاع خمش در هر سناریو به‌طور ملایمی کم می‌شود؛ برای مثال در سناریوی ۱۰۰۰ مانع، از ۱۷/۸۷ متر در شعاع نیم متر به ۱۷/۱۳ متر در شعاع چهار متر می‌رسد که کاهشی حدود ۰/۷۴ متر را نشان می‌دهد. با این حال، عامل اصلی تعیین‌کننده حاشیه ایمنی، تراکم موانع است، نه شعاع خمش. گواه این مدعا آن‌که از ۱۹/۷۹ متر در سناریوی ۲۵۰ مانع در شعاع ۴ متر به ۱۷/۱۳ متر در سناریوی ۱۰۰۰ مانع در شعاع ۴ متر افت پیدا می‌کند؛ یعنی ۲/۶۶ متر کاهش که ۱۳ درصد از مقدار اولیه را شامل می‌شود. در مجموع، این یافته اطمینان‌بخش است که حتی در بدترین ترکیب، میانگین فاصله نقاط کمان از موانع حدود ۱۷ متر بوده که برای یک ربات پلیمری نرم ۴×۴ متری فضای مانور بسیار امنی فراهم می‌کند. این نتیجه دلالت بر آن دارد که محدودیت اصلی در انتخاب شعاع، نه خطر برخورد، بلکه هزینه طولی و قابلیت خمشی ربات است.

در شکل ۱۰، برخلاف انتظار اولیه زمان اجرای هر دو الگوریتم با افزایش موانع کاهش یافته است؛ میانگین زمان دیکسترا از ۰/۰۹۸۳۷۳ ثانیه در ۲۵۰ مانع به ۰/۰۵۶۳۷۷ ثانیه در ۱۰۰۰ مانع و برای A* از ۰/۰۶۹۸۲۴ به ۰/۰۳۹۳۱۹ ثانیه رسیده است. این رفتار را می‌توان به کاهش فضای جست‌وجوی مؤثر نسبت داد: موانع بیشتر، گره‌های آزاد کمتری برای پیمایش باقی می‌گذارند و الگوریتم زودتر به نتیجه می‌رسد. با وجود این روند مشابه، A* در تمامی سناریوها برتری محسوسی از خود نشان داده است. برای مثال در سناریوی ۷۵۰ مانع A*، تنها ۳۶ درصد زمان دیکسترا را مصرف کرده است. همچنین انحراف معیار A* عموماً پایین‌تر از دیکسترا بوده که حاکی از پایداری بیشتر آن در برابر تغییرات تصادفی موقعیت موانع است. در سناریوی ۹۰۰ مانع، به‌رغم طول یکسان ۴۴۰ متر، تعداد پیچ‌های دو مسیر

بر طول، ایمنی و بازده خمشی مسیر در تراکم‌های مختلف موانع ارزیابی کند. در شکل ۷، پاسخ طول مسیر نرم‌شده به تغییرات شعاع خمش برای پنج سناریو با تراکم‌های مختلف موانع ترسیم شده است. چنان‌که از مقادیر برمی‌آید، در سناریوی ۲۵۰ مانع (با تنها ۲۱ پیچ) درصد افزایش طول از ۱/۲۵٪ در شعاع نیم متر تا ۱۰/۰۱٪ در شعاع ۴،۰ متر نوسان دارد. این دامنه در سناریوی ۱۰۰۰ مانع (با ۶۱ پیچ) به شدت گسترده‌تر شده و از حدود ۳٪ تا حدود ۲۳٪ می‌رسد. علت این شکاف فزاینده، نه تنها افزایش تعداد پیچ‌ها (از ۲۱ به ۶۱) بلکه افزایش طول صلب از ۳۶۰،۰۰ متر به ۴۴۰،۰۰ متر است؛ چه آن‌که هزینه نسبی نرم‌سازی به ازای هر پیچ ثابت بوده و انباشت آن در مسیرهای بلندتر، درصد افزایش طول را تشدید می‌کند. نگاه دقیق‌تر به مقادیر میانی مثلاً در سناریوی ۷۵۰ مانع نشان می‌دهد که گذار از شعاع ۲ متر به ۲/۵ متر، ۲/۲ واحد درصد به افزایش طول می‌افزاید، درحالی‌که همین گام در سناریوی ۲۵۰ مانع تنها ۱/۲۵ واحد درصد رشد دارد. این حساسیت مضاعف، تأکیدی است بر آن‌که تعیین شعاع خمش در محیط‌های پرمانع باید با وسواس بیشتری انجام پذیرد. در شکل ۸، نسبت بازده خمش از ۹۰٪ در شعاع نیم متر تا ۲۰٪ در شعاع ۴ متر کاهش یافته و کاملاً مستقل از تعداد موانع است. در مقابل، نسبت کارایی که به‌نوعی بهره‌وری خمش را نمایندگی می‌کند، الگویی به‌شدت غیرخطی و وابسته به تراکم موانع از خود نشان می‌دهد. برای نمونه، ER در سناریوی ۲۵۰ مانع از ۷۱/۸۹ در شعاع نیم متر به ۲ در شعاع چهار متر سقوط می‌کند، حال آن‌که در سناریوی ۱۰۰۰ مانع همین بازه از ۳۰/۲۵ به ۰/۸۴ محدود می‌شود. این اعداد آشکار می‌سازند که شعاع‌های کوچک (نیم تا یک متر) در همه سناریوها ER دو رقمی را حفظ کرده و مصالحه‌ای عالی میان نرم‌شدگی و هزینه طولی ارائه می‌دهند، اما با عبور از شعاع دو متر، ER به زیر ۱۰ افت کرده و عملاً افزایش طول بر منفعت خمشی غلبه می‌کند. نکته قابل تأمل آن‌که در سناریوی ۱۰۰۰ مانع، حتی در شعاع دو متر نیز ER تنها ۵/۰۴ است، بدین معنا که در محیط‌های بسیار

ایستاست. تحلیل کمی سناریوهای ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ مانع آشکار ساخت که افزایش تراکم موانع، نه تنها بر تعداد پیچ‌های مسیر صلب می‌افزاید، بلکه حساسیت تمامی معیارهای عملکردی به‌ویژه طول و ER را به شعاع خمش تشدید می‌کند. بر پایه داده‌ها، شعاع‌های میانی موازنه پذیرفتنی‌ای میان BER حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد، ER (بین ۷ تا ۱۸) و Clearance (بیش از ۱۷ متر) برقرار می‌سازند و می‌توان آن‌ها را به‌عنوان انتخاب‌های پیش‌فرض برای کاربردهای عمومی توصیه کرد. با این حال، انتخاب نهایی شعاع خمش باید بر اساس اولویت‌های مأموریت (حداقل‌سازی زمان پیمایش، بیشینه‌سازی ایمنی، یا مصرف بهینه انرژی) صورت گیرد. همچنین، الگوریتم A* به دلیل زمان اجرای به‌مراتب کمتر و پایداری بالاتر، گزینه‌ای ایده‌آل برای سامانه‌های بی‌درنگ و پلتفرم‌هایی با منابع محاسباتی محدود شناخته شد. در امتداد این پژوهش، جایگزینی کمان‌های دایره‌ای با منحنی‌های واجد پیوستگی مرتبه دوم نظیر اسپلاین‌های مکعبی یا کلوئیدها، بسط مدل به محیط‌های پویا با بازمحاسبه بی‌درنگ مسیر و توسعه یک چارچوب بهینه‌سازی تطبیقی برای تعیین محلی شعاع خمش متناسب با چگالی موانع پیشنهاد می‌شود. اعتبارسنجی تجربی بر روی سکوی رباتیک نرم نیز گام ضروری آتی به‌شمار می‌آید.

۶۱ و ۶۳ گزارش شده است که نشان‌دهنده وجود چندین مسیر بهینه با طول یکسان در گراف است. این پدیده تأکید می‌کند که ارزیابی صرفاً بر مبنای طول مسیر کافی نیست و معیارهایی چون تعداد پیچ و به تبع آن PS و PC برای قضاوت درباره کیفیت مسیر ضروری‌اند.

در شکل ۱۱، با افزایش موانع از ۲۵۰ به ۱۰۰۰، شاخص همواری PS کاهش حدود ۶۵ درصدی و شاخص پیچیدگی PC افزایش حدود ۱۳۸ درصدی به‌همراه دارد. جهش اصلی نه میان ۵۰۰ و ۷۵۰، بلکه در گذار از ۷۵۰ به ۹۰۰ رخ می‌دهد، جایی که شمار پیچ‌ها از ۳۷ به ۶۳ و PC از ۰/۲۰۵۶ به ۰/۳ جهش می‌کند بزرگ‌ترین پرش در همه‌ی سناریوها و نشان‌دهنده‌ی آستانه‌ای است که مسیر ناچار به زیگزاگ‌های متراکم می‌شود. با این حال، در سناریوی ۱۰۰۰ مانع، PC اندکی کاهش و PS افزایش می‌یابد؛ این بازگشت جزئی ناشی از افزایش طول صلب از ۴۲۰ به ۴۴۰ متر و کاهش پیچ‌ها از ۶۳ به ۶۱ است که در تراکم‌های بسیار بالا، مسیرهای جایگزین کم‌پیچ‌تر با طول بیشتر مجال بروز می‌یابند. شناسایی این آستانه‌ها برای طراحی راهبردهای ناوبری تطبیقی با شعاع خمش محلی راهگشاست.

به‌طور کلی این پژوهش به‌طور نظام‌مند نشان داد که شعاع خمش، پارامتری کانونی در تنظیم هم‌زمان طول، ایمنی و انعطاف‌پذیری مسیر ربات نرم با بدنه پلیمری در محیط‌های شبکه‌ای با موانع

مراجع

- Núñez-Calvo N., Sorrosal G., Cabanes I., Mancisidor A., Rodríguez-Guerra J., Enhancing Accuracy in Mobile Manipulators: Challenges, Current Solutions and Future Needs, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 96, 103041, **2025**.
- Eyvazian A., Song Y., Hovhannes C., Savari A., Sawaran Singh N.S., State-of-the-Art Soft Robotic Systems for Unstructured and Real-world Environments: A Systematic Review, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 73, 102264, **2026**.
- Wang J., Zhou Z., Kahak A., Li S., Embodying Physical Computing Into Soft Robots, *Nature Communications*, 17, 3384, **2026**.
- Willemstein N., Imanian M.E., van der Kooij H., Sadeghi A., Pellet-Based 3D Printing of Soft Thermoplastic Elastomeric Membranes for Soft Robotic Applications, *Materials & Design*, 258, 114589, **2025**.
- Kulkarni S.S., Bayre N.M., Khan K.A., Modelling Visco-Hyperelastic Response of Silicone Based Elastomers for Soft Robotics and Foldable Structure Applications, *International Journal of Engineering Science*, 211, 104253, **2025**.
- Esmalipour S., Ajri M., Modeling and Analysis of the Bending Behavior of Soft Pneumatic Network Actuator with Hyperelastic Models, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 55, 1021-1042, **2023**.
- Molla M.H.O.R., Chen J., Xu C., Advancing Soft Robotics: Recent Progress in Dielectric Elastomer and Fluid Actuators, *npj Robotics*, 4, 17, **2026**.
- Zhou S., Li Y., Wang Q., Lyu Z. Integrated Actuation and Sensing: Toward Intelligent Soft Robots. *Cyborg and Bionic Systems*, 5, 0105, **2024**.
- Zhang B., et al. Morphological Design Methodologies of Soft Robots. *The Innovation*, 6, 100578, **2025**.
- Weng Z., Sun L., Li L., et al. Design and Implementation of a Three-Segment Tendon-Driven Soft Robot with Variable Stiffness. *Biomimetics*, 11, **2026**.
- Wang B., Sun H., Du J., et al. Kinematic Modelling and Closed-Loop Control of a Novel Soft Continuum Robot. *Knowledge-Based Systems*, 316, 113367 **2025**.
- Liu L., Wang P., et al., Path Planning Techniques for Mobile Robots: Review and Prospect, *Expert Systems with Applications*, 227, 120264, **2023**.
- Lee S., Joo H., Kim K., Kim H., Rolling-Horizon Genetic Algorithm for Adaptive Path Planning in Hazardous Environments, *Computers and Electrical Engineering*, 129, 110820, **2026**.
- Sabelhaus D., Röben F., Meyer zu Helliggen L.P., Schulze Lammers P., Using Continuous-Curvature Paths to Generate Feasible Headland Turn Manoeuvres, *Biosystems Engineering*, 116, 399–409, **2013**.
- Du S., Du M., Gao Y., Yang M., Hu F., Weng Y., Optimized Motion Planning for Mobile Robots in Dynamic Construction Environments with Low-Feature Mapping and Pose-Based Positioning, *Automation in Construction*, 177, 106334, **2025**.
- Tang Y., Zakaria M.A., Younas M., A Review on Path Planning Algorithms for Autonomous Mobile Robots, *Sensors*, 25, 1206, **2025**.
- Ahmad, J., & Ab Wahab, M. N. Enhancing the Safety and Smoothness of Path Planning Through an Integration of Dijkstra's Algorithm and Piecewise Cubic Bezier Optimization. *Expert Systems with Applications*, 289, Article 128315. **2025**.
- Šelek, A., & Seder, M. Smooth Motion Planning Method for Mobile Robots in Dynamic Environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 195, 105220. **2026**.
- Liu L., Wang S., Zhang S., Du H., Wang P., Path Planning Techniques for Mobile Robots: Review and Prospect, *Expert Systems with Applications*, 229, 120466, **2023**.
- Venu S., Gurusamy M., A comprehensive Review of Path Planning Algorithms for Autonomous Navigation, *Results in Engineering*, 28, 107750, **2025**.
- Yang L., Qi H., Ma E., Qiu S., Li P., Huang Y., Mao J., Li M., Path Planning Technique for Mobile Robots: A Review, *Machines*, 11, 980, **2023**.
- Benrabah M., Orou Mousse C., Randriamariantsoa E., Chapuis R., Aufrère R., A Review on Traversability Risk Assessments for Autonomous Ground Vehicles: Methods and Metrics, *Sensors*, 24, 1909, **2024**.

