

مسیریابی بازوی مکانیکی ماهر ربات با استفاده از الگوریتم ژنتیک

احمد حبیبی زاد نوین^۱، آیدین سخاوتی^۲، محمد باروت کوب^۳

^۱ هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی تبریز

^۲ هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر

^۳ کارشناسی ارشد مکترونیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر

چکیده

در این نوشتار جهت تولید مسیر حرکت بازوی ربات صفحه ای از روش نقطه به نقطه بر اساس الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. مسئله اصلی، تولید حرکت نرم و هموار از نقطه شروع تا نقطه هدف برای یک ربات دو لینکی و یک ربات سه لینکی دارای افزونگی در فضای کاری ربات است. مسیر حرکت تولید شده طوری است که گشتاورهای مفصلی از حداکثر گشتاور اعمالی مفروض تجاوز نکرده و با مانع برخورد نمی کند. برای پیدا کردن گشتاورهای مفصلی از الگوریتم دینامیکی تکراری نیوتن اولر استفاده شده است. مسیر حرکت تولید شده به روش نقطه به نقطه بر اساس یک تابع هزینه پیشنهادی بهینه سازی می شود. تابع هزینه پیشنهادی شامل میزان تغییر زوایای مفاصل، مدت زمان و مسافت طی شده توسط بازوی ربات می باشد. برای توصیف مسیر حرکت ربات از نقطه شروع تا نقطه میانی از یک چندجمله ای درجه ۴ و برای توصیف مسیر حرکت از نقطه میانی تا هدف از یک چندجمله ای درجه ۵ استفاده شده است. نتایج شبیه سازی برای هر دو نوع ربات ۲ لینکی و ۳ لینکی، نشان دهنده عملکرد موثر روش پیشنهادی برای مسیریابی حرکت بازوی ربات صفحه ای بخصوص زمانی که در فضای کاری ربات مانع وجود دارد، می باشد.

واژه‌های کلیدی: بازوی ربات، مسیریابی حرکت، الگوریتم ژنتیک

مقدمه

دانشمندان اغلب احساس می‌کنند که با انجام مطالعاتشان درباره جنبه‌ای از خود چیزهایی می‌آموزند. فیزیکدانان، روانشناسان و شیمی‌دانان همه این ارتباط را مشاهده می‌کنند. در مطالعه بازوهای روبات‌ها ارتباط بین این زمینه مطالعاتی و انسان بسیار قابل لمس است، همچنین رباتیک بر خلاف علوم می‌کنند که تنها به تحلیل بسنده می‌کنند در شکل حاضر خود از مهندسی نیز برای ترکیب استفاده می‌کند. مطالعه رباتیک، با تمایل شخص به ترکیب بعضی از کارهای انجام شده توسط انسان با استفاده از مکانیزمها، حساسه‌ها، کاراندازها و کامپیوترها ارتباط نزدیک دارد. این کار عظیمی است که به نظرات متعددی از رشته‌های کلاسیک گوناگون نیاز دارد [۱].

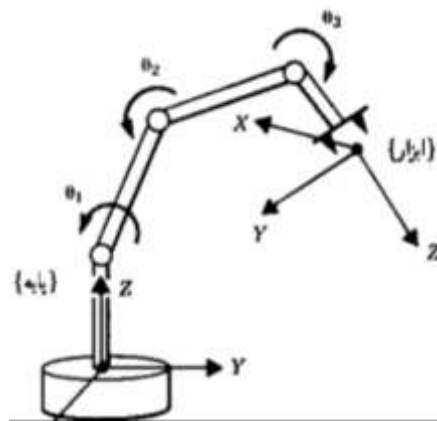
در مطالعه روباتیک، پیوسته با مکان و جهت‌گیری اجسام سروکار داریم. این اجسام ممکن است رابط‌های بازوی مکانیکی ماهر، قطعات و ابزاری که بازوی مکانیکی ماهر با آنها سروکار دارد، و یا سایر اجسام موجود در محیط کار بازو باشند. این اجسام تنها با دو مشخصه تعیین می‌شوند: مکان و جهت‌گیری.

سینماتیک علم حرکت است و حرکت را بدون در نظر گرفتن نیروهای بوجود آورنده آن مطالعه می‌کند. در علم سینماتیک، مکان، سرعت، شتاب و کلیه مشتقات بالاتر از متغیرهای مکانی (نسبت به زمان یا هر متغیر دیگر) بررسی می‌شود. از این رو مطالعه سینماتیک بازوهای مکانیکی ماهر به تمام ویژگیهای هندسی و زمانی حرکت مربوط می‌شود.

بازوهای مکانیکی ماهر از رابط‌های نسبتاً صلبی تشکیل می‌شوند که به وسیله مفصل‌هایی که حرکت نسبی رابط‌های مجاور را ممکن می‌سازند، به یکدیگر اتصال یافته‌اند. این مفصل‌ها معمولاً به حساسه‌های مکانی، که اندازه‌گیری مکان نسبی رابط‌های مجاور را ممکن می‌سازند، مجهزند. در حالتی که مفصل‌ها از نوع چرخشی یا لولایی باشند، این‌گونه جابجایی‌ها را زوایای مفصلی می‌نامند. برخی از بازوهای مکانیکی ماهر، مفصل‌های لغزشی یا کشویی دارند که در آنها جابجایی نسبی بین رابط‌ها از نوع انتقال است و گاه آن را انحراف مفصلی نیز می‌نامند.

تعداد درجات آزادی هر بازوی مکانیکی ماهر، عبارتست از تعداد متغیرهای مکانی مستقلی که باید برای تعیین مکان و جهت-گیری کلیه قسمت‌های مکانیزم مشخص شوند. این اصطلاحی کلی است که برای هر مکانیزم به کار می‌رود. از آنجا که بازوی مکانیکی ماهر یک زنجیر سینماتیکی باز است و چون مکان هر مفصل معمولاً تنها با یک متغیر توصیف می‌شود، تعداد درجات آزادی با تعداد مفصل‌ها برابر خواهد بود.

به طور کلی مکان بازوی مکانیکی ماهر را با توصیف چهارچوب ابزار که به مجری نهایی متصل است، نسبت به چهارچوب پایه، که به پایه غیر متحرک بازو اتصال دارد تعیین می‌کنیم که در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): معادلات سینماتیکی چهارچوب ابزار نسبت به پایه به صورت تابعی از متغیرهای مفصلی توصیف می شود

در مطالعه بازوی مکانیکی ماهر مسئله سینماتیک مستقیم یک مسئله بسیار اساسی می باشد. این مسئله در واقع مسئله هندسی-استاتیکی محاسبه مکان و جهت گیری مجری نهایی بازوی مکانیکی ماهر است. به طور دقیق تر چنانچه یک دسته زاویه مفصلی داده شده باشد، مسئله سینماتیک مستقیم عبارت است از محاسبه مکان و جهت گیری چهارچوب ابزار نسبت به چهارچوب پایه. گاهی این مسئله را تغییر نمایش مکان بازوی مکانیکی ماهر از فضای مفصلی به فضای دکارتی تعبیر می کنند. اهداف این مقاله به طور مختصر به صورت زیر می باشد:

تولید مسیر حرکت به صورت نقطه به نقطه برای بازوهای مکانیکی ماهر ۲ لینکی و ۳ لینکی با استفاده از چندجمله ای های درجه چهار و پنج.

بهینه سازی مسیر حرکت تولید شده بوسیله الگوریتم ژنتیک. تابع هزینه استفاده شده شامل زمان طی مسیر، طول مسیر کارترین طی شده و تغییرات زوایای مفصل های ربات می باشد بدون اینکه از ماکزیمم گشتاور مفروض قبلی تجاوز کند. بررسی توانایی الگوریتم پیشنهادی برای جلوگیری از برخورد بازوی ربات با مانع فرضی در مسیر حرکت با تعریف یک تابع هزینه مجزا برای مانع.

مبانی نظری

در سال های اخیر ربات های خودکار در زمینه های زیادی با کاربردهای مختلف از جمله جوشکاری، بسته بندی، مونتاژ، کارهای زیر دریا، پزشکی و غیره معرفی شده اند. مسیریابی حرکت، محاسبه و آنالیز توابع حرکت است که بازوی ربات را از یک پیکربندی به پیکربندی دیگر می رساند. روش های زیادی برای مسیریابی حرکت در دهه های اخیر ارائه شده است [۱۷]. Kim و Shin [۱۸] روشی را برای ترسیم مسیر در فضای مفصلی جهت بهینه سازی زمان ارائه کردند. برای تولید مسیر حرکت صاف و هموار Zoller و Zentay [۱۹] بر روی مسئله مسیریابی ربات با در نظرگیری انرژی سینتیکی متمرکز شده بودند. آنها از فضای اقلیدسی برای فراهم کردن معادلات دینامیک حرکت ربات با انرژی سینتیکی ثابت استفاده کرده بودند. این روش از نظر صافی و همواری مسیر، یک روش بهتری نسبت به روش ارائه شده توسط Kim و Shin می باشد، ولی فقط زمانی کارایی دارد که از قبل تمام مشخصات مربوط به مسیر حرکت تعریف شده باشد.

Somlo و Sokolov [۲۰] تلاش زیادی را برای اتوماتیک کردن تولید مسیر حرکت انجام دادند. آنها نشان دادند که رویکردهای متفاوتی برای مسیریابی حرکت وجود دارد که می‌توان از جمله به مسیر زمان بهینه، مسیر عملکرد بهینه و مسیر نیرو بهینه اشاره کرد. تحقق همه این رویکردها در حقیقت اتوماتیک سازی تولید مسیر می‌باشد.

Zhe Tang [۲۱] یک روش مسیریابی براساس منحنی درونیابی سه درجه جهت ایجاد یک مسیر نرم و هموار ارائه کرد. در مورد مسیریابی درون خطی^۱، Chwa [۲۲] یک الگوریتم هدایت موشک برای تولید مسیر حرکت به صورت درون خطی ارائه کرد. او از قانون هدایت موشک برای مسیر حرکت با در نظرگیری قیود دینامیکی مانند گشتاور و سرعت استفاده کرد و شرایط را به گونه‌ای ایجاد کرد که موقعیت و سرعت ربات نسبت به زمان با هم رهگیری می‌شد.

در چند سال اخیر الگوریتم‌های تکاملی نقش بسیار مهمی را در بهینه سازی مسیر حرکت ربات‌ها ارائه کرده‌اند. Vada Kapat [۲۳] روشی را بر اساس میدان پتانسیل مصنوعی برای تولید مسیر حرکت به صورت زمان واقعی ارائه کردند. ایده اساسی در این روش این بود که ربات در فضای پیکربندی به عنوان یک ذره نقطه‌ای تحت تاثیر یک میدان پتانسیل مصنوعی قرار دارد، به گونه‌ای که زمانی که ربات از مرزهای مانع فضای پیکربندی (مجموعه پیکربندی‌هایی که در آنها ربات با مانع برخورد می‌کند) خارج می‌شود، به سمت پیکربندی نهایی جذب می‌شود. در این روش مسئله، یافتن مینیمم مطلق میدان پتانسیل مصنوعی با شروع از پیکربندی اولیه است. برای یافتن این مینیمم مطلق از الگوریتم ژنتیک استفاده شده بود.

تولید مسیر چگونگی مشخص کردن یک مسیر در فضا توسط انسان را نیز شامل می‌شود. چنانچه بخواهیم توصیف حرکت بازوی مکانیکی ماهر را برای شخص استفاده کننده از سیستم رباتی ساده کنیم، نباید از وی انتظار نوشتن توابعی پیچیده از فضا و زمان را داشته باشیم، بلکه باید از او تنها قابلیت تولید مسیرهای مشخص را با توصیف‌هایی ساده از حرکت مورد نظر خواستار شویم و جزئیات انجام کار را بر عهده سیستم رباتی بگذاریم. مثلاً ممکن است استفاده کننده تنها مکان هدف موردنظر و موقعیت مجری نهایی را مشخص کند و تصمیم‌گیری درباره شکل دقیق مسیر، زمان دقیق برای رسیدن به هدف، منحنی تغییرات سرعت و دیگر جزئیات را به عهده سیستم رباتی بگذارد. بنابراین سیستم برنامه‌ریزی مسیر حرکت روبات باید قادر باشد بهترین مسیر را با در نظر گرفتن موانع موجود در فضای کاری تولید کند [۱۲].

یک ربات می‌تواند به دو قسمت اصلی تجزیه شود.

- مکانیزم ربات مانند مفاصل، لینک‌ها و کاراندازها که توانایی انجام رنج گسترده‌ای از حرکت‌ها را دارد.

- الگوریتم کامپیوتری با سیستم کنترلی و سنسوری که توانایی برنامه‌ریزی و کنترل این حرکات را دارد.

برنامه ریزی حرکت ربات می‌تواند به صورت درون خطی یا برون خطی انجام گیرد. در حالت درون خطی ربات در حال انجام کار می‌باشد و در حالت برون خطی ربات هنوز شروع به کار نکرده است. به علت افزایش قدرتمندی رفتار ربات در مقابل نامعلومی و خطاهای مدلسازی، برنامه ریزی در حالت درون خطی مطلوب است ولی برنامه ریزی درون خطی زمانی استفاده می‌شود که نیازمند الگوریتم برنامه ریزی با محاسبات فشرده باشیم [۳۴].

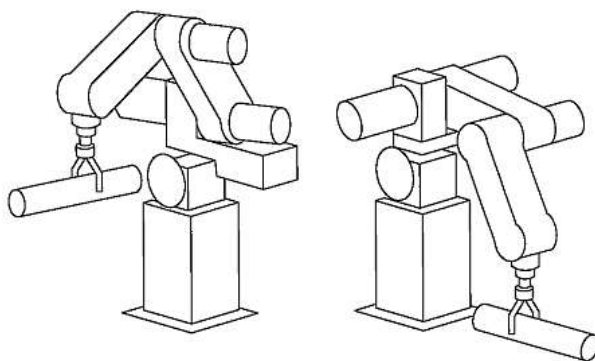
¹ Online

ملاحظات کلی مسیریابی

در طراحی مسیر به مشخص کردن کامل مکان هر نقطه بر روی ربات، پیکربندی گفته می شود و به مجموع تمام پیکربندی-های ممکن فضای پیکربندی می گویند. برای یک بازوی ربات پیدا کردن یک مسیر بهینه و صاف از یک پیکربندی اولیه به یک پیکربندی نهایی مطلوب در فضای پیکربندی را مسیریابی می گویند. در بیشتر حالتها، حرکت های بازوی مکانیکی ماهر را به صورت حرکت چارچوب ابزار نسبت به چارچوب پایه (جهانی) در نظر می گیریم. این همان ترتیبی است که استفاده کننده نهایی از سیستم نیز در ذهن خود رعایت می کند. طراحی یک سیستم توصیف و تولید مسیر چند مزیت مهم دارد.

هنگامی که مسیرها را به صورت حرکت چارچوب ابزار نسبت به چارچوب پایه بیان می کنیم، توصیف حرکت را مستقل از هر گونه ربات، مجری نهایی، یا قطعه کار خاص در نظر می گیریم. بدین ترتیب انعطاف پذیری سیستم افزایش می یابد، و می توان توصیف مسیری یکسان را برای ربات های مختلف یا برای ربات های یکسان به اندازه ابزار متفاوت به کار برد. همچنین می توان حرکت ها را نسبت به یک چارچوب پایه متحرک (مانند تسمه نقاله) نیز بیان کرد. این کار چنانچه بیش از این نیز گفته شد، با توصیف حرکت ها نسبت به چارچوب پایه و با در نظر گرفتن تغییر چارچوب پایه نسبت به زمان، همزمان با اجرای برنامه انجام پذیر است.

چنانچه در شکل ۲ نشان داده شده است، مسئله اصلی در طراحی مسیر عبارت است از حرکت بازوی مکانیکی ماهر از نقطه شروع به نقطه هدف مورد نظر است. به عبارت دیگر می خواهیم چارچوب ابزار را از محل فعلی آن به محل نهایی مورد نظر حرکت دهیم [۱۵].



شکل (۲): در حرکت از مکان اولیه به سوی هدف بازوی مکانیکی ماهر باید مسیر همواری را طی کند

حرکت های خشن و ناگهانی باعث ساییدگی مکانیزم ربات می شود و با ایجاد حالت تشدید در آن ارتعاشات زیان آور به وجود می آورد لذا حرکت بازوی ماهر مکانیکی باید هموار و صاف^۲ باشد. منظور از تابع هموار تابعی پیوسته با مشتق اول پیوسته است. گاهی باید مشتق دوم نیز پیوسته باشد. بنابراین برای اطمینان از هموار بودن باید در آن نوعی قید مکانی و زمانی را در بین نقاط میان راه در نظر گرفت. در این مرحله انتخاب های متعددی وجود دارد و می توان مسیرها را به روش های گوناگون مشخص کرد. هر تابع همواری از زمان که از نقاط بینابینی بگذرد، می تواند برای تعیین دقیق شکل مسیر به کار رود. در مرجع های [۱۳-۱۹] می توان رهیافت های دیگری را یافت. مسیرها را می توان به روش های گوناگونی تولید کرد. معمولاً دو روش در مسیریابی حرکت ربات وجود دارد: روش فضای مفصلی (PTP) و روش فضای دکارتی (CPC) [۱۶].

روش های فضای دکارتی

در روش های دکارتی شکل های مسیر بر حسب توابعی توصیف می شوند که مکان و جهت گیری دکارتی را بر حسب تابعی از زمان محاسبه می کنند، بنابراین می توان شکل فضایی مسیر بین نقاط بینابینی را نیز مشخص کرد. معمول ترین شکل مسیر خط راست است، اما از شکل های دایره ای، سینوسی و غیره نیز می توان استفاده کرد [۳۴].

هر نقطه مسیر، معمولاً بر حسب مکان و جهت گیری چهارچوب ابزار نسبت به چهارچوب پایه مشخص می شود. در روش های تولید مسیری که بر مختصات دکارتی مبتنی اند، توابعی که به یکدیگر وصل می شوند و منحنی مسیر کل را تولید می کنند، توابع زمانی با متغیرهای دکارتی اند. طرح این مسیرها را می توان مستقیماً، بدون آنکه ابتدا سینماتیک وارون حل شود، از تعریف نقاط مسیر توسط استفاده کننده، که مشخصات ابزار را نسبت به پایه بیان می کنند، به دست آورد. در هر صورت روش های دکارتی از نظر محاسباتی پرهزینه ترند، زیرا به هنگام اجرای برنامه کامپیوتری آنها، باید معادله های سینماتیکی وارون را با سرعتی برابر با آهنگ روزآمد کردن مسیر حل کرد. از آنجا که محاسبه مسیرها به وسیله کامپیوترهای دیجیتال صورت می گیرد، نقاط مسیر با آهنگی معین به نام آهنگ روزآمد کردن مسیر محاسبه می شوند. در سیستم های بازوی مکانیکی معمولی، این آهنگ بین ۲۰ تا ۲۰۰ Hz است [۳۴]. به عبارت دیگر، پس از آنکه مسیر در فضای دکارتی تولید شد، با حل معادله های سینماتیک وارون در آخرین مرحله، زوایای مفصلی موردنظر محاسبه می شوند.

مشکلات هندسی مسیرهای دکارتی

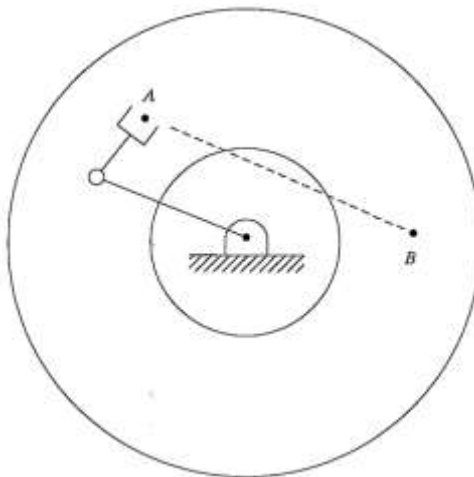
در مسیرهای دکارتی مشکلات گوناگونی در ارتباط با فضای کاری و نقاط تکیه، ایجاد می شود که در زیر به آنها اشاره می شود.

- مشکل نوع اول: نقاط بینابینی غیرقابل دسترس

اگرچه وضعیت اولیه و نقطه هدف نهایی بازوی مکانیکی ماهر، هر دو در محدوده فضای کاری آن هستند، اما امکان دارد برخی نقاط واقع بر خط واصل این دو نقطه، در فضای کاری قرار نگیرند. به عنوان نمونه، ربات صفحه ای با دو رابط و فضای کاری آن را همانطور که در شکل (۲-۵) نشان داده شده است در نظر می گیریم. در این ربات رابط ۲ از رابط ۱ کوتاه تر است، به طوری که در فضای کاری ربات سوراخی با شعاعی برابر با اختلاف طول دو رابط، ایجاد شده است. نقطه شروع و نقطه هدف در فضای کاری ربات قرار دارند. حرکت از نقطه شروع به هدف در فضای مفصلی ربات مسئله ای پدید نمی آورد، اما اگر بخواهیم حرکت را

² smooth

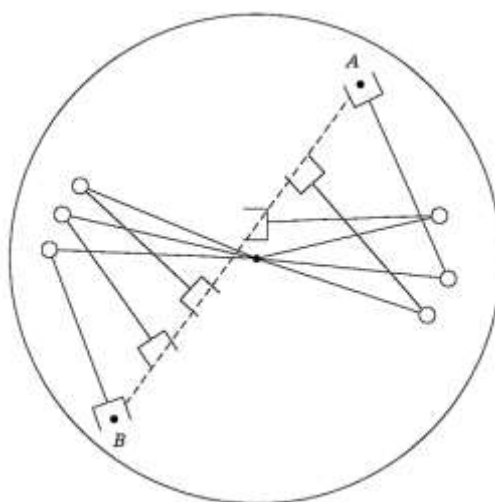
در فضای دکارتی در راستای خطی راست انجام دهیم، آنگاه دسترسی به برخی نقاط بینابینی در راستای مسیر ممکن نخواهد بود.



شکل (۳): مشکل نوع اول در فضای دکارتی

- مشکل نوع دوم: سرعت زیاد مفصل در نزدیکی نقاط تکین

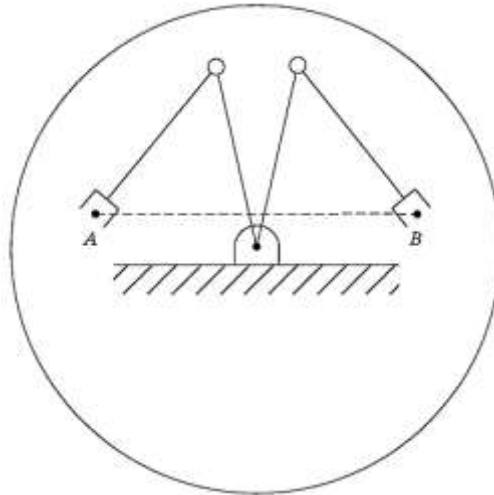
اگر بازوی مکانیکی ماهر در فضای دکارتی خطی راست را دنبال کند، و به سوی یکی از پیکربندی‌های تکین مکانیزم پیش رود، ممکن است سرعت یک یا چند مفصل افزایش یابد، و به بینهایت میل کند. چون سرعت‌های مکانیزم محدودیت دارند، این وضعیت غالباً باعث انحراف بازو از مسیر موردنظر می‌شود. در شکل یک ربات صفحه‌ای با دو رابط با چند وضعیت بینابینی نشان داده شده است. اگرچه دسترسی به کلیه نقاط مسیر ممکن است، اما هنگامی که ربات از قسمت میانی مسیر می‌گذرد، سرعت مفصل اول بسیار زیاد می‌شود. هرچه مسیر به محور مفصل ۱ نزدیکتر باشد، این سرعت بیشتر خواهد بود. برای حل این مشکل می‌توان سرعت در کل مسیر را تا حدی پایین آورد که سرعت کلیه مفصل‌ها در محدوده توانایی آنها قرار گیرد، اما این کار باعث می‌شود که مسیر از نظر زمانی وضع مطلوبی نداشته باشد.



شکل ۴: مشکل نوع دوم در فضای دکارتی

- مشکل نوع سوم: دسترسی پذیری نقاط شروع و هدف در جواب‌های مختلف

مشکل سوم در شکل نشان داده شده است. در اینجا یک ربات صفحه‌ای با دو رابط با طول‌های مساوی، به دلیل داشتن محدودیت‌های حرکتی در مفصل‌هایش، نمی‌تواند با همه جواب‌های ممکن به نقطه‌ای معین در فضا برسد.



شکل (۵): مشکل نوع سوم در فضای دکارتی

الگوریتم ژنتیک

ایده اصلی الگوریتم‌های تکاملی (evolutionary) در سال ۱۹۶۰ میلادی توسط ریچنبرگ مطرح گردید. الگوریتم‌های ژنتیک که منشعب از این نوع الگوریتم‌ها می‌باشد، در حقیقت روش جستجوی کامپیوتری بر پایه الگوریتم‌های بهینه‌سازی و بر اساس ساختار ژن‌ها و کروموزوم‌ها است که توسط جان هلند (۱۹۷۰) در دانشگاه میشیگان مطرح شد [۱۱]. پس از وی یکی دانشجویش به نام دیوید گلدبرگ با حل مسئله بسیار سخت کنترل انتقال خط لوله گاز در رساله خود (۱۹۸۹)، الگوریتم ژنتیک را مشهور ساخت [۳۷]. یکی از بهترین و جامع‌ترین تعاریف الگوریتم‌های ژنتیک نیز متعلق به کتاب گلدبرگ است: "الگوریتم‌های ژنتیک مدلی از یادگیری ماشین است که نحوه رفتار آن تمثیلی از فرآیندهای تکاملی موجود در عالم طبیعت است."

تابع هزینه مربوط به حرکت بدون برخورد با مانع

برای فضای کاری با مانع، تابع هزینه f_{ob} که مربوط به حرکت بدون برخورد با مانع می‌باشد را با تابع هزینه فضای کاری آزاد ترکیب می‌کنیم. بنابراین تابع هزینه کلی برای فضای کاری با مانع به صورت زیر می‌باشد [۲۵]:

$$f = f_f / f_{ob}$$

این تابع باعث می‌شود که ربات توانایی پرهیز از برخورد با مانع را در مسیر حرکت خود از نقطه‌ای به نقطه دیگر در فضای کاری خود داشته باشد. f_{ob} با توجه به شکل به صورت زیر توصیف می‌شود:

هر منطقه حرکت نقطه به نقطه اعم از وضعیت اولیه، مسیر کارترین و وضعیت نهایی هیچ تقاطعی با منطقه مانع نداشته باشد. در این حالت $f_{ob1}=1$ خواهد بود.

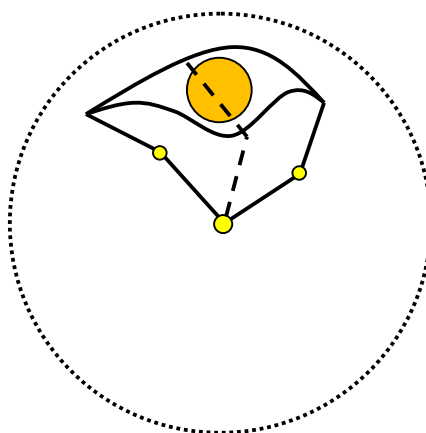
همه لینک‌ها از پیکربندی اولیه تا پیکربندی نهایی در طول مسیر هیچ تقاطعی با منطقه مانع نداشته باشد. در این حالت $f_{ob2}=1$ خواهد بود [۲۵].

بنابراین تابع هزینه مربوط به مانع به صورت زیر خواهد بود.

$$f_{ob} = f_{ob1} \times f_{ob2}$$

$$f_{ob1} = \begin{cases} 1 & \text{if } (motion\ region \cap obstacle) = 0 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases}$$

$$f_{ob2} = \begin{cases} 1 & \sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^a (Link_{ij} \cap obstacle) = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$



شکل (۶): برخورد پیکربندی ربات و مسیر دکارتی با مانع

شبیه سازی و مقایسه

مسیریابی حرکت برای ربات دو درجه آزادی

در این بخش یک ربات بندبند ۲ لینکی صفحه‌ای مورد مطالعه قرار می‌گیرد. پارامترهای مربوط به ربات در جدول (۴-۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): پارامترهای نامی ربات ۲ لینکی

واحد	لینک ۲	لینک ۱	
طول	۱	۱	متر
جرم	۱	۱	کیلوگرم
گشتاور	۱۲	۳۴	نیوتن متر

برای سادگی معادلات دینامیکی جرم لینک‌های ربات به صورت نقطه‌ای در انتهای هر لینک فرض می‌شود. هر دو مفصل ۱ و ۲ توانایی چرخش به اندازه 2π را دارا می‌باشند. همچنین پارامترهای مربوط به الگوریتم ژنتیک در جدول (۴-۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): پارامترهای مربوط به الگوریتم ژنتیک برای ربات ۲ لینکی

تعداد جمعیت اولیه	نرخ جهش	احتمال تقاطع	تعداد نسل
۲۰۰	۰/۰۵	۰/۸	۸۰

همانطور که نشان داده شد، برای یک ربات ۲ لینکی، ۶ تا پارامتر برای بهینه‌سازی وجود دارد. بنابراین هر کروموزوم اولیه تولید شده دارای ۶ ژن است که به صورت زیر می‌باشد.

$$\text{chromosome} = [q_1, q_2, \dot{q}_1, \dot{q}_2, t_1, t_2] \quad (1-4)$$

که در آن، q_1 و q_2 زوایای مفاصل در پیکربندی میانی، $\dot{q}_1$ و $\dot{q}_2$ سرعت مفاصل در پیکربندی میانی و t_1 و t_2 زمان طی شده توسط مجری نهایی ربات از نقطه شروع تا نقطه میانی و از نقطه میانی تا نقطه هدف می‌باشد. جدول (۳-۴) مختصات نقطه شروع، نقطه هدف و مانع را برای مورد تست شده نشان می‌دهد.

جدول (۳): مختصات نقطه شروع، نقطه هدف و مانع برای مورد تست شده ربات ۲ لینکی

مورد تست شده	نقطه شروع		نقطه هدف		مانع	
	x(m)	y(m)	x(m)	y(m)	x(m)	y(m)
تست ربات دو لینکی	۱/۲	۱/۵	-۱/۵	۱/۲	۰	۱/۴
					شعاع	۰/۳

فضای کاری آزاد

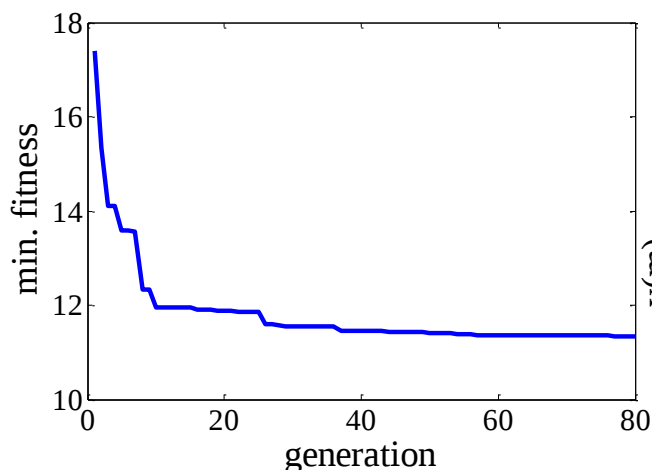
در این مورد مجری نهایی ربات از نقطه شروع تا نقطه پایان با مختصات داده شده در جدول (۳-۴) حرکت می‌کند. متغیرهای فضای دکارتی ربات با استفاده از معادلات سینماتیک معکوس به متغیرهای فضای مفصلی تبدیل می‌شود. معادلات سینماتیک ربات ۲ لینکی در پیوست الف نشان داده شده است.

الگوریتم ژنتیک مقدار ژن‌های تعریف شده برای یک کروموزوم را با توجه به تابع هزینه پیشنهادی، بهینه‌سازی می‌کند. در هر نسل و برای همه کروموزوم‌های تولید شده در الگوریتم، معادلات مسیریابی بیان شده در معادلات (۱-۳) الی (۳-۲۵) استفاده شده و زاویه مفصلی برای هر یک از مفصل‌ها پیدا می‌شود. مشتقات اول و دوم موقعیت زاویه مفاصل نسبت به زمان از نقطه شروع تا نقطه پایانی که از نقطه میانی می‌گذرد به صورت تابعی از زمان به دست می‌آید. بعد از ۸۰ نسل اجرای الگوریتم، پارامترهای مربوط به بهترین کروموزوم برای تابع هزینه تعریف شده برای فضای کاری آزاد در جدول (۴-۴) نشان داده شده است.

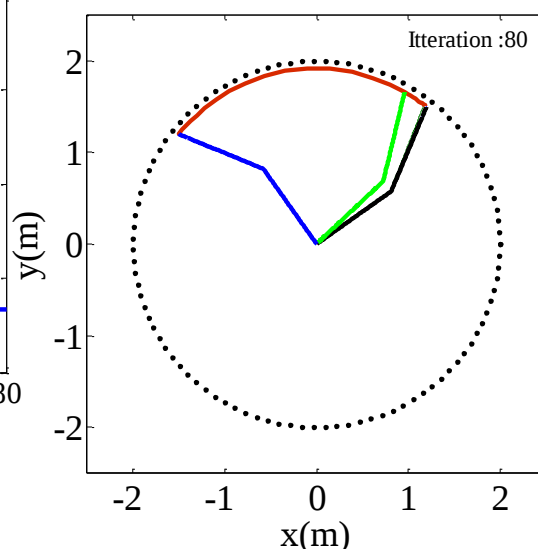
جدول (۴): پارامترهای مربوط به بهترین کروموزوم برای ربات ۲ لینکی در فضای کاری آزاد

q_1	q_2	$\dot{q}_1$	$\dot{q}_2$	t_1	t_2
۰/۷۵۴۱	۰/۵۸۲۷	۰/۷۸۰۸	۰/۰۳۹۹	۰/۵۱۰۴	۱/۸۹۱۴

با بکار بردن پارامترهای کروموزوم بهینه شده در معادلات مسیریابی حرکت (۱-۳) الی (۳-۲۵) زاویه مفاصل، سرعت و شتاب زاویه‌ای تولید شده برای هر مفصل به دست می‌آید. نقطه میانی در نظر گرفته شده مابین نقطه شروع و نقطه هدف در حقیقت بهترین کروموزوم به دست آمده از اجرای الگوریتم ژنتیک می‌باشد.

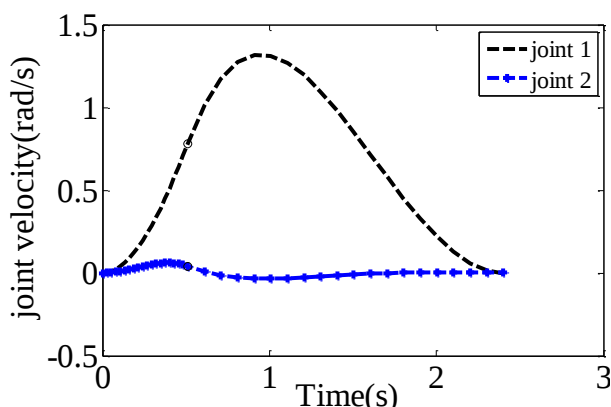


شکل (۸): بهینه سازی تابع هزینه با الگوریتم ژنتیک



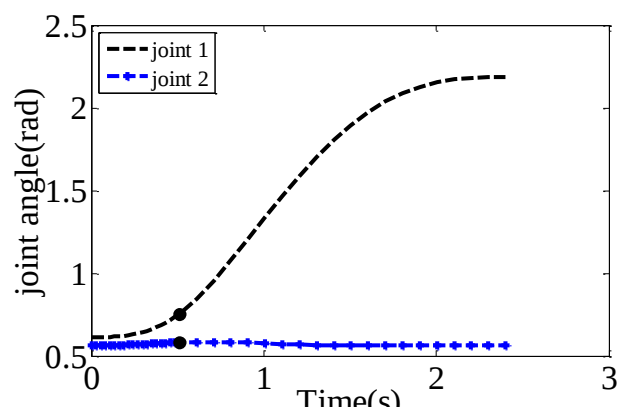
شکل (۷): مسیر حرکت کارتزین ربات ۲ لینکی

برای ربات ۲ لینکی در فضای کاری آزاد



شکل (۱۰): تغییر سرعت مفاصل بر حسب زمان برای

در فضای کاری آزاد



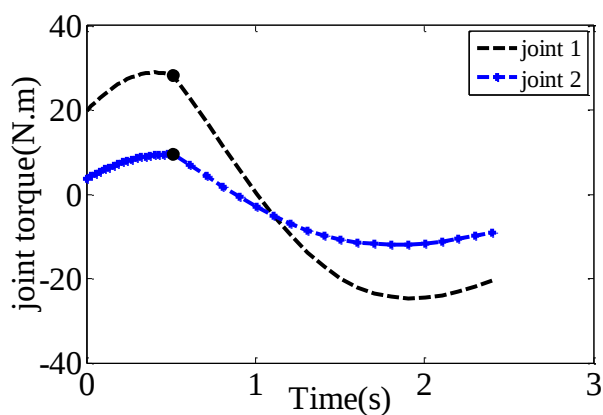
شکل (۹): تغییر زاویه مفاصل بر حسب زمان برای

ربات ۲ لینکی در فضای کاری آزاد

همانطور که در شکل نشان داده شده است، تغییرات زاویه مفاصل ۱ و ۲ از پیکربندی شروع تا پیکربندی هدف به گونه‌ای است که از روی نقطه میانی بهینه شده توسط الگوریتم عبور می‌کند. همچنین تغییرات سرعت و شتاب مفاصل ۱ و ۲ از پیکربندی شروع تا پیکربندی هدف به گونه‌ای است که از روی نقطه میانی بهینه شده توسط الگوریتم عبور می‌کند. نقاط سیاه رنگ در شکل‌های (۳-۴) الی (۶-۴) به ترتیب زاویه مفاصل، سرعت، شتاب و گشتاور مفاصل مربوط به نقطه میانی می‌باشد.

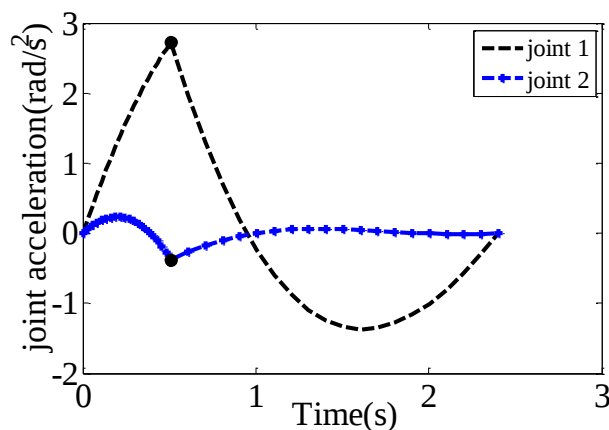
برای محاسبه گشتاور مفاصل بر حسب زمان، مقادیر به دست آمده برای زاویه مفاصل، سرعت مفاصل و شتاب مفاصل در زمان طی مسیر در معادلات دینامیکی نیوتن اولر جاگذاری می‌شوند. تغییرات گشتاور مفاصل در شکل (۶-۴) نشان داده شده است. تغییرات گشتاور مفاصل ۱ و ۲ از پیکربندی شروع تا پیکربندی هدف به گونه‌ای است که از روی نقطه میانی بهینه شده توسط الگوریتم عبور می‌کند. همانطور که در شکل (۶-۴) نشان داده شده است، گشتاورهای مفاصل ربات از حداکثر گشتاور از پیش

تعریف شده تجاوز نکرده است. همچنین گشتاورهای مفاصل در نقطه شروع و هدف غیر صفر می‌باشد که به دلیل اعمال معادلات دینامیکی نیوتن اولی و در نظر گیری نیروی گرانش زمین است.



شکل (۱۲): تغییر گشتاور مفاصل بر حسب زمان برای

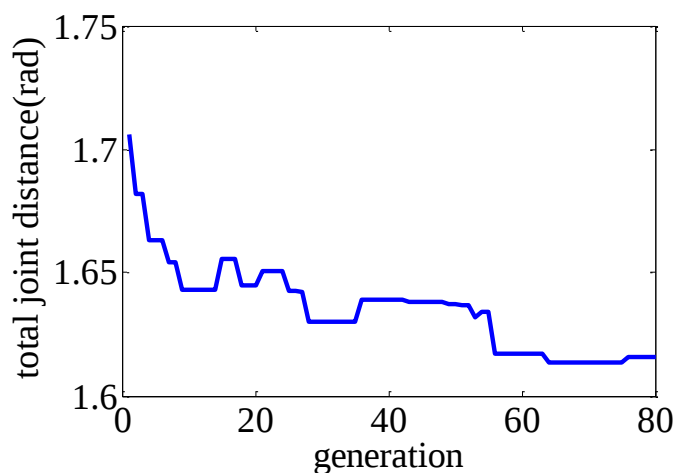
ربات ۲ لینکی در فضای کاری آزاد



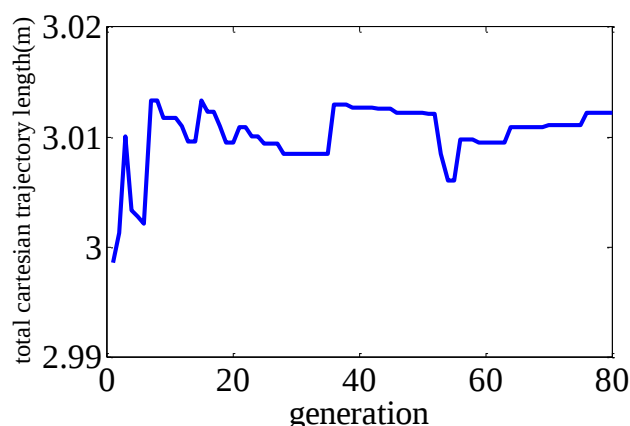
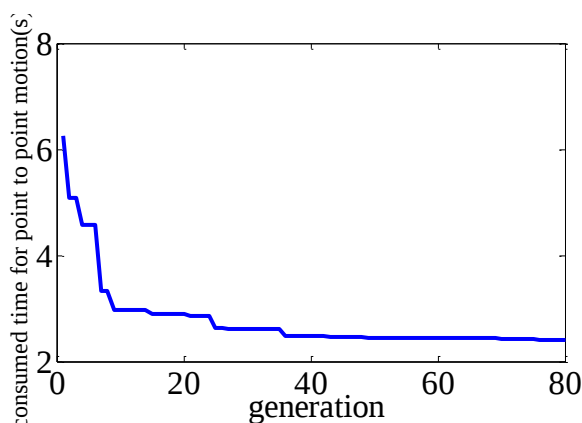
شکل (۱۱): تغییر شتاب مفاصل بر حسب زمان برای

ربات ۲ لینکی در فضای کاری آزاد

فاصله کلی تغییر زوایا، طول مسیر کارترین طی شده و زمان کل طی مسیر با استفاده از معادلات (۳-۳۸)، (۳-۳۹) و (۳-۴۰) بدست می‌آید. شکل‌ها به ترتیب فاصله کلی تغییر زوایا، طول مسیر کارترین تولید شده و زمان کل طی مسیر را در هر نسل (تکرار) نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): نمودار فاصله کلی تغییر زوایا در هر نسل برای ربات ۲ لینکی در فضای کاری آزاد



شکل (۱۴): نمودار طول مسیر کارتیزین طی شده در هر نسل شکل (۱۵): نمودار زمان کل طی مسیر در هر نسل برای

ربات ۲ لینکی در فضای کاری آزاد

برای ربات ۲ لینکی در فضای کاری آزاد

با توجه به شکل‌ها مقادیر بدست آمده برای مورد تست شده در فضای کاری آزاد به صورت زیر می‌باشند:

- فاصله کلی تغییر زوایا = $۱/۶۱۶۰$ رادیان
- طول مسیر کارتیزین طی شده = $۳/۰۱۲۲$ متر
- زمان کل طی مسیر = $۲/۴۰۱۸$ ثانیه

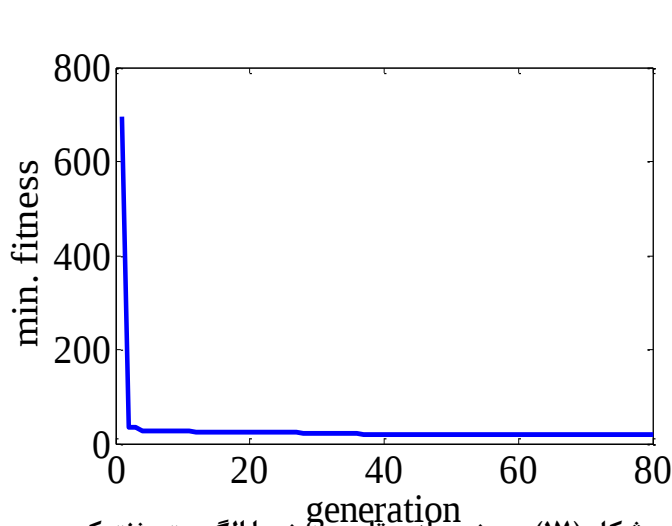
۱-۱-۱- فضای کاری با مانع

وقتی که یک مانع در فضای کاری ربات ظاهر می‌شود، ربات باید از نقطه شروع تا هدف به گونه‌ای حرکت کند که با مانع برخوردی نداشته باشد. الگوریتم ژنتیک مقدار پارامترهای کروموزوم تولید شده را به گونه‌ای بهینه می‌کند که تابع هزینه تعریف شده را کمینه کرده، از حداکثر گشتاور مفروض تجاوز نکرده و با مانع برخوردی نداشته باشد. بعد از ۸۰ نسل اجرای الگوریتم، پارامترهای مربوط به بهترین کروموزوم برای تابع هزینه تعریف شده برای فضای کاری با مانع در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول (۵): پارامترهای مربوط به بهترین کروموزوم برای ربات ۲ لینکی در فضای کاری با مانع

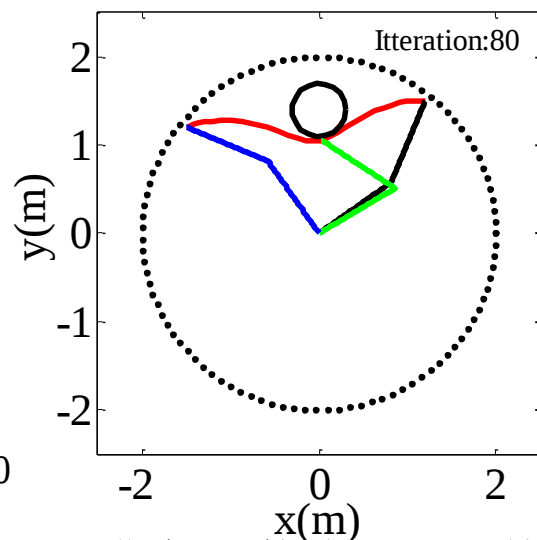
q_1	q_2	$\dot{q}_1$	$\dot{q}_2$	t_1	t_2
۰/۵۳۱۳	۰/۰۳۰۴	۰/۶۶۶۸	۰/۳۳۴۴	۱/۸۶۲۸	۱/۷۵۷۹

مسیر کارتیزین ربات برای فضای کاری با مانع به صورت شکل (۴-۱۰) خواهد بود. در شکل (۴-۱۱) نمودار بهینه‌سازی تابع هزینه تعریف شده توسط الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است.



شکل (۱۷): بهینه سازی تابع هزینه با الگوریتم ژنتیک

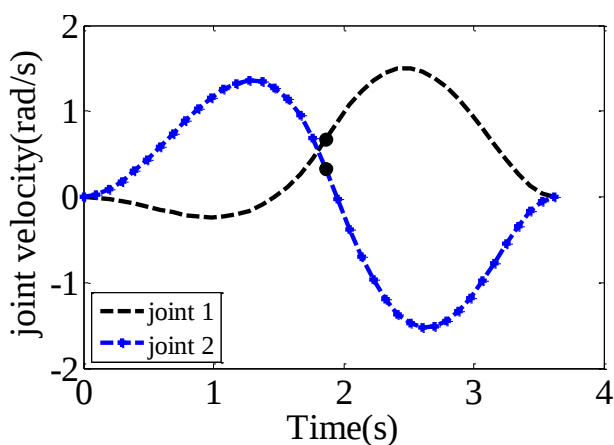
برای ربات ۲ لینکی در فضای کاری با مانع



شکل (۱۶): مسیر حرکت کارتزین ربات ۲

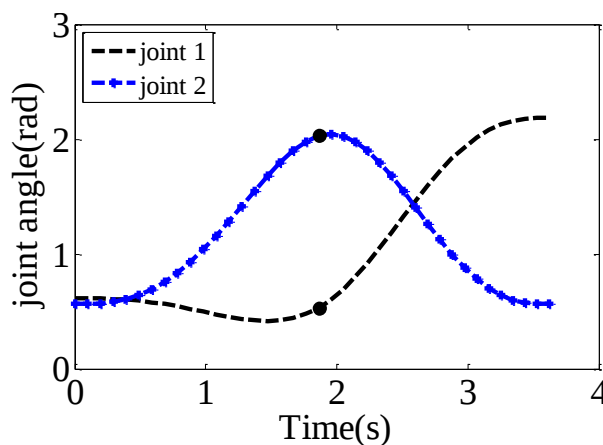
لینکی در فضای کاری با مانع

بوسیله جاگذاری پارامترهای جدول در معادلات مسیریابی حرکت (۳-۱) الی (۳-۲۵) زاویه، سرعت و شتاب برای هر مفصل محاسبه می‌شود. شکل‌ها به ترتیب تغییرات زاویه مفصل، سرعت و شتاب بر حسب زمان را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده است، تغییرات زاویه مفصل ۱ و ۲ از پیکربندی شروع تا پیکربندی هدف به گونه‌ای است که از روی نقطه میانی بهینه شده توسط الگوریتم عبور می‌کند. همچنین تغییرات سرعت و شتاب مفصل ۱ و ۲ از پیکربندی شروع تا پیکربندی هدف به گونه‌ای است که از روی نقطه میانی بهینه شده توسط الگوریتم عبور می‌کند. نقاط سیاه رنگ در شکل‌ها به ترتیب زاویه مفصل، سرعت، شتاب و گشتاور مفصل مربوط به نقطه میانی می‌باشد. برای محاسبه گشتاور مفصل بر حسب زمان، مقادیر به دست آمده برای زاویه مفصل، سرعت مفصل و شتاب مفصل در زمان طی مسیر در معادلات دینامیکی نیوتن اولیتر جاگذاری می‌شوند. تغییرات گشتاور مفصل را بر حسب زمان نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است، گشتاورهای مفصل ربات از حداکثر گشتاور از پیش تعریف شده تجاوز نکرده است.



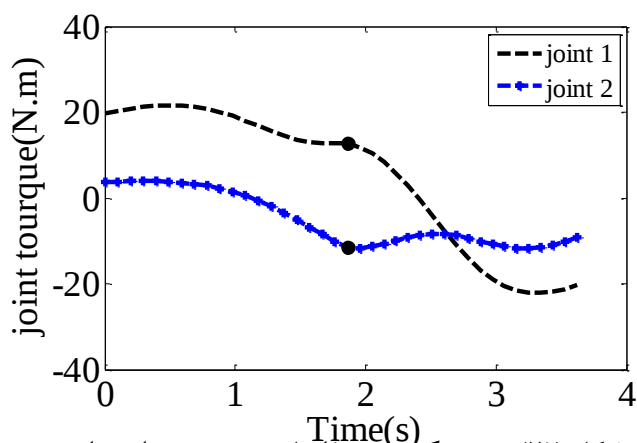
شکل (۱۹): تغییر سرعت مفصل بر حسب زمان برای

ربات ۲ لینکی در فضای کاری با مانع



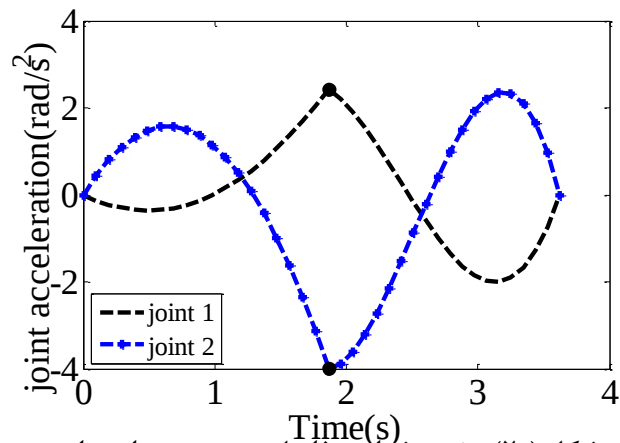
شکل (۱۸): تغییر زاویه مفصل بر حسب زمان برای

ربات ۲ لینکی در فضای کاری با مانع



شکل (۲۱): تغییر گشتاور مفاصل بر حسب زمان برای

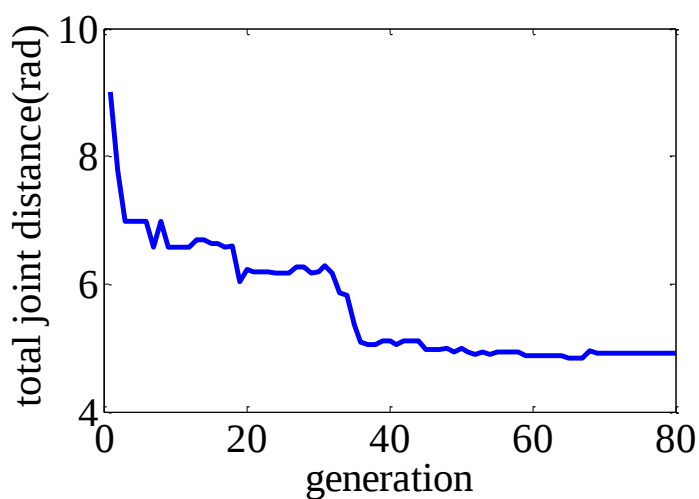
ربات ۲ لینکی در فضای کاری با مانع



شکل (۲۰): تغییر شتاب مفاصل بر حسب زمان برای

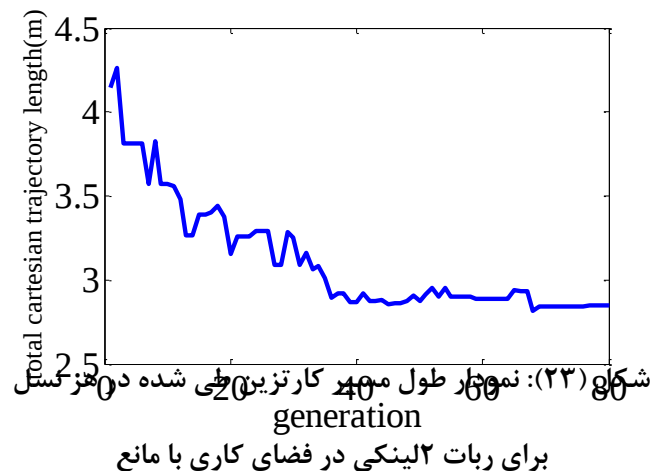
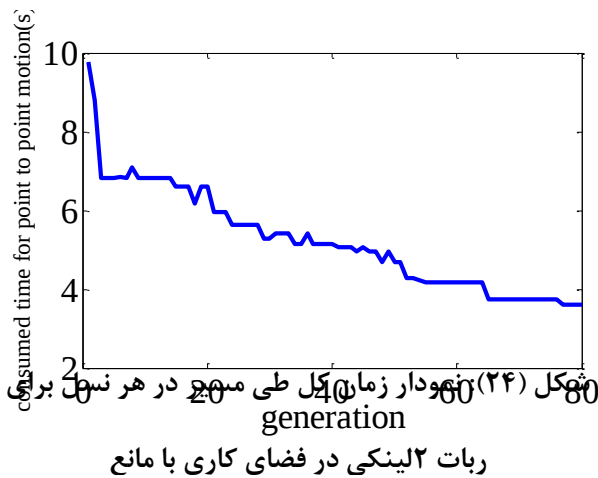
ربات ۲ لینکی در فضای کاری با مانع

فاصله کلی تغییر زوایا، طول مسیر کارترین طی شده و زمان کل طی مسیر با استفاده از معادلات (۳-۳۸)، (۳-۳۹) و (۳-۴۰) بدست می‌آید. شکل‌ها به ترتیب فاصله کلی تغییر زوایا، طول مسیر کارترین تولید شده و زمان کل طی مسیر را در هر نسل (تکرار) نشان می‌دهد.



شکل (۲۲): نمودار فاصله کلی تغییر زوایا در هر نسل برای ربات

۲ لینکی در فضای کاری با مانع

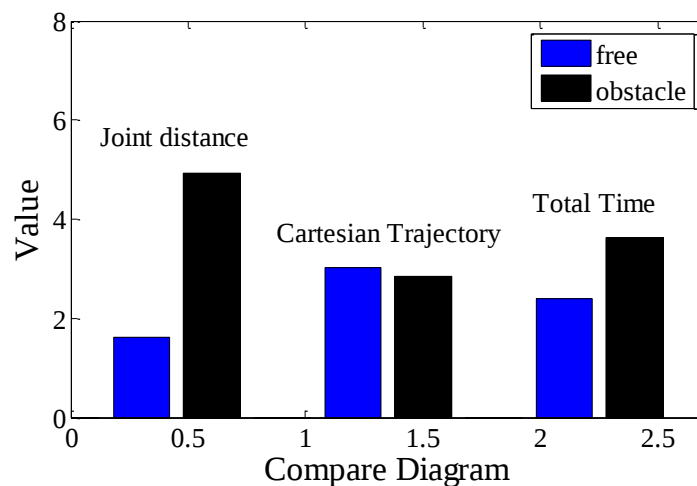


با توجه به شکل‌ها مقادیر بدست آمده برای تست شماره ۱ در فضای کاری آزاد به صورت زیر می‌باشند:

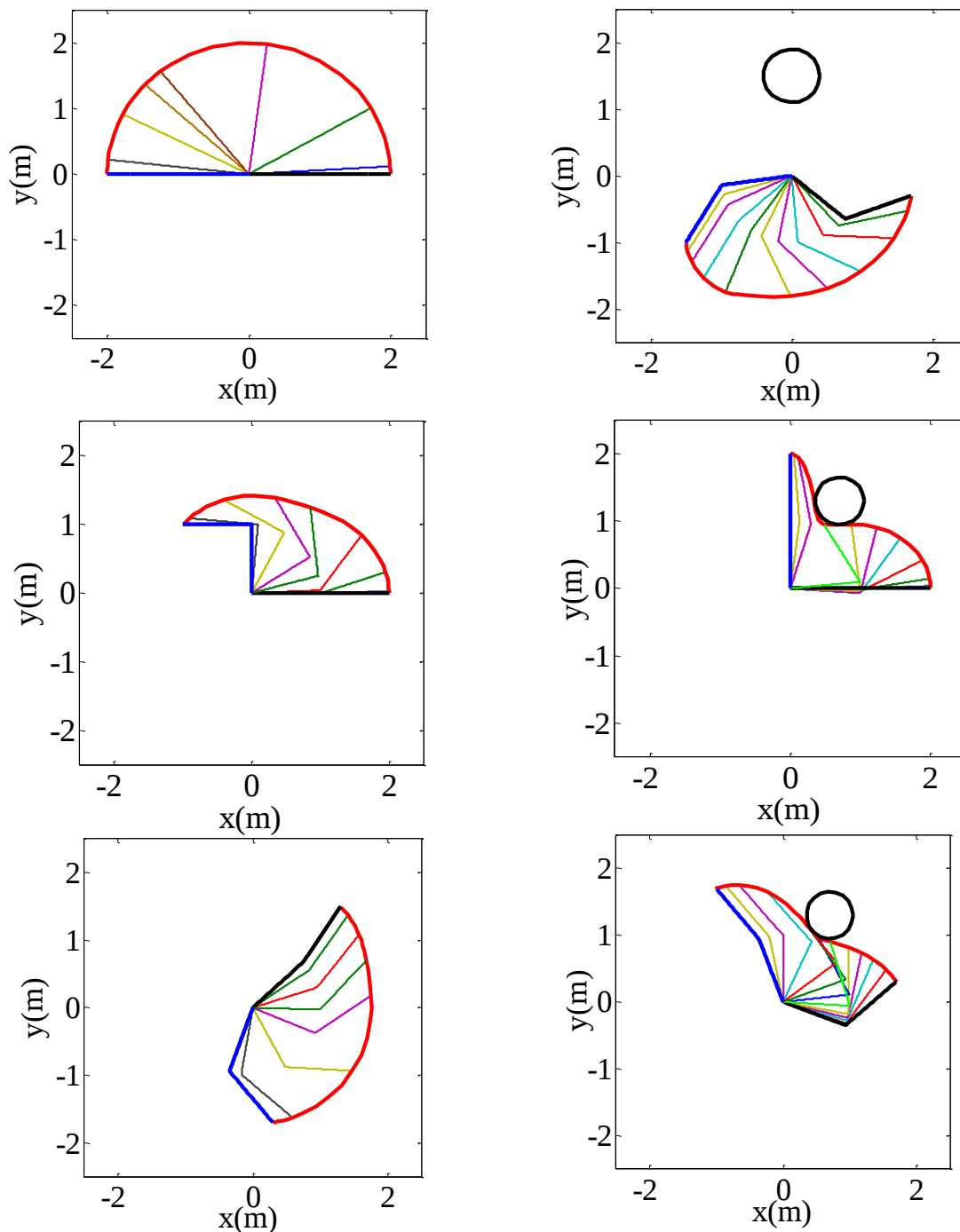
- فاصله کلی تغییر زوایا = $4/9210$ رادیان
- طول مسیر کارتیزین طی شده = $2/8471$ متر
- زمان کل طی مسیر = $3/6207$ ثانیه

۲-۱-۱- مقایسه فضای کاری آزاد و با مانع برای ربات ۲ لینکی

مقایسه مقادیر تغییر زوایای کلی، طول مسیر کارتیزین و زمان کل طی مسیر برای فضای کاری آزاد و با مانع در شکل نشان داده شده است. همانطور که در شکل می‌بینیم، فاصله کلی تغییر زوایا و زمان کل طی مسیر در فضای کاری با مانع بیشتر از فضای کاری آزاد می‌باشد که این عمل به دلیل مانور ربات برای دور زدن مانع و پرهیز از برخورد با آن می‌باشد. افزایش تغییرات زوایا در فضای کاری با مانع نسبت به فضای کاری آزاد، باعث کاهش طول مسیر کارتیزین ربات در فضای کاری با مانع نسبت به فضای کاری آزاد ربات شده است.



در شکل چند نمونه از مسیریابی بازوی ربات صفحه‌ای ۲ لینکی در فضای کاری آزاد و با مانع توسط الگوریتم ژنتیک و نحوه حرکت ربات از نقطه شروع به هدف نشان داده شده است.



شکل (۲۶): چند نمونه از مسیریابی بازوی ربات ۲ لینکی توسط الگوریتم ژنتیک و نحوه حرکت آنها

۱-۲- مسیریابی حرکت برای روبات سه درجه آزادی

این قسمت بر روی مسئله مسیریابی حرکت به روش نقطه به نقطه برای یک ربات بندبند صفحه‌ای ۳ لینکی متمرکز شده است. مسیر حرکت تولید شده به روش نقطه به نقطه با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است. پارامتر مربوط به افزونگی سینماتیکی ربات در وضعیت ابتدایی توسط کاربر تعریف می‌شود ولی برای وضعیت نهایی ربات، افزونگی سینماتیکی ربات باید به وسیله الگوریتم حل شود. الگوریتم ژنتیک افزونگی سینماتیکی را برای وضعیت نهایی به همراه سایر پارامترهای بهینه‌سازی تعریف شده بهینه‌سازی می‌کند.

در این بخش یک ربات بندبند ۳ لینکی صفحه‌ای مورد تست قرار می‌گیرد. پارامترهای مربوط به روبات در جدول نشان داده شده است.

جدول (۶): پارامترهای نامی ربات ۳ لینکی

	لینک ۱	لینک ۲	لینک ۳	واحد
طول	۱	۱	۰/۵	متر
جرم	۱	۱	۰/۵	کیلوگرم
گشتاور	۴۵	۲۰	۵	نیوتن متر

برای سادگی معادلات دینامیکی جرم لینک‌های ربات به صورت نقطه‌ای در انتهای هر لینک فرض می‌شود. هر سه مفصل ۱، ۲ و ۳ توانایی چرخش به اندازه 2π را دارا می‌باشند. همچنین پارامترهای مربوط به الگوریتم ژنتیک در جدول (۷) نشان داده شده است.

جدول (۷): پارامترهای مربوط به الگوریتم ژنتیک برای ربات ۳ لینکی

تعداد جمعیت اولیه	نرخ جهش	احتمال تقاطع	تعداد نسل
۲۰۰	۰/۰۵	۰/۸	۸۰

همانطور که در فصل قبل نشان داده شد، برای یک ربات ۳ لینکی، ۹ تا پارامتر برای بهینه‌سازی وجود دارد. بنابراین هر کروموزوم اولیه تولید شده دارای ۹ پارامتر است که به صورت زیر می‌باشد.

$$chromosome = [q_1, q_2, q_3, \varphi, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, t_1, t_2] \quad (2-4)$$

که در آن، q_1, q_2, q_3 زوایای مفاصل در پیکربندی میانی، $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3$ سرعت مفاصل در پیکربندی میانی و t_1 و t_2 زمان طی شده توسط مجری نهایی ربات از نقطه شروع تا نقطه میانی و از نقطه میانی تا نقطه هدف می‌باشد. همچنین φ زاویه کلی پیکربندی نهایی مجموع زوایای مفصلی می‌باشد، این زاویه مربوط به افزونگی سینماتیکی ربات می‌باشد. مانعی که در فضای کاری ربات و در مسیر حرکت آن قرار دارد به صورت یک شکل دایروی و با شعاع‌های مشخص شده در جدول (۴-۸) فرض شده است. جدول (۴-۸) مختصات نقطه شروع، نقطه هدف و مانع را برای موارد تست شده نشان می‌دهد.

جدول (۸): مختصات نقطه شروع، نقطه هدف و مانع برای موارد تست شده ربات ۳ لینکی

پارامترها	نقطه شروع			نقطه هدف		مانع	
	φ (degree)	x(m)	y(m)	x(m)	y(m)	x(m)	y(m)
مورد تست	۳۰	۱/۸	۱/۵	-۲	۱	-۰/۵	۱/۵

۱-۲-۱- فضای کاری آزاد

در این مورد مجری نهایی ربات از نقطه شروع تا نقطه پایان با مختصات داده شده در جدول (۸-۴) حرکت می‌کند. متغیرهای فضای دکارتی ربات با استفاده از معادلات سینماتیک معکوس به متغیرهای فضای مفصلی تبدیل می‌شود. معادلات سینماتیک معکوس ربات ۳ لینکی در پیوست ب نشان داده شده است.

الگوریتم ژنتیک مقدار پارامترهای تعریف شده برای یک کروموزوم را با توجه به تابع هزینه پیشنهادی بهینه‌سازی می‌کند. در هر نسل و برای همه کروموزومهای تولید شده در الگوریتم، معادلات مسیریابی بیان شده در معادلات (۱-۳) الی (۳-۲۵) استفاده شده و زاویه مفصلی برای هر یک از مفصل‌ها پیدا می‌شود. مشتقات اول و دوم موقعیت زاویه مفاصل نسبت به زمان از نقطه شروع تا نقطه پایانی که از نقطه میانی می‌گذرد به صورت تابعی از زمان به دست می‌آید. بعد از ۸۰ نسل اجرای الگوریتم، پارامترهای مربوط به بهترین کروموزوم برای تابع هزینه تعریف شده برای فضای کاری آزاد در جدول (۹-۴) نشان داده شده است.

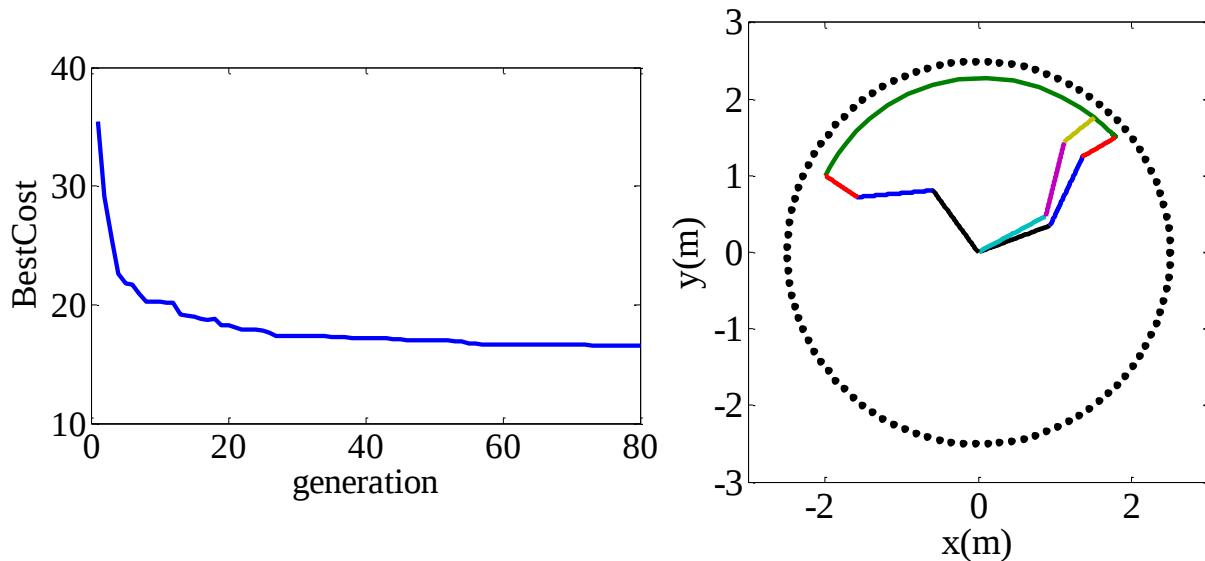
جدول (۹): پارامترهای مربوط به بهترین کروموزوم برای ربات ۳ لینکی در فضای کاری آزاد

q_1	q_2	q_3	φ	$\dot{q}_1$	$\dot{q}_2$	$\dot{q}_3$	t_1	t_2
۰/۴۸۹۸	۰/۸۳۶۲	-۰/۶۴۸۳	۲/۵۴۸۴	۰/۶۰۲۱	۰/۱۶۲۲	-۰/۰۴۱۷	۰/۸۹۳۴	۲/۲۷۰۴

با بکار بردن پارامترهای کروموزوم بهینه شده در معادلات مسیریابی حرکت (۱-۳) الی (۳-۲۵) زاویه مفاصل، سرعت و شتاب زاویه‌ای تولید شده برای هر مفصل به دست می‌آید. نقطه میانی در نظر گرفته شده مابین نقطه شروع و نقطه هدف در حقیقت بهترین کروموزوم به دست آمده از اجرای الگوریتم ژنتیک می‌باشد. بنابراین زوایا و سرعت مفاصل در نقطه میانی در دسترس می‌باشد که در جدول (۹-۴) نشان داده شده است.

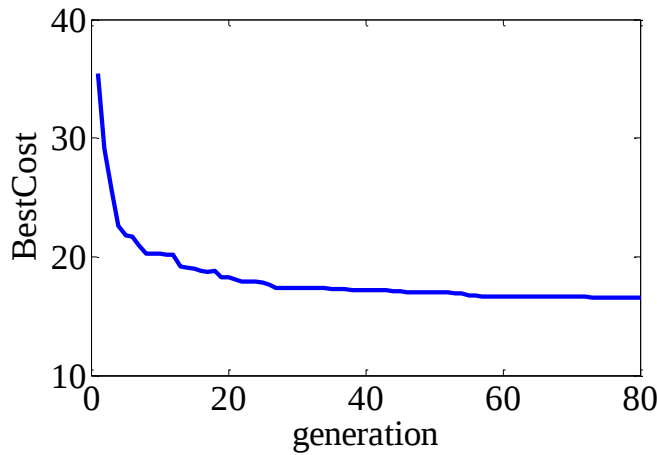
پارامتر φ نشان داده شده در جدول (۹-۴) مربوط به افزونگی سینماتیکی ربات در پیکربندی نهایی می‌باشد. با بکار بردن معادلات سینماتیک مستقیم برای مسیر فضای مفصلی، مسیر کارترین ربات به صورت شکل (۴-۲۱) خواهد بود. شکل (۴-۲۲) نمودار بهینه‌سازی تابع هزینه تعریف شده را توسط الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد. شکل‌های (۴-۲۳)، (۴-۲۴) و (۴-۲۵) به ترتیب تغییرات زاویه مفاصل، سرعت و شتاب بر حسب زمان را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۴-۲۳) نشان داده شده است، تغییرات زاویه مفاصل از پیکربندی شروع تا پیکربندی هدف به گونه‌ای است که از روی نقطه میانی بهینه شده توسط الگوریتم عبور می‌کند. همچنین تغییرات سرعت و شتاب مفاصل از پیکربندی شروع تا پیکربندی هدف به گونه‌ای است که از

روی نقطه میانی بهینه شده توسط الگوریتم عبور می‌کند. نقاط سیاه رنگ در شکل های (۴-۲۳) الی (۴-۲۶) به ترتیب زاویه مفاصل، سرعت، شتاب و گشتاور مفاصل مربوط به نقطه میانی می باشد.



شکل (۲۷): مسیر حرکت کارتزین ربات ۳

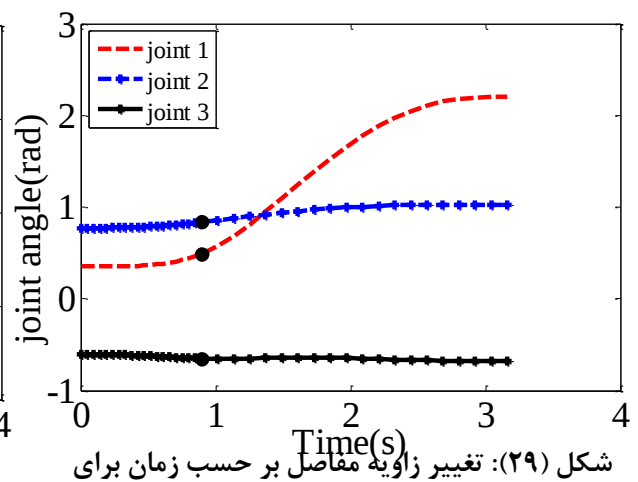
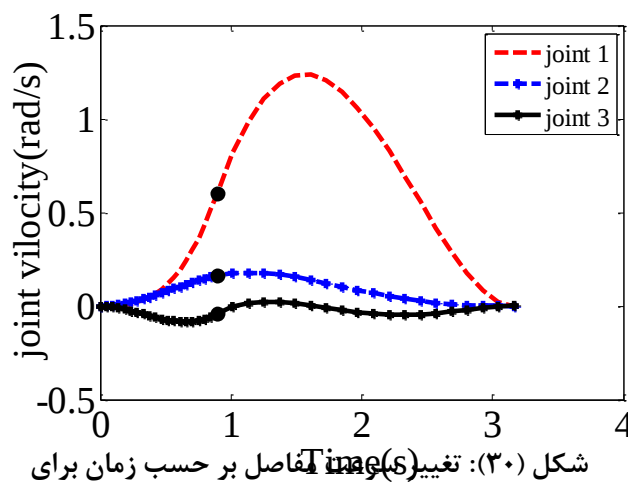
شکل (۲۸): بهینه سازی تابع هزینه با الگوریتم ژنتیک



برای ربات ۳ لینکی در فضای کاری آزاد

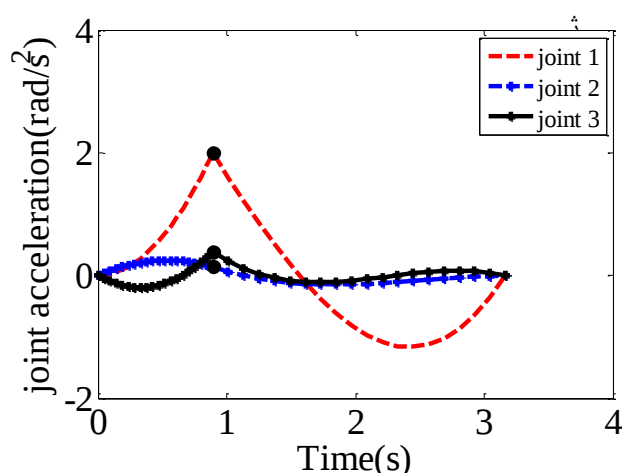
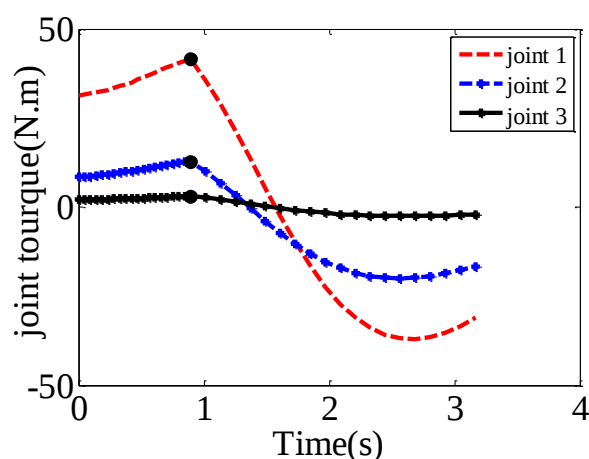
لینکی در فضای کاری آزاد

برای محاسبه گشتاور مفاصل بر حسب زمان، مقادیر به دست آمده برای زاویه مفاصل، سرعت مفاصل و شتاب مفاصل در زمان طی مسیر در معادلات دینامیکی نیوتن اوایلر جاگذاری می‌شوند. تغییرات گشتاور مفاصل بر حسب زمان در شکل (۴-۲۶) نشان داده شده است. تغییرات گشتاور مفاصل از پیکربندی شروع تا پیکربندی هدف به گونه‌ای است که از روی نقطه میانی بهینه شده توسط الگوریتم عبور می‌کند. همانطور که در شکل (۴-۲۶) نشان داده شده است، گشتاورهای مفاصل ربات از حداکثر گشتاور از پیش تعریف شده تجاوز نکرده است. همچنین به دلیل اعمال معادلات دینامیکی نیوتن اوایلر و در نظر گیری نیروی گرانش زمین، گشتاورهای مفاصل در نقطه شروع و هدف غیر صفر می‌باشد.



ربات ۳ لینکی در فضای کاری آزاد

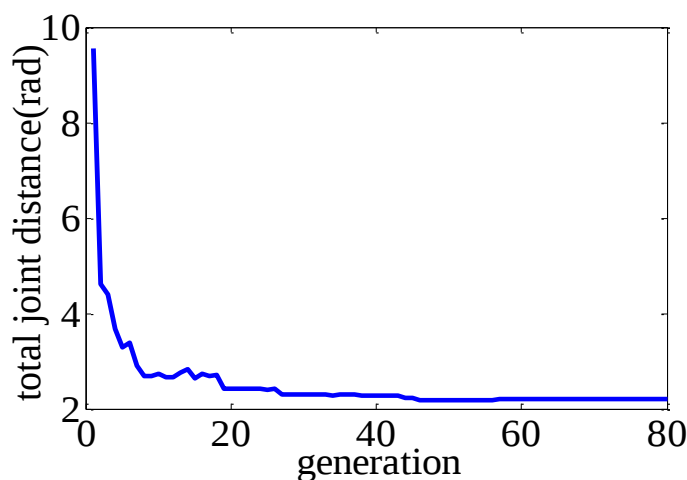
ربات ۳ لینکی در فضای کاری آزاد



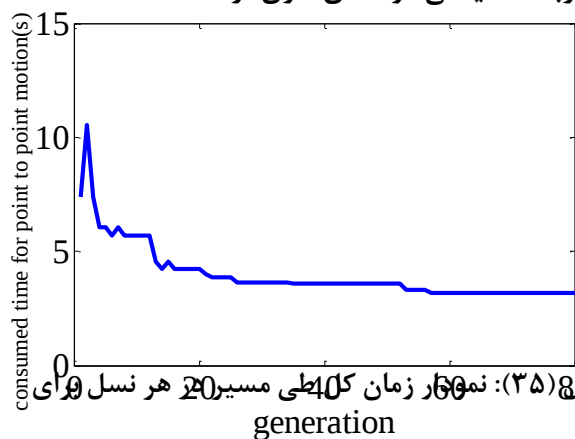
شکل (۳۱): تغییر شتاب مفاصل بر حسب زمان برای ربات شکل (۳۲): تغییر گشتاور مفاصل بر حسب زمان برای

ربات ۳ لینکی در فضای کاری آزاد

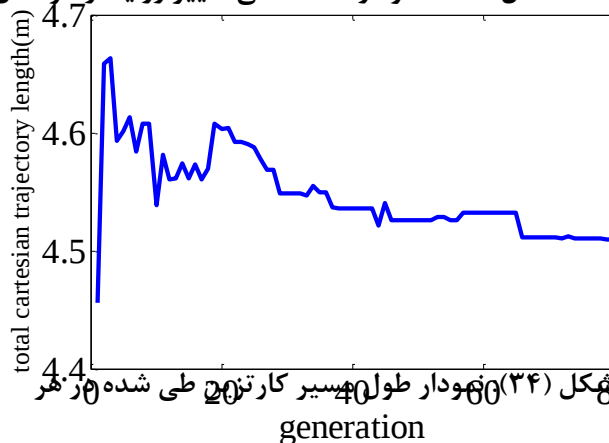
فاصله کلی تغییر زوایا، طول مسیر کارترین طی شده و زمان کل طی مسیر با استفاده از معادلات (۳۸-۳)، (۳۹-۳) و (۴۰-۳) بدست می‌آید. شکل‌ها به ترتیب فاصله کلی تغییر زوایا، طول مسیر کارترین تولید شده و زمان کل طی مسیر را در هر نسل (تکرار) نشان می‌دهد.



شکل (۳۳): نمودار فاصله کلی تغییر زوایا در هر نسل برای ربات ۳ لینکی در فضای کاری آزاد



شکل (۳۴): نمودار طول مسیر کارترین طی شده در هر نسل برای ربات ۳ لینکی در فضای کاری آزاد



شکل (۳۵): نمودار زمان کل طی مسیر ۲۰ نسل برای ربات ۳ لینکی در فضای کاری آزاد

با توجه به شکل‌ها مقادیر بدست آمده برای تست شماره ۱ در فضای کاری آزاد به صورت زیر می‌باشند:

- فاصله کلی تغییر زوایا = $2/1908$ رادیان
- طول مسیر کارتزین طی شده = $4/5097$ متر
- زمان کل طی مسیر = $3/1638$ ثانیه

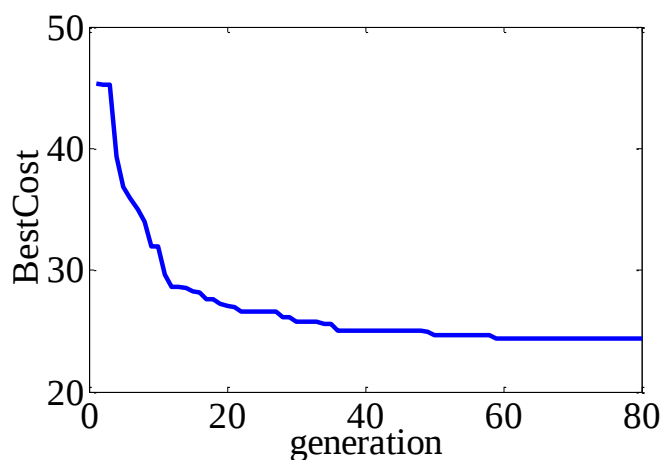
۱-۲-۲- فضای کاری با مانع

وقتی که یک مانع در فضای کاری ربات ظاهر می‌شود، ربات باید از نقطه شروع تا هدف به گونه‌ای حرکت کند که با مانع برخوردی نداشته باشد. الگوریتم ژنتیک مقدار پارامترهای کروموزوم تولید شده را به گونه‌ای بهینه می‌کند که تابع هزینه تعریف شده را کمینه کرده، از حداکثر گشتاور مفروض تجاوز نکرده و با مانع برخوردی نداشته باشد. بعد از ۸۰ نسل اجرای الگوریتم، پارامترهای مربوط به بهترین کروموزوم برای تابع هزینه تعریف شده برای فضای کاری با مانع در جدول (۴-۱۰) نشان داده شده است.

جدول (۱۰): پارامترهای مربوط به بهترین کروموزوم برای ربات ۳ لینکی در فضای کاری با مانع

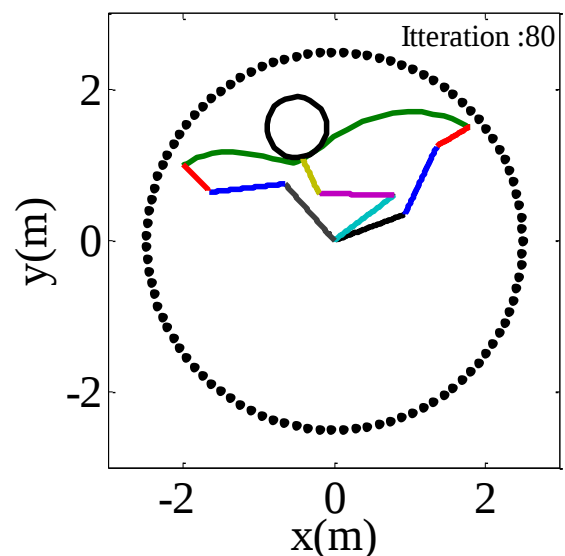
q_1	q_2	q_3	φ	$\dot{q}_1$	$\dot{q}_2$	$\dot{q}_3$	t_1	t_2
۰/۶۴۳۶	۲/۴۷۳۲	-۱/۰۹۴۷	۲/۳۴۰۲	۰/۶۵۲۴	۰/۰۹۱۳	۰/۰۶۶۰	۲/۹۹۱۴	۱/۵۱۹۰

بوسیله جاگذاری پارامترهای بالا در معادلات مسیریابی حرکت (۳-۱) الی (۳-۲۵) زاویه، سرعت و شتاب برای هر مفصل محاسبه می‌شود. با بکار بردن معادلات سینماتیک مستقیم برای مسیر فضای مفصلی، مسیر کارتزین ربات به صورت شکل خواهد بود. شکل بهینه‌سازی تابع هزینه تعریف شده جهت تولید مسیر حرکت ربات ۳ لینکی را نشان می‌دهد.



شکل (۳۷): بهینه سازی تابع هزینه با الگوریتم ژنتیک برای

ربات ۳ لینکی در فضای کاری با مانع

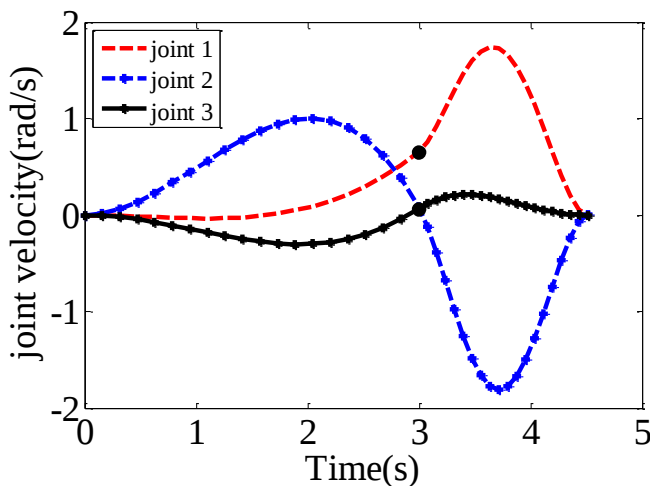


شکل (۳۶): مسیر حرکت کارتزین ربات ۳

لینکی در فضای کاری با مانع

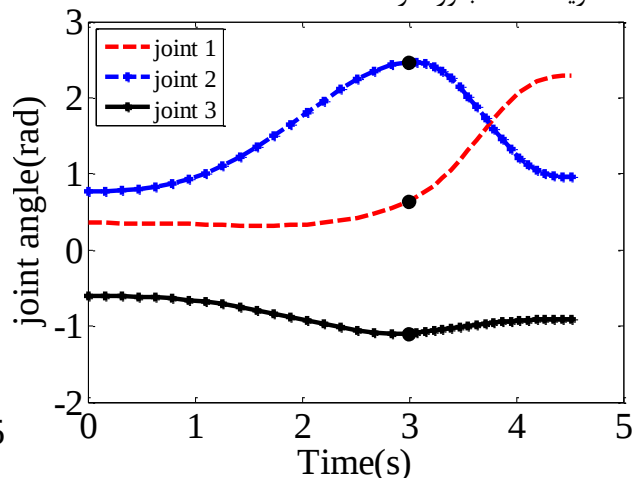
تغییرات زاویه مفاصل، سرعت و شتاب مفاصل به ترتیب در شکل‌ها نشان داده شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده است، تغییرات زاویه مفاصل از پیکربندی شروع تا پیکربندی هدف به گونه‌ای است که از روی نقطه میانی بهینه شده توسط الگوریتم عبور می‌کند. همچنین تغییرات سرعت و شتاب مفاصل از پیکربندی شروع تا پیکربندی هدف به گونه‌ای است که از روی نقطه میانی بهینه شده توسط الگوریتم عبور می‌کند. نقاط سیاه رنگ در شکل‌ها به ترتیب زاویه مفاصل، سرعت، شتاب و گشتاور مفاصل مربوط به نقطه میانی می‌باشد.

برای محاسبه گشتاور مفاصل بر حسب زمان، مقادیر به دست آمده برای زاویه مفاصل، سرعت مفاصل و شتاب مفاصل در زمان طی مسیر در معادلات دینامیکی نیوتن اولی‌ر جاگذاری می‌شوند. تغییرات گشتاور مفاصل بر حسب زمان در شکل نشان داده شده است. تغییرات گشتاور مفاصل از پیکربندی شروع تا پیکربندی هدف به گونه‌ای است که از روی نقطه میانی بهینه شده توسط الگوریتم عبور می‌کند. همانطور که در شکل نشان داده شده است، گشتاورهای مفاصل روبات از حداکثر گشتاور از پیش تعریف شده تجاوز نکرده است.



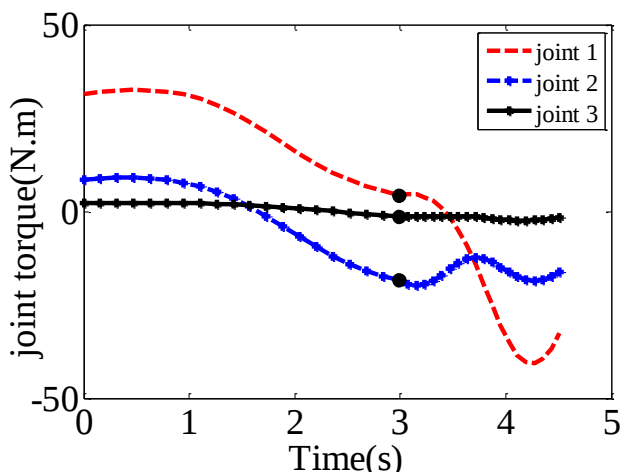
شکل (۳۹): تغییر سرعت مفاصل بر حسب زمان برای

روبات ۳لینکی در فضای کاری با مانع



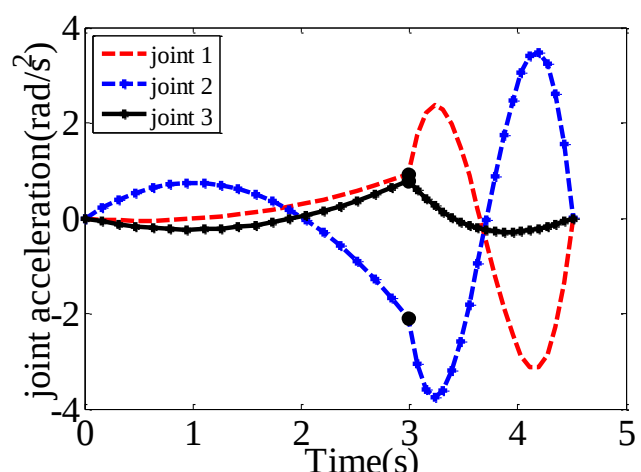
شکل (۳۸): تغییر زاویه مفاصل بر حسب زمان برای

روبات ۳لینکی در فضای کاری با مانع



شکل (۴۱): تغییر گشتاور مفاصل بر حسب زمان برای

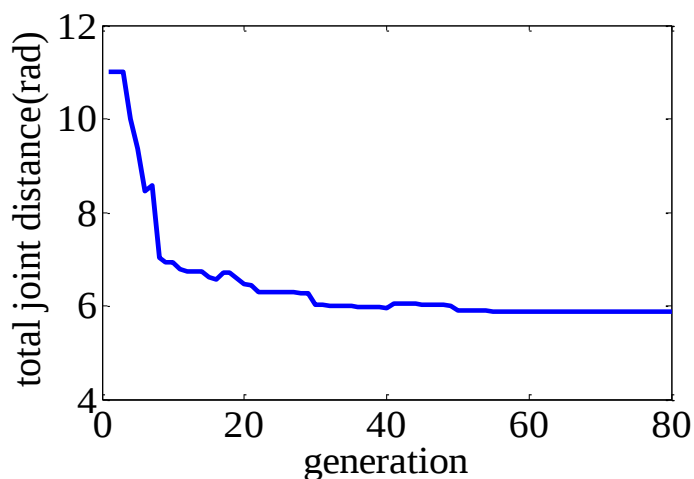
روبات ۳لینکی در فضای کاری با مانع برای



شکل (۴۰): تغییر شتاب مفاصل بر حسب زمان برای روبات

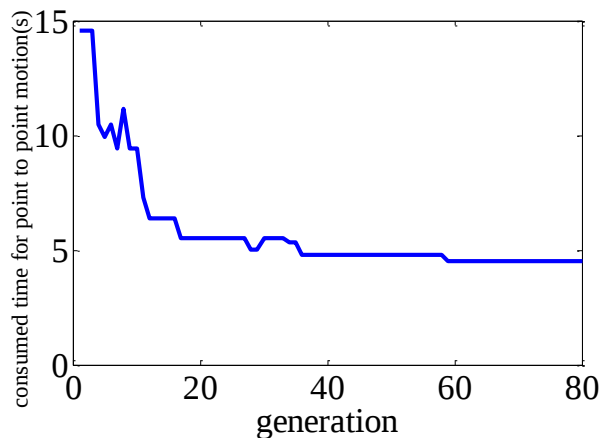
۳لینکی در فضای کاری با مانع برای

فاصله کلی تغییر زوایا، طول مسیر کارترین طی شده و زمان کل طی مسیر با استفاده از معادلات (۳-۳۸)، (۳-۳۹) و (۳-۴۰) بدست می‌آید. شکل‌ها به ترتیب فاصله کلی تغییر زوایا، طول مسیر کارترین تولید شده و زمان کل طی مسیر را در هر نسل (تکرار) نشان می‌دهد.

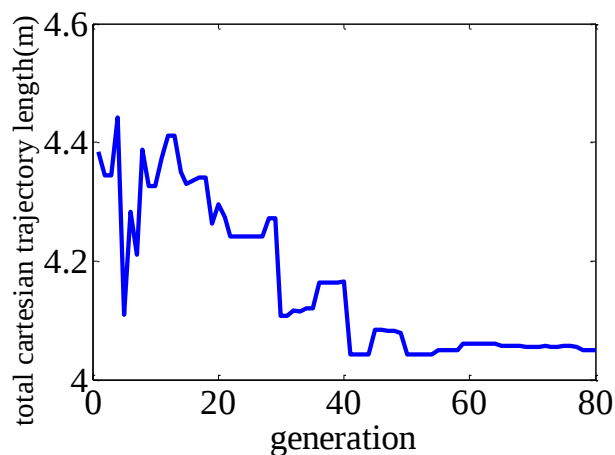


شکل (۴۲): نمودار فاصله کلی تغییر زوایا در هر نسل برای ربات ۳

لینکی در فضای کاری با مانع



شکل (۴۴): نمودار زمان کل طی مسیر در هر نسل برای



شکل (۴۳): نمودار طول مسیر کارترین طی شده در هر نسل

ربات ۳ لینکی در فضای کاری با مانع

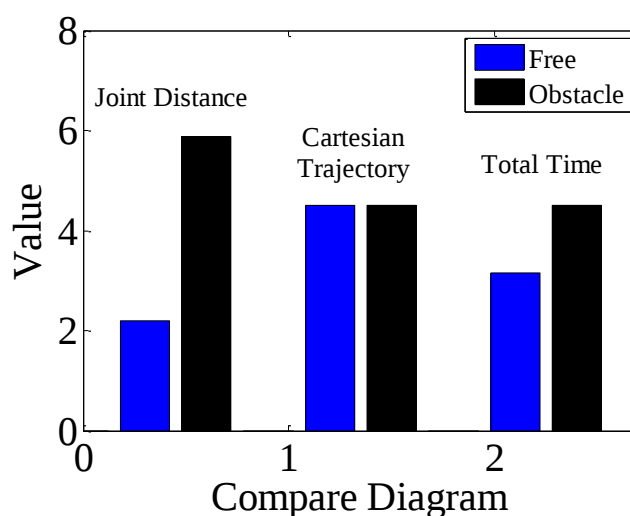
برای ربات ۳ لینکی در فضای کاری با مانع

با توجه به شکل‌ها مقادیر بدست آمده برای تست شماره ۱ در فضای کاری با مانع به صورت زیر می‌باشند:

- فاصله کلی تغییر زوایا = $5/8841$ رادیان
- طول مسیر کارترین طی شده = $4/5097$ متر
- زمان کل طی مسیر = $4/5104$ ثانیه

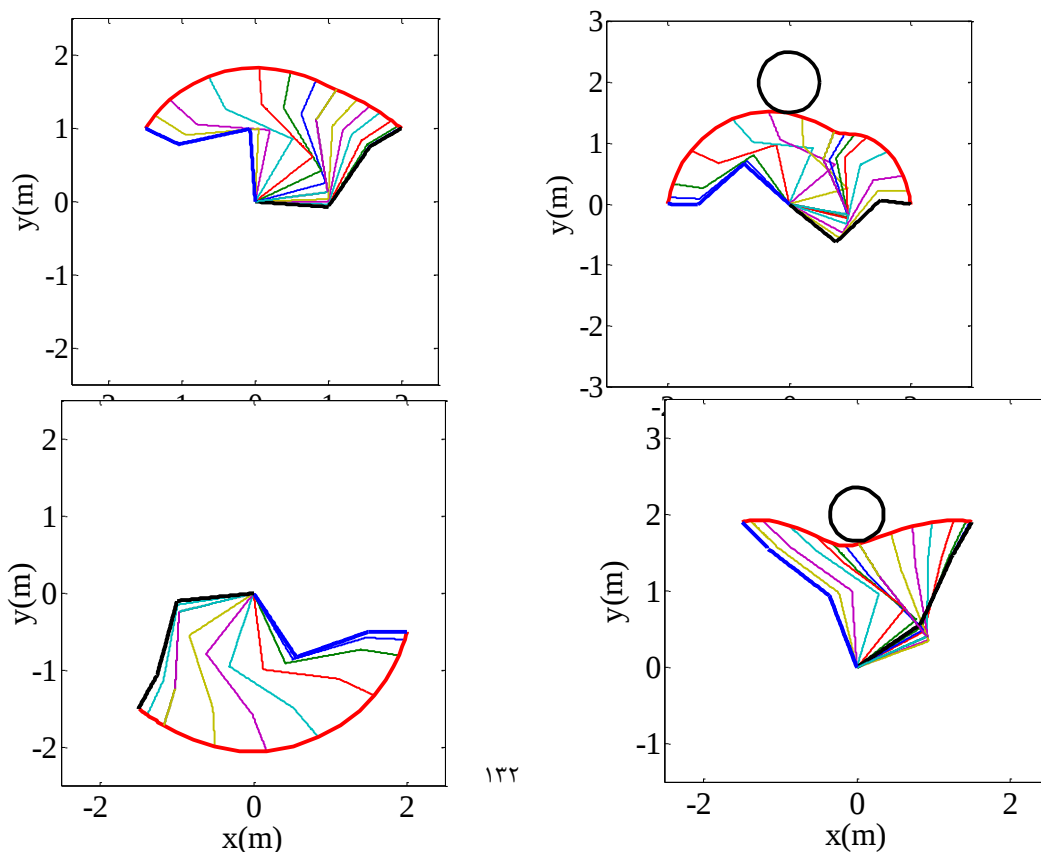
۳-۲-۱- مقایسه فضای کاری آزاد و با مانع برای ربات ۳ لینکی

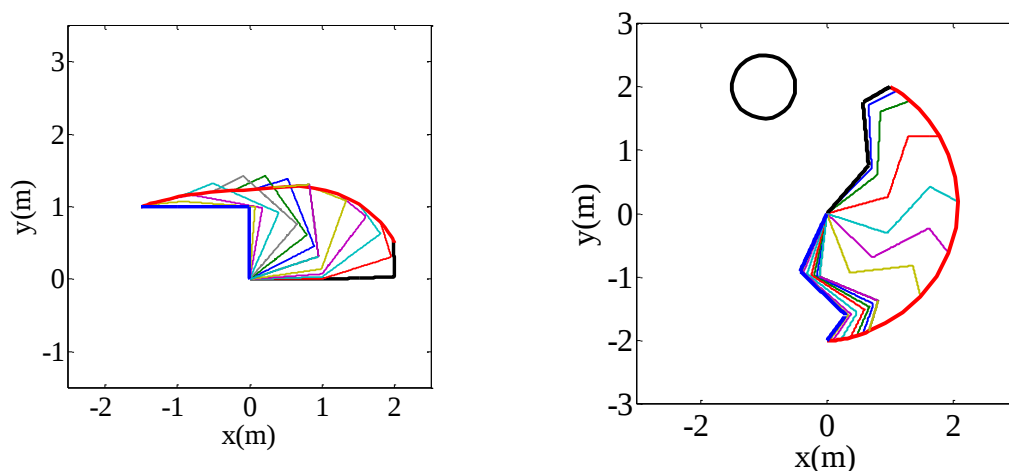
مقایسه مقادیر تغییر زوایای کلی، طول مسیر کارترین و زمان کل طی مسیر برای فضای کاری آزاد و با مانع در شکل نشان داده شده است. همانطور که در شکل می بینیم، فاصله کلی تغییر زوایا و زمان کل طی مسیر در فضای کاری با مانع بیشتر از فضای کاری آزاد می باشد که این عمل به دلیل مانور ربات برای دور زدن مانع و پرهیز از برخورد با آن می باشد. افزایش تغییرات زوایا در فضای کاری با مانع نسبت به فضای کاری آزاد، باعث برابر شدن طول مسیر کارترین ربات در فضای کاری با مانع و فضای کاری آزاد ربات در این تست، شده است.



شکل (۴۵): مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی برای ربات ۳ لینکی در فضای کاری آزاد و با مانع

در شکل (۴۰-۴) چند نمونه از مسیریابی بازوی ربات صفحه ای ۳ لینکی در فضای کاری آزاد و با مانع توسط الگوریتم ژنتیک و نحوه حرکت ربات از نقطه شروع به هدف نشان داده شده است.





شکل (۴۶): چند نمونه از مسیریابی بازوی ربات ۳ لینکی توسط الگوریتم ژنتیک و نحوه حرکت آنها

بحث و نتیجه‌گیری

مسیریابی حرکت خودکار یک زمینه تحقیقاتی بسیار مهمی در رباتیک می‌باشد. در این مقاله یک روش نقطه به نقطه برای تولید مسیر حرکت صاف و هموار برای بازوی ربات صفحه‌ای ۲ لینکی و ۳ لینکی پیشنهاد شده است. مسیر حرکت تولید شده به وسیله روش نقطه به نقطه، توسط الگوریتم ژنتیک بهینه سازی شده است. پارامترهای در نظر گرفته شده جهت بهینه سازی مربوط به مشخصات نقطه میانی می‌باشد که در یک تابع هزینه کلی قرار می‌گیرد. تابع هزینه پیشنهاد شده شامل طول مسیر کارترین تولید شده، زمان کلی طی مسیر از نقطه شروع تا نقطه هدف و میزان تغییرات کلی زاویه مفاصل ربات می‌باشد با ضرایب وزنی خاص می‌باشد.

مسیر حرکت تولید شده به گونه‌ای است که گشتاور وارد شده بر مفاصل ربات نباید از حداکثر گشتاور از قبل تعریف شده برای هر مفصل تجاوز کند، همچنین ربات نباید با مانعی فرضی که در مسیر حرکت ربات در فضای کاری قرار دارد، برخورد داشته باشد.

نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده این است که، تا زمانی که مسیر حرکت ارائه شده در فضای مفصلی باشد زمان کلی مسیر طی شده فقط وابسته به میزان فاصله طی شده توسط مفاصل ربات می‌باشد یعنی هر چقدر که مفاصل ربات حرکت بیشتری داشته باشند زمان طی مسیر بیشتر خواهد بود. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده این است که در هر دو نوع ربات ۲ لینکی و ۳ لینکی، گشتاورهای مفاصل روبات از حداکثر گشتاور از پیش تعریف شده تجاوز نکرده است.

با توجه به اینکه از روش نقطه به نقطه (فضای مفصلی) برای تولید مسیر استفاده شده است، زاویه و سرعت و شتاب مفاصل در هر نقطه از مسیر در دسترس می‌باشد. اعمال معادلات دینامیکی نیوتن اوپلر باعث شده که گشتاورهای مفصلی ربات به آسانی به دست بیاید. به دست آوردن زاویه، سرعت، شتاب و همچنین گشتاورهای مفصلی در هر نقطه از مسیر دو مزیت عمده دارد: اولاً همه پارامترهای نامبرده در طراحی کنترل کننده برای ربات ضروری‌اند، ثانیاً با محاسبه موارد ذکر شده می‌توان ربات و مسیر حرکت آنرا شبیه‌سازی کرد. همچنین در نظریه نیروی گرانش زمین در معادلات دینامیکی نیوتن اوپلر سبب شده تا

مفاصل ربات در پیکربندی شروع و هدف که ربات ساکن است، گشتاور تحمل کنند. به دلیل استفاده از معادلات سینماتیک مستقیم در الگوریتم ژنتیک ربات در نقاط تکین خود قرار نگرفته است.

ربات ۳ لینکی دارای افزونگی سینماتیکی می باشد که در نقطه شروع این افزونگی سینماتیکی توسط کاربر وارد می شود ولی برای پیکربندی نهایی افزونگی سینماتیکی به صورت اتوماتیک توسط الگوریتم ژنتیک حل شده است که یکی از مزایای مهم این روش می باشد. هر دو بازوی ربات ۲ لینکی و ۳ لینکی در مسیر حرکت تولید شده در فضای کاری خود با مانع فرضی در نظر گرفته شده برخوردی ندارد و ربات قادر به انجام مانور و دور زدن مانع به صورت خودکار می باشد. با توجه به اینکه حرکت ربات از یک نقطه به نقطه دیگر در فضای کاری ربات کاری بسیار سخت در مسیریابی می باشد، این نوع برنامه ریزی حرکت به اوپراتور کمک می کند تا کار خسته کننده مسیریابی را به صورت اتوماتیک انجام دهد، به گونه ای که اوپراتور فقط مشخصات نقطه شروع و هدف و مانع را وارد می کند و الگوریتم به طور خودکار مسیر حرکت بهینه را تولید می کند. همچنین این کار باعث کاهش احتمال خطای انسانی در کل فرآیند می شود.

مسیر حرکت تولید شده یک مسیر کاملاً صاف و هموار بوده و دارای سرعت و شتاب پیوسته در طول مسیر می باشد. صاف و هموار بودن مسیر تولید شده سبب عدم حرکت های خشن و ناگهانی، کاهش ارتعاشات زیان آور در ربات، افزایش دقت حرکت ربات و در نتیجه افزایش بهره وری می شود.

یکی دیگر از مزایای این روش این می باشد که با توجه به اینکه تابع هزینه تعریف شده کلی برای بهینه سازی از چند قسمت تشکیل شده، بنابراین کاربر می تواند با توجه به نیاز مسئله و اینکه کدام فاکتور دارای اهمیت بیشتری می باشد ضرایب وزنی هر کدام از توابع تعریف شده در تابع هزینه کلی را تغییر دهد.

با توجه به در نظرگیری تغییر زوایای کلی مفاصل ربات به عنوان یکی از توابع هزینه تعریف شده در الگوریتم ژنتیک، میزان تغییرات زوایای مفصلی ربات کاهش می یابد که این عمل سبب کاهش مصرف انرژی در موتور و کنترلر می گردد.

مقایسه این روش با کار انجام شده قبلی [۳۰] برای ربات ۳ لینکی نشان دهنده بهبود پارامترهای تعریف شده و عملکرد مناسب این روش می باشد، به گونه ای که میزان تغییرات کلی زوایای مفصلی به اندازه ۲۴/۰۴٪ و زمان کل طی مسیر به اندازه ۴۸/۱۳٪ کاهش یافته است. نتایج شبیه سازی نشان دهنده آن است که روش پیشنهاد شده یک روش موثر در مسیریابی بازوی روبات می باشد بخصوص زمانی که در فضای کاری روبات مانع وجود داشته باشد.

پیشنهادهای برای کارهای آینده

مسیریابی حرکت به روش پیشنهاد شده برای بازوهای رباتیکی ۳ درجه آزادی کروی
مسیریابی حرکت به روش پیشنهاد شده برای بازوهای رباتیکی با درجات آزادی بیشتر
طراحی کنترل کننده مناسب جهت کنترل حرکت ربات روی مسیر تولید شده به روش پیشنهادی
افزایش تعداد موانع ساکن موجود در فضای کاری ربات و تولید مسیر آن
تولید مسیر به روش پیشنهادی برای ربات با موانع متحرک در فضای کاری
مسیریابی حرکت به روش پیشنهادی برای بازوهای مکانیکی متحرک
افزودن پارامتر لرزش ربات جهت بهینه سازی
مسیریابی حرکت به روش پیشنهادی برای بازوهای مکانیکی که با هم کار می کنند (ربات های اشتراکی)

مراجع

- [1] Fu, K.S., Gonzalez, R.C., and Lee, C.S.G “Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence”, McGraw Hill, 1987.
- [2] Tesar, D., And Tosunoglu, S., “Robotics & Automation: An Introduction To Cams, Mechanisms And Robotics”, Lecture Notes For Me 372j, Department Of Mechanical Engineering, The University Of Texas At Austin, 1992.
- [3] Asada and Slotine, "Robot Analysis and Control", John Wiley & Sons, Inc., 1976.
- [4] Schilling J., "Fundamentals of Robotics Analysis and Control", Prentice Hall, 1996.
- [5] Craig, J.J “Introduction to Robotics: Mechanics and Control”, Addison- Wesley, 1989.
- [6] Lung-Wen T. "Robot Analysis, the Mechanism of Serial and Parallel Manipulators" John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [7] Izaguirre, A., Hashimoto, M., Paul, R.P., and Hayward, V., “A New Computational Structure for Real-Time Dynamics,” *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 11, No. 4, August 1992, pp. 346-361.
- [8] Dminik Henrich, "Fast Motion Planning By Parallel Processing –A Review ", *Journal Of Intelligent And Robotic Systems*, Vol. 20, No. 1, Pp. 45-69, Sept., 1997.
- [9] Zoltan Zoller And Peter Zentay, "Constant Kinetic Energy Robot Trajectory Planning", *Periodica Polytechica Ser. Mech. Eng.* Vol. 43, No. , pp. 213-228, 1999.
- [10] Maha Adham Al-Bayati, "Genetic Algorithm Based Path Planner", Ph.D. Thesis, Department Of Computer Science, University Of Technology, June, 1998.
- [11] S.C.Chu and H.L.Fang, (1999), "Genetic Algorithms vs. Tabu Search in Timetable Scheduling", *Third International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information Engineeing Systems*
- [12] E. Rich, And K. Knight, "Introduction to Artificial Intelligence", Mc. Graw Hill Inc., 1991.
- [13] Neil B. Petroff, "Biomimetic Sensing For Robotic Manipulation", Ph.D. Thesis, Aerospace And Mechanical Engineering Dept., University Of Notre Dame, Indiana, August, 2006.
- [14] Craig Eldershaw, "Heuristic Algorithms for Motion Planning", Ph.D. Thesis, Computing Laboratory, the University Of Oxford, Hilary Term, 2001.

- [15] Daniela Constantinescu, " Smooth Time Optimal Trajectory Planning For Industrial Manipulators", Master Of Applied Science Thesis, Department Of Mechanical Engineering, The University Of British Columbia, September, 1998.
- [16] Ratheesh Rajan, B.Tech, "Foundation Studies For An Alternate Approach To Motion Planning Of Dynamic Systems", MS.c. Thesis, The Faculty Of The Graduate School, The University Of Texas At Austin, December, 2001.
- [17] Shunji Umetani, Takashikurakaka, Yasuyuki Suzuki, & Masatake Higashi, " A Bi-Directional Local Search For Robot Motion Planning Problem With Many Degree Of Freedom" The 6th Meta Heuristics International Conference , Vienna, Austria, August 22-26, 2005.
- [18] Byung Kook Kim, Kang G. Shin. " Minimum - Time Path Planning For Robot Arms And Their Dynamics", IEEE Transactions On Systems, Man And Cybernetics, Vol. Smc – 15, No.2, Pp.213 – 223, March, April, 1985.
- [19] Zoltan Zoller, & Peter Zentan " Constant Kinetic Energy Robot Trajectory Planning ", Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng., Vol. 43, No.2, Pp. 213 – 228, 1999.
- [20] J. Sumlo, a Sckou, V. Lukanyin, "Intelligent Robot Control. The Automatic Trajectory Planning", Department of Manufacture Engineering, Budapest, University Of Technology and Economics, 2000.
- [21] Zhe Tang, Changjiu Zhou, Zenqi Sun, " Trajectory Planning For Smooth Transition Of A Biped Robot", IEEE International Conference on Robotic & Automation, Taipei, Taiwan, September 14 – 19, 2003.
- [22] Dong Kyoung Chwa, Jungo Kang, Kihong Im, Jin Young Choi, " Robot Arm Trajectory Planning Using Missile Guidance Algorithm", SICE Annual Conference In Funkui, August 4-6, 2003.
- [23] Devendra P. Garg, & Manish Kumar, "Optimization Techniques Applied To Multiple Manipulators for Path Planning and Torque Minimization," Duke University, 2002.
- [24] E.J. Solteiro Pires, & J.A. Tenreiro Machado, " A GA Perspective Of The Energy Requirement For Manipulators Maneuvering In A Workspace With Obstacles", CEC 2000- Congress On Evolutionary Computation , pp. 1110- 1116, 16-19 July 2000, Santiago, California, USA.

- [25] E.J. Solteiro Pires, P.B. De Moura Oliveira, & J.A. Tenreiro Machado, "An Evolutionary Approach To Robot Structure And Trajectory Optimization", Universidade De Tras – Os-Montes E Alto Douro, Dep. De Engenharia Electrotecnica, Quinta De Prados, Portugal, 2001.
- [26] S.G. Yue, D. Henrich, X. L. Xu, & S.K. Toss, " Trajectory Planning In Joint Space For Flexible Robots With Kinematics Redundancy" , The Iasted International Conference, Modeling, Identification, And Control, Innsbruck, Austria. February 19-27, 2001.
- [27] Bahaa Ibrahim Kazem, Ali Ibrahim Mahdi, Ali Talib, " Motion Planning for a Robot Arm by Using Genetic Algorithm" , Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering , Volume 2, Number 3, Sep. 2008, Pages 131 – 136.
- [28] E.J. Solteiro Pires, J.A. Tenreiro Machado & P.B. Moura Oliveira, "Fractional Order Dynamic In A Genetic Algorithm", The 11th International Conference On Advanced Robotics, Colomboa, Portugal, Pp. 264 -269 June 30- July 3, 2003.
- [29] A. Gunawan, K. M. Ng and H. L. Ong, (2008), " A Genetic Algorithm for the Teacher Assignment Problem for a University in Indonesia", Information and Management Sciences, Volume 19, Number 1, pp. 1-16
- [30] Randy L. Haupt and Sue Ellen Haupt, (2004), "Practical Genetic Algorithm" (2nd ed) , USA: Wiley
- [31] Fabian Marki, Manfred Vogel and Martin Fischer, (2006), " Process Plan Optimization using a Genetic Algorithm", PATAT 2006, pp. 528–531. ISBN 80-210-3726-1.
- [32] Matlab version 7.4.0.287(R2007a), 29 January 2007, U.S. Patents
- [33] Carol Meyers and James B. Orlin, (2006), "Very Large-Scale Neighborhood Search Techniques in Timetabling Problems", PATAT 2006, pp. 36–52. ISBN 80-210-3726-1.