

بازیابی یک بازوی مکانیکی ماهر متحرک واژگونی شده به کمک سیستم بینایی

داود نادری (استادیار)

محمود کریمی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا همدان

مهران ستاری (مربی)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان

در آینده استفاده از ربات‌های کلوشر در سطوح ناهموار برای انجام کارهای سخت و بدون نیاز به نظارت انسان کاربردهای بسیار وسیعی خواهد داشت. بسیاری از الگوریتم‌های فعلی کنترل و طراحی مسیر، مشخصات ربات و محیط را در نظر نمی‌گیرند و لذا کارایی آنها در سطوح ناصاف محدود خواهد بود. بنابراین ناپایداری و حتی واژگونی این وسایل در چنین شرایطی دور از انتظار نیست. در این تحقیق بازیابی حرکت از حالت «واژگونی از بغل» یک بازوی مکانیکی ماهر با استفاده از اهرم‌بندی و سیستم بینایی ارائه شده است. برای کنترل عملیات بازیابی و رسیدن به یک حالت بهینه، الگوریتم ژنتیک و یک مدل شبه استاتیکی به کار گرفته شده است. معیار به کار گرفته شده برای بهینه‌سازی، توان مصرفی کاراندازهای بازوی مکانیکی است. طراحی مسیر حرکت مجری نهایی بر روی سطح در تعیین این معیار حائز اهمیت است. بدین منظور برای تخمین منحنی سطح ناهموار از یک سیستم برجسته‌سازی دوچشمی، روشی مشابه بینایی انسان و علم پردازش تصویر، استفاده می‌شود. در پایان نتایج حاصل از شبیه‌سازی، کارایی الگوریتم‌های به کار گرفته شده را نشان می‌دهند.

۱. مقدمه

این نمونه می‌توان ربات چهارچرخ JPL را نام برد که یک الگوریتم کنترل برای آن ارائه شده است.^[۱] این الگوریتم با تغییر مکان مرکز جرم قادر به بهبود پایداری است. همچنین از روش الگوریتم ژنتیک برای حرکت دادن بازوی مکانیکی به منظور اصلاح موقعیت مرکز جرم، برای کمک به پایداری نیز استفاده شده است.^[۸] به منظور کنترل مؤثر سیستم تعلیق مفصل‌دار روش جدیدی برای افزایش پایداری بازوی مکانیکی متحرک در مقابل واژگونی به کار رفته است.^[۹] در این روش با استفاده از یک مدل شبه استاتیکی و بهینه‌سازی آنلاین (روی خط)، پایداری ایجاد شده است. در ادامه‌ی این مطالعه به منظور افزایش پایداری و قابلیت تحرک کلوشر، زمین ناهموار به صورت یک سطح تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته شده و از روشی بر پایه‌ی سیستم بینایی به منظور اندازه‌گیری میزان فرورفتگی چرخ‌ها استفاده شده است.^[۱۰]

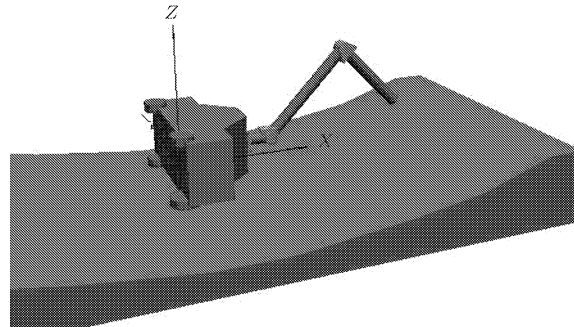
تاکنون تحقیقات انجام شده اساساً در راستای بهبود پایداری ربات در زمین‌های ناهموار بوده است. همواره ربات متحرک پایدار فرض شده و لذا تحقیقی برای بازیابی ربات متحرک از حالت واژگونی انجام نشده است. اما در واقع ناپایداری ربات‌های متحرک و در نهایت واژگونی کامل آنها غیرقابل اجتناب است و واژگونی ربات‌های متحرک می‌تواند موجب شکست مأموریت‌ها و تحمیل هزینه‌های سنگین شود. به همین علت بازیابی حرکت از حالت واژگونی بازوی مکانیکی متحرک توسط

ربات‌های سیار در انجام مأموریت در مناطق خطرناک و ناهموار، مثل کاوش در سیارات و کاربردهای نظامی، استفاده‌ی روزافزون دارند.^[۱] در آینده مأموریت‌ها در کرات دیگر نیاز به ربات‌های سیار برای انجام وظایف مشکل در زمین‌های نامسطح دارد. این امر باعث گیر کردن یا ناپایدار شدن بازوی مکانیکی متحرک شده و هر دو عامل شکست مأموریت خواهد بود.^[۲]

ربات‌هایی که دارای مرکز جرم ثابت هستند خطر واژگونی آنها را بیشتر تهدید می‌کند. واضح است که در محاسبه‌ی خطر واژگونی، نسبت پهنای مؤثر وسیله به ارتفاع مرکز جرم پارامتر بسیار مهمی است.^[۳] برای تعیین ارتفاع مرکز جرم، یک روش برآورد Online ارائه شده است.^[۴] با توجه بر تأثیر چرخش بدنه، تأثیرات تغییر شکل جانبی تایرها و ممان‌های ژيروسکوپی حاصل از گردش تایرها را در نظر می‌گیرد. در مطالعات اخیر، تأثیرات مهم ثانوی ناشی از سیستم تعلیق و نرمی که موجب تمایل به واژگونی می‌شوند، مورد بحث قرار گرفته است.^[۶]

اخیراً ربات‌هایی با سیستم تعلیق مفصل‌دار فعال به منظور اصلاح پیکربندی چرخ‌ها برای افزایش قابلیت حرکتی بر روی زمین‌های ناهموار طراحی شده‌اند. مرکز جرم این ربات‌های تغییر شکل‌پذیر، با دو اهرم برای رسیدن به پایداری تغییر می‌یابند. همچنین این ربات‌ها قادرند مرکز جرم‌شان را با حرکت دادن بازوی مکانیکی جابه‌جا کنند. از

شروع تا لحظه‌ی بازیابی، می‌توان زوایای تعیین‌کننده‌ی پیکربندی بازوی مکانیکی را تعیین کرد.



شکل ۱. نحوه‌ی بازیابی یک بازوی مکانیکی متحرک واژگون.

۲. سیستم بینایی

سیستم بینایی انسان قادر به استخراج دقیق اطلاعات سه بعدی از صحنه‌های دیدنی دوبعدی است. این مسئله ما را به این باور می‌رساند که در تصاویر دوبعدی اطلاعات کافی برای رسیدن به یک تصویر سه بعدی وجود دارد. بدین سبب مطالعات فراوانی برای فرموله کردن چنین عملکردی انجام شده که از آن جمله می‌توان به تخمین عمق مطلق یا نسبی بر پایه‌ی تکنیک‌های پردازش تصویر برای سیستم‌های بینایی ماشین اشاره کرد.^[۱۷]

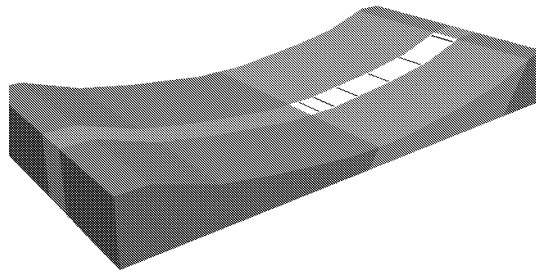
تکنیک‌های مورد استفاده به منظور تعیین عمق اجسام به دو مقوله تقسیم می‌شوند: دریافت فعال^۳ و دریافت غیرفعال^۴. دریافت فعال معمولاً مستلزم انتقال انرژی است، مثل امواج آکوستیک، الکترومغناطیس، امواج مادون قرمز و لیزر که بعد از برخورد به سطح بازتاب پیدا می‌کنند. در طرف مقابل، دریافت غیر فعال غالباً از روشنایی موجود روی جسم برای پیدا کردن عمق آن استفاده می‌کنند.

روش‌های دریافت فعال از معمولی‌ترین روش‌های فاصله‌یابی‌اند که فاصله‌ی زمان پرواز (TOF) را در نظر می‌گیرند. حسگرهای به‌کار رفته در این شیوه، با تعیین زمان سپری شده بین سیگنال ارسالی و دریافتی، و سپس ضرب این زمان در سرعت سیگنال، فاصله را تعیین می‌کنند. بهر حال استفاده از TOF در فواصل کوچک با سیگنال‌های سریع نتایج کم‌دقتی را عرضه می‌دارد.^[۱۸]

دریافت غیرفعال روشی دیگر برای تعیین عمق سطوح است که از روش‌های پردازش تصویر استفاده می‌کند؛ برای آنالیز آن نیز از روش‌هایی مثل تجزیه و تحلیل بافت، حرکت، همگرایی و غیره بهره می‌برد. همه‌ی این روش‌ها مشخصاً دارای مزایا و معایبی در فرمول‌بندی و به‌کارگیری هستند.^[۱۹]

یکی دیگر از روش‌های دریافت غیرفعال، استفاده از برجسته‌سازی دو چشمی است که شباهت بسیار به بینایی انسان دارد. در این روش از دو دوربین نزدیک به هم برای گرفتن تصاویر استفاده می‌شود. اطلاعات مربوط به عمق با به‌کارگیری این دو تصویر و تعدادی نقاط کنترل بر روی سطح جسم به دست می‌آیند. از آنجا که می‌توان برای افزایش دقت تعداد دوربین‌های بیشتری به‌کار برد، لذا استفاده از آن عمومیت بیشتری دارد. همچنین این روش برای تهیه‌ی نقشه‌ی سطح نیز مفید است.^[۲۰] در روشی مشابه، دو یا چند تصویر گرفته شده از یک دوربین در مکان‌های مختلف هم می‌تواند اطلاعات مربوط به عمق را به همین ترتیب پیدا کند.

خودشان و بدون دخالت انسان از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش یک بازوی مکانیکی متحرک به‌صورت واژگون روی یک سطح ناهموار در نظر گرفته شده که با استفاده از بازوی مکانیکی قصد بازیابی خود را به حالت اولیه دارد (شکل ۱). این بازوی مکانیکی ماهر چند رابط دارد که توسط اتصالات مفصلی به هم وصل شده‌اند و به‌وسیله‌ی موتورهای DC به‌کار می‌افتند. برای بازیابی باید مجری نهایی را با اعمال گشتاور توسط موتورها بر روی سطح ناهموار حرکت داد. بدین‌منظور لازم است پیکربندی بازو و پایه مشخص باشد، یعنی مقادیر مناسب متغیرهای مفصلی به‌منظور قراردادن مجری نهایی روی سطح باید محاسبه شوند. این وظیفه منجر به حل مسئله‌ی سینماتیک معکوس می‌شود که نیاز به شناخت پروفیل سطح نیز دارد. بنابراین اولین گام برای حل این مسئله مشخص کردن عمق نقاط مختلف است که از طریق آن منحنی سطح به دست می‌آید. بدین منظور می‌توان از شیوه‌های مختلف شناسایی سطح بهره گرفت که شیوه‌ی به‌کار گرفته شده در این پژوهش روش سیستم بینایی دوچشمی^۱ است. برای به‌کارگیری این روش، دو دوربین در دو جهت مختلف بر روی بازوی متصل به مجری نهایی نصب شده تا بتوان از یک سطح در جهات مختلف تصویربرداری کرد. با استفاده از علم پردازش تصویر و فتوگرامتری^۲ می‌توان عمق نقاط مورد نظر را نسبت به یک مبدأ مشخص، با استفاده از تصاویر گرفته شده، به دست آورد. با تخمین پروفیل سطح، مدل‌سازی سینماتیک و نیروهای بازوی مکانیکی در حین بازیابی با به‌کارگیری یک مدل شبه استاتیکی تعیین، و تابع توان مصرفی کاراندازهای آن برحسب زوایای مفصلی نوشته می‌شود. به‌دلیل محدود بودن توان موتورهای محرک، از توان مصرفی موتورها به‌عنوان معیاری برای بهینه‌کردن حرکت بازوهای مکانیکی ماهر استفاده می‌شود. بدین‌منظور الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار MATLAB که یکی از روش‌های بهینه‌سازی کلی است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. الگوریتم ژنتیک به‌دلیل کارایی خوب در بهینه‌یابی عمومی و سهولت تعریف تابع هدف با توجه به نوع معادلات در این مسئله انتخاب شده است. سرانجام با کمینه‌کردن تابع توان از



شکل ۳. نحوه تاباندن الگوهای خطی.

می‌شود، کافی است که تحلیل‌ها بر روی نوار باریکی در اطراف این محور متمرکز شود و از بررسی بقیه‌ی قسمت‌های تصویر صرف‌نظر شود. در این صورت تعیین عمق تعداد نقاط دلخواه روی این نوار نشان‌دهنده‌ی مقادیر ارتفاعی مسیری است که مجری نهایی برای بازیابی طی می‌کند. برای پیدا کردن نقاط مزدوج در دو تصویر، تعدادی الگوی نورانی خطی که برابر تعداد نقاط دلخواه است، روی سطح ناهموار تابانده می‌شود. تابش این الگوها بر روی نوار مرکزی است و تصویر این اشکال خطی در راستای افق صورت می‌گیرد (شکل ۳). علت به‌کارگیری الگوی خطی آن است که اولاً عملیات پردازش تصویر از ابتدا تا انتها ماندگار باشد و از بین نرود، دوماً در صورت حذف یک یا چند پیکسل بعد از عملیات آشکارسازی لبه، بقیه‌ی قسمت‌های خط قادر به تعیین محل الگو باشند؛ سوم اینکه عملیات تناظریابی در آن آسان است. به‌دلیل ناهمواری موجود روی سطح و نیز جهت‌گیری مختلف دوربین‌ها، فاصله‌ی بین این الگوها و ابعاد آنها در هر دو عکس با هم متفاوت‌اند که این اختلاف می‌تواند برای محاسبه‌ی عمق مورد استفاده قرار گیرد.

۲.۳. تخمین منحنی سطح

برای اینکه موقعیت الگوهای خطی با واقعیت مطابقت داشته باشد، شبیه‌سازی پروفیل سطح در ابتدا به‌صورت معکوس انجام می‌شود. بدین منظور برای سطح ناهموار منحنی‌بی با معادله‌ی زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$Z = 0.1(X^2 - X) \quad (1)$$

سپس نقاطی به‌عنوان محل قرارگیری الگوها انتخاب شده و موقعیت آنها در هر دو تصویر با استفاده از معادلات قیدی هم‌خطی و تقاطع فضایی به دست می‌آید. برای مدل‌سازی مستقیم، از اطلاعات شبیه‌سازی معکوس استفاده شده و دو تصویر به‌گونه‌ی ساخته می‌شوند که توسط دو دوربین از سطح بدون بافت گرفته شده‌اند. این تصاویر به ابعاد 5×5 cm، و حاوی $48^\circ \times 48^\circ$ پیکسل‌اند. در هر تصویر شش الگوی خطی موجود است و فرض بر این است که این تصاویر تحت تأثیر اغتشاش گوسی قرار گرفته‌اند (شکل ۴). با اعمال عملیات فیلترینگ گوسی و بهبود

۱.۲. روش دوچشمی

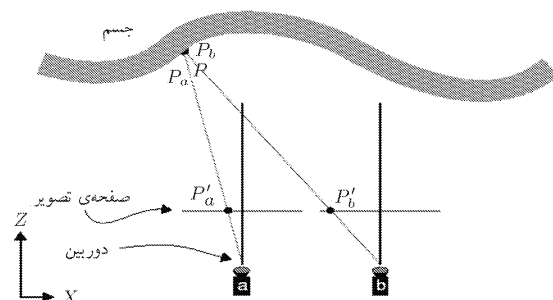
روشی که در این تحقیق برای به دست آوردن عمق نقاط به‌کار گرفته شده، استفاده از دو دوربین است که اصطلاحاً به آن «روش دو چشمی»^۵ نیز می‌گویند. در این روش توسط دو دوربین، تصویری از سطح گرفته می‌شود. این دوربین‌ها در مکان‌هایی مشخص روی ربات نصب شده‌اند. شکل یا نقطه‌ی روی سطح که توسط دو دوربین دیده شده، در موقعیت‌های مختلفی از صفحات تصویر قرار می‌گیرد. به‌دلیل سیستم تصویر مرکزی تصویر برداری، جابه‌جایی بین موقعیت‌های دو شکل در صفحه‌ی تصویر به‌وجود می‌آید که آن را عدم توافق^۶ می‌گویند. عمق نقاط مختلف با توجه به این عدم توافق در دو شکل به دست می‌آید (شکل ۲).

برای پیدا کردن نقاط متناظر در دو تصویر که نشان‌دهنده‌ی یک نقطه از سطح‌اند می‌توان از روش‌های تناظریابی استفاده کرد. پیداست که برای مشخص شدن نقاط مشابه باید پیکسل‌های اطراف آن نقطه با بقیه‌ی نقاط متفاوت باشند تا تطبیق کافلاً درستی صورت گیرد. بدین‌منظور می‌توان از ایجاد الگوهای خاص بر روی سطح استفاده کرد. برای مشخص کردن الگویی که در اطراف نقطه‌ی مورد نظر وجود دارد، آشکارسازی مرزها یا لبه‌یابی الگو لازم است تا بتوان با استفاده از آن عمل تطبیق را بکار برد. لبه‌یابی یکی از کار بردهای مهم پردازش تصویر است و الگوریتم آن فیلتر کردن، بهبود و آشکارسازی را شامل می‌شود.^[۱۵]

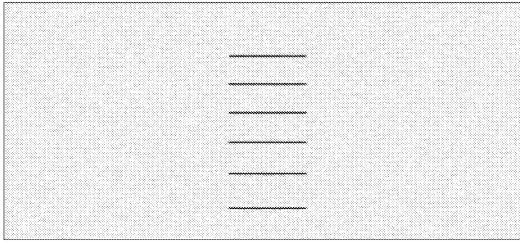
در نهایت به‌منظور دسترسی به عمق نقاط در نظر گرفته شده باید با استفاده از یکسری معادلات قیدی، ارتباط بین تصاویر و پارامترهای خارجی را به‌کار بست. این پارامترها عبارت‌اند از: موقعیت مرکز تصویر و وضعیت دوربین در لحظه‌ی عکس‌برداری.

۲.۲. نحوه‌ی تصویرگیری

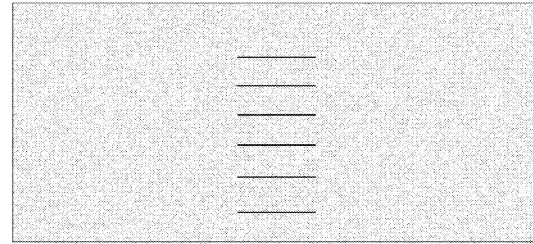
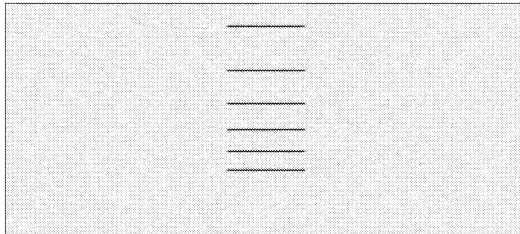
با توجه به فرض «و» (۳-۱ فرضیات) می‌توان دریافت که امتداد رابط‌های بازوی مکانیکی عمود بر کشیدگی سطح است و تصاویری که توسط دو دوربین متصل به رابط‌ها گرفته شده یک محور متقارن عمودی دارند. چون حرکت مجری نهایی ربات بر روی این محور انجام



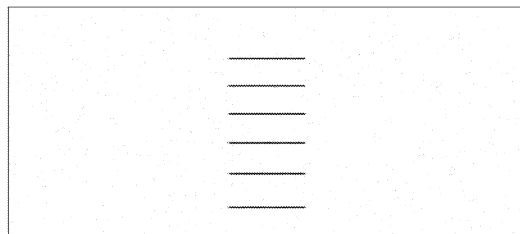
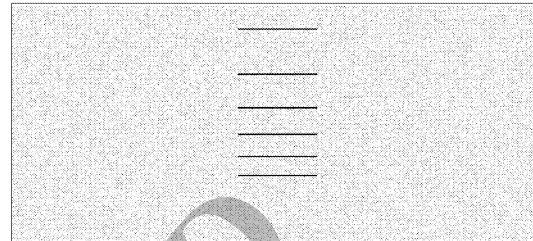
شکل ۲. مدل ساده‌ی یک سیستم دوچشمی.



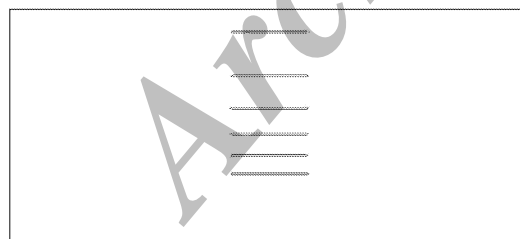
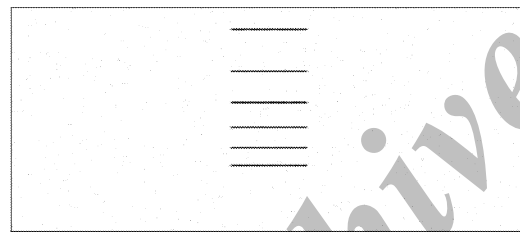
شکل ۵. تصاویر راست و چپ سطح بعد از اعمال فیلتر.



شکل ۴. تصاویر راست و چپ سطح با اغتشاش گوسی.



شکل ۶. تصاویر راست و چپ سطح بعد از اعمال فیلتر.



شکل ۷. تصاویر راست و چپ سطح بعد از آشکارسازی لبه.



این تصاویر، اشکال ۵ و ۶ حاصل می‌شوند. بعد از عملیات فیلترینگ و بهبود، کنتراست الگوهای خطی نسبت به قسمت‌های اغتشاش تصاویر بالا رفته و سرانجام با استفاده از عملگر لبه‌یاب سابل، مرز الگوهای خطی مانند شکل ۷ معین می‌شوند. در این شبیه‌سازی زوایای دور بین‌ها (با توجه به شکل ۸) به صورت $\phi_1 = -20^\circ$ و $\phi_2 = +20^\circ$ حول محور Y و فاصله‌ی کانونی $f_1 = f_2 = 3\text{cm}$ انتخاب می‌شوند. محل قرارگیری دور بین‌ها در مختصات مرجع به صورت $X_{0,1} = 120\text{cm}$ و $X_{0,2} = 180\text{cm}$ در ارتفاع $Z_{0,1} = Z_{0,2} = 100\text{cm}$ است.

با توجه به اینکه شیب سطوح ناهموار در محل بازیابی زیاد در نظر گرفته نمی‌شود، ترتیب الگوها در هر دو عکس یکسان بوده و فقط فاصله‌ی آنها از هم تغییر کرده است. این نتیجه‌ی بسیار کارآمد، موجب ساده‌تر شدن عملیات تطبیق می‌شود. برای رسیدن به موقعیت هر الگوی خطی، جست‌وجو از بالای تصویرها و سطر به سطر در محدوده‌ی نوار مرکزی آغاز می‌شود. بعد از اعمال عملگر آشکارسازی لبه، فقط الگوها مقدار پیکسل یک پیدا کرده و مقدار پیکسل‌های بقیه‌ی تصویر صفر هستند؛ لذا با میانگین‌گیری از مقادیر هر ردیف پیکسل حول محور وسط تصویر، می‌توان موقعیت پیکسلی هر الگوی خطی را به دست آورد. با پیدا کردن شماره‌ی پیکسل مربوط به لبه‌ی هر خط در سیستم مختصات عکسی می‌توان با استفاده از تبدیل مختصات، محل هر الگو را نسبت به سیستم مختصات عکسی به دست آورد. در نتیجه با مشخص شدن موقعیت هر دو الگوی متناظر در سیستم عکسی، عملیات تناظریابی کامل می‌شود. باید توجه داشت که به علت دوبعدی شدن مسئله، نیازی به جست‌وجوی افقی نیست، زیرا ارتفاع تمام نقاط موجود روی یک خط عرضی با هم برابر است.

با داشتن مختصات عکسی الگوها می‌توان روابط تقاطع فضایی

۱.۳ فرضیات

در ابتدا به منظور کاهش پیچیدگی معادلات حاکم و جلوگیری از ورود مسئله‌ی هوش مصنوعی، فرضیات زیر برای سادگی تحلیل‌های سینماتیکی و سینتیکی انجام می‌شود:

الف) به دلیل حرکت بر روی سطح ناهموار، سرعت بازوی مکانیکی کم در نظر گرفته شده و از اثرات دینامیکی آن صرف‌نظر می‌شود.

ب) پروفیل سطح ناهموار در یک ناحیه‌ی کوچک به طور عمده تغییر نمی‌کند و اختلاف ارتفاع نقاط مختلف سطح نیز زیاد نیست.

ج) با توجه به فرض ب و همچنین با آگاهی بر این که وزن پایه چند برابر وزن اهرم‌بندی است در نتیجه نقطه‌ی تماس چرخ و سطح، که دوران حول آن انجام می‌گیرد، ثابت فرض می‌شود.

د) محل تماس سطح و چرخ‌ها تک نقطه‌یی است و از طرف سطح هیچ گشتاوری به آنها وارد نمی‌شود.

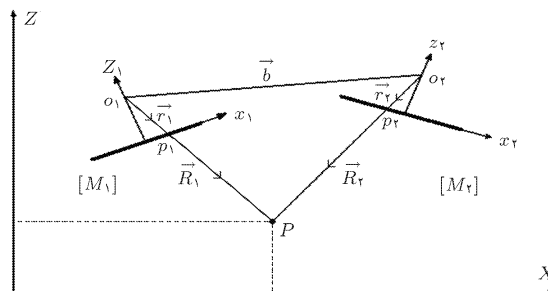
ه) سطح غیرقابل انعطاف و صلب در نظر گرفته می‌شود.

و) سطح ناهموار به صورت دوبعدی گسترش یافته در نظر گرفته شده و محوری که ربات حول آن واژگون شده در امتداد این کشیدگی است؛ لذا می‌توان از مدل دوبعدی به جای مدل سه‌بعدی استفاده کرد.

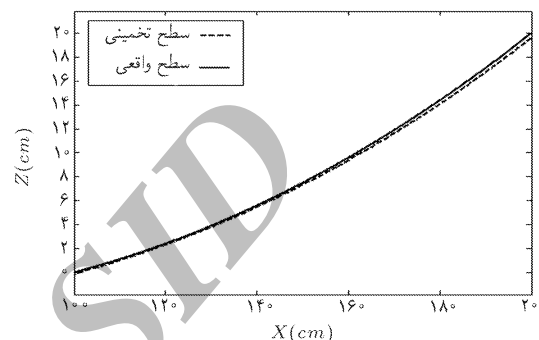
۲.۳ سینماتیک

تعیین حالت و پیکربندی مدل به صورت تابعی از سطح ناهموار است که برای تحلیل نیرویی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق مسئله‌ی سینماتیک معکوس به عنوان موضوعی اساسی و پایه‌یی به کار گرفته می‌شود، بنابراین می‌توان با استفاده از نقشه‌ی پروفیل سطح به دست آمده از سیستم بینایی وضعیت بازوی مکانیکی را تعیین کرد. برای ارائه‌ی تعریف کامل پیکربندی بازوی مکانیکی، پارامترهایی مورد نیاز است که به آنها اشاره خواهیم کرد.

سیستم به صورت یک بازوی مکانیکی با k درجه آزادی در نظر گرفته شده که در فضای کاری w حرکت می‌کند. در اینجا w فضای اقلیدسی است و به صورت R^2 نمایش داده می‌شود. بازوی مکانیکی n رابط دارد و به صورت L_i ($i = 1 \dots n$) تعریف می‌شود که در آن L_1 طول معادل پایه است (شکل ۱۰). همچنین با توجه به شکل مسئله می‌توان رابطه‌ی $n = k + 1$ را بین تعداد درجات آزادی و تعداد رابط‌ها نوشت. موقعیت مجری نهایی و همچنین نقطه‌ی تماس چرخ و سطح در دستگاه مختصات دکارتی $\{x, y, z\}$ به ترتیب به صورت بردار $p_e = [x_e, z_e]$ و $p_b = [x_b, z_b]$ بیان می‌شوند. جهت‌گیری عضوهای بازوی مکانیکی به صورت بردار زوایای مفصلی $\theta_i = [\theta_{1j}, \theta_{2j}, \dots, \theta_{nj}]$ بیان شده که در این بردار θ_{ij} زاویه‌ی مفصلی بازوی i ام در نقطه‌ی j ام مسیر است.



شکل ۸. نمایش تقاطع فضایی.



شکل ۹. منحنی سطح واقعی و سطح برآورد شده با نرم‌افزار Vision.

را برای هر الگو در دو تصویر چپ و راست به کار برد [۱۶]

$$\begin{aligned} X_i(x_{i1} \sin(\phi_1) + f_1 \cos(\phi_1)) + Z_i(x_{i1} \cos(\phi_1) + f_1 \sin(-\phi_1)) &= x_i(X_{o1} \sin(\phi_1) + Z_{o1} \cos(\phi_1)) + f_1(X_{o1} \cos(\phi_1) + Z_{o1} \sin(-\phi_1)) \\ X_i(x_{i2} \sin(\phi_2) + f_2 \cos(\phi_2)) + Z_i(x_{i2} \cos(\phi_2) + f_2 \sin(-\phi_2)) &= x_i(X_{o2} \sin(\phi_2) + Z_{o2} \cos(\phi_2)) + f_2(X_{o2} \cos(\phi_2) + Z_{o2} \sin(-\phi_2)) \end{aligned} \quad (2)$$

با حل معادلات ۲، پارامترهای نامعین X_i و Z_i که مختصات نقاط سطح ناهموار نسبت به محور دوران پایه‌ی ربات است، به صورت شکل ۹ به دست می‌آید. علت این خطای کوچک ناشی از تعداد پیکسل‌ها است که با انتخاب دور بین‌های گران‌قیمت‌تری که تعداد پیکسل حس‌گرهای آنها بیشتر است، می‌توان به دقت بالاتری دست یافت.

۳. مدل‌سازی بازوی مکانیکی

برای تعیین پیکربندی بازوی مکانیکی واژگون و نیروها و نیز گشتاورهای اعمالی موتورها و ارائه‌ی معیاری برای کنترل حرکت می‌بایست تحلیل سینماتیک و سینتیکی بازو انجام شود.

نیروها و گشتاورهای اعمال شده بر بازوهای مکانیکی که حاصل وجود سطح ناهموار و موتورهای محرک اند، به صورت $f_i = [f_{xi} \ f_{zi} \ \tau_i]^T$ در دستگاه محلی مربوطه بیان می شوند. برای سیستم صفحه‌یی فوق، معادلات تعادل نیروی شبه استاتیکی برای هر مفصل تا نقطه‌ی تماسی چرخ و سطح به صورت رابطه‌ی ۴ نوشته می شود: [۷]

$$\begin{bmatrix} {}^i R & 0 & {}^b R \\ {}^i V_z^z & -{}^i V_z^x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_i \\ f_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{x(i-1)} \\ F_{z(i-1)} \\ M_{y(i-1)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

که در آن $f_b = f_1 = [f_{x1} \ f_{z1}]$ نیروی اعمالی از سوی زمین بر چرخ ربات است؛ ${}^i R$ یک ماتریس دوران 2×2 است و هر بردار از دستگاه i را به برداری دیگر در دستگاه j تبدیل می کند. با ترکیب معادلات تعادل نیرویی فوق برای تمام مفاصل می توان یک ماتریس کلی نوشت:

$$GX = F \quad (5)$$

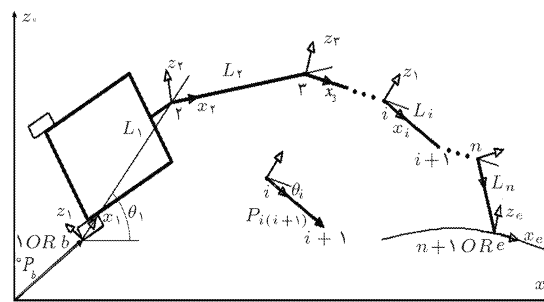
که در آن ماتریس G یک تابع از هندسه‌ی ربات، و X بردار نیروها و گشتاورهای مفاصل است.

با توجه به این که گشتاور در نقطه‌ی تماس مجری نهایی با سطح معادل صفر است، پس رابطه‌ی ۵ دارای $3n$ معادله و $3n+1 = (3n+2)-1$ مجهول است؛ در نتیجه سیستم معادلات دارای یک درجه نامعینی است. با در نظر گرفتن حرکت مداوم مجری نهایی بر روی سطح، می توان معادله‌ی ۶ را به عنوان یک معادله‌ی اضافی برای حل دستگاه فوق در نظر گرفت:

$$f_{z(n+1)} \equiv f_{ze} = \pm \mu f_{xe} \quad (6)$$

در این رابطه μ ضریب اصطکاک بین سطح و مجری نهایی است و مقادیر مثبت و منفی در آن به این دلیل است که مجری نهایی می تواند در دو جهت مختلف حرکت کند. با افزودن رابطه‌ی ۶ به دستگاه معادلات ۵، و سپس حل آنها می توان گشتاورهای مورد نیاز موتورها، τ_i ، را به دست آورد.

به منظور دستیابی به حالت اولیه، لازم است حرکت اهرم بندی واژگون بر روی سطح ناهموار از لحاظ توان مصرفی کمینه باشد. بدین منظور سیستم مورد مطالعه به صورت مسئله‌ی بهینه سازی مقید فرموله می شود. در اینجا کم ترین توان مصرفی موتورها از لحظه‌ی شروع تا حرکت خودکار به عنوان معیار بهینه سازی در نظر گرفته می شود. منظور از این بهینه سازی، کمینه کردن تابع فوق با ارضای قیود مسئله است. تابع بهینه سازی را می توان به صورت رابطه‌ی ۷ در نظر گرفت. از آنجا که کاراندازه‌ی بازوهای مکانیکی دارای موتورهای DC هستند، توان



شکل ۱۰. نمایش سیستم مختصات تحلیل سینماتیکی.

برای نوشتن معادلات سینماتیکی و حل مسئله‌ی سینماتیک معکوس، موقعیت مجری نهایی نسبت به چهارچوب مرجع به صورت رابطه‌ی ۳ نوشته می شود:

$${}^n P_e = {}^n P_b + \sum_{i=1}^n ({}^i R \ {}^i P_{i(i+1)}) \quad (3)$$

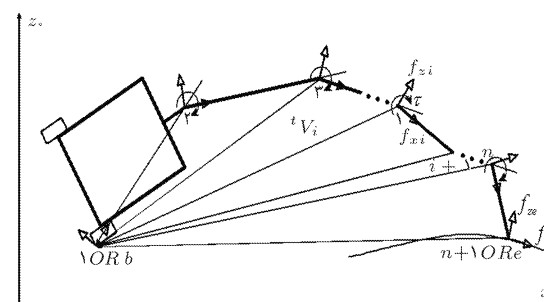
که

$${}^i R = {}^1 R \times \dots \times {}^{i-1} R, \quad {}^i P_{i(i+1)} = {}^i P_{i+1} - {}^i P$$

در این رابطه ${}^{i-1} R$ ماتریس دوران است و چهارچوب i را نسبت به چهارچوب $i-1$ توصیف می کند. همچنین ${}^i P_{i(i+1)}$ برداری است که رابط نام را در مختصات مربوطه یعنی i نشان می دهد. با در نظر گرفتن k درجه آزادی برای سیستم، ورودی های رابطه‌ی ۳ نقاط ارتعاشی یا همان پروفیل سطح و همچنین k متغیر مستقل است و هدف از حل آن، محاسبه‌ی زوایای مفصلی در هر موقعیت از مجری نهایی است.

۳.۳. سینتیک

اهرم بندی k درجه آزادی صفحه‌یی به صورت واژگون بر روی یک سطح ناهموار در نظر گرفته می شود. بردار ${}^i \vec{V}_i = [{}^i V_i^x \ {}^i V_i^z]^T$ که نقاط مفصلی و مجری نهایی را به نقطه‌ی تماسی چرخ/سطح وصل می کند، در مختصات موضعی مربوط به هر نقطه $\{x, z\}$ بیان می شود (شکل ۱۱). بردار $\vec{F}_i = [F_{xi} \ F_{zi} \ M_{yi}]$ با ابعاد 3×1 که در دستگاه مختصات $\{x, z\}$ در نظر گرفته می شود، مجموع تأثیرات نیروهای گرانش و نیروهای تأثیرگذار از محیط بر ربات را برای عضوهای ۱ تا i نشان می دهد.



شکل ۱۱. نمایش سیستم نیرویی.

داشته باشد. با وجود این به والدینی که تابع برازندگی کم‌تری هم دارند امکان ازدواج داده می‌شود. این عمل به صورت اتفاقی ولی براساس مقدار این تابع صورت می‌گیرد (شکل ۱۳).

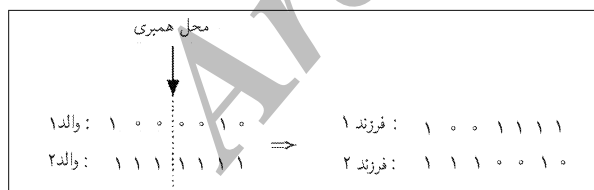
در زیر به عملکردهای مهم در الگوریتم وراثتی اشاره می‌شود. **عملگر همبری:** این عملگر بیشترین استفاده را در الگوریتم‌های وراثتی دارد. عمل همبری در دو گام انجام می‌شود.

- گام اول: اعضای جمعیت (کروموزوم‌ها) در حوزه‌ی توزیع به صورت اتفاقی ایجاد می‌شوند.

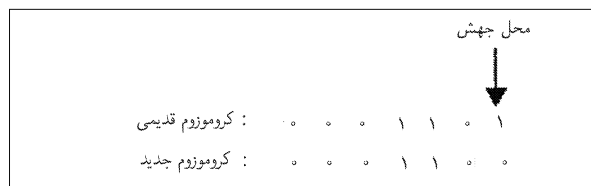
- گام دوم: هر دو عضو از جمعیت با توجه به ارزش آنها انتخاب و عمل همبری انجام می‌گیرد.

عمل همبری به صور مختلف ممکن است انجام شود؛ همبری تک‌نقطه‌یی، همبری دونقطه‌یی و همبری یکنواخت. در عملگر تک‌نقطه‌یی که در این تحقیق استفاده شده است، یک عدد صحیح تصادفی بین ۱ و L_c (طول کروموزوم برحسب ژن است) انتخاب می‌شود و از نقطه‌ی به دست آمده بین دو کروموزوم همبری صورت می‌گیرد. شکل ۱۴ مثالی از همبری تک‌نقطه‌یی را نشان می‌دهد.

عملگر جهش: عملگری است که بطور اتفاقی تغییراتی در کروموزوم‌ها ایجاد می‌کند. اگر احتمال وقوع این عملگر زیاد باشد، ممکن است قابلیت همگرایی الگوریتم به یک جواب از دست برود و اگر این احتمال خیلی کم باشد ممکن است کروموزوم‌های مناسب در تعداد تکرار مشخص الگوریتم برای رسیدن به جواب بهینه تولید نشوند. عمل جهش، یک عدد صحیح تصادفی بین ۱ و L_c انتخاب می‌شود و در نقطه‌ی به دست آمده، ژن کروموزوم تغییر می‌یابد، به طوری که ژن با مقدار صفر به یک، و ژن با مقدار یک به صفر تغییر می‌یابد. مثالی از نحوه‌ی جهش در شکل ۱۵ آمده است. برای ارزیابی هر شخص از یک تابع ارزشی استفاده می‌شود. در مسئله‌ی بهینه‌سازی، افراد



شکل ۱۴. عملگر همبری تک‌نقطه‌یی.



شکل ۱۵. عملگر جهش.

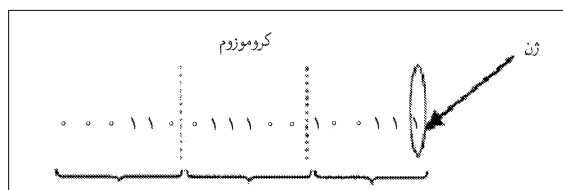
مصرفی تقریباً برابر است با مجموع مربعات گشتاور موتورها؛ [۱۸]

$$E = c \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{i=1}^k T_{ij}^2 \quad (7)$$

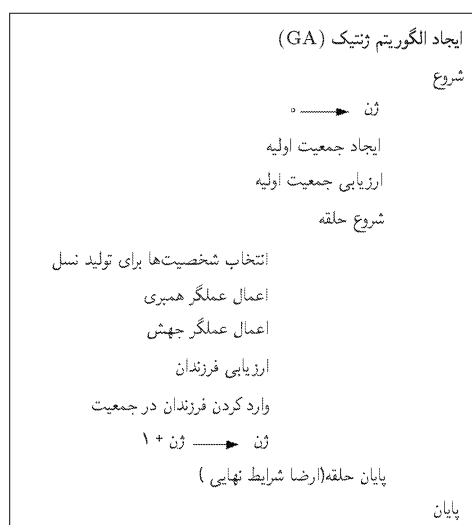
که در آن c یک عدد ثابت و وابسته به مشخصات موتورها است و N_p تعداد نقاط از لحظه‌ی شروع تا پایان حرکت است.

۴. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم‌های ژنتیک (GA) روش‌های بهینه‌سازی کلی و اتفاقی‌اند که از تکامل زیستی طبیعت اقتباس شده‌اند. در یک الگوریتم ژنتیک، بقای هر جمعیت از افراد طبق مطلوبیت آنها در محیط است. افرادی با قابلیت‌های برتر، شانس ازدواج و تولید مثل بیشتری خواهند یافت؛ بنابراین بعد از چند نسل فرزندان با کارایی بهتر به وجود می‌آیند. در الگوریتم وراثتی هر فرد جمعیت به صورت یک کروموزوم معرفی می‌شود (شکل ۱۲). کروموزوم‌ها در طول چندین نسل کامل‌تر می‌شوند. در هر نسل کروموزوم‌ها ارزیابی می‌شوند و متناسب با ارزش خود امکان بقا و تکثیر می‌یابند. در بحث الگوریتم ژنتیک تولید نسل طی عملکردهای همبری (crossover) و جهش (mutation) صورت می‌گیرد. والدین برتر براساس یک تابع برازندگی انتخاب می‌شوند. در عمل ازدواج، کروموزوم‌هایی شرکت خواهند کرد که تابع برازندگی آنها مقدار بیشتری



شکل ۱۲. مثالی از یک کروموزوم.



شکل ۱۳. ساختار الگوریتم ژنتیک.

بازوی مکانیکی، دو ورودی با استفاده از یک چندجمله‌ای درجه‌ی سه به صورت رابطه‌ی ۱۱ به سیستم اعمال می‌شود. [۲۰]

$$q_{ij} = a_0(\dot{i}) + a_1(\dot{i})j^1 + a_2(\dot{i})j^2 + a_3(\dot{i})j^3$$

$$\dot{i} = 1, 2, \dots, 1 \leq j \leq N_p \quad (11)$$

اگر مسیر هر متغیر از لحظه‌ی شروع تا پایان حرکت به N_p نقطه تبدیل شود، در این صورت q_{ij} بیانگر متغیر مستقل عضو \dot{i} ام در نقطه‌ی j ام مسیر است که می‌تواند زوایای مفصلی اعضا یا موقعیت مجری نهایی روی سطح باشد. با اعمال سرعت‌ها و زوایای ابتدا و انتهای مسیر به معادله‌ی ۱۱ یعنی $q_{11} = q_{initial(1)}$ ، $q_{N_p,1} = q_{final(1)}$ ، $\dot{q}_{11} = 0$ و $\dot{q}_{N_p,1} = 0$ مجهولات a_k به دست می‌آیند. از آنجا که پروفیل سطح، z_e ممکن است معادله‌ی پیچیده‌ی برحسب x_e باشد و نیز با توجه به مقدار اولیه‌ی θ_1 ، در اینجا برای سادگی حل معادلات سینماتیکی و همچنین کاهش زمان محاسبات از θ_1 و x_e به عنوان ورودی‌های سیستم استفاده می‌شود. در این صورت مقادیر a_0 تا a_3 برای این دو متغیر عبارت خواهد بود از:

$$a_0(\dot{i}) = (q_{final(\dot{i})}(3N_p - 1) + q_{initial(\dot{i})}N_p^2(N_p - 3)) / (N_p - 1)^3$$

$$a_1(\dot{i}) = 6N_p(q_{initial(\dot{i})} - q_{final(\dot{i})}) / (N_p - 1)^3$$

$$a_2(\dot{i}) = -3(N_p + 1)(q_{initial(\dot{i})} - q_{final(\dot{i})}) / (N_p - 1)^3$$

$$a_3(\dot{i}) = 2(q_{initial(\dot{i})} - q_{final(\dot{i})}) / (N_p - 1)^3 \quad (12)$$

در روابط فوق $q_{initial(\dot{i})}$ نمایانگر متغیر \dot{i} ام در حالت اولیه و $q_{final(\dot{i})}$ نمایانگر همان متغیر در حالت نهایی حرکت است. [۲۱] بعد از اعمال این ورودی‌ها که مقادیر نامعین آنها با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک به دست می‌آید، پیکربندی ربات در حال بازیابی در تمام نقاط مسیر کاملاً مشخص می‌شود.

پس از محاسبه‌ی گشتاورهای اعمالی موتورها توسط معادلات سینماتیکی، برای بهینه‌سازی ابتدا می‌بایست قیود فیزیکی مسئله بر آن اعمال شود؛ اول آنکه نیروی عمودی وارد شده از طرف زمین بر مجری نهایی باید به صورت

$$image(N_e) = 0, N_e > 0 \quad (13)$$

باشد تا از قرار گرفتن مجری نهایی بر روی زمین اطمینان حاصل شده، و از پیدا شدن نقاط تکین جلوگیری شود. دوم آن که منحنی مسیر حرکت مفصل‌ها نباید به‌طور کلی یا جزئی زیر سطح باشد. سوم آنکه گشتاور کل حول نقطه‌ی تماس چرخ/سطح به‌منظور بازیابی به صفر برسد. در این صورت گشتاور کل حول نقطه‌ی دوران صفر می‌شود و سیستم دارای

باید کم‌ترین مقادیر عددی را برای این تابع داشته باشند. تابع برازندگی به‌طور معمول برای تبدیل تابع ارزشی به یک میزان شایستگی نسبی تعریف می‌شود. در این مطالعه انرژی مصرفی (معادله ۷) به‌عنوان تابع ارزش شناخته می‌شود. مقادیر تابع ارزشی هر کروموزوم به‌صورت نزولی مرتب شده و تابع برازندگی با توجه به موقعیت هر کدام در گروه به‌صورت رابطه ۸ تعریف می‌شود. در این رابطه N_{ind} تعداد کروموزوم‌ها است. [۱۹]

$$Fit(pos) = 2 \times \frac{pos - 1}{N_{ind} - 1} \quad (8)$$

۵. شبیه‌سازی و نتایج

به‌منظور مطالعه‌ی یک حالت، بازوی مکانیکی متحرک واژگون بر روی یک سطح ناهموار در نظر گرفته شده است. به‌طوری‌که بر روی آن یک بازوی مکانیکی با دو رابط سوار است (پارامترهای عددی در جدول ۱ آمده است). به‌منظور ایجاد درجه‌ی آزادی اضافی برای بهینه‌سازی، از این دو رابط متصل به پایه استفاده شده که منتج به یک مسئله با بازوی مکانیکی دو درجه آزادی می‌شود.

معادلات سینماتیک مستقیم این حالت را می‌توان برای مجری نهایی با استفاده از معادلات (۱-۳) به صورت زیر نوشت:

$$x_e = x_b + L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\sum_{i=1}^2 \theta_i) + L_3 \cos(\sum_{i=1}^3 \theta_i)$$

$$z_e = z_b + L_1 \sin(\theta_1) + L_2 \sin(\sum_{i=1}^2 \theta_i) + L_3 \sin(\sum_{i=1}^3 \theta_i) \quad (9)$$

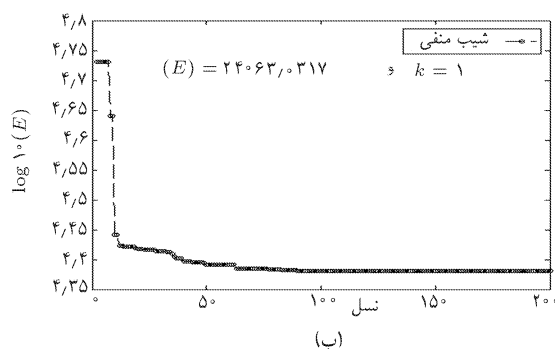
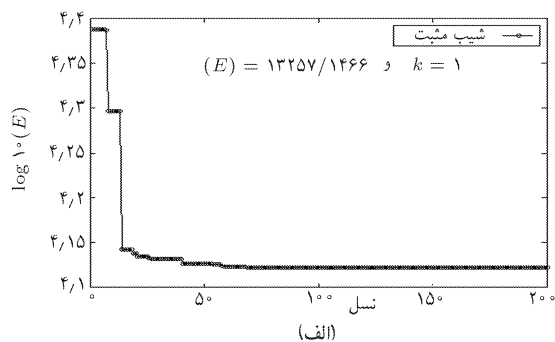
سپس برای کاهش مجهولات دو معادله‌ی فوق، مقادیر ارتفاعی سطح به دست آمده از سیستم بینایی در رابطه‌ی ۱۰ جایگزین می‌شود:

$$z_e = f(x_e) \quad (10)$$

این مقادیر نشان‌دهنده‌ی مسیر حرکتی مجری نهایی است و بیانگر یک مسئله‌ی سینماتیک معکوس است. به خاطر دو درجه آزادی بودن

جدول ۱. پارامترهای عددی.

L1	0.85 (m)
L2	1.1 (m)
L3	0.8 (m)
M1	10.2 (Kg)
M2	1.1 (Kg)
M3	0.8 (Kg)



شکل ۱۶. لگاریتم توان مصرفی در مقابل تعداد نسل.

در شکل‌های ۱۷ الف تا ۱۷ ج زوایای مفصلی θ_1 ، θ_2 و θ_3 را از لحظه‌ی شروع تا لحظه‌ی حرکت خودکار بر حسب نقاط مسیر برای دو حالت نشان داده شده است. همان‌طور که در این سه شکل دیده می‌شود شیب نقاط شروع و پایان برابر صفر است که نشان‌دهنده سرعت صفر در این نقاط است. با مشاهده‌ی دو تصویر ۱۷ ب و ۱۷ ج در لحظه‌ی شروع تا تکمیل بازیابی می‌توان دریافت که زاویه‌ی θ_2 نقش عمده‌تری نسبت به θ_3 بر عهده دارد. همچنین تفاوت دامن‌داری موجود در شکل ۱۷ الف از شکل‌های دیگر کم‌تر است، زیرا θ_1 نشان‌دهنده زاویه‌ی پایه ربات است در حالی که دو زاویه‌ی دیگر بیانگر جهت‌گیری رابطه‌های بازوی مکانیکی‌اند. با توجه به رابطه‌ی ۱۱، این منحنی‌ها توابعی از درجه‌ی ۳ نسبت به نقاط مسیریند.

شکل ۱۸ موقعیت قرارگیری مجری نهایی بر روی سطح ناهموار را در هر دو پروفیل مورد بررسی نشان می‌دهد. چنان که در شکل پیداست، منحنی مربوط به سطح با شیب منفی، پایین‌تر قرار گرفته است. این بدان معناست که قرارگیری نزدیک‌تر مجری نهایی به محور چرخش پایه‌ی ربات به منظور کاهش گشتاور موتورها امکان‌پذیر بوده است.

شکل ۱۹ به منظور اثبات بازیابی در آخرین نقطه‌ی مسیر، ارائه شده است. صفر شدن گشتاور در نقطه‌ی N_p بیانگر این حقیقت است که ربات به حالت بازیابی رسیده است. این گشتاور از مجموع مزدوج نیروهای گرانشی پایه و بازوهای مکانیکی نسبت به محور چرخش به

حرکت خودکار خواهد شد. در نتیجه‌ی اعمال این قیدهای فیزیکی از به دست آمدن جواب‌های غیرواقعی جلوگیری می‌شود. با فرض استفاده از سیستم بینایی، مسیر حرکت مجری نهایی یا همان پروفیل سطح ناهموار در دو حالت مختلف به صورت معادله‌های ۱۴ و ۱۵ منظور می‌شود:

$$z^- = .1((x - 0/5)(x - 0/5) - 0/25) \quad (14)$$

$$z^{--} = .1(-(x - 0/5)|x - 0/5| - 0/25) \quad (15)$$

این دو پروفیل تا قبل از مقدار $x = 0/5$ با هم برابرند ولی به‌ازای مقادیر بیش از آن به ترتیب دارای دو شیب مثبت (—) و منفی (-) با ضریب اصطکاک $\mu = 0/8$ هستند. بنابراین در دو حالت مورد بررسی، مجری نهایی می‌بایست بر روی این دو منحنی حرکت کند. در این مطالعه $N_p = 60$ در نظر گرفته شده و برای اعمال قیود مسئله، مقدار تابع ارزشی برابر ∞ منظور می‌شود تا حالت‌های غیرواقعی در درون الگوریتم ژنتیک سریعاً حذف شوند.^[۲۲] پارامترهای ژنتیکی استفاده شده عبارت‌اند از:

تعداد متغیرها: ۳

دقت متغیرها: ۸

تعداد شخصیت‌ها: ۱۰۰

بیشترین تعداد تولید نسل: ۲۰۰

نرخ همبری (Crossover rate): ۰/۷

نرخ جهش (Mutation rate): ۰/۸

میزان زایش: ۰/۹

برای نشان دادن تأثیرگذاری الگوریتم در نظر گرفته شده بر روی یک اهرم‌بندی دو درجه آزادی صفحه‌ی، در شکل‌های ۱۶ تا ۲۰

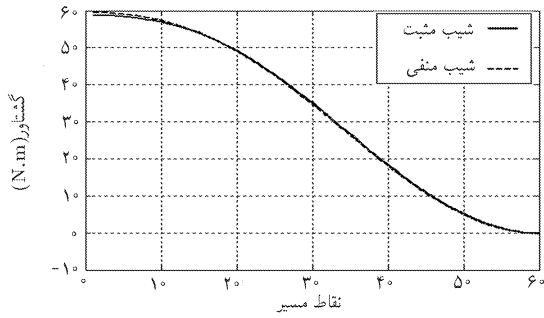
$$x_{final(i)} = \begin{cases} 1/5616 & \text{با استفاده از نتایج بهینه‌سازی} \\ 1/5431 & \dots \end{cases}$$

$$x_{initial(e)} = \begin{cases} 1/3490 & \dots \\ 1/2706 & \dots \end{cases}$$

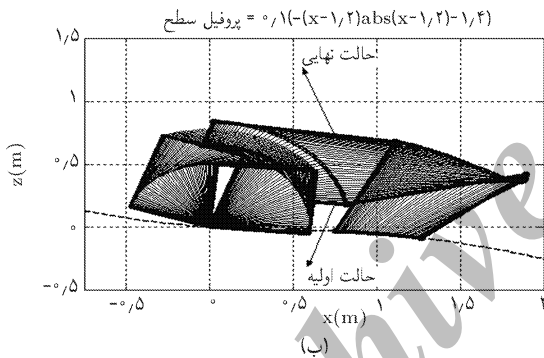
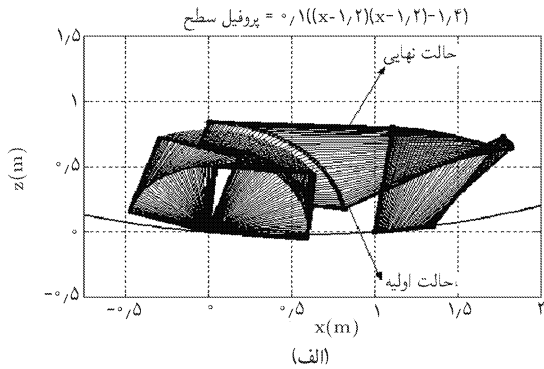
$$x_{final(e)} = \begin{cases} 1/0039 & \dots \\ 1/7529 & \dots \end{cases}$$

شده‌اند.

شکل ۱۶ الف و ۱۶ ب همگرایی الگوریتم را تا رسیدن به یک حد بهینه‌ی پایدار به ترتیب در حدود نسل‌های ۷۰ و ۹۰ نشان می‌دهد، اگر چه ممکن است در اجراهای مختلف متفاوت باشند. در این شکل لگاریتم تابع توان بر حسب تعداد تولید بیان شده تا بتواند محدوده‌ی وسیعی از مقادیر را در دامنه‌ی کوچک نمایش دهد.



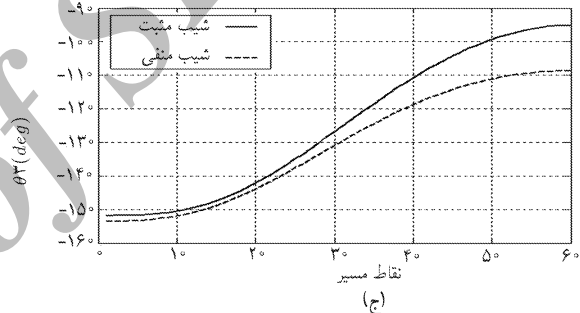
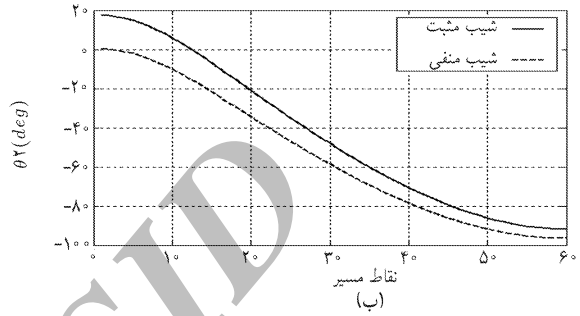
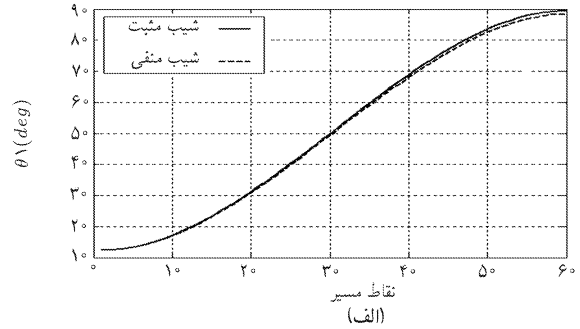
شکل ۱۹. گشتاور ناشی از نیروهای گرانشی برحسب نقاط مسیر.



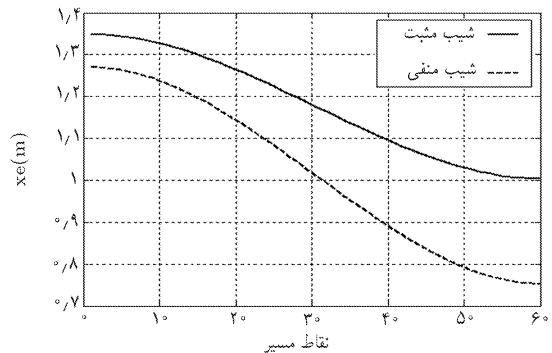
شکل ۲۰. نحوه حرکت بازوهای مکانیکی حاصل از GA.

۶. نتیجه گیری

تاکنون تحقیقات انجام شده اساساً در راستای بهبود پایداری ربات در زمین‌های ناهموار بوده است. همواره فرض شده است که می‌توان در هر شرایطی پایداری بازوی مکانیکی متحرک را حفظ نمود. اما در واقع ناپایداری ربات‌های متحرک در نهایت واژگونی آنها به‌طور کامل غیرقابل اجتناب بوده و واژگونی ربات‌های متحرک می‌تواند موجب شکست مأموریت‌ها و تحمیل هزینه‌های سنگین شود. در این پژوهش یک بازوی مکانیکی متحرک واژگون در نظر گرفته شده و روشی جهت بازیابی آن توسط بازوی مکانیکی و سیستم بینایی با کمینه انرژی مصرفی توسط کاراندازها ارائه گردید. جهت بهینه‌یابی از الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار MATLAB استفاده شد و صحت نتایج با شبیه‌سازی در نرم‌افزار WORKING MODEL بررسی شد.



شکل ۱۷. زوایای مفصلی برحسب نقاط مسیر.



شکل ۱۸. موقعیت افقی مجری نهایی برحسب نقاط مسیر.

دست می‌آید. با نگاه دقیق‌تر به دو منحنی ارائه شده در شکل ۱۹ می‌توان دریافت که چون پایه‌ی ربات نسبت به بازوهای آن سنگین‌تر است، اثر بیکربندی‌های مختلف برگشتاور ناچیز است. برای درک بهتر از بازیابی حالت واژگونی از بغل، شکل ۲۰ الف و ۲۰ ب نحوه‌ی حرکت بازوی مکانیکی را در تمام نقاط اولیه، میانی و نهایی برای دو پروفیل سطح مسیر نشان می‌دهد.

پانوشت

1. stereo vision
2. photogrammetry
3. active sensing
4. passive sensing
5. binocular stereo
6. disparity
7. Generation gap

منابع

1. Golombek, M. "Mars pathfinder mission and science results", In Proceedings of the 29th Lunar and Planetary Science Conference (1989).
2. Hayati, S., Volpe, R., Backes, P., Balaram, J., and Welch, W., "Microrover research for exploration of Mars", In AIAA Forum on Advanced Developments in Space Robotics (1998).
3. Odenthal, D., Buente, T., and fieldman, J., "Nonlinear steering and braking control for vehicle more rollover avoidance", In Proc. European control Conference, Karlsruhe, Germany (1999).
4. Germann S., and Isermann, R., "Determination of the centre of gravity height of a vehicle with parameter estimation", In IFAC Symposium on System Identification, Copenhagen (1994).
5. Dixon, J.C., **Tires, Suspension and Handling**. SAE, Inc., Warrendale, PA 15096-0001 (1996).
6. Hac, A., "Rollover Stability Index Including Effects of Suspension Design", SAE 2002 World Congress, Detroit, Michigan (2002).
7. Sreenivasan, S., and Wilcox, B., "Stability and traction control of an actively actuated micro-robot", *Journal of Robotic Systems*, 11(6), pp. 487-502 (1994).
8. Farritor, S., Hacot, H., and Dubowsky, S., "Physics-based planning for planetary exploration", In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 278-283 (1998).
9. Iagnemma, K., Rzepniewski, A., Dubowsky, S., and Schenker, P., "Control of Robotic Vehicles with Actively Articulated Suspensions in Rough Terrain", *Autonomous Robots*, 14(1), (2003).
10. Schenker, P., Huntsberger, T., Pirjanian, Dubowsky, S., Iagnemma, K., Sujjan, V., "Rovers for Agile, Intelligent Traverse of Challenging Terrain", Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics (2003).
11. Vikramaditya, B., **Micropositioning Using Active Vision Techniques**. M.Sc. thesis, University of Illinois at Chicago, Illinois (1995).
12. Tran, D.L., **Obstacle detection for robot navigation using structured light**. M.Sc. thesis, MIT, MA (2001).
13. Harding, C.M., **Depth estimation by a moving camera**. Ph.D. thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand (2001).
14. Wu, Jiahua, **Rotation Invariant Classification of 3D Surface Texture Using Photometric Stereo**. Ph.D. thesis, Heriot-Watt university, UK (2003).
15. Jain, R., Kasturi, R., Schunck, B.G., **Machine Vision**. McGraw Hill, Inc (1995).
16. Amini, J., **Digital and Analytical Photogrammetry**. N.C.C Press, 1 (1998).
17. Iagnemma, K., and Dubowsky, S., "Mobile Robot Rough-Terrain Control (RTC) for Planetary Exploration", Proceedings of the 26th ASME Biennial Mechanisms and Robotics Conference (2000).
18. Dubowsky, S., Moore, C., and Sunada, C., "On the Design and Task Planning of Power Efficient Field Robotic Systems", Proceedings of the ANS 6th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Monterey, CA, pp. 501-508 (1995).
19. Chipperfield, A., Fleming, P., Fonseca, C., **Genetic Algorithm TOOLBOX For Use with MATLAB**. Department of Automatic Control and Systems Engineering, University of Sheffield, Version 1.2 (1994).
20. Chen, M.W., Zalzal, A.M.S., "Dynamic Modelling and Genetic-Based Trajectory Generation for Non-Holonomic Mobile Manipulators" *Control Eng. Practice*, 5(1), pp. 39-48 (1997).
21. Abo-Hammour, Z.S., Mirza, N.M., Mirza, S.M., Arif, M., "Cartesian path generation of robot manipulators using continuous genetic algorithms" *Robotics and Autonomous Systems*, 41, pp. 179-223 (2002).
22. Lavoie, M.H., Boudreau, R., "Obstacle Avoidance for Redundant Manipulators Using a Genetic Algorithm", CCToMM Symposium (2001).