

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۱۱/۲۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۲/۲۶

اجتناب از موانع روبات سیار با استفاده از الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده

سید محمد حسینی رستمی*

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات- تهران- ایران

پست الکترونیکی: seyed.mazandaran@gmail.com

حمید خالوزاده

استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران- ایران

پست الکترونیکی: h_khaloozadeh@kntu.ac.ir

محمد کمارجی

استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات- تهران- ایران

پست الکترونیکی: mkomareji@gmail.com

چکیده

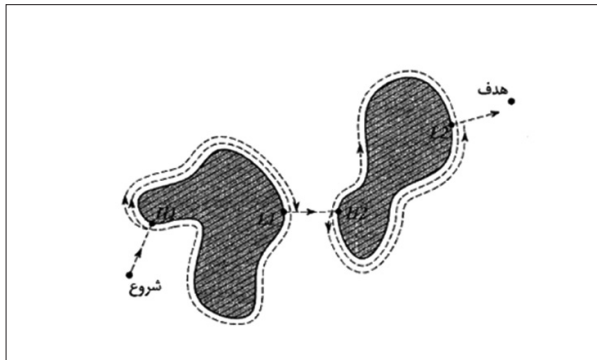
دارد. نقص عمده آن مشکل حداقل محلی^۱ و غیرقابل دسترس بودن هدف برای زمانی است که موانع در مجاورت هدف قرار دارند. بنابراین، به منظور به دست آوردن نتیجه بهتر و بهبود کاستی الگوریتم میدان پتانسیل مجازی لازم است که این الگوریتم بهبود یابد. در اینجا یک الگوریتم برنامه‌ریزی اجتناب از مانع براساس بهبود الگوریتم میدان پتانسیل مجازی برای حل این مشکل حداقل محلی ارائه شده است. در پایان با ارزیابی نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب نشان داده می‌شود که نتیجه مطلوب به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: اجتناب از مانع، هدایت و ناوبری، میدان پتانسیل مجازی، روبات سیار.

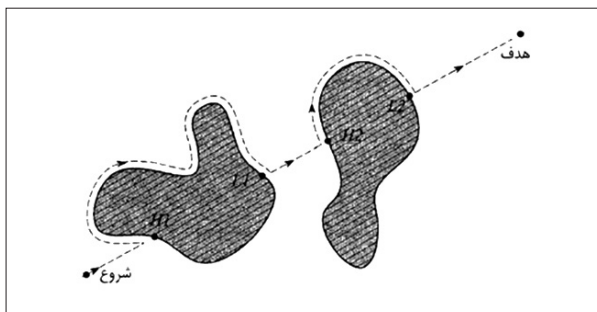
در سال‌های اخیر، مباحث مرتبط با علوم روباتیک، به یکی از زمینه‌های تحقیقاتی و در حال گسترش تبدیل شده است. در این میان روبات‌های هوشمند سیار، از مقبولیت بسیاری برخوردار شده‌اند؛ اما کنترل و ناوبری این وسایل بسیار دشوار بوده و عدم برخورد با موانع ثابت و اجتناب از آن‌ها، به جهت مسیریابی ایمن و مطمئن، از نیازهای اساسی این سیستم‌ها به شمار می‌رود. در این مقاله برای این که روبات از برخورد با موانع ثابت اجتناب و با طی یک مسیر بهینه به هدف برسد به الگوریتم میدان پتانسیل مجازی و رفع نقایص آن پرداخته شده است. الگوریتم میدان پتانسیل مجازی مزایایی دارد مانند استفاده از مدل ریاضی نمونه که به راحتی قابل درک و پیاده‌سازی است. با این حال، این الگوریتم نقایص بسیاری

1-local minimum

* نویسنده مسئول



شکل ۱: الگوریتم Bug1 با دو نقطه H1 و H2 به عنوان نقطه برخورد. L1 و L2 به عنوان نقطه خروج انتخاب شده است



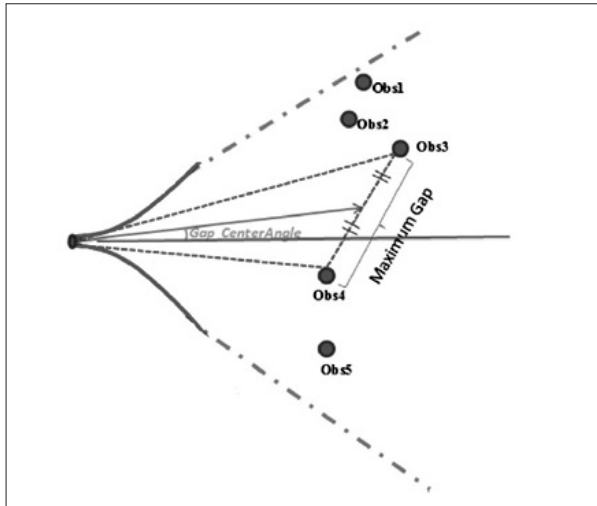
شکل ۲: الگوریتم Bug2 با دو نقطه H1 و H2 به عنوان نقطه برخورد. L1 و L2 به عنوان نقطه خروج انتخاب شده است

متحرک جلوگیری شود. بنابراین وقتی یک ربات با یک مانع مواجه می‌شود باید تصمیم بگیرد از آن اجتناب کند و در عین حال بهینه‌ترین مسیر را تا هدف انتخاب کند. پس از استخراج موانع و تعیین لزوم اجتناب از آن‌ها، با اعمال الگوریتم‌های اجتناب از موانع، ناوبری ایمن و مطمئن تضمین می‌گردد. اولین الگوریتمی که برای بحث اجتناب از مانع مطرح شد، الگوریتم اشکال است. این الگوریتم شاید ساده‌ترین الگوریتم اجتناب از مانع قابل تصور باشد. ایده اولیه این است که به پیروی از مسیر هر مانعی در زمین، روبات آن را دور بزنند. در الگوریتم اول Bug1 همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، روبات به‌طور کامل جسم اول را دور می‌زند، سپس جسم اول را ترک کرده و با کوتاه‌ترین فاصله نسبت به هدف این کار را انجام می‌دهد. این رویکرد البته بسیار ناکارآمد است اما تضمین می‌کند که روبات به هر هدف قابل دسترسی می‌رسد. در این الگوریتم خواننده‌های فعلی حسگر نقش اساسی را دارند. ضعف این الگوریتم در ماندن بیش از اندازه روبات در کنار

یک روبات سیار هوشمند باید در زمانی معین به هدف‌های تعیین شده برسد. روبات باید در هر گام، موقعیت مکانی خود نسبت به اهداف را تعیین کرده و راهبرد مناسب را برای رسیدن به اهداف، اتخاذ نماید. همچنین کسب اطلاعات در خصوص محیط نیز برای دوری از موانع و طراحی مسیر بهینه ضروری است. در این پژوهش برای حل مسئله ناوبری هوشمند روبات سیار در محیطی که موانع آن ثابت بوده و مشخصات آن‌ها در اختیار روبات قرار دارد و انتخاب مسیر بهینه، به بهبود الگوریتم میدان پتانسیل مجازی پرداخته شده است، چرا که با استفاده از این الگوریتم، روبات می‌تواند در محیط‌های ثابت، مسیر بهینه را بدون هیچ مشکلی با اجتناب از موانع تا هدف طی نماید و همچنین با استفاده از این الگوریتم برخلاف الگوریتم میدان پتانسیل مجازی، روبات در حداقل محلی دیگر گیر نمی‌افتد. به‌طور کلی اهداف این پژوهش عبارتند از: ۱- بهبود الگوریتم میدان پتانسیل مجازی به منظور ردیابی مسیر و اجتناب از موانع توسط یک روبات سیار. ۲- مقایسه عملکرد و کارایی الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم میدان پتانسیل مجازی. در این مقاله، در بخش دوم ابتدا پیشینه تحقیق بحث اجتناب از موانع ارائه و در ادامه به الگوریتم میدان پتانسیل مجازی پرداخته می‌شود. سپس در بخش سوم برای رفع نقایص الگوریتم میدان پتانسیل مجازی به اصلاح این الگوریتم پرداخته می‌شود. بخش چهارم و پنجم نیز شامل نتایج شبیه‌سازی، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری می‌باشد.

۲- مروری بر پیشینه تحقیق

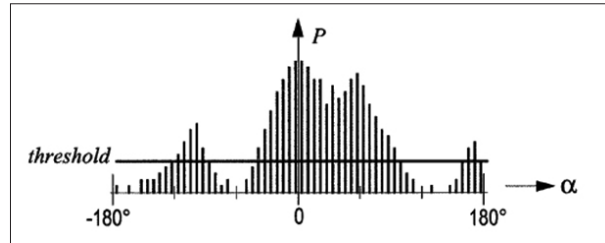
روبات هوشمند سیار یک وسیله پرکاربرد است که قادر است خود را به سمت هدف هدایت کند و در عین حال با استفاده از الگوریتم اجتناب از مانع، از موانع پیش روی خود جلوگیری کند [۱]. اجتناب از مانع، یعنی از برخورد روبات با هر مانعی اعم از اشیای ثابت یا اشیای



شکل ۴: نمایش زاویه مرکزی فضای خالی [۷]

نقشه دوبعدی به یک هیستوگرام قطبی ترجمه می‌شود. در این هیستوگرام، محور X نشان دهنده زوایای اطراف مانع و محور Y نشان دهنده احتمال وجود مانع در زاویه مورد نظر است، در این نقشه قطبی قله‌ها نشان دهنده اجسام حجیم و دره‌ها نشان دهنده اجسام کم حجم هستند. دره‌هایی که زیر حد آستانه قرار می‌گیرند، دره‌های مناسب جهت حرکت روبات هستند، در نهایت دره‌ای از بین دره‌های مناسب انتخاب می‌گردد که فاصله کمتری تا هدف داشته باشد و موقعیت این دره، زاویه حرکت و سرعت روبات را تعیین می‌کند [۴].

بهبودهای صورت گرفته بر روی VFH منجر به معرفی VFH^+ و VFH^- شد [۵]. الگوریتم بعدی بحث اجتناب از مانع، الگوریتم شبکه‌های قطعیت می‌باشد که یکی از الگوریتم‌های شناخته شده، قدرتمند و کارا در استفاده از ترکیب چند حسگری، جهت شناسایی محیط و تعیین مسیر حرکت است. در این الگوریتم فضای حرکتی روبات به سلول‌های بدون همپوشانی تجزیه شده و از فضای حرکتی گرافی تهیه شده (هر فضای آزاد به صورت گره و روابط بین آن‌ها به صورت یال تعیین می‌گردد). و بر مبنای الگوریتم‌های جستجوی گراف (نظیر جستجوی ژرفایی) مسیر حرکت تعیین می‌شود [۶]. در ادامه الگوریتم دنبال کردن فضای خالی (۲۰۱۲) مطرح شد [۷]، در این الگوریتم

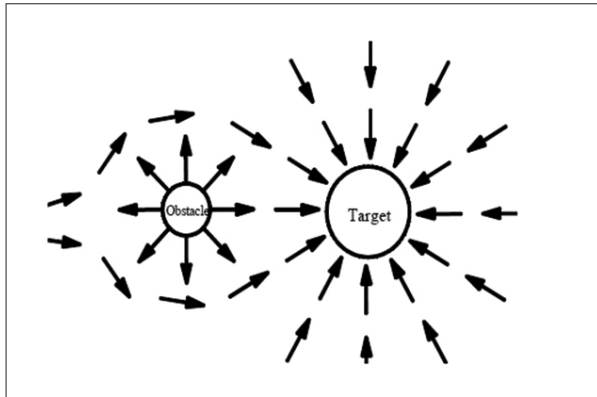


شکل ۳: هیستوگرام قطبی [۴]

موانع می‌باشد [۲].

در الگوریتم دوم Bug2 همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، روبات روی خط شروع تا هدف حرکت می‌کند و اگر مانعی دید آن را دور می‌زند تا جایی که دوباره به نقطه‌ای روی خط واصل بین شروع تا هدف برسد. آنگاه مانع را رها می‌کند. در این الگوریتم نیز روبات زمان زیادی را صرف حرکت در کنار مانع می‌کند ولی این زمان کمتر از الگوریتم قبلی است. به‌طور کلی این الگوریتم اشکال بهبود یافته به مراتب در مجموع مسیر کوتاه‌تری را برای روبات می‌سازد [۲].

در ادامه خطیب در سال ۱۹۸۵ الگوریتمی به نام میدان پتانسیل مجازی را مطرح کرد [۳] این الگوریتم روبات را به‌عنوان نقطه‌ای داخل میدان‌های پتانسیل در نظر می‌گیرد و سپس کشش به سمت هدف و دافعه از موانع را با هم ترکیب می‌کند. خط سیر نهایی خروجی به‌عنوان مسیر مدنظر می‌باشد. این الگوریتم با توجه به این‌که خط سیر با محاسبه کمی به دست می‌آید، مفید واقع می‌شود. نقص آن این است که در این الگوریتم روبات می‌تواند در حداقل‌های محلی میدان‌های پتانسیل به دام بیفتد و موفق به پیدا کردن مسیر نشود که برای برطرف کردن آن اصلاحاتی بر روی آن در این مقاله صورت گرفته است. در بخش سوم به تفصیل به این الگوریتم که میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده نامیده می‌شود خواهیم پرداخت. در ادامه، جان بورن استین و یورام کورن در سال ۱۹۹۱ الگوریتم هیستوگرام میدان برداری را ارائه کردند [۴] در این الگوریتم، ابتدا به کمک یکی از حسگرهای فاصله، یک نقشه دوبعدی از محیط اطراف روبات تهیه می‌شود. در مرحله بعدی این



شکل ۵: مدل میدان پتانسیل مجازی [۳]

می‌توان در پتانسیل مجازی به صورت زیر انجام داد:

$$U_{art}(x) = U_{att}(x) + U_{rep}(x) \quad (1)$$

که در آن، U_{att} ، U_{rep} و U_{art} به ترتیب نشان دهنده انرژی پتانسیل جاذبه، انرژی پتانسیل دافعه و میدان پتانسیل مجازی هستند. سپس تابع گرادیان آن را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$F_{art} = F_{att} + F_{rep} \quad (2)$$

$$F_{att} = -grad[U_{att}(X)] \quad (3)$$

$$F_{rep} = -grad[U_{rep}(X)] \quad (4)$$

که در آن‌ها F_{att} جاذبه ایجاد شده بر روی روبات برای رسیدن به موقعیت هدف X_d و F_{rep} نشان دهنده یک نیروی ایجاد شده توسط $U_{rep}(X)$ است که توسط دافعه از مانع ایجاد می‌شود. F_{att} متناسب با فاصله بین روبات و هدف است. سپس عامل افزایش جاذبه k_p نیز در نظر گرفته می‌شود و میدان پتانسیل جاذبه $U_{att}(x)$ به سادگی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$U_{att} = \frac{1}{2} k_p R_{at}^2 \quad (5)$$

علاوه بر این، $U_{rep}(X)$ تابع غیرمنفی پیوسته و مشتق‌پذیر است و نفوذ این پتانسیل باید به یک منطقه خاص در اطراف مانع بدون نیروهای آشفتگی نامطلوب محدود شود. بنابراین معادله $U_{rep}(X)$ به صورت زیر می‌باشد:

$$U_{rep}(X) = \begin{cases} 0.5m \left(\frac{1}{R_{rep}} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 & R_{rep} \leq \rho_0 \\ 0 & R_{rep} > \rho_0 \end{cases} \quad (6)$$

روبات فاصله خودش با هر مانع را محاسبه می‌کند. طبیعتاً روبات با دانستن فاصله خود با هر مانع می‌تواند فاصله موانع را از یکدیگر پیدا کند. سپس روبات بزرگ‌ترین فاصله‌ای که بین موانع هست را تشخیص می‌دهد و زاویه مرکزی فضای خالی را محاسبه می‌کند. بعد این‌که روبات زاویه مرکزی فضای خالی را محاسبه کرد آن را با زاویه هدف ترکیب می‌کند و زاویه حرکت نهایی را نشان می‌دهد. بدیهی است که این ترکیب بر اساس وزن انجام می‌شود، به این صورت که موانعی که در فاصله نزدیک‌تری از روبات قرار دارند وزن بیشتری می‌گیرند چون اجتناب از آن‌ها برای روبات در اولویت قرار دارد.

الگوریتم‌های اجتناب از موانع، تنها به موارد بالا محدود نبوده و منطق فازی و شبکه‌های نوروفازی نیز می‌توانند جهت اجتناب از موانع مورد استفاده قرار گیرند. در این میان منطق فازی جهت رفع مشکلات ناشی از جریان اقیانوس، در زیرسطحی‌ها می‌تواند مفید واقع شود [۸]. لازم به ذکر است اساس کار انواع الگوریتم‌هایی که در پیشینه تحقیق برای بحث اجتناب از موانع مطرح شد، بر این نیست که الگوریتم قبل‌تر را بهبود بخشند بلکه هر الگوریتم روش جداگانه و جدیدی را برای بحث اجتناب از موانع مطرح کرده است. در بخش زیر ابتدا به بررسی الگوریتم میدان پتانسیل مجازی و سپس در بخش سوم به اصلاح این الگوریتم پرداخته می‌شود.

۲-۱- مدل میدان پتانسیل مجازی

مدل میدان پتانسیل مجازی پیشنهاد شده توسط خطیب [۳] یک مدل میدان معمولی است (شکل ۵). در مدل میدان پتانسیل مجازی، T نشان دهنده هدف است که برای روبات تولید جاذبه و O نشان دهنده موانع است که تولید دافعه می‌کند.

در فضای دو بعدی، مشکل اجتناب از برخورد روبات مربوط به تنها مانع O در شکل ۵ است. اگر X_d موقعیت هدف را نشان دهد، کنترل روبات با توجه به مانع O را

محور X و محور Y به صورت معادلات زیر در نظر گرفته می شوند.

$$F_{rep_x}(X, X_{ob}) = F_{rep}(X, X_{ob}) \cos \beta \quad (9)$$

$$F_{rep_y}(X, X_{ob}) = F_{rep}(X, X_{ob}) \sin \beta \quad (10)$$

$$F_{att_x}(X, X_d) = F_{att}(X, X_d) \cos \alpha \quad (11)$$

$$F_{att_y}(X, X_d) = F_{att}(X, X_d) \sin \alpha \quad (12)$$

اول نیروی حاصل از دافعه و جاذبه در محور X و محور Y محاسبه شده و سپس θ زاویه بین نیروی حاصل و محور X ، محاسبه شده است. در نهایت زاویه فرمان روبات به صورت معادله زیر محاسبه می شود:

$$\theta = \arctan \frac{F_{att_y}(X, X_d) + F_{rep_y}(X, X_{ob})}{F_{att_x}(X, X_d) + F_{rep_x}(X, X_{ob})} \quad (13)$$

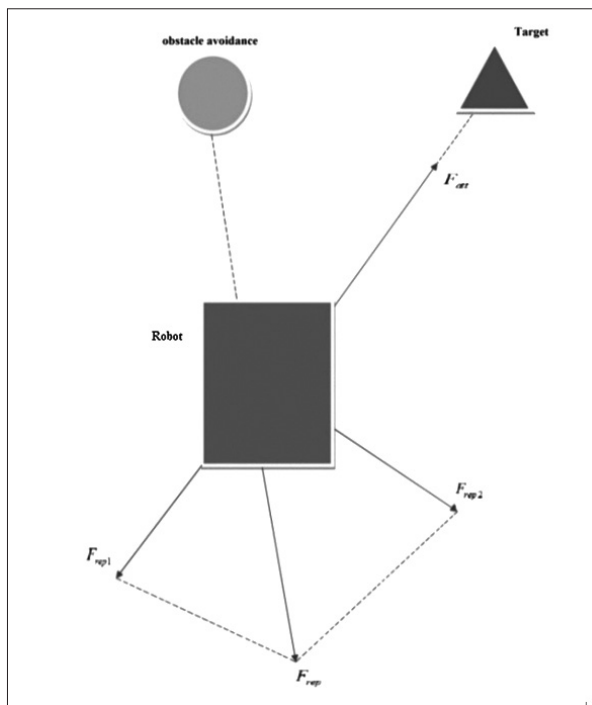
موقعیت بعدی روبات می تواند به طور مداوم با توجه به تابع زیر، تا زمانی که به شرایط همگرایی برسد محاسبه شود.

$$\begin{cases} x^* = x + l \times \cos \theta \\ y^* = y + l \times \sin \theta \end{cases} \quad (14)$$

که در آن l نشان دهنده اندازه گام، x^* و y^* نیز موقعیت مکان بعدی روبات را نشان می دهند. سپس از مدل میدان پتانسیل مجازی استفاده می شود تا روبات در صورتی که موانع به صورت ذراتی ساده باشند به نقطه هدف به صورت امن برسد. با این حال، مشکلات متعددی وجود دارد. اول، حاصل برآیند نیروی دافعه و جاذبه در برخی نقاط در روند حرکت صفر است که منجر به توقف روبات در حال حرکت و یا سرگردان شدن آن در اطراف آن نقاط می شود که حداقل محلی روبات نامیده می شود. دوم، زمانی که هدف توسط موانع احاطه شده است مسیر نمی تواند همگرا شود و روبات نمی تواند به هدف برسد. برای رفع این کاستی ها، در بخش سوم به اصلاح الگوریتم میدان پتانسیل مجازی پرداخته می شود.

۳- اصلاح الگوریتم میدان پتانسیل مجازی

پژوهشگران در سراسر جهان در مورد عیوب میدان پتانسیل مجازی تحقیق کرده و پیشنهادهایی را جهت بهبود ارائه داده اند [۹]. برای مثال، از الگوریتم شبیه سازی



شکل ۶: تجزیه و تحلیل نیروها بر روی روبات

که در آن $X = (x, y)$ موقعیت روبات، $X_{ob} = (x_{ob}, y_{ob})$ موقعیت موانع و $X_d = (x_d, y_d)$ موقعیت هدف است. کوتاه ترین فاصله بین روبات و هدف در فضای دو بعدی، m عامل افزایش دافعه، $R_{rep} = \|X_{ob} - X\| = \sqrt{(x - x_{ob})^2 + (y - y_{ob})^2}$ کوتاه ترین فاصله بین روبات و موانع در فضای دو بعدی و ρ_0 نشان دهنده فاصله امن از موانع است. با توجه به نظریه جنبشی، از رابطه $\rho_0 \geq V_{max} / 2a_{max}$ جایی که V_{max} بیانگر حداکثر سرعت روبات و a_{max} بیانگر حداکثر ظرفیت کاهش سرعت (شتاب منفی) است. بنابراین تابع جاذبه و دافعه به صورت زیر نوشته می شوند:

$$F_{att} = -\nabla \left[\frac{1}{2} k_p R_{at}^2 \right] = k_p R_{at} \quad (7)$$

$$F_{rep}(X) = \begin{cases} m \left(\frac{1}{R_{rep}} - \frac{1}{R_{rep}^2} \right) \frac{1}{R_{rep}^2} & R_{rep} \leq \rho_0 \\ 0 & R_{rep} > \rho_0 \end{cases} \quad (8)$$

فرض بر این است که β زاویه بین محور X و خط از یک نقطه موقعیت روبات به مانع می باشد. سپس هر دو اجزای دافعه در جهت محور X و محور Y را می توان از این طریق به دست آورد. با توجه به α زاویه بین محور X و خط از نقطه موقعیت روبات به هدف، اجزای جاذبه در

آنیلینگ؛ الگوریتم همراه با میدان پتانسیل مجازی برای حل مشکلات حداقل محلی و غیرقابل دسترس بودن هدف استفاده می‌شود [۱۰]. نقاط ضعف آن این است که نیاز به مقدار زیادی محاسبه دارد و زمانبر است. در اینجا یک عامل نظارتی برای بهبود الگوریتم میدان پتانسیل مجازی با هدف غلبه بر حداقل محلی و غیرقابل دسترس بودن هدف اضافه شده است. وقتی روبات نزدیک به هدف است، این عامل نظارتی برای کنترل جاذبه به‌عنوان یک تابع خطی و دافعه به‌عنوان یک تابع مرتبه بالاتر کاهش می‌یابد ($N \geq 2$).

۳-۱- مدل میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده

در فضای دو بعدی، عملکرد اصلاح شده تابع میدان جاذبه به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$U_{att} = \frac{1}{2} k_p R_{at}^2 \quad (15)$$

تابع اصلاح شده میدان جاذبه به‌صورت زیر نوشته

$$U_{rep}(X) = \begin{cases} 0.5m \left(\frac{1}{R_{rep}} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 R_{at}^N & R_{rep} \leq \rho_0 \\ 0 & R_{rep} > \rho_0 \end{cases} \quad (16)$$

که در آن $X = (x, y)$ موقعیت روبات، $X_{ob} = (x_{ob}, y_{ob})$

موقعیت موانع و $X_d = (x_d, y_d)$ موقعیت هدف است. R_{at} نیز کوتاه‌ترین فاصله بین روبات و هدف در فضای دو بعدی و R_{at}^N عامل نظارتی است. تابع جاذبه، گرادیان منفی از میدان جاذبه است که به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$F_{att} = -\nabla \left[\frac{1}{2} k_p R_{at}^2 \right] = k_p R_{at} \quad (17)$$

در روشی مشابه تابع دافعه؛ گرادیان منفی از میدان

دافعه است که به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$F_{rep} = \begin{cases} mF_{rep1}(X) + \frac{N}{2} mF_{rep2}(X) & R_{rep} \leq \rho_0 \\ 0 & R_{rep} > \rho_0 \end{cases} \quad (18)$$

در مدل اصلاح شده، F_{rep} به F_{rep1} و F_{rep2} تجزیه می‌شود

که در آن F_{rep1} نیروی مولفه در جهت خط بین روبات و مانع و F_{rep2} نیروی مولفه در جهت خط بین روبات و هدف است

$$\begin{cases} F_{rep1} = \left(\frac{1}{R_{rep}} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{R_{at}^N}{R_{at}^2} \\ F_{rep2} = \left(\frac{1}{R_{rep}} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 R_{at}^{N-1} \end{cases} \quad (19)$$

دو جزء دافعه و جاذبه را در جهت محور X و محور Y می‌توان به‌صورت زیر به‌دست آورد.

$$\begin{bmatrix} F_{repx}(X, X_{ob}) \\ F_{repy}(X, X_{ob}) \\ F_{atx}(X, X_d) \\ F_{atp}(X, X_d) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{rep}(X, X_{ob}) \cos \beta \\ F_{rep}(X, X_{ob}) \sin \beta \\ F_{at}(X, X_d) \cos \alpha \\ F_{at}(X, X_d) \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (20)$$

نیروی حاصل از دافعه و جاذبه روی محور X و محور Y محاسبه می‌شود و زاویه θ ، بین نیروی حاصل و محور X محاسبه شده، که θ زاویه فرمان روبات است. موقعیت مکان بعدی روبات تا همگرایی مسیر محاسبه می‌شود.

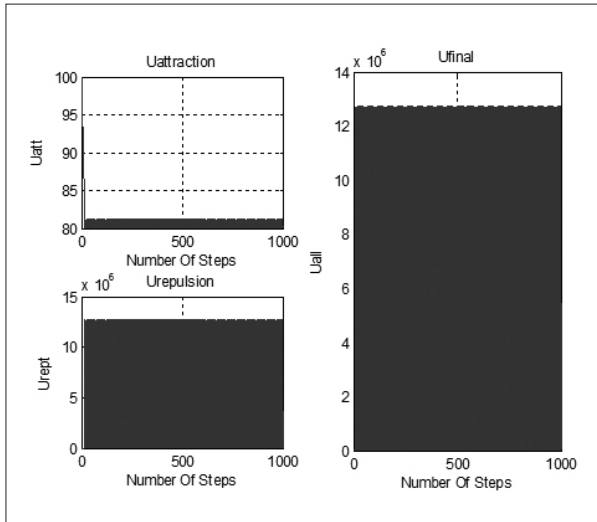
$$\theta = \arctan \frac{F_{atp}(X, X_d) + F_{repy}(X, X_{ob})}{F_{atx}(X, X_d) + F_{repx}(X, X_{ob})} \quad (21)$$

$$\begin{cases} x^* = x + l \times \cos \theta \\ y^* = y + l \times \sin \theta \end{cases} \quad (22)$$

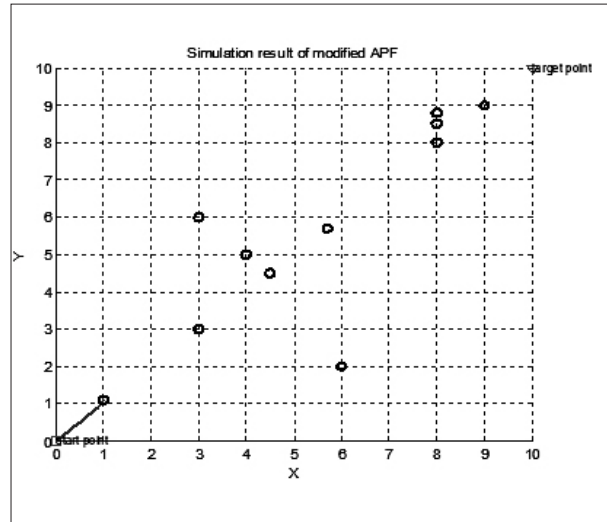
که در آن l نشان دهنده اندازه گام، x^* و y^* نشان دهنده موقعیت مکان بعدی روبات است. عامل نظارتی R_{at}^N در مدل اصلاح شده این مقاله اضافه می‌شود. عملکرد این عامل نظارتی به این صورت است که اگر روبات نمی‌تواند به هدف برسد و $0 < N < 1$ باشد، F_{rep1} وقتی که روبات نزدیک به هدف می‌شود تمایل به بینهایت دارد و مسیر همگرایی تنها با F_{rep2} و F_{att} ایجاد می‌شود. اگر $N = 1$ باشد، F_{rep2} تمایل دارد ثابت باشد و F_{rep1} به صفر تمایل خواهد داشت و مسیر همگرایی نیز تنها با F_{att} و F_{rep2} ایجاد می‌شود. اگر $N = 0$ باشد، F_{rep1} و F_{rep2} همه به صفر تمایل خواهند داشت و راه همگرایی نیز تنها با جاذبه ایجاد می‌شود. بالاتر از همه، اگر N عدد حقیقی مثبت باشد، روبات با موارد حداقل محلی و یا غیرقابل دسترس بودن هدف روبرو نمی‌شود.

۴- نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی آن

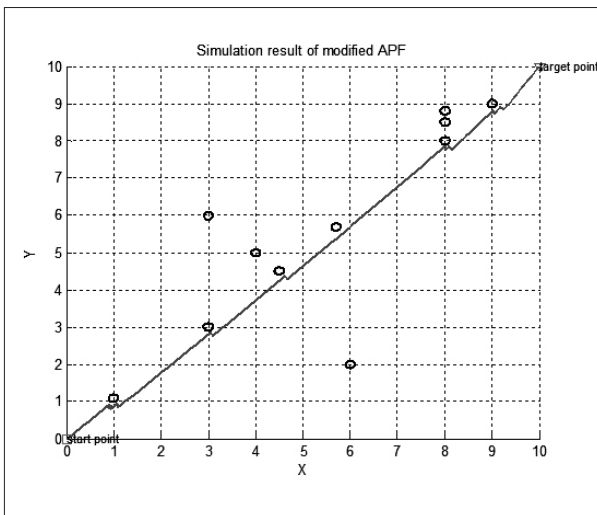
در این بخش ابتدا مقایسه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی الگوریتم میدان پتانسیل مجازی و میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده صورت می‌گیرد، سپس اجتناب از موانع روبات سیار در مقابل انواع موانع مختلف که با استفاده از الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده شبیه‌سازی شده، نمایش داده می‌شود.



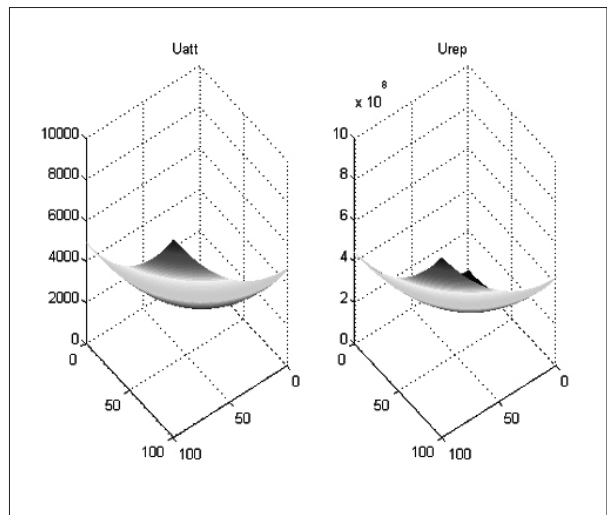
شکل ۸: مقدار انرژی دافعه و جاذبه و برآیند آن‌ها با توجه به تعداد مراحل در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی، برای موانع دایره‌ای شکل با شعاع $R = 0.1$



شکل ۷: نتیجه شبیه‌سازی الگوریتم میدان پتانسیل مجازی برای موانع دایره‌ای شکل با شعاع $R = 0.1$



شکل ۱۰: نتیجه شبیه‌سازی الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده برای موانع دایره‌ای شکل با شعاع $R = 0.1$

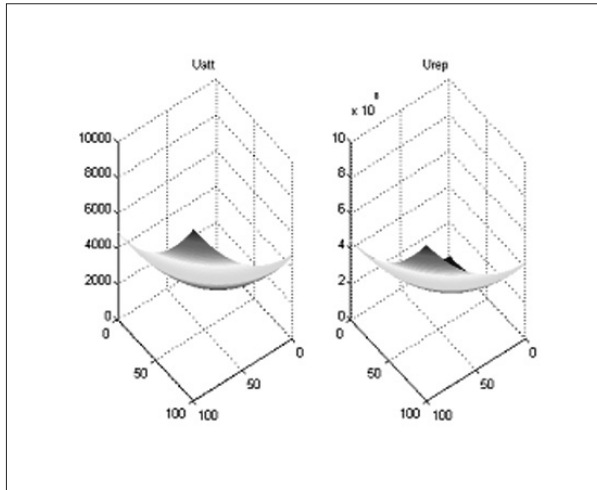


شکل ۹: طرح شبکه‌ای از انرژی پتانسیل جاذبه و دافعه در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی، برای موانع دایره‌ای شکل با شعاع $R = 0.1$

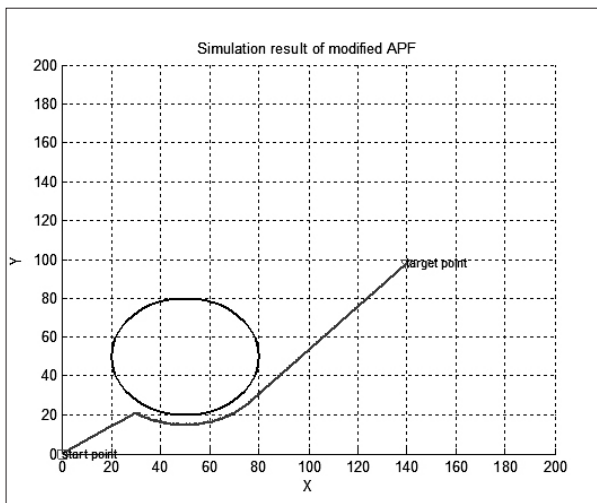
نیز تغییر داده شوند به دلیل این‌که روبات در حداقل محلی وارد شده، تغییری در وضعیتش ایجاد نمی‌شود. طرح شبکه‌ای حاصل از این شبیه‌سازی در شکل ۹ نشان می‌دهد موانع مثل قله و هدف مانند حفره عمل می‌کند و روبات را به درون خود می‌کشد.

در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده که روابط آن در بخش سوم گفته شد، اگر مقدار پارامترها به صورت $m = 100$ ، $l = 0.1$ ، $\rho_0 = 0.11$ ، $k_p = 1$ ، $N = 2$ و موانع به صورت دایره با شعاع $R = 0.1$ در نظر گرفته شوند، نتیجه آن

در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی که روابط آن در بخش دوم گفته شد، اگر مقدار پارامترها به صورت $m = 100$ ، $l = 0.1$ ، $\rho_0 = 0.11$ ، $k_p = 1$ ، $N = 2$ ، با شعاع $R = 0.1$ در نظر گرفته شوند، نتیجه آن به صورت شکل ۷ می‌شود که همان‌طور که مشخص است روبات در حداقل محلی گیر افتاده و می‌ایستد. شکل ۸ نشان می‌دهد که نیروی دافعه بیشتر از نیروی جاذبه در تمام مراحل هست و این یعنی روبات در حداقل محلی گیر افتاده است. اگر این پارامترها به هر اندازه دلخواهی غیر از این مقادیر



شکل ۱۲: طرح شبکه‌ای از انرژی پتانسیل جاذبه و دافعه در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده، برای موانع دایره‌ای شکل با شعاع $R = 0.1$

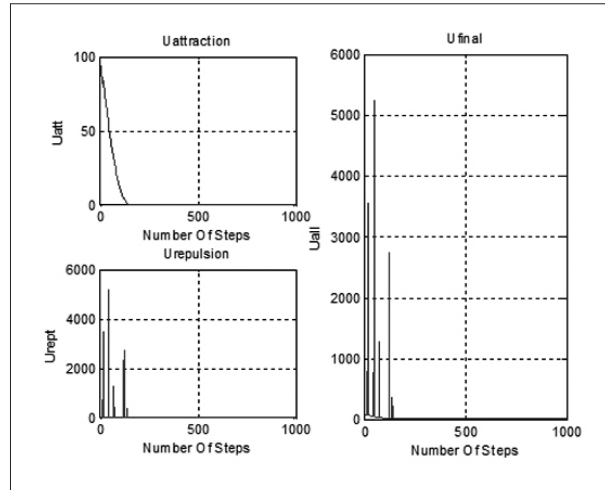


شکل ۱۳: نتیجه شبیه‌سازی الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده برای مانع دایره‌ای شکل با شعاع $R = 30$

هدف مانند حفره عمل می‌کند و روبات را به درون خود می‌کشد.

در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده اگر مقدار پارامترها به صورت $l = 0.5$ ، $\rho_0 = 2$ ، $k_p = 1$ ، $N = 2$ ، $m = 100$ و موانع به صورت دایره با شعاع $R = 6$ در نظر گرفته شوند، نتیجه آن به صورت شکل ۱۶ می‌شود. شکل ۱۶ نشان می‌دهد که روبات با اجتناب از موانع به هدف می‌رسد.

شکل ۱۷ نشان می‌دهد که با تعداد مراحل نزدیک به ۷۰۰ دور، نیروی جاذبه صفر شده یعنی با این تعداد

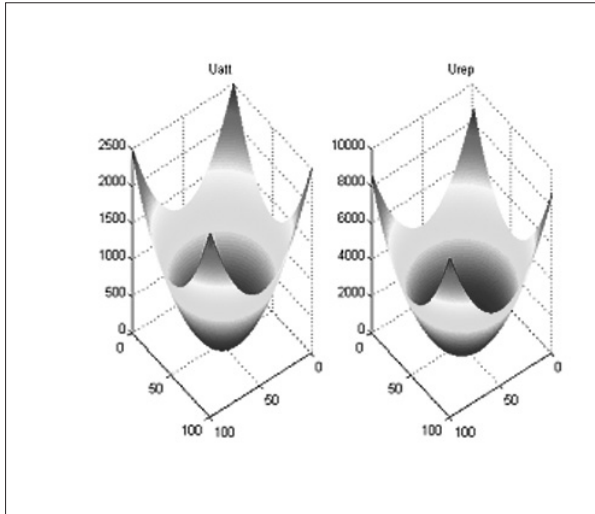


شکل ۱۱: مقدار انرژی دافعه و جاذبه و برآیند آن‌ها با توجه به تعداد مراحل در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده، برای موانع دایره‌ای شکل با شعاع $R = 0.1$

به صورت شکل ۱۰ می‌شود. با مقایسه شکل ۷ و ۱۰ مشخص می‌شود که در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی مرسوم روبات نمی‌تواند به هدف برسد و در حداقل محلی گیر می‌افتد، ولی با همان شرایط در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده روبات با اجتناب از موانع به هدف می‌رسد.

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با تعداد مراحل نزدیک به ۲۰۰ دور، نیروی جاذبه صفر شده یعنی با این تعداد مراحل روبات به هدف می‌رسد. طرح شبکه‌ای حاصل از این شبیه‌سازی در شکل ۱۲ نشان می‌دهد موانع مثل قله و هدف مانند حفره عمل می‌کند و روبات را به درون خود می‌کشد.

در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده اگر مقدار پارامترها به صورت $l = 0.5$ ، $\rho_0 = 5$ ، $k_p = 1$ ، $N = 2$ ، $m = 100$ و موانع به صورت دایره با شعاع $R = 30$ در نظر گرفته شوند، نتیجه آن به صورت شکل ۱۳ می‌شود. شکل ۱۳ نشان می‌دهد روبات با اجتناب از موانع به هدف می‌رسد. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که با تعداد مراحل نزدیک به ۴۰۰ دور، نیروی جاذبه صفر شده یعنی با این تعداد مراحل روبات به هدف می‌رسد. طرح شبکه‌ای حاصل از این شبیه‌سازی در شکل ۱۵ نشان می‌دهد موانع مثل قله و



شکل ۱۵: طرح شبکه‌ای از انرژی پتانسیل جاذبه و دافعه در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی، برای مانع دایره‌ای شکل با شعاع $R = 30$

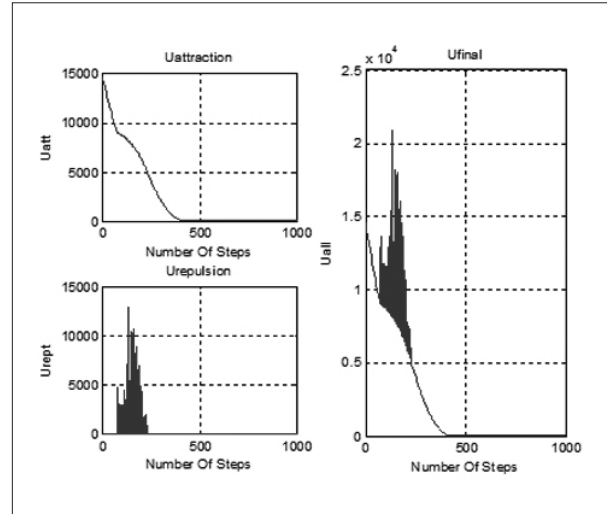
دور زدن آن به هدف می‌رسد.

شکل ۲۰ نشان می‌دهد که با تعداد مراحل نزدیک به ۱۰۰۰ دور، نیروی جاذبه صفر شده یعنی با این تعداد مراحل روبات به هدف می‌رسد. طرح شبکه‌ای حاصل از این شبیه‌سازی در شکل ۲۱ نشان می‌دهد موانع مثل قله و هدف مانند حفره عمل می‌کند و روبات را به درون خود می‌کشد.

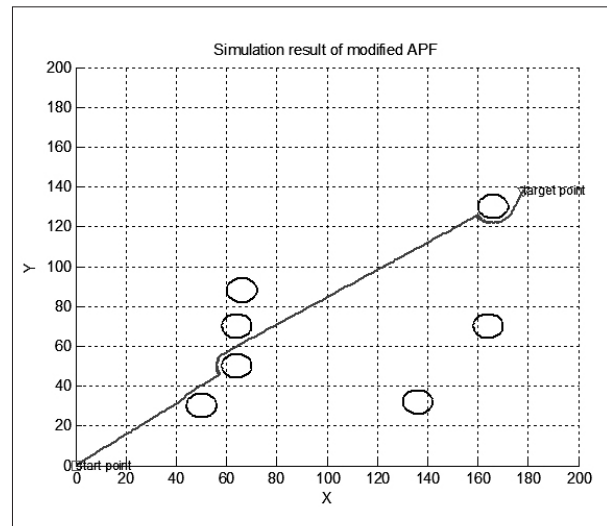
در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده اگر مقدار پارامترها به صورت $k_p = 1$ ، $N = 2$ ، $m = 100$ ، $\rho_0 = 0.3$ ، $l = 0.1$ و مانع به صورت $x = 3; 2 \leq y \leq 5$ قرار داده شوند، نتیجه آن به صورت شکل ۲۲ می‌شود. شکل ۲۲ نشان می‌دهد که روبات با اجتناب از برخورد به این مانع و دور زدن آن به هدف می‌رسد.

در شکل ۲۳ مشاهده می‌شود که با تعداد مراحل نزدیک به ۹۰۰ دور، نیروی جاذبه صفر شده یعنی با این تعداد مراحل روبات به هدف می‌رسد. طرح شبکه‌ای حاصل از این شبیه‌سازی در شکل ۲۴ نشان می‌دهد مانع مثل قله و هدف مانند حفره عمل می‌کند و روبات را به درون خود می‌کشد.

در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده اگر مقدار پارامترها به صورت $k_p = 1$ ، $N = 2$ ، $m = 100$



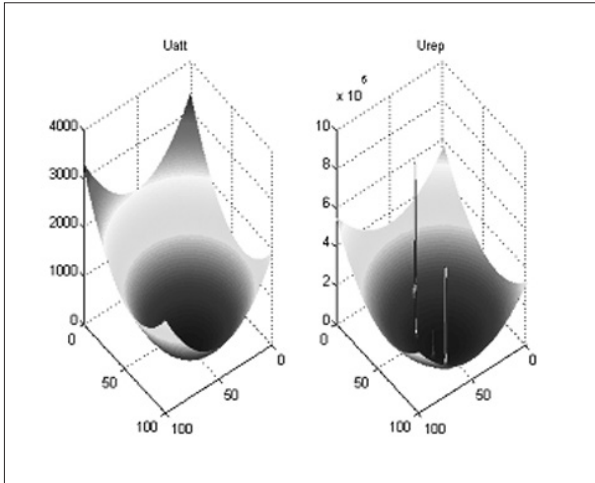
شکل ۱۴: مقدار انرژی دافعه و جاذبه و برآیند آن‌ها با توجه به تعداد مراحل در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی، برای مانع دایره‌ای شکل با شعاع $R = 30$



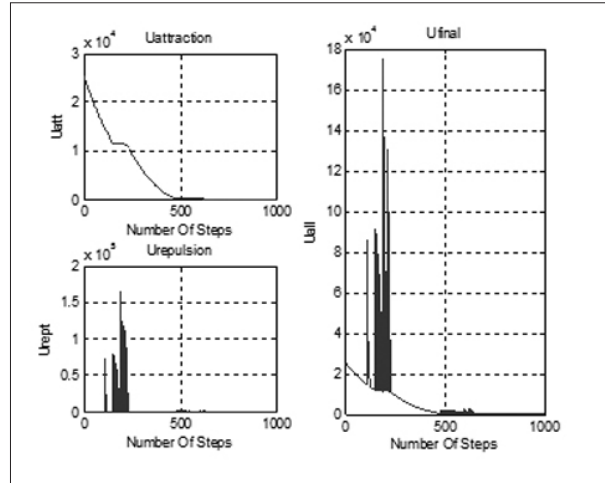
شکل ۱۶: نتیجه شبیه‌سازی موانع دایره شکل با شعاع $R = 6$ در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده

مراحل روبات به هدف می‌رسد. طرح شبکه‌ای حاصل از این شبیه‌سازی در شکل ۱۸ نشان می‌دهد موانع مثل قله و هدف مانند حفره عمل می‌کند و روبات را به درون خود می‌کشد.

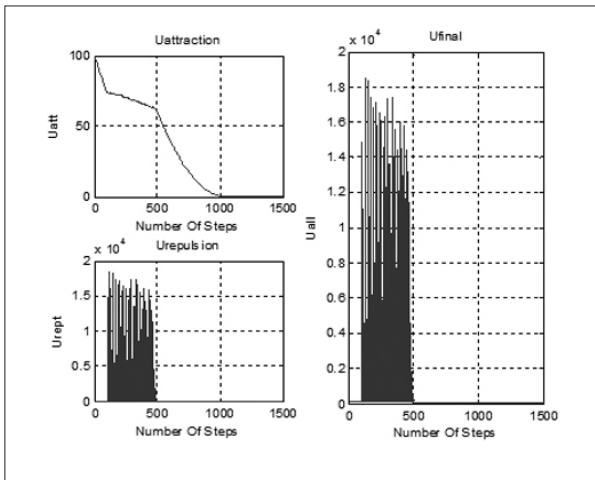
در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده اگر مقدار پارامترها به صورت $k_p = 1$ ، $N = 2$ ، $m = 100$ ، $\rho_0 = 0.3$ ، $l = 0.1$ و مانع به صورت $y = \frac{1}{x} + 1; x \in (\frac{1}{5}, 3)$ قرار داده شوند، نتیجه آن به صورت شکل ۱۹ می‌شود. شکل ۱۹ نشان می‌دهد که روبات با اجتناب از برخورد به این مانع و



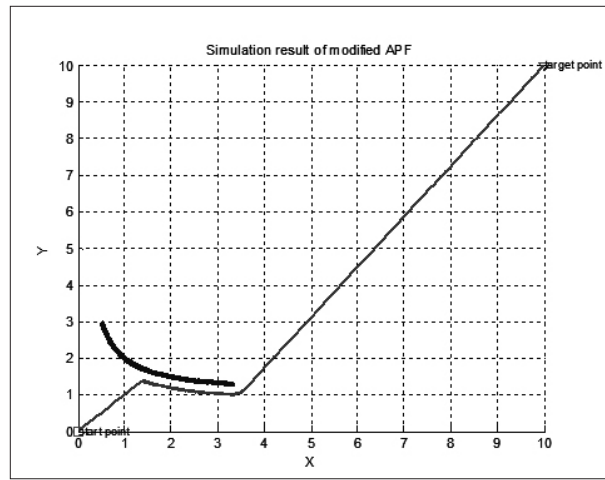
شکل ۱۸: طرح شبکه‌ای از انرژی پتانسیل جاذبه و دافعه در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده، برای موانع با شعاع $R = 6$



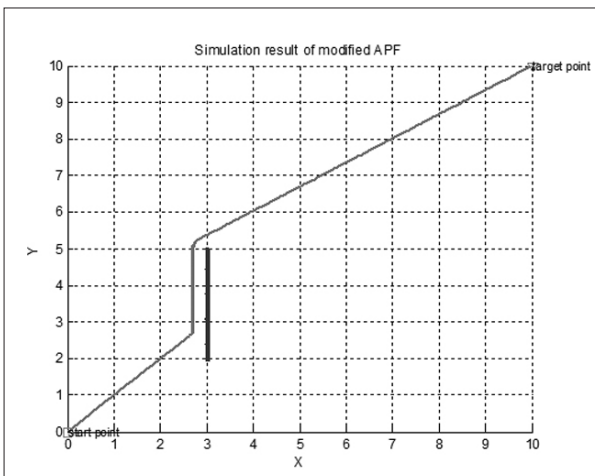
شکل ۱۷: مقدار انرژی دافعه و جاذبه و برآیند آن‌ها با توجه به تعداد مراحل در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده، برای موانع با شعاع $R = 6$



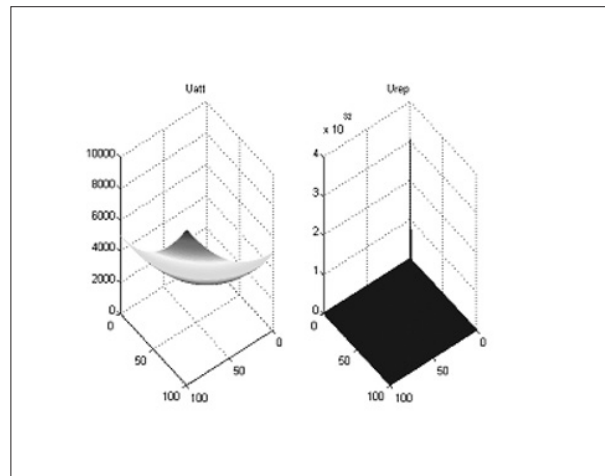
شکل ۲۰: مقدار انرژی دافعه و جاذبه و برآیند آن‌ها با توجه به تعداد مراحل در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده، برای مانع منحنی شکل



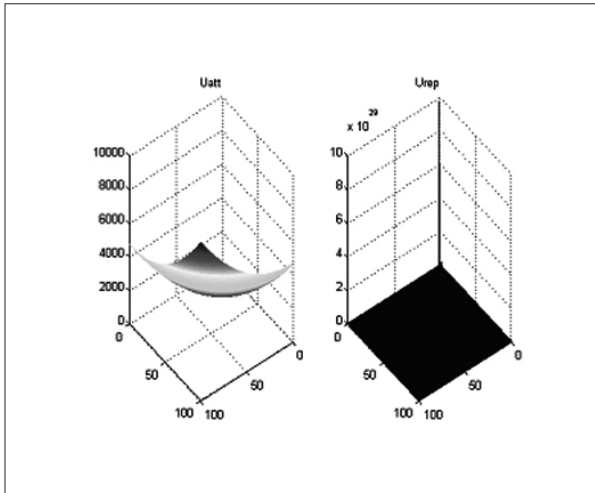
شکل ۱۹: نتیجه شبیه‌سازی مانع منحنی شکل در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده



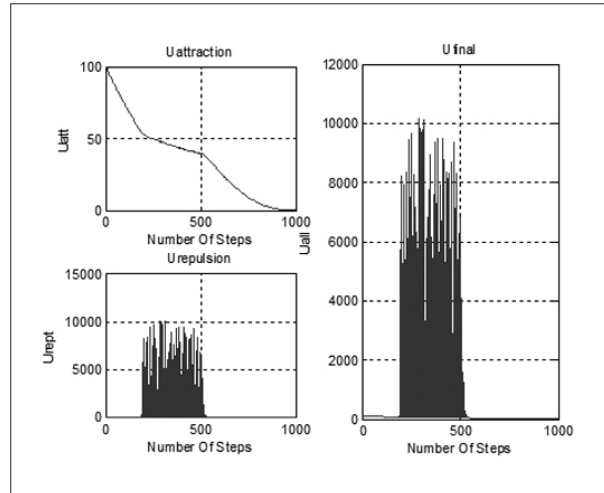
شکل ۲۲: نتیجه شبیه‌سازی مانع خط راست در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده



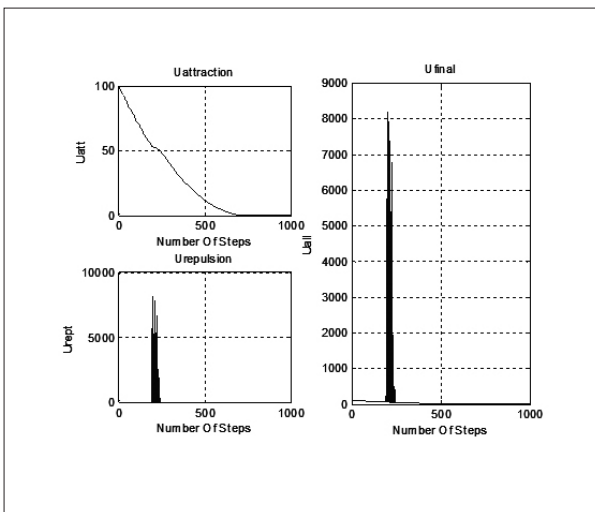
شکل ۲۱: طرح شبکه‌ای از انرژی پتانسیل جاذبه و دافعه در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده، برای مانع منحنی شکل



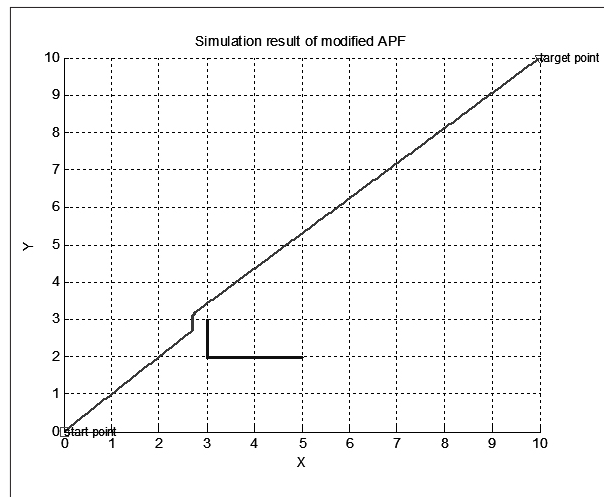
شکل ۲۴: طرح شبکه‌ای از انرژی پتانسیل جاذبه و دافعه در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده، برای مانع خط راست



شکل ۲۳: مقدار انرژی دافعه و جاذبه و برآیند آن‌ها با توجه به تعداد مراحل در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده، برای مانع خط راست



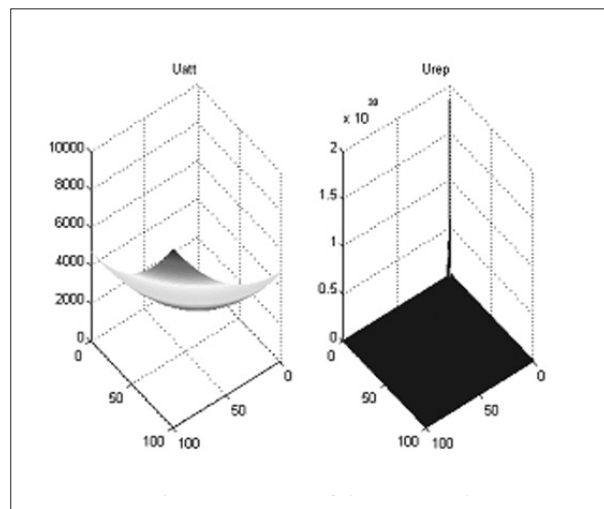
شکل ۲۶: مقدار انرژی دافعه و جاذبه و برآیند آن‌ها با توجه به تعداد مراحل در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده، برای مانع خط شکسته



شکل ۲۵: نتیجه شبیه‌سازی مانع خط شکسته در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده

، $\rho_0 = 0.3$ ، $l = 0.1$ و مانع به صورت $3 \leq x \leq 5, y = 2$ ؛
 $3 \leq y \leq 3, x = 3$ قرار داده شوند، نتیجه آن به صورت
 شکل ۲۵ می‌شود. شکل ۲۵ نشان می‌دهد که روبات با
 اجتناب از برخورد به این مانع و دور زدن آن به هدف
 می‌رسد.

شکل ۲۶ نشان می‌دهد که با تعداد مراحل نزدیک به
 ۷۰۰ دور، نیروی جاذبه صفر شده یعنی با این تعداد
 مراحل روبات به هدف می‌رسد. طرح شبکه‌ای حاصل از این
 شبیه‌سازی در شکل ۲۷ نشان می‌دهد مانع مثل قله و هدف
 مانند حفره عمل می‌کند و روبات را به درون خود می‌کشد.



شکل ۲۷: طرح شبکه‌ای از انرژی پتانسیل جاذبه و دافعه در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده، برای مانع خط شکسته

نتیجه‌گیری

plying the self-tuning fuzzy control with the image detection technique on the obstacle-avoidance for autonomous underwater vehicles”, Ocean Engineering, pp:11–24, 2015.

9- T. T. Mac, C. Copot, A. Hernandez and R. D. Keyser, “Improved Potential Field Method for Unknown Obstacle Avoidance Using UAV in Indoor Environment”, IEEE 14th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, pp:345–350, 2016.

10- Q. Zhu, Y. Yan and Z. Xing, “Robot Path Planning Based on Artificial Potential Field Approach with Simulated Annealing”, IEEE Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, China, pp:1–6, 2006.

در این مقاله بهبود الگوریتم میدان پتانسیل مجازی مورد ارزیابی قرار گرفته است که اجازه می‌دهد روبات برای پیدا کردن یک مسیر امن و حرکت بدون برخورد با مانع و بدون گیر افتادن در حداقل محلی، زمانی که موانع در اطراف هدف وجود دارد از نقطه شروع به هدف برسد. میدان پتانسیل مجازی یک الگوریتم نسبتاً بالغ است که به‌طور گسترده‌ای با محاسبات ریاضی مختصر و صریح از آن استفاده می‌شود. با این حال، به دلیل وجود مشکل حداقل محلی در این الگوریتم، روبات نمی‌تواند به هدف مورد نظر برسد. بنابراین با هدف حل این مشکل، در این مقاله یک روش جدید با هدف اصلاح این الگوریتم مطرح شده است. روش ارائه شده در محیط متلب شبیه‌سازی شده است. نتایج ارزیابی شکل‌های شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد در الگوریتم میدان پتانسیل مجازی اصلاح شده روبات می‌تواند از موانع در اطراف هدف عبور کرده و به هدف برسد.

مراجع

- 1- I. R. Nourhakhsh and R. Siegwart. “Introduction to autonomous mobile robots”, the MIT press, Cambridge, Massachusetts, pp: 1–321, 2004.
- 2- A. Yufka and O. Parlaktuna, “Performance comparison of bug algorithms for mobile robots”, In Proceedings of the 5th international advanced technologies symposium”, International Advanced Technologies Symposium, pp: 1–5, 2009.
- 3- O. Khatib, “Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots”, The International Journal of Robotics Research, pp: 90-98, 1986.
- 4- J. Borenstein and Y. Koren, “The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots”, IEEE Transactions On Robotics And Automation, pp: 278–288, 1991.
- 5- Kushnerik, A., A., Vorontsov, A., V., Scherbatyuk., A., Ph., “small AUV docking algorithm near dock unit based on visual data”, 0-933957-38-1/09, 2009.
- 6- Moravec, H., P., “Sensors fusion in certainty grids for mobile robots”, AI Magazine, Vol. 2, 1988.
- 7- V. Sezer and M. Gokasan, “A novel obstacle avoidance algorithm: “Follow the Gap Method””, Robotics and Autonomous Systems, pp: 1123–1134, 2012.
- 8- M. C. Fang, S. M. Wang, M. C. Wua and Y. H. Lin, “Ap-