

یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تطبیقی مبتنی بر مساله برای تولید مسیر زاویه‌ای راه‌رفتن روبات دوپا

معین اوحدی کارشک^۱ و محمدرضا اکبرزاده توتونچی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، قطب علمی رایانش نرم و پردازش هوشمند اطلاعات، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

owhadi@stu.um.ac.ir

^۲ استاد، قطب علمی رایانش نرم و پردازش هوشمند اطلاعات، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

akbazar@um.ac.ir

چکیده - راه‌رفتن روبات دوپا به دلیل کوچک بودن ناحیه پشتیبان و نیز درگیر بودن تعداد زیاد مفاصل بسیار پیچیده است. در گذشته، یافتن مسیر زاویه‌ای مفاصل روبات توسط سری شکسته فوری، به عنوان یک روش مستقل از مدل، عملکرد مناسبی داشته‌است. در این مقاله، برای تقریب بهتر حرکت تناوبی راه‌رفتن، استفاده از سری کامل فوری پیشنهاد شده‌است. همچنین یک روش بهینه‌سازی تطبیقی جدید مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای یافتن مقادیر ضرائب سری فوری کامل ارائه می‌شود. در روش پیشنهادی، استراتژی به‌روزرسانی سرعت ذرات با توجه به وضعیت جمعیت تغییر می‌کند و در ضمن، اطلاعات خاص مساله‌ی راه‌رفتن نیز در طراحی الگوریتم بهینه‌سازی مدنظر گرفته شده‌است. یافتن پاسخ بهینه قابل قبول و عدم همگرایی زودرس از ویژگی‌های الگوریتم ارائه شده‌است. کلید واژه - الگوریتم بهینه‌سازی هوش ازدحامی تطبیقی، راه‌رفتن، روبات دوپا

۱- مقدمه

سیستمی برای راه رفتن روبات با سرعت و تعادلی مشابه راه رفتن انسان است. تلاش‌های انجام شده را در دو زیرگروه کلی می‌توان تقسیم نمود. راه رفتن ایستا [۱] و راه رفتن پویا [۲].

در راه رفتن ایستا، روبات به صورت استاتیک، پایدار فرض می‌شود. برای این منظور، مرکز جرم روبات همواره باید در ناحیه‌ی پشتیبان در زیر روبات قرار داشته‌باشد. محدودیت‌های این روش باعث شده است تا امروزه روش‌هایی بر پایه‌ی این نوع راه رفتن پیشرفت قابل توجهی نداشته باشند. راه رفتن پویا اما این امکان را ایجاد می‌کند تا برای لحظاتی محدود و کوتاه، مرکز جرم روبات از ناحیه‌ی پشتیبان خارج شود. این امر باعث می‌شود که راه رفتن پویا محدودیت‌های دینامیکی کمتری را نسبت به راه رفتن ایستا داشته‌باشد. هر چند که معیار خاصی برای تعیین میزان پایداری این نوع راه رفتن وجود دارد، می‌توان از نقطه‌ی گشتاور صفر^۱ به شرطی که مفصل مچ پای روبات قابلیت حرکت داشته و نیز همواره یک پای روبات بر روی زمین باشد، به عنوان معیاری برای پایداری بهره‌برد [۳]. در راه رفتن پویا دو رویکرد اصلی وجود دارد. برخی از روش‌ها با

امروزه پژوهش بر روی روبات‌های انسان‌نما از موضوعات مورد علاقه‌ی محققان است. این روبات‌ها در تحقیقات مربوط به حرکت و جابه‌جایی به عنوان روبات‌های دوپا نیز شناخته می‌شوند. مطالعه بر روی روبات‌های دوپا از این نظر اهمیت دارد که اولاً، انسان‌ها در تعامل با آن‌ها احساس راحتی بیشتری می‌نمایند و بنابراین بیشتر به آن‌ها اعتماد کرده و تعامل بهتری با آن‌ها دارند و در ثانی، ساختار محیط زندگی انسان بر اساس آناتومی بدن اوست و در نتیجه، روباتی که به شکل انسان ساخته‌شود بهترین انطباق را با محیط انسانی خواهد داشت. توسعه‌ی یک روبات دوپا از جنبه‌های مختلفی مدنظر است که یکی از مهمترین آن‌ها راه رفتن است. توانایی راه رفتن خود شامل زیرمجموعه‌هایی همچون راه رفتن به سمت جلو، عقب و طرفین و همچنین چرخیدن درجا است. اصولاً جدای از ظاهر روبات‌های انسان‌نما، راه رفتن از ویژگی‌های بارز این گونه روبات‌ها است. راه رفتن بر روی دوپا حرکتی بسیار پیچیده است که بسیاری از مفاصل روبات در آن درگیر هستند. روش‌های مختلفی برای توسعه‌ی این توانایی پیشنهاد شده است که هدف تمام آن‌ها طراحی

^۱ Zero Moment Point (ZMP)

رویگرد مبتنی بر مدل هستند و برخی نیز مستقل از مدل طراحی می‌شوند.

در روش‌هایی که رویکردی مبتنی بر مدل دارند، اول باید مدل روبات ساخته شده و کنترل‌کننده‌ها بر مبنای آن مدل خاص طراحی می‌شوند. روش‌های کنترل ZMP [۴] و پاندول معکوس شده [۵] از موثرترین تلاش‌های انجام شده هستند که رویکردی بر مبنای مدل دارند. ZMP نقطه‌ای است که در آن برآیند نیروهای وارد بر روبات صفر است و عمل راه رفتن با کنترل این نقطه و اطمینان از قرار گرفتن آن در ناحیه‌ی پشتیبان صورت می‌گیرد. در روش پاندول معکوس شده، روبات دوپا به صورت یک جفت پاندول معکوس شده فرض و سپس کنترل می‌شود. اما در مقابل روش‌هایی که رویکردی بر مبنای مدل دارند، روش‌های دیگری نیز وجود دارند که کنترل روبات را مستقل از مدل آن انجام می‌دهند. در این روش‌ها، کنترل‌کننده بر اساس اطلاعات ورودی از سنسورها کنترل روبات را انجام می‌دهد و در نتیجه برای طراحی کنترل‌کننده نیازی به در نظر گرفتن یک مدل خاص از روبات نیست. پیاده سازی سایر توانایی‌های روبات در این روش‌ها آسان هستند. از تلاش‌هایی که بر اساس رویکرد مستقل از مدل هستند می‌توان به راه رفتن دینامیک غیرفعال^۱ [۶]، تولیدکننده‌ی الگوی مرکزی [۷]، روش پرتابه‌ای [۸] و سری فوریه‌ی ناقص [۹] اشاره کرد. در PDW روبات بدون عملکرد فرض شده و مدل به گونه‌ای ساخته می‌شود تا با استفاده از جاذبه‌ی زمین حرکت نماید. محدودیت این روش آن است که تنها در سراسیمه‌ی قابل استفاده است. اما از طرف دیگر ترکیب این روش با سایر روش‌های پیشنهادی می‌تواند باعث کاهش مصرف انرژی شود. به گونه‌ای که اگر سطح زیرین روبات از شیب کافی برخوردار باشد از این روش و در شرایط محیطی دیگر از سایر روش‌های موجود استفاده می‌شود. CPG شبکه‌های عصبی مصنوعی هستند که از آن‌ها به عنوان تولیدکننده‌ی مسیر زاویه‌ای تناوبی استفاده می‌شود و مدل‌های ریاضی چون موارد ارائه شده در [۱۰] و [۱۱] در آن‌ها به کار می‌رود. در روش Ballistic نیز از مدلی ساده شده از راه رفتن بهره گرفته شده است که در آن پای در حال حرکت، تنها در شروع و پایان طی کردن یک قدم، فعال و قابل کنترل در نظر گرفته می‌شود.

روش TFS روشی برای تولید مسیر زاویه‌ای است که عموماً از ZMP به عنوان معیار تعادل و پایداری بهره می‌برد. سادگی پیاده سازی و تعیین طول و فرکانس گام برداشتن بوسیله‌ی تنها یک پارامتر از مزایای این روش است. در این روش دو سیگنال برای بخش بالا و پایین سیگنال اصلی راه رفتن به طور مجزا مدل می‌شود و این باعث بروز اشکالاتی در این روش شده است. از جمله این که پیاده سازی سایر توانایی‌های مبتنی بر راه رفتن همچون چرخیدن و

راه رفتن جهت دار در آن با مشکلاتی همراه است و همچنین تغییر وضعیت از وضعیت بخش بالا به پایین و بالعکس باعث ناپایداری و مصنوعی شدن حرکت می‌شود. دلیل استفاده از TFS و در نظر گرفتن دو بخش مجزا برای تولید سیگنال اصلی آن است که مدل کردن روبات با سری فوریه‌ی کامل نیازمند یافتن پارامترهای بیشتری است. جستجو در فضایی با ابعاد بالا نیز نیازمند استفاده از الگوریتم‌های جستجوی فرااکتشافی قدرتمند است.

در این مقاله، برای رفع مشکلات TFS از سری کامل فوریه استفاده شده، همچنین برای جستجو در فضای بزرگ‌تر یک الگوریتم بهینه سازی تطبیقی جدید ارائه شده است. اگرچه در این جا مسیر زاویه‌ای تنها برای ایجاد توانایی راه رفتن به سمت جلو انجام شده است، امکان پیاده سازی توانایی‌های متفاوت تنها با استفاده از تعریف یک تابع تناسب جدید میسر است. در تعریف تابع تناسب می‌توان به جز جهت حرکت، پارامترهایی چون مصرف انرژی، پایداری و مقاومت را نیز دخیل کرد. الگوریتم ازدحام ذرات در سال ۱۹۹۵ ارائه شد [۱۲]. این الگوریتم بر اساس حرکت ذرات در فضای جستجو عمل می‌کند. در این کار پژوهشی به روزرسانی سرعت هر ذره به شکل تطبیقی و با استفاده از اطلاعات مساله انجام شده است. در مساله‌ی راه رفتن، هر دسته از ضرائب فوریه که با استفاده از آن روبات بتواند به تعداد محدودی گام را بپیماید، یک جواب قابل قبول در نظر گرفته می‌شود. دلیل این موضوع آن است که در هر چند قدم نحوه‌ی تولید مسیر زاویه‌ای توسط برنامه ریز، که یک کنترل کننده‌ی سطح بالا است، اصلاح می‌گردد. در نتیجه، در الگوریتم بهینه سازی تطبیقی پیشنهادی، تمام پاسخ‌هایی که روبات با استفاده از آن‌ها در چند گام اولیه به زمین نمی‌افتد، به عنوان پاسخ بهینه سراسری فرض شده اند.

یک روش مبتنی بر بهینه سازی ازدحام ذرات برای استخراج پارامترهای حل تحلیلی در [۱۳] ارائه گشته است. دیدگاه بهینه سازی چندهدفه نیز تا کنون به شکل موفق عمل کرده است [۱۴] [۱۵] [۱۶]. تا کنون از بهینه سازی ازدحام ذرات در تنظیم پارامترهای سایر روبات‌ها نیز استفاده شده است [۱۷]. مقاله [۱۸] نیز به معرفی یک روش جدید برای راه رفتن به کمک بهینه سازی ازدحام ذرات می‌پردازد. در [۱۹] نیز یک مقایسه بین روش‌های فرااکتشافی مورد استفاده برای TFS انجام شده است.

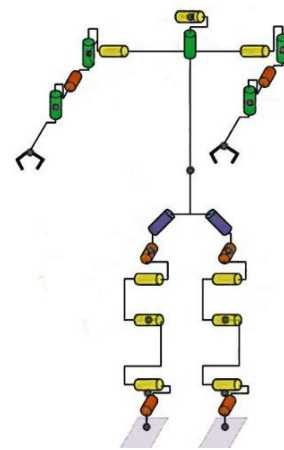
در بخش بعدی نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها و مدل روبات استفاده شده تشریح می‌شود. در بخش سه نیز نحوه‌ی تولید مسیر زاویه‌ای مورد بحث قرار می‌گیرد. الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی در بخش چهار توضیح داده شده است. نتایج این کار پژوهشی هم در بخش پنج

^۱ Passive Dynamic Walking (PDW)

آورده شده است. بخش شش نیز به نتیجه گیری و ارائه ی پیشنهادات برای کارهای آینده اختصاص یافته است.

۲- مدل روبات دوپا و شبیه سازی

از روبات شبیه سازی شده ی NAO [۲۰] به عنوان مدل روبات دوپا استفاده شده است. دلیل استفاده از این مدل، استاندارد بودن و استفاده از آن در مسابقات روباتیک بوده است که امکان مقایسه ی روش پیشنهادی با سایر روش ها را افزایش می دهد. این روبات ۴/۵ کیلوگرم وزن و ۵۷ سانتی متر قد و در مجموع ۲۲ درجه آزادی دارد. شکل ۱ آناتومی روبات NAO را نشان می دهد.



شکل ۱ - آناتومی روبات NAO

بیشتر مفاصل روبات در راه رفتن یا در حفظ تعادل و کنترل روبات کاربرد دارند. اما برای جلوگیری از پیچیدگی کار و همچنین کاهش مصرف انرژی، برای راه رفتن مستقیم تنها مفاصل لگن، زانو و مچ که بیشترین تاثیر را داشتند، فعال و قابل حرکت در نظر گرفته شدند. برای کنترل هر مفصل هم از یک کنترل کننده ی PD^۱ استفاده شده است. در بخش بعد، نحوه ی ایجاد مسیر زاویه ای برای مفاصل درگیر روبات توضیح داده خواهد شد.

۳- تولید مسیر زاویه ای

راه رفتن حرکتی بسیار پیچیده است و از جهات گوناگونی می توان به مطالعه ی آن پرداخت. تولید مسیر زاویه ای و کنترل برای رسیدن به هدف، از رویکردهای موجود برای تحلیل توانایی راه رفتن هستند. تولید مسیر را به طور عمده می توان به دو دسته ی تولید مسیر زاویه ای و مکانی تقسیم کرد. در تولید مسیر مکانی، هدف کنترل روبات از طریق مشخص کردن موقعیت مکانی عملگر نهایی روبات یعنی کف پاها در هر لحظه از زمان است. تولید مسیر زاویه ای نیز به این معنا است که مقدار زاویه ی هر مفصل در هر لحظه از زمان

مشخص شود. در این کار پژوهشی هدف، تولید مسیر زاویه ای بهینه برای راه رفتن روبات دوپا به صورت پایدار است.

۳-۱- سری فوریه

در حالت کلی سری فوریه یک تابع ریاضی برای تولید و مدل کردن سیگنال های تناوبی به شکل معادله ۱ است. این معادله مقدار سیگنال را در لحظه ی t مشخص می کند.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t) \quad (۱)$$

در این معادله a_0 مقدار بایاس سیگنال، ω فرکانس اصلی سیگنال و a_n و b_n ضرایب مجهول هستند. از نظر تئوری هنگامی که حد بالای سری فوریه بی نهایت در نظر گرفته شود، می توان هر سیگنال تناوبی را با معادله ۱ تخمین زد. اما استفاده از بی نهایت جمله در سری فوریه و همچنین یافتن ضرایب مجهول آن از نظر عملی امکان پذیر نمی باشد و در کاربردهای عملی این سری، از تعداد محدودی جمله استفاده می شود. در این مقاله تنها از سه جمله ی اول سری فوریه برای مدل کردن حرکات مفاصل استفاده شده است.

۳-۲- تولید مسیر زاویه ای با استفاده از سری فوریه

با توجه به تناوبی بودن حرکت راه رفتن بر روی دوپا و توانایی سری فوریه در مدل کردن این گونه توابع از سری فوریه برای تولید مسیر زاویه ای هر مفصل استفاده شده است [۲۱]. استفاده از سه جمله ی نخست سری فوریه، یافتن سه ضریب مجهول برای هر مفصل و در نتیجه ۱۸ مجهول برای تمام شش مفصل مورد استفاده را ایجاد می کند. جستجو در فضای حالتی با این چنین ابعاد زیادی حتی برای الگوریتم های فرااکتشافی قدرتمند نیز کاری بسیار مشکل و زمان بر است.

با اتخاذ تدابیری می توان تعداد مجهولات را کم و فضای جستجو را کاهش داد. با تحلیلی بر مبنای [۲۲] مشخص می شود که حرکت هر دو پا کاملاً مشابه هم بوده و تنها یک پا از پای دیگر تاخیری برابر نصف دوره ی تناوب دارد. بنابراین می توان با استفاده از تنها سه سری فوریه مسیر زاویه ای را برای یکی از دوپا محاسبه نمود و همان مسیر را با تاخیر ذکر شده به پای دیگر اعمال کرد. در نتیجه تعداد مسیرهای زاویه ای که باید تولید شوند به سه عدد و به تبع آن تعداد مجهولات به نه عدد کاهش می یابد. مسیر زاویه ای با استفاده از معادله های ۲ محاسبه شده است.

$$f_{H(t)} = x_0 + x_1 \sin(\omega t) + x_2 \cos(\omega t)$$

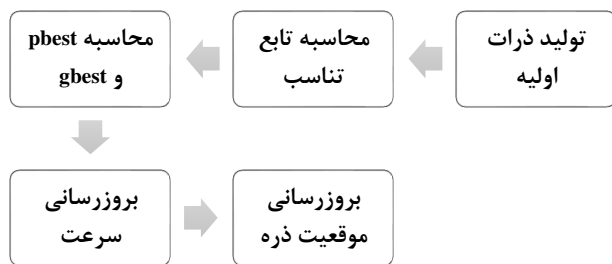
$$f_{K(t)} = x_3 + x_4 \sin(\omega t) + x_5 \cos(\omega t) \quad (۲)$$

$$f_{A(t)} = x_6 + x_7 \sin(\omega t) + x_8 \cos(\omega t)$$

^۱ Proportional – Derivative (PD) controller

$$P_{t+1}^d = P_t^d + V_{t+1}^d \quad (۴)$$

در این جا P_{t+1}^d مکان جدید ذره در بعد d ، P_t^d مکان کنونی ذره در بعد d و V_{t+1}^d سرعت جدید بعد d ذره است. در نسخه‌ی استاندارد الگوریتم، میزان کشش به بهترین موقعیت محلی و سراسری با پارامترهای C_1 و C_2 تعیین می‌شود. همچنین C_0 مشخص خواهد کرد که ذره چقدر تمایل به تغییر سرعت داشته‌باشد. در نسخه‌ی کلاسیک همچنین همسایگی ذرات به شکل ایستا و ثابت فرض شده‌است. شکل ۲ کارکرد الگوریتم پایه را نشان می‌دهد.



شکل ۲ - الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استاندارد

۴-۲- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تطبیقی

در نسخه‌ی استاندارد الگوریتم، $pbest$ دقت کاوش را افزایش می‌دهد و از طرف دیگر $gbest$ باعث می‌شود تا جستجوی گسترده‌تری در فضای حالت انجام شود. با استفاده از هریک از این دو هر ذره می‌تواند هم نقش جستجوگر در محیط و هم نقش کاوشگر متمرکز جواب را داشته‌باشد. همچنین در یک گام خاص از اجرای الگوریتم، برخی از ذرات می‌توانند نقش کاوشگر در محیط، و برخی دیگر نقش یافتن پاسخ بهینه‌تر را بر عهده گیرند. مشکل اصلی در این بین، یافتن روش بهینه برای استفاده به‌موقع از هر یک از این دو رویکرد است. در الگوریتم پیشنهادی، از چهار روش مختلف برای بروزرسانی سرعت استفاده شده‌است. هر یک از این استراتژی‌ها برای شرایطی خاص در نظر گرفته شده‌اند. این شرایط شامل وضعیت کل جمعیت و همسایگی ذره موردنظر است. شکل ۳ استراتژی‌های موردنظر را نشان می‌دهد.



شکل ۳ - بروزرسانی سرعت ذرات

$$V_{t+1}^d = C_0 * V_t^d + C_1 * R_1 * (gbest - p_t^d) \quad (۵)$$

در این جا $f_{H(t)}$ ، $f_{K(t)}$ و $f_{A(t)}$ مسیر زاویه‌ای مفصل لگن، زانو و مچ در لحظه‌ی t هستند. همچنین پارامترهای X_0 تا X_8 ضرائب مجهول و ω نیز فرکانس قدم برداشتن هستند که همان‌طور که در بخش ۴ تشریح خواهد شد، توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تطبیقی مقادیر بهینه برای آن‌ها یافته خواهد شد.

۴- روش بهینه‌سازی

هوش جمعی نوعی روش جستجوی فرااکتشافی است که مبتنی بر رفتارهای جمعی در سامانه‌های نامتمرکز و خودسامانده بنیان شده است. الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلفی نیز بر مبنای همین مفهوم ایجاد شده‌است که الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات [۱۲] مثالی از آن است. سادگی و انعطاف‌پذیری این الگوریتم باعث شده‌است که تا کنون در مسائل مختلف مهندسی و ریاضی مورد استفاده قرار گیرد. الگوریتم ارائه شده‌ی اولیه ناپایدار بود و دچار همگرایی زودرس می‌شد و در نتیجه برای مسائل پیچیده مناسب نبود [۲۳]. به همین دلیل تا کنون نسخه‌های مختلفی از این الگوریتم ارائه شده‌است. ایجاد پایداری و تعریف درست مفهوم همسایگی از روندهایی است که بیشترین کارها در آن‌ها انجام شده‌است [۲۴].

۴-۱- نسخه‌ی استاندارد الگوریتم

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک روش سراسری بهینه‌سازی است که با استفاده از آن می‌توان با مسائلی که جواب آن‌ها یک نقطه یا سطح در فضای چند بعدی می‌باشد، برخورد نمود. در این چنین فضایی، ذره‌هایی فرض و یک سرعت ابتدایی به آنها اختصاص داده می‌شود. همچنین همسایگی‌هایی بین ذرات لحاظ خواهد شد. سپس این ذرات در فضای پاسخ حرکت می‌کنند، و نتایج حاصله بر مبنای یک ملاک شایستگی پس از هر بازه‌ی زمانی محاسبه می‌شود. با گذشت زمان، ذرات به سمت نقاطی که دارای ملاک شایستگی بهتری هستند و در همسایگی یکسانی قرار دارند، شتاب می‌گیرند. در هر گام، سرعت جدید ذره با توجه به سرعت کنونی آن با استفاده از معادله ۳ محاسبه می‌شود.

$$V_{t+1}^d = C_0 * V_t^d + C_1 * R_1 * (pbest - p_t^d) + C_2 * R_2 * (gbest - p_t^d) \quad (۳)$$

در این جا V_{t+1}^d سرعت جدید بعد d ذره، C_0 اینرسی ذره، C_1 و C_2 ضرائب کشش به بهترین حالت محلی و سراسری، V_t^d سرعت کنونی بعد d ذره، R_1 و R_2 اعداد تصادفی در بازه‌ی صفر تا یک، p_t^d مکان کنونی ذره و $pbest$ و $gbest$ نیز بهترین موقعیت محلی و سراسری دست‌یافته توسط مجموع ذرات است. جمله‌ی دوم که کشش به بهترین موقعیت محلی را نشان می‌دهد $pbest$ و جمله‌ی سوم که کشش ذره به بهترین موقعیت سراسری را نشان می‌دهد $gbest$ خوانده می‌شود. مکان جدید ذرات نیز با استفاده از معادله ۴ محاسبه می‌شود.

$$V_{t+1}^d = C_0 * V_t^d + C_1 * R_1 * (pbest - p_t^d) \quad (ع)$$

$$V_{t+1}^d = \sum_{i=1}^N \frac{V_t^d R_i}{N} \quad (و)$$

در معادله ۷، N تعداد ذرات جمعیت و R_i وزن ذرات در جستجوی محیطی (در این جا مساوی برای تمام ذرات) را نشان می‌دهد.

چهار روش فوق در حقیقت، شیوه‌هایی مختلف از پیکربندی و تعامل بین ذرات را نشان می‌دهند. بروزرسانی نیز مانند [۲۵] در سطح ذرات انجام خواهد شد. الگوریتم ۱ نحوه‌ی بروزرسانی سرعت را در الگوریتم پیشنهادی نشان می‌دهد.

```

1.  START
2.  Parameters: acceptableAns, q
3.  Vlist := Null
4.  Vlist.Add( getVal( 3 ) )
5.  if fitDiff ≤ ε then
    a.  Vlist.Add( getVal( 4 ) )
6.  end if
7.  if pbestAve ≤ pbest then
    a.  Vlist.Add( getVal( 2 ) )
8.  end if
9.  if acceptableAn ≤ gbest then
    a.  if Rand ≤ q then
        i.  Vlist.Add( getVal( 1 ) )
    b.  end if
10. newVal := Vlist.getItem();
11.  END

```

الگوریتم ۱: بروزرسانی سرعت ذرات

پارامترهای الگوریتم:

- $acceptableAns$: حداقل میزان قابل قبول تابع تناسب است. در مساله‌ی تولید مسیر زاویه‌ای برابر راه رفتن به اندازه‌ی ۱۰ برابر طول ربات در نظر گرفته شده است.
- q : احتمال دنبال کردن $gbest$ در صورت رسیدن به پاسخ قابل قبول توسط جمعیت، که در این مقاله ۸۰ درصد فرض شده است.

ساختمان داده الگوریتم:

ساختمان داده $Vlist$ یک آرایه برای ذخیره‌سازی مقادیر انتخابی سرعت است. تابع $Add()$ یک مقدار را در این آرایه درج می‌کند. $getItem()$ نیز یکی از مقادیر موجود در آرایه را به صورت تصادفی برمی‌گرداند. تابع $getVal()$ نیز سرعت جدید را بر مبنای روش‌های ارائه شده در شکل ۲ محاسبه می‌کند. ورودی این تابع، شماره روش مورد نظر است.

متغیرهای الگوریتم:

- $fitDiff$ میانگین تغییرات تابع تناسب در سه گام اخیر اجرا
- ϵ حد آستانه‌ی تغییرات تابع تناسب (در این مقاله، حرکت کمتر از ۰.۱ متر روبات)
- $pbestAve$ میانگین بهترین پاسخ‌های محلی در کل جمعیت
- $pbest$ بهترین پاسخ در همسایگی
- $gbest$ بهترین پاسخ در کل جمعیت
- $newVal$ سرعت جدید ذره

۳-۴- تعریف توابع تناسب

تعریف صحیح تابع تناسب از مهمترین بخش‌های پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی مورد بحث است. این تابع می‌بایست برای پاسخ‌های بهتر مقدار بیشتری را اخذ نماید. برای محاسبه‌ی مقدار تابع تناسب، ابتدا روبات در مبدا مختصات قرار می‌گیرد و سپس به مدت ۱۰۰ ثانیه برای حرکت بر اساس مسیر زاویه‌ای تولید شده به آن مهلت داده می‌شود. همچنین چنان‌چه روبات بیافتد شبیه‌سازی خاتمه پیدا خواهد کرد. تابع برای حرکت رو به جلو به صورت معادله ۸ تعریف شده است.

$$F_x := \frac{X - 0.5|Y|}{100 - CurrentTime} \quad (ا)$$

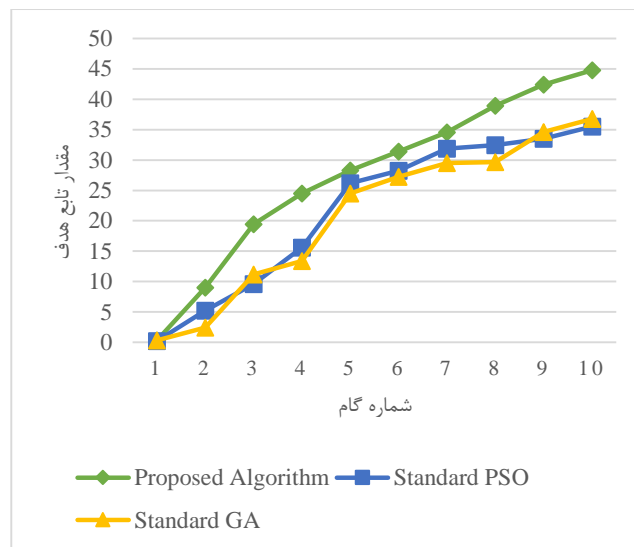
در این جا F_x مقدار تابع تناسب برای راه رفتن روبات به سمت جلو، X تصویر نقطه‌ی نهایی حرکت روبات بر روی محور x و Y تصویر این نقطه بر روی محور y است. $CurrentTime$ نیز نشان‌دهنده‌ی لحظه‌ی افتادن روبات خواهد بود. در بخش بعد روش پیشنهادی با استفاده از شبیه‌سازی آزمایش خواهد شد.

۵- شبیه‌سازی و نتایج

روش پیشنهادی برای پیاده‌سازی توانایی‌های پایه‌ی راه رفتن روبات دوپا بر روی سیستمی با پردازنده‌ی Intel Core2Due 2.66 GHz و حافظه‌ی 2GB و بر روی سیستم عامل Ubuntu 13.04 اجرا و الگوریتم بهینه‌سازی نیز با تعداد ۵۰ ذره و ۱۰ گام پیکربندی شده است.

در شکل ۳ نمودار تغییرات تابع تناسب در اجرای روش پیشنهادی برای راه رفتن مستقیم آورده شده است. در این نمودار الگوریتم پیشنهادی با نسخه‌ی استاندارد الگوریتم PSO و همچنین الگوریتم ژنتیک مقایسه شده است. پیکربندی نسخه‌ی استاندارد الگوریتم، مشابه پیکربندی الگوریتم پیشنهادی است. الگوریتم ژنتیک نیز دارای ۵۰ فرد در هر نسل و با تکرار ۱۰ عدد اجرا شده است. همچنین نرخ برش و جهش به ترتیب ۰.۸۵ و ۰.۰۴ بوده است. با توجه به دقت بودن نسبی شبیه‌ساز فیزیکی مورد استفاده، دو پاسخ یکسان الزاماً دو خروجی تناسب یکسان ندارند و بنابراین ممکن است که با وجود حفظ ذرات نخبه (در این مقاله، ۱۰ درصد)، در برخی قدم‌ها شاهد کم شدن میزان تناسب بهترین ذره باشیم. با توجه به شکل ۴ الگوریتم پیشنهادی توانست مساله‌ی تولید مسیر زاویه‌ای را با ۱۰ درصد بهبود نسبت به نسخه‌ی استاندارد الگوریتم حل نماید.

- [7] C. Pinto, M. Golubitsky, "Central Pattern Generator for Bipedal locomotion", J. Math. Biol. ,Vol. 53, 2006.
- [8] S. Mochon and T.A. McMahon, "Ballistic walking", Journal of Biomech, Vol. 13, 1980.
- [9] L. Yang, C.M. Chew, A.N. Poo, "Adjustable Bipedal Gait Generation using Genetic Algorithm Optimized Fourier Series Formulation", In : Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006.
- [10] J. Buchli, F. Iida, A.J. Ijspeert, "Finding Resonance: Adaptive Frequency scillators for Dynamic Legged Locomotion", Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006.
- [11] K. Matsuoka, "Sustained oscillations generated by mutually inhibiting neurons with adaptation", Biol. Cybern., Vol. 52, 1985.
- [12] J. Kennedy and R.C. Eberhart, "Particle Swarm Optimization", IEEE Int. Conf. on Neural Networks, 1995.
- [13] Huan, Tran Thien, Ho Pham Huy Anh, Y. Kondo, X. H. Han, X. Wei, Y. W. Chen, C. Wang et al. "Novel Stable Walking for Humanoid Robot Using Particle Swarm Optimization Algorithm", hip 6, no. 6, 2015.
- [14] Mahmoodabadi, M. J., M. Taherkhorsandi, and A. Bagheri. "Optimal robust sliding mode tracking control of a biped robot based on ingenious multi-objective PSO", Neurocomputing 124, 2014.
- [15] Taherkhorsandi, M., M. J. Mahmoodabadi, M. Talebipour, and K. K. Castillo-Villar. "Pareto design of an adaptive robust hybrid of PID and sliding control for a biped robot via genetic algorithm optimization", Nonlinear Dynamics 79, no. 1, 2014.
- [16] Taherkhorsandi, M., K. K. Castillo-Villar, M. J. Mahmoodabadi, F. Janaghaei, and SM Mortazavi Yazdi. "Optimal Sliding and Decoupled Sliding Mode Tracking Control by Multi-objective Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithms", In Advances and Applications in Sliding Mode Control systems, pp. 43-78. Springer International Publishing, 2015.
- [17] Gao, Qin, Zhelong Wang, and Hongyi Li. "An Optimization Algorithm with Novel RFA-PSO Cooperative Evolution: Applications to Parameter Decision of a Snake Robot", Mathematical Problems in Engineering, 2015.
- [18] Kherici, Nada, and Yamina Mohamed Ben Ali. "Using PSO for a walk of a biped robot", Journal of Computational Science 5, no. 5, 2014.
- [19] Azarkaman, Mostafa, Mohammad Aghaabbasloo, and Mostafa E. Salehi. "Evaluating GA and PSO evolutionary algorithms for humanoid walk pattern planning", In Electrical Engineering (ICEE), 2014 22nd Iranian Conference on, IEEE, 2014.
- [20] <http://www.aldebaran-robotics.com/en/>
- [21] Hinrichs RN, "Whole body movement, coordination of arms and legs", In: Winters JM, WooSLY (eds) Walking and running. Springer-Verlag, New York, 1990.
- [22] L. Yang, C.M. Chew, T. Zielinska, A.N. Poo, "A Uniform Bipedal Gait Generator with Offline Optimization and Online Adjustable Parameters", Robotica 2007, Cambridge University Press, United Kingdom, 2007.
- [23] J. J. Liang, A. K. Qin, P. N. Suganthan, and S. Baska, "Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions", IEEE Trans. Evol. Comput., vol. 10, no. 3, 2006.
- [24] K. KAMEYAMA, "Particle Swarm Optimization - A Survey", IEICE Transactions on Information and Systems, Vol. E92.D No. 7, 2009.
- [25] Changhe Li; Shengxiang Yang; Trung Thanh Nguyen, "A Self-Learning Particle Swarm Optimizer for Global Optimization Problems", Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on , vol.42, no.3, 2012.



شکل ۴ - تغییرات تابع تناسب در اجرای الگوریتم بهینه‌سازی

۶- نتیجه‌گیری و کارهای آینده

در این مقاله روشی برای تولید مسیر زاویه‌ای حرکات تناوبی راه‌رفتن معرفی شد. روش پیشنهادی اگرچه تعداد پارامترهای مجهول بیشتری نسبت به کارهای گذشته دارد، اما حرکتی متعادل‌تر و پایدارتر را فراهم می‌آورد. همچنین این روش می‌تواند برای تمام حرکاتی که بر مبنای راه‌رفتن هستند نیز مورد استفاده قرار گیرد. روش پیشنهادی برای بهبود الگوریتم ازدحام ذرات نیز توانست حل مساله را تا حد قابل قبولی بهبود بخشد. این بهبود از طریق تغییر استراتژی حرکت ذرات در شرایط مختلف ایجاد شده‌است. در آینده می‌توان با خوشه‌بندی پاسخ‌های مساله، مجموعه الگوها را برای تولید مسیر زاویه‌ای ایجاد نمود که در راه‌رفتن روبات در محیط واقعی بسیار مورد توجه است. همچنین با بهبود الگوریتم بهینه‌سازی می‌توان مفاصل بیشتری را به شکل فعال در نظر گرفتن و حرکت را پایدارتر نمود.

مراجع

- [1] Kato I, Ohteru S, Kobayashi H, Shirai K, Uchiyama A, "Information-power machine with senses and limbs", First CISM-IFTOMM symposium on theory and practice of robots and manipulators, Springer-Verlag, 1974.
- [2] Takanishi A, Naito G, Ishida M, Kato I, "Realization of plane walking by the biped walking robot WL-10R", Robotic and Manipulator Systems, 1982.
- [3] Hodgins JK, Raibert MH, "Biped gymnastics", Int. J. Robot Res. 9(2), 1990.
- [4] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surdilovic, "Zero-moment point proper interpretation and new applications", In Proceedings of the 2nd IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Humanoids 2001, 2001.
- [5] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Yokoi, H. Hirukawa "The 3D linear inverted pendulum mode A simple modeling for a biped walking pattern generation", In: Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2001.
- [6] T. McGeer, "Passive dynamic walking", International Journal of Robotics Research, Vol. 9(2), 1990.