

برنامه‌ریزی حرکت یک ربات افزوده در یک محیط نامعین با استفاده از کنترل فازی مستقل زاویه‌ی اعضا

مهدی کریمی* (استادیار)

امین دادستان (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی فنی‌ومهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

مهندسی مکانیک شریف، (پهار ۱۳۹۶) ۳-۳، شماره ۱، ص. ۱۲۱-۱۲۷، (پادداشت‌نوی)

در این پژوهش یک سیستم کنترل فازی چندگانه به منظور برنامه‌ریزی حرکت یک ربات افزوده در یک محیط دوبعدی با حضور موانع طراحی شده است. سیستم کنترل به‌گونه‌ی است که مستقل از تعداد درجات آزادی سیستم است. با افزودن هر تعداد عضو به بازو تغییری در کنترل‌گرهای فازی، توابع عضویت و تعداد سیگنال‌های ورودی و خروجی به وجود نمی‌آید. در طراحی کنترل‌گرهای فازی چند رفتار مختلف در مواجهه با خطرات و همچنین نزدیک شدن به هدف با هم آمیخته شده است. با استفاده از این روش ربات افزوده با سه و شش درجه آزادی همزمان با رسیدن به هدف از برخورد با مانع اجتناب می‌کند. استفاده از منطق فازی و تدوین قوانین ساده با استفاده از چند کنترل‌گر فازی مختلف و ترکیب خروجی آن‌ها امکان گسترش رفتار بازوی مکانیکی را تسهیل کرده و قابلیت گسترش و بهینه‌سازی رفتارها را نیز محفوظ داشته است.

karimi_mh@yahoo.com
amin.dadsetan7@gmail.com

واژگان کلیدی: برنامه‌ریزی حرکت، ربات افزوده، کنترل فازی، محیط نامعین.

۱. مقدمه

در اکثر کاربردهای صنعتی، ربات‌های با دست‌کم شش درجه آزادی، دارای تقریباً تمامی توانایی‌های لازم برای انجام عملیات مختلف در فضای سه‌بعدی هستند، چرا که قابلیت قرارگرفتن در موقعیت‌ها و جهت‌های مختلف در فضا را دارند.^[۱] با این حال در صورت حضور موانع در محیط، انعطاف‌پذیری بیشتر بازوهای مکانیکی ضرورت خواهد یافت. به عنوان یک سیستم ایده‌آل، بازوهای مکانیکی پیوسته، توانایی انجام هرگونه عملیاتی را با حضور موانع دارند. بازوهای مکانیکی پیوسته با اعضای کوچک و متعدد به دلیل مهارت بالا و انعطاف‌پذیری بیشترشان نسبت به بازوهای مکانیکی ساده قابلیت‌های بیشتری دارند. اما کنترل بازوهای پیوسته سخت‌تر است چرا که تعداد درجات آزادی آن‌ها بسیار زیاد یا حتی بی‌نهایت است.^[۲] برای ساده‌تر شدن کنترل و نزدیک شدن رفتار بازو به رفتار بازوی پیوسته، ربات‌های افزوده در نظر گرفته می‌شوند. ربات افزوده به ربات‌هایی گفته می‌شود که درجه آزادی آن‌ها بیشتر از کمینه درجه آزادی مورد نیاز در محیط کاری آن‌هاست. مطابق تعریفی که کانکور و باکینگهام برای ربات افزوده پیشنهاد دادند، هر رباتی که بتواند یک عملیات را به چندین صورت مختلف انجام دهد یک ربات افزوده است.^[۳] سینماتیک معکوس ربات‌های افزوده به دلیل تعداد زیاد درجات آزادی سیستم بسیار پیچیده است، چرا که برای قرارگیری نقطه‌ی نهایی ربات در یک موقعیت خاص تعداد زیادی از پیکربندی‌های مختلف برای ربات موجود خواهد بود. روش‌های مختلفی -- نظیر

شبکه‌های عصبی مصنوعی^[۴] روش جبری،^[۵] روش هندسی،^[۶] استفاده از الگوریتم ژنتیک^[۷] -- برای حل سینماتیک معکوس ربات‌های افزوده به کارگرفته شده است. برای برنامه‌ریزی حرکت ربات‌های افزوده با حضور موانع نیز از روش‌های مختلفی -- نظیر سینماتیک معکوس حلقه‌بسته و الگوریتم ژنتیک -- استفاده شده است. در پژوهش حاضر سعی بر آن است تا با استفاده از منطق فازی و براساس رفتاری مشابه با رفتار بازوی انسان، الگوریتم ساده‌ی برای سینماتیک معکوس یک ربات افزوده و برنامه‌ریزی حرکت آن به منظور قرارگیری نقطه‌ی پایانی بازوی مکانیکی در یک نقطه‌ی تعیین شده انجام بگیرد. این عملیات در ربات‌های بردار و گذار مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تحقیقات پیشین نیز استفاده از کنترل فازی به صورت طراحی یک کنترل‌گر متمرکز انجام شده است.^[۸-۱۰]

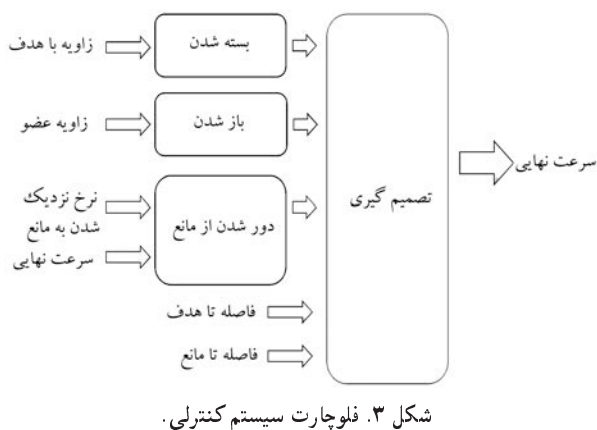
الگوریتم طراحی شده در این پژوهش به‌گونه‌ی است که هر عضو ربات به طور مستقل کنترل می‌شود و سیگنال‌های ورودی و خروجی کنترل‌گرهای فازی هر عضو با افزایش تعداد اعضا ثابت می‌ماند. به این ترتیب الگوریتم طراحی شده در این پژوهش قابل استفاده برای ربات‌های افزوده با تعداد درجه آزادی دلخواه است.

۲. سینماتیک ربات

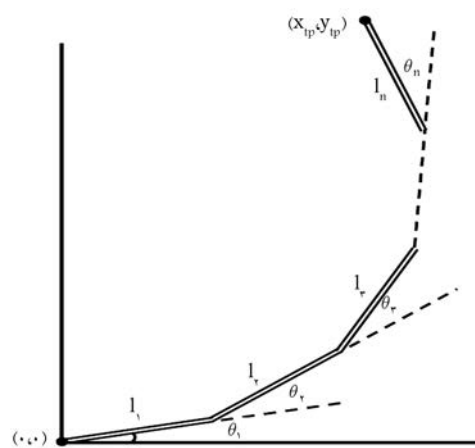
ربات در نظرگرفته شده در این تحقیق یک ربات افزوده‌ی دوبعدی است که به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. متغیرهای θ نشان‌گر زاویه‌ی هر عضو

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۶/۲/۱۳۹۴، اصلاحیه ۱۵/۴/۱۳۹۴، پذیرش ۱۹/۱۱/۱۳۹۴.

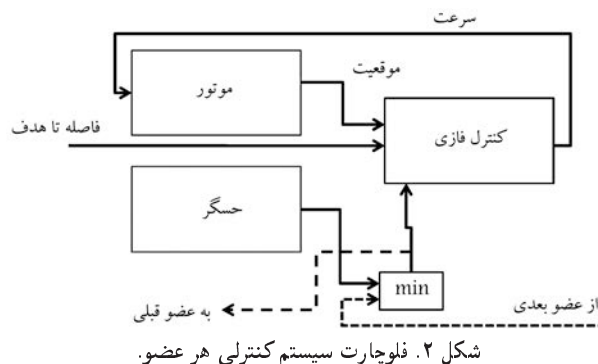


شکل ۳. فلوچارت سیستم کنترلی.



شکل ۱. ربات افزوده با n عضو.

محیط کاری مانعی وجود داشته باشد، باید بتوان بدون برخورد با مانع عملیات خود را انجام داد. در این تحقیق به جای استفاده از یک کنترل‌گر فازی مرکزی از چندین کنترل‌گر فازی مستقل استفاده شده است. روی هر کدام از اعضای ربات یک سنسور (حساسه) نصب شده که فاصله‌ی مانع تا سنسور (حساسه) نسبت به عضو را تعیین می‌کند. هر کدام از اعضا، با توجه به موقعیتی که نسبت به موانع یا هدف دارند، باید رفتارهای مختلفی بروز دهند. در سیستم کنترل طراحی شده چند رفتار مجزا از هم برای ربات تعریف شده است. این رفتارها از رفتار بازوی انسان در مواجهه با خطرات یا به‌منظور رسیدن به هدف الگو گرفته است. سه رفتار بسته شدن، باز شدن و دور شدن از مانع در کنار کنترل‌گر فازی تصمیم‌گیری سیستم کنترل فازی هر عضو را تشکیل می‌دهد. در شکل ۳ شیوه‌ی ترکیب رفتارهای مختلف نمایش داده شده است. از جمله مزایای استفاده از چند کنترل‌گر فازی به‌جای تنها یک کنترل‌گر مرکزی می‌توان به اشاره کرد به:



شکل ۲. فلوچارت سیستم کنترلی هر عضو.

نسبت به عضو قبلی است. مختصات نقطه‌ی پایانی هر کدام از اعضا از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$p(i) = \sum_{k=1}^i l_k * \exp \left(j \sum_{n=1}^k \theta_n \right) \quad (1)$$

که در آن l_k طول عضو شماره‌ی k است. طول اعضا به‌طور پیش فرض مساوی هم و برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

در مدل طراحی شده مکان هدف به‌صورت یک نقطه در مختصات قطبی با مبدأ منطبق بر مفصل اول ربات به سیستم کنترلی داده می‌شود. سیستم کنترل طراحی شده باید قادر باشد با ترکیب کردن رفتارهایی از قبیل بسته و باز شدن و تغییر دادن زاویه‌های مفاصل، نقطه‌ی پایانی ربات افزوده را بر نقطه‌ی هدف منطبق کند. الگوی این رفتار برگرفته از رفتار بازوی انسان است.

در شکل ۲ فلوچارت سیستم کنترلی هر عضو نمایش داده شده است. هر عضو فقط از طریق سیگنال کمیته‌ی فاصله‌ها تا مانع با اعضای قبلی و بعدی در ارتباط است و بدین ترتیب با افزایش تعداد اعضا تعداد سیگنال‌های ورودی و خروجی سیستم کنترل هر عضو تغییری نمی‌کند.

۳. کنترل فازی

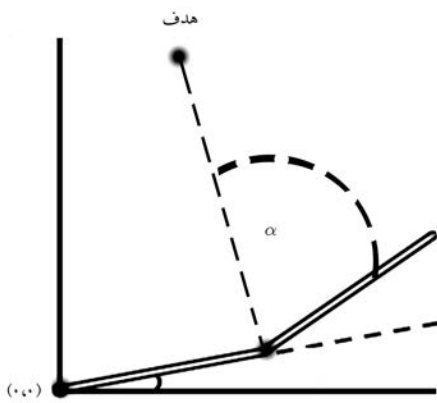
بازوی مکانیکی طراحی شده باید بتواند در محیط کاری خود، با تغییر زاویه‌ی اعضایش نقطه‌ی پایانی بازو را از یک نقطه‌ی خاص به نقطه‌ی خاص دیگری انتقال دهد. این عملیات در ربات‌های بردار و گذار کاربرد دارد. در کنترل فازی، چنانچه در

۱. راحتی تنظیم و عیب‌یابی کنترل‌گرها، زیرا تعداد قوانین و ورودی‌ها کم‌ترند؛
 ۲. انعطاف‌پذیری بیشتر کنترل‌گر طراحی شده، در مقایسه با اضافه شدن رفتارهای جدید به‌منظور گسترش مهارت ربات؛^[۱۱]
 ۳. قابلیت اضافه شدن یک عضو به ربات بدون تغییر ساختار کلی ربات؛
 ۴. کاهش حجم پردازش مورد نیاز در هر کنترل‌گر به‌علت مستقل بودن کنترل‌گرها و در نتیجه بهتر شدن شرایط برای کنترل بدون درنگ ربات.
- ابتدا سه رفتار اصلی بازوی مکانیکی یعنی بسته شدن، باز شدن و پرهیز از برخورد به موانع توضیح داده خواهد شد و سپس کنترل‌گر فازی تصمیم‌گیری که تشخیص می‌دهد کدام یک از این رفتارها اجرا شود معرفی خواهد شد.

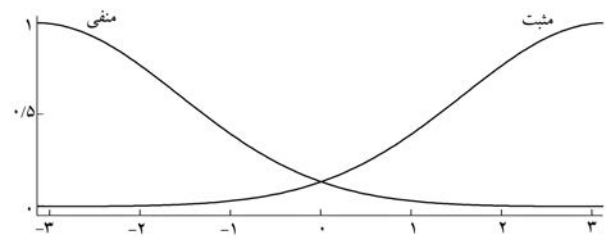
۴. بسته شدن

رفتار بسته شدن ربات، که ملهم از رفتار بازوی انسان در مواجهه با خطرات است، رفتاری است که هم می‌تواند هنگام نزدیک شدن به موانع و به‌منظور کاهش خطر، و هم هنگام نزدیک شدن به هدف مورد استفاده قرار بگیرد. این رفتار به‌وسیله‌ی کنترل‌گر فازی یک ورودی و یک خروجی انجام می‌گیرد. ورودی این کنترل‌گر زاویه‌ی θ و خروجی آن سرعت زاویه‌ی موتور نصب شده روی مفصل است.

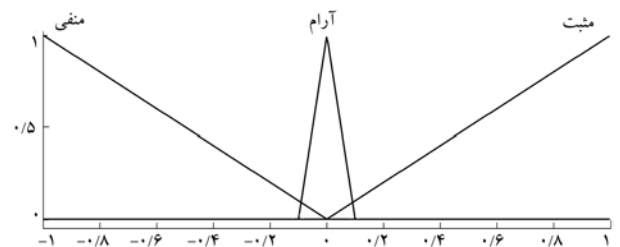
در شکل ۴ توابع عضویت مربوط به متغیر زاویه که ورودی کنترل‌گر فازی است، و در شکل ۵ توابع عضویت متغیر سرعت که خروجی کنترل‌گر است نمایش داده شده است. قوانین فازی به کار گرفته شده در این کنترل‌گر عبارت‌اند از:



شکل ۶. زاویه‌ی عضو با راستای هدف.



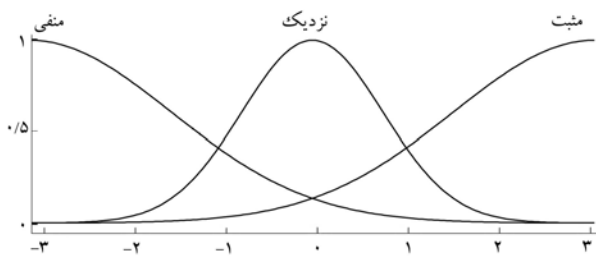
شکل ۴. توابع عضویت متغیر اختلاف زاویه با هدف.



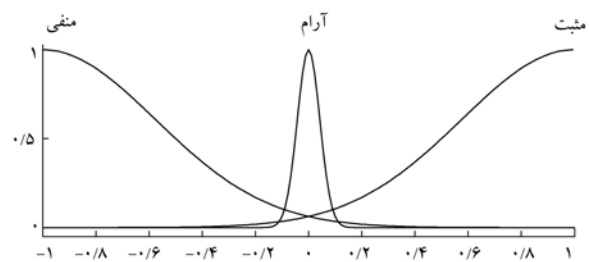
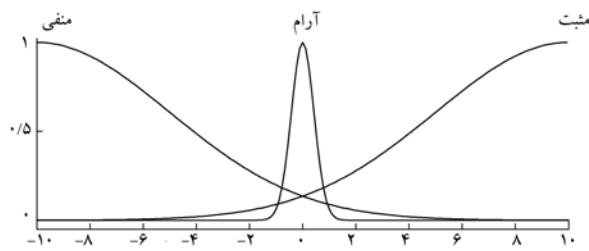
شکل ۵. توابع عضویت متغیر سرعت.

-- در صورت منفی بودن زاویه، سرعت منفی است؛

-- در صورت مثبت بودن زاویه، سرعت مثبت باشد.



شکل ۷. توابع عضویت متغیر زاویه با هدف.



شکل ۸. توابع عضویت مشتق فاصله تا مانع و سرعت.

۵. باز شدن

هنگامی که هدف در فاصله‌ی دورتر از مبدأ، نسبت به انتهای ربات قرار گرفته باشد ربات باید از طریق در راستای هم قرار دادن اعضایش طول خود را بیشتر کند. به همین منظور رفتار باز شدن در نظر گرفته شده است. این رفتار به گونه‌ی طراحی شده است که علاوه بر در راستای هم قرار گرفتن بازوهای ربات افزوده باعث می‌شود که ربات در جهت هدف حرکت کند.

این رفتار به وسیله‌ی کنترل‌گر فازی یک ورودی و یک خروجی انجام می‌گیرد. ورودی این کنترل‌گر زاویه‌ی راستای عضو و راستای خط واصل محل قرارگیری مفصل ابتدایی عضو و نقطه‌ی هدف است، و خروجی آن نیز سرعت موتور نصب شده روی مفصل است. این زاویه در شکل ۶ نمایش داده شده است.

در شکل ۷ توابع عضویت مربوط به ورودی و خروجی این کنترل‌گر آمده است. قوانین فازی به کار گرفته شده در این کنترل‌گر عبارت‌اند از:

-- در صورت منفی بودن زاویه با هدف، سرعت مثبت است؛

-- در صورت مثبت بودن زاویه با هدف، سرعت منفی باشد.

۶. دور شدن از موانع

یکی از مهم‌ترین بخش‌هایی که کنترل فازی می‌تواند در آن نقش به‌سزایی ایفا کند، دور شدن ربات از موانع است. در مدل در نظر گرفته شده وظیفه‌ی دور شدن و دور زدن ربات جزئیات پیچیده‌ی دارد اما با طراحی یک کنترل‌گر فازی با قوانین ساده از ورود به جزئیات پیچیده و شرایط خاصی که ربات ممکن است در آن قرار بگیرد پرهیز شده است.

کنترل‌گر فازی مربوط به این رفتار دارای دو سیگنال ورودی سرعت عضو و مشتق سیگنال فاصله تا مانع است. سیگنال فاصله تا مانع کمینه فاصله‌ی سنسورهای

هر عضو و عضوهای بعدی آن است. این سیگنال را می‌توان با استفاده از نصب سنسورهای فاصله‌سنج روی اعضای مختلف به دست آورد. در مدل در نظر گرفته شده در این تحقیق سنسورها در وسط هر عضو کار گذاشته شده‌اند و کنترل‌گر نیز به گونه‌ی طراحی شده که کمینه فاصله‌ی سنسورها تا مانع بیشتر از نصف طول هر عضو باشد تا احتمال برخورد به مانع از بین برود.

توابع عضویت مربوط به سیگنال‌های ورودی کنترل‌گر پرهیز از برخورد به مانع در شکل ۸ نمایش داده شده است. در این کنترل‌گر قواعد زیر اجرا خواهد شد:

-- اگر مشتق فاصله منفی و سرعت مثبت باشد، پس سرعت منفی است؛

جدول ۱. قوانین فازی کنترل‌گر تصمیم‌گیری.

| خروجی | ورودی‌ها (and) | |
|-----------------|-----------------|-------------|
| | اختلاف زاویه‌یی | اختلاف طولی |
| رفتار | با هدف | با هدف |
| دور شدن از مانع | - | خیلی نزدیک |
| بسته شدن | - | نزدیک |
| بسته شدن | نزدیک | مثبت |
| باز شدن | نزدیک | منفی |

اما با اضافه کردن این دو قاعده، در صورت بروز چنین اتفاقی در هر تکرار شرایط قرارگیری این ربات دچار تغییراتی می‌شود و موجب می‌شود که یک حلقه‌ی تکرار به وجود نیاید. این دو قاعده عبارت‌اند از:

— اگر فاصله‌ی زاویه با هدف منفی باشد، پس سرعت مثبت است؛

— اگر فاصله‌ی زاویه با هدف مثبت باشد، پس سرعت منفی است.

در همه‌ی کنترل‌گرها از موتور استنتاج ممدانی^۱ و استلزام «اند» (and) از نوع کمینه استفاده شده است.

۸. شبیه‌سازی

شبیه‌سازی حرکت بازوی مکانیکی به‌وسیله‌ی شبیه‌سازی ریاضی محیط در نرم‌افزار سیمولینک صورت گرفته است. مدل طراحی شده قابلیت اجرایی شدن به‌وسیله‌ی موتورها و حسگرهای واقعی را دارد، اما برای بررسی عملکرد سیستم کنترل محیطی با حضور یک مانع در مسیر ربات به سمت هدف طراحی شده است. با توجه به مستقل بودن سیستم کنترل طراحی شده نسبت به تعداد اعضای بازوی مکانیک، عملکرد سیستم کنترل یک بار برای بازویی با سه درجه آزادی و یک بار برای بازویی با شش درجه آزادی، ابتدا بدون حضور مانع و سپس با حضور مانع بررسی، و نتایج حاصله با هم مقایسه خواهد شد.

در شکل ۱۰ نمایشی از محیط طراحی شده، به‌صورت شماتیک مانع، هدف و موقعیت اولیه‌ی ربات افزوده با سه عضو تصویر شده است. در شکل ۱۱ نیز نمایش کلی از مدل ساخته شده برای کنترل فازی هر عضو نمایش داده شده است.

۹. نتایج شبیه‌سازی

عملکرد بازوی مکانیکی با سه عضو، بدون حضور مانع در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود الگوریتم فازی تعیین شده هر سه موتور نصب شده روی مفاصل را هم‌زمان و به یک اندازه درگیر می‌کند. این نتیجه با نتایج بهینه‌سازی حرکت بازوی مکانیکی^[۱۲] مطابقت، و با عملکرد بازوی انسان نیز شباهت دارد. در شکل ۱۳ بازویی با سه عضو در محیطی با مانع قرار داده شده است. مشاهده می‌شود که از موقعیت اولیه تا موقعیت شماره ۱ عملکرد ربات دقیقاً مشابه حالت بدون مانع است. از موقعیت شماره ۱ تا موقعیت شماره ۳ ربات بدون توجه به رفتار رسیدن به هدف، تلاش می‌کند که از برخورد با مانع جلوگیری کند و در ادامه نیز تا موقعیت شماره ۵ سعی در جمع‌ترکردن خود دارد. از موقعیت ۵

— اگر مشتق فاصله منفی و سرعت نیز منفی باشد، پس سرعت مثبت است؛

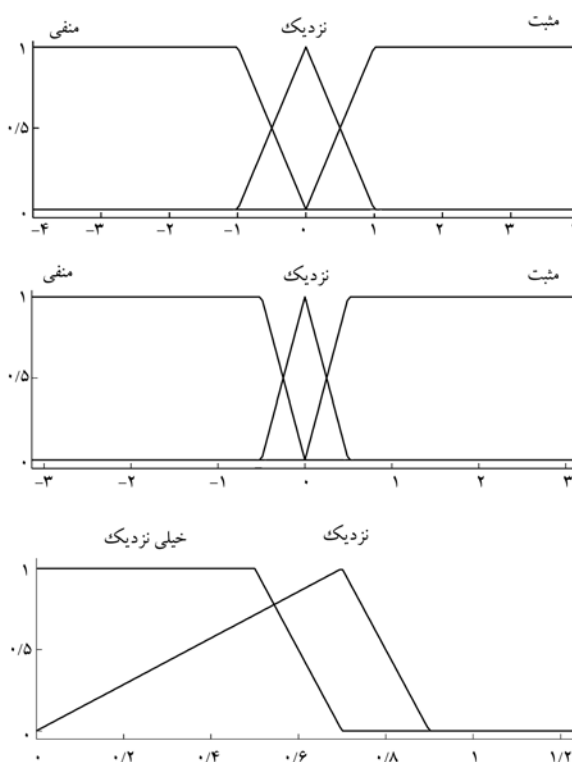
— اگر مشتق فاصله مثبت و سرعت نیز مثبت باشد، پس سرعت مثبت است.

سیگنال سرعت ورودی و سیگنال سرعت خروجی با هم متفاوت‌اند؛ سیگنال سرعت خروجی سرعتی است که کنترل‌گر تصمیم‌گیرنده با ترکیب سرعت‌های هر سه رفتار به سیستم خواهد داد در حالی که سیگنال خروجی سرعت در واقع سرعت مربوط به رفتار دور شدن از مانع است.

۷. تصمیم‌گیری

در نهایت، کنترل‌گر فازی با توجه به شرایطی مانند فاصله تا مانع، و فاصله تا هدف، باید با ترکیب رفتارهای مختلف بتواند یک سرعت را برای اجرای پیشروی یا عقب‌گرد ربات به آن اعمال کند. این کنترل‌گر شش ورودی و یک خروجی دارد. سه سیگنال ورودی اول سرعت‌های هرکدام از رفتارها و سیگنال‌های دیگر عبارت‌اند از: کمینه‌ی فاصله تا مانع، فاصله‌ی طولی تا هدف و فاصله‌ی زاویه‌یی تا هدف. توابع عضویت در نظر گرفته شده برای سه سیگنال ورودی دوم در شکل ۹ نمایش داده شده است. مطابق قواعد اجرا شده، این کنترل‌گر باید در شرایط مختلف هرکدام از رفتارهای مختلف سیستم را به‌عنوان رفتار اصلی سیستم برگزیند. در جدول ۱ این شرایط توضیح داده شده است.

در کنار این قواعد دو قاعده‌ی دیگر نیز به این کنترل‌گر افزوده شده است. این دو قاعده‌ی اضافه از آن جهت به کنترل‌گر اضافه شده‌اند که چنانچه شرایط مانع و هدف در حالت خاصی باشد ممکن است کنترل‌گر درگیر یک حلقه‌ی تکرار شود و به‌صورت متناوب رفتارهای دور شدن از مانع و نزدیک شدن به هدف را تکرار کند؛



شکل ۹. توابع عضویت کمینه‌ی فاصله تا مانع، فاصله‌ی طولی تا هدف و فاصله‌ی زاویه‌یی تا هدف.

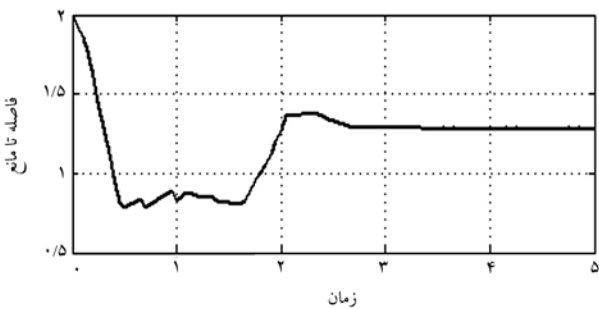
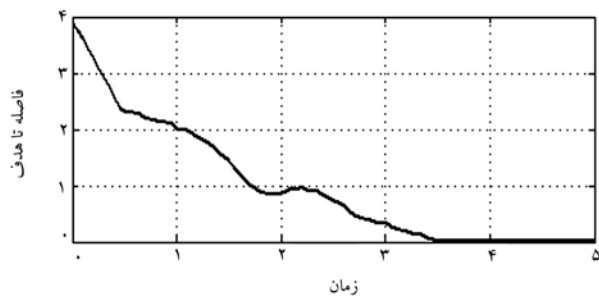
دوباره وظیفه‌ی نزدیک شدن به هدف از سرگرفته می‌شود و در موقعیت 10° بازو به هدف تعیین شده می‌رسد.

در بخش اول شکل ۱۴ فاصله‌ی نوک بازوی مکانیکی با هدف برحسب زمان نمایش داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود در اکثر مواقع این روند نزولی بوده است. مشخص است که در ابتدا ربات با سرعت بیشتری به سمت هدف حرکت می‌کرده و با نزدیک شدن به هدف، با سرعت کم‌تری به این روند ادامه می‌دهد. در نهایت با پشت سر گذاشتن مانع در زمان 3.55 ثانیه، نوک بازوی مکانیکی در محل تعیین شده قرار می‌گیرد.

در بخش دوم شکل ۱۴ نمودار کمینه فاصله‌ی حسگرها تا مانع نشان داده شده است. چنان که مشخص است در ابتدای حرکت این فاصله سیر نزولی داشته و به محض نزدیک شدن فاصله به حد بحرانی تعریف شده برای سیستم کنترل، رفتار سیستم تغییر می‌کند و با پرهیز از نزدیک تر شدن به مانع سعی در بسته کردن بازو می‌کند تا بتواند بدون برخورد با مانع، آن را پشت سر بگذارد.

به منظور بررسی عملکرد کنترل‌گرهای فازی و شیوه‌ی ترکیب رفتارهای مختلف، در شکل ۱۵ سیگنال سرعت خروجی هرکدام از کنترل‌گرها رفتارهای باز شدن، بسته شدن و دوری از مانع برای عضو اول بازوی مکانیکی، و در شکل ۱۶ نمودار سرعت نهایی آن عضو نمایش داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود سیگنال‌های رفتار بازو بسته شدن دقیقاً قرینه‌ی هم هستند. هرچند تا حدودی منطقی به نظر می‌رسد که به دلیل مخالف بودن این دو رفتار، کنترل‌گرهای فازی سرعت‌های قرینه‌ی نسبت به هم داشته باشند، این تقارن صرفاً به دلیل موقعیت خاص هدف و در واقع یک حالت خاص است و حتی در عضوهای دیگر این بازوی مکانیکی این تقارن وجود ندارد. رفتار دور شدن از مانع، با نزدیک شدن به مانع سرعت منفی را برای عضو شماره ۱ پیشنهاد می‌دهد که پس از نزدیکی کافی بازو به مانع، این سرعت به عنوان سرعت نهایی سیستم به موتور داده می‌شود. سپس با دور زدن مانع، این بار سرعت مثبت را در جهت دور شدن از مانع پیشنهاد می‌کند.

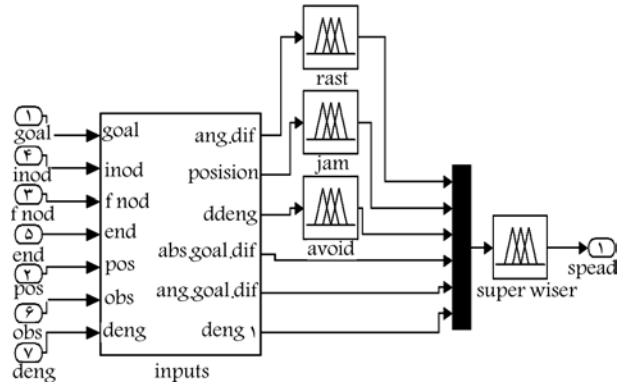
با توجه به نمودار شکل ۱۶ پس از دور زدن مانع، سیستم کنترل رفتار باز شدن را در پیش می‌گیرد و به سرعت به هدف مورد نظر می‌رسد.



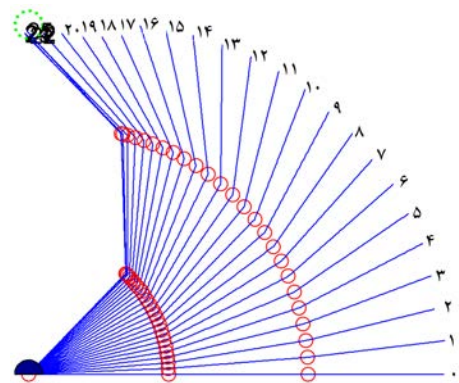
شکل ۱۴. فاصله با هدف و کمینه‌ی فاصله تا مانع.



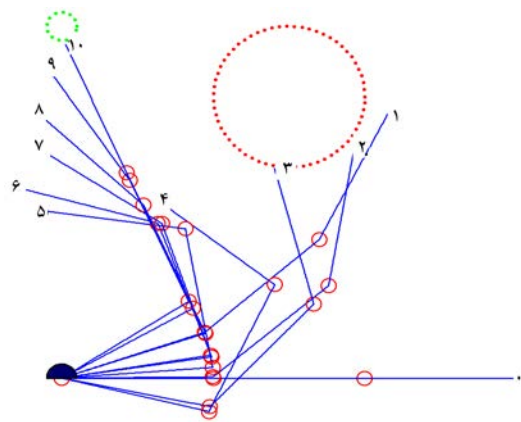
شکل ۱۰. محیط مدل‌سازی شده.



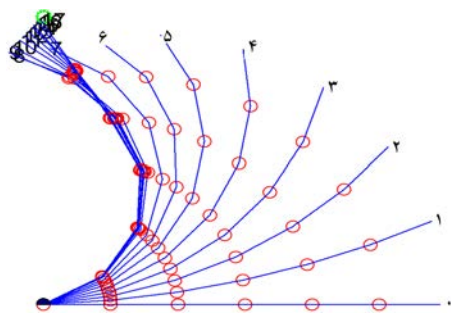
شکل ۱۱. مدل ساخته شده در نرم افزار Simulink.



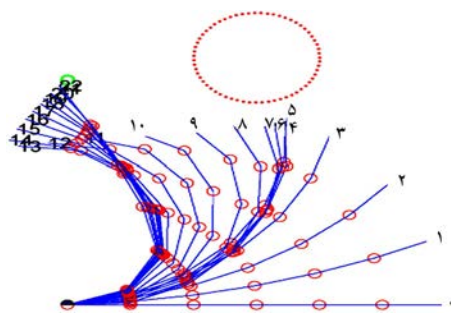
شکل ۱۲. حرکت ربات افزوده با سه عضو در محیط بدون مانع.



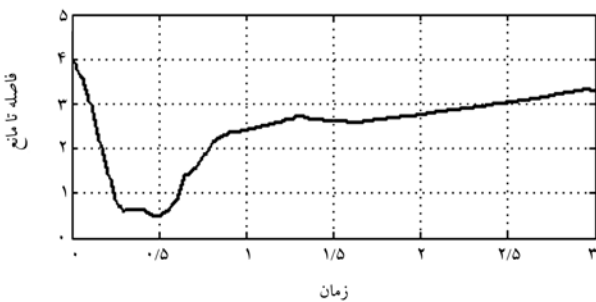
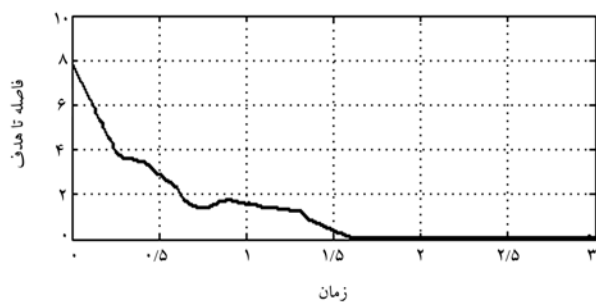
شکل ۱۳. حرکت ربات افزوده با سه عضو با حضور مانع.



شکل ۱۷. حرکت ربات افزوده با شش عضو در محیط بدون مانع.



شکل ۱۸. حرکت ربات افزوده با سه عضو در محیطی با حضور مانع.

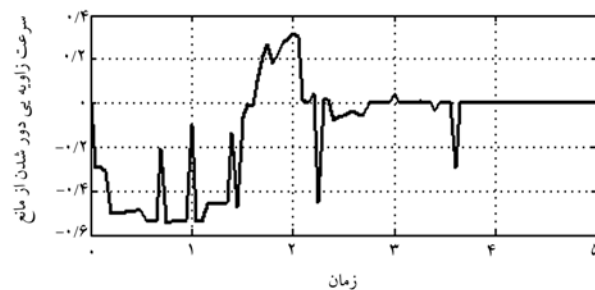
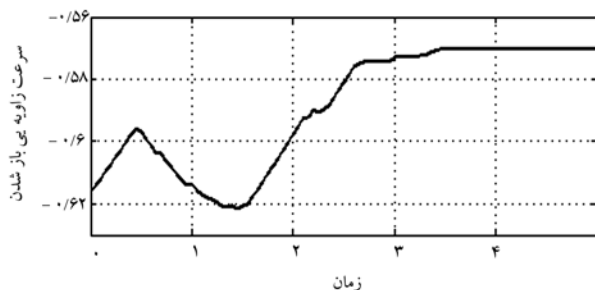
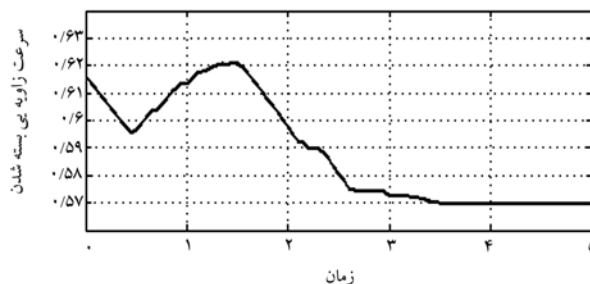


شکل ۱۹. فاصله نوک بازو تا مانع و کمینه فاصله‌ی حسگرها تا مانع.

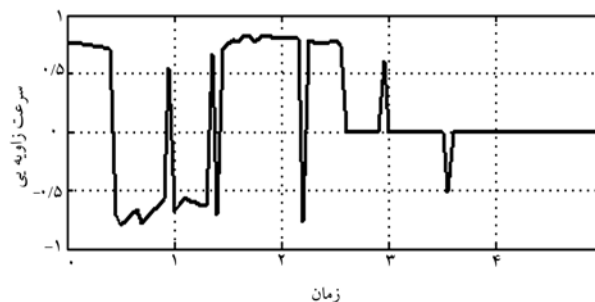
نتایج حاصل از بازوی مکانیکی با شش عضو و بازوی مکانیکی با سه عضو می‌توان مشاهده کرد که در بازوی مکانیکی با اعضای بیشتر زمان رسیدن به هدف تقریباً نصف شده و در مرحله‌ی دور شدن از مانع نیز با دورخیز کم‌تری از برخورد با مانع پرهیز شده است.

۱۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق نشان داده شد که کنترل‌گر فازی طراحی شده مبتنی بر رفتار بازوی انسان می‌تواند مستقل از تعداد اعضای ربات، برنامه‌ریزی حرکت ربات‌های افزوده



شکل ۱۵. رفتار باز شدن، بسته شدن و دور شدن از مانع.



شکل ۱۶. رفتار نهایی سیستم.

در شکل ۱۷ مسیری شده‌ی یک بازوی مکانیکی با شش عضو بدون حضور مانع نمایش داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود عملکرد کلی سیستم کنترلی دقیقاً مشابه حالت قبل است.

در شکل ۱۸ شیوه‌ی مواجهه‌ی بازوی مکانیکی با شش درجه آزادی با مانع نمایش داده شده است. از موقعیت اولیه تا موقعیت ۴ سیستم کنترلی رفتاری مشابه با حالت بدون مانع را دارد؛ از موقعیت ۷ تا موقعیت ۱۲ رفتار سیستم کنترلی در جهت بسته شدن و دور شدن از مانع است؛ و از موقعیت ۱۲ تا موقعیت ۲۲ رفتار سیستم کنترلی در جهت باز شدن بازو و نزدیک شدن به هدف است.

در بخش نخست شکل ۱۹ فاصله‌ی نوک بازو تا مانع و در بخش دوم شکل ۱۹ کمینه فاصله‌ی سنسورها تا مانع، برحسب زمان نمایش داده شده است. از مقایسه‌ی

ربات با شش درجه آزادی و چه در ربات با سه درجه آزادی مشابه هم است و در حالت بدون حضور مانع هر دو حرکت منطبق بر مدل‌های بهینه‌سازی شده در کارهای قبلی‌اند.

را در محیط‌های نامعین به‌گونه‌ی انجام دهد که علاوه بر ناوبری سریع، از برخورد ربات با مانع جلوگیری شود. نتایج نشان می‌دهد که حرکت برنامه‌ریزی شده به‌وسیله‌ی این روش، چه در

پانویس

1. Ebrahim mamdani

منابع (References)

1. Siciliano, B. "Kinematic control of redundant robot manipulators: A tutorial", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, **3**(3), pp. 201-212 (1990).
2. Sardana, L., Sutar, M.K. and Pathak, P.M. "A geometric approach for inverse kinematics of a 4-link redundant In-Vivo robot for biopsy", *Robotics and Autonomous Systems*, **61**(12), pp. 1306-1313 (2013).
3. Conkur, E.S. and Buckingham, R. "Clarifying the definition of redundancy as used in robotics", *Robotica*, **15**(05), pp. 583-586 (1997).
4. Xia, Y. and Wang, J. "A dual neural network for kinematic control of redundant robot manipulators", *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, **31**(1), pp. 147-154 (2001).
5. Perez, A. and McCarthy, J.M. "Clifford algebra exponentials and planar linkage synthesis equations", *Journal of Mechanical Design*, **127**(5), pp. 931-940 (2005).
6. Yahya, S., Moghavvemi, M. and Mohamed, H.A. "Geometrical approach of planar hyper-redundant manipulators: Inverse kinematics, path planning and workspace", *Simulation Modelling Practice and Theory*, **19**(1), pp. 406-422 (2011).
7. Parker, J.K., Khoogar, A.R. and Goldberg, D.E. "Inverse kinematics of redundant robots using genetic algorithms", *In Robotics and Automation, IEEE International Conference on*, pp. 271-276 (1989).
8. Bingül, Z. and Karahan, O. "A fuzzy logic controller tuned with PSO for 2 DOF robot trajectory control", *Expert Systems with Applications*, **38**, pp. 1017-1031 (2011).
9. Florescu, M. "Fuzzy control algorithm for a tentacle robot arm", *System Theory, Control and Computing (ICSTCC), IEEE 17th International Conference* (2013).
10. Kobayashi, N. and Toshiyuki, M. "Workspace acceleration based MDOF motion control in redundant manipulators", *Industrial Electronics (ISIE), IEEE 23rd International Symposium on* (2014).
11. Cupertino, F., Giordano, V., Naso, D. and Delfino, L. "Fuzzy control of a mobile robot", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, **13**(4), pp. 74-81 (2006).
12. Yun, W.M. and Xi, Y.G. "Optimum motion planning in joint space for robots using genetic algorithms", *Robotics and Autonomous Systems*, **18**(4), pp. 373-393 (1996).