

طراحی کنترلر یادگیری مرجعی مدل فازی برای سیستم ربات سگویی با نقصان عملگر

مسئله ربات سگویی و پاندول معکوس، از مسائل مهم و شناخته شده در حوزه کنترل غیرخطی می‌باشد. از اهداف کنترلی، زوایای مطلوب و سرعت مورد نظر بدنه توسط اعمال گشتاور به چرخ‌هاست. مقاله حاضر روش کنترلی هوشمندی را ارائه می‌دهد که در آن کنترلر فازی پایین دست با استفاده از خطا، ورودی مناسب به سیستم دینامیکی را به وجود می‌آورد؛ و در بالادست وجود یک مکانیزم یادگیری به مقایسه خروجی کنترلر پایین دست با خروجی مدل مرجع می‌پردازد و سپس با استفاده از کنترلر معکوس فازی آن را اصلاح می‌کند. این امر از یکسو روش را مقاوم و کارآمدتر می‌کند و از طرف دیگر به دلیل تنظیم خودکار و هوشمند می‌تواند به طراحی ساده‌تر کنترلر کمک کند. روش کین برای استخراج معادلات به کار می‌رود. طراحی کنترلر فازی با توجه به تجربه انسان خبره برای چنین سیستمی می‌تواند به خوبی بر ناپایداری و طبیعت غیرخطی سیستم غلبه کند. عملکرد الگوریتم پیشنهادی کنترلی ارزیابی و توسط شبیه‌سازی در متلب نشان داده شده است. همچنین با در نظر گرفتن حدود عدم قطعیت سیستم به هنگام طراحی و نیز اغتشاشات، کنترل کننده‌ها نسبت به عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات موجود در مسئله مقاوم می‌باشند.

سیدامیرمحمد مناقب^۱

دانشجوی دکترا

علی غفاری^۲

استاد

سیدحسین ساداتی^۳

استادیار

واژه‌های راهنما: ربات سگویی، یادگیری مرجعی مدل فازی، کنترلر بالادست راهنما، نقصان عملگر

۱- مقدمه

مسئله ربات تعادلی دوچرخ را می‌توان یکی از مسائل کلاسیک در حوزه کنترل نام برد. ناپایداری‌ها، وجود قیود غیرهولونومیک و نقصان عملگر، از ویژگی‌های این مسئله به شمار می‌رود. ربات‌های انسان‌نما و پروتزه‌های توانبخشی را نیز می‌توان به طور ساده با پاندول معکوس مدل کرد [۱]. برخی از ربات‌های چرخ‌دار عملی عبارتند از JOE، B2 و محصول تجاری سگویی. چنین سیستم‌هایی مانورپذیری بالایی دارند و می‌توانند به مکان‌هایی بروند که تنها عابرین پیاده می‌توانند در آنجا تردد کنند.

^۱ نویسنده مسئول، دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
s.am_managheb@email.kntu.ac.ir

^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی Ghaffari@kntu.ac.ir

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی Sadati@kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۶/۳۰، تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۵/۱۱

ربات سگویی یک مثال خوب از دسته سیستم‌های نقصان تحریک می‌باشد که می‌توان آن را ترکیبی از یک ربات سیار و یک سیستم آونگ وارونه در نظر گرفت. این سیستم شامل دو چرخ در طرفین بدنه می‌باشد و در واقع هدف کنترلی در اکثر این گونه ربات‌ها، تعیین مقادیر کنترلی به گونه‌ای است که ربات بتواند بدون از دست دادن تعادل خود از یک نقطه به نقطه دیگر حرکت کند. در سال‌های اخیر، مطالعه بر روی ربات‌های تعادلی دوچرخ بسیار گسترش یافته و تحقیقات بسیاری بر روی طراحی، دینامیک و کنترل آنها انجام شده است. پژوهش‌های انجام شده در زمینه ربات تعادلی دو چرخ در دو مبحث کلی انواع مکانیزم‌ها و نیز شیوه‌های مختلف کنترل آنها قابل دسته بندی است. در مبحث اول نخستین بار کازو یامافوجی ربات دوچرخ آونگ وارونه را در دهه ۹۰ میلادی ساخت لکن ربات دوچرخ سگویی از جمله ربات‌های تعادلی مشهور می‌باشد که توسط دین کالمن در سال (۲۰۰۰) ساخته شد [۲].

یامافوجی یک مدل با یک درجه آزادی که متمرکز بر روی زاویه حفظ تعادل ربات بود ساخت و با استفاده از پایداری رات تعادل ربات را حفظ کرد [۳]. بلکول در سال (۲۰۰۲) توانست با هزینه کمتر و به طور ساده‌تر، نمونه‌ای مشابه سگویی بسازد [۴]. کلارک و همکاران [۵] در سال (۲۰۰۵) یک ربات تعادلی شبیه سگویی ارائه کردند. در این پژوهش، مدل ریاضی ربات استخراج شده است. مدل در نرم افزار متلب شبیه سازی و یک کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتقی (PID) روی آن اعمال شده است و در نهایت نمونه واقعی ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. به طور کلی از لحاظ شیوه‌های مختلف کنترل ربات تعادلی می‌توان کارهای انجام شده را از نظر نوع کنترل کننده در سه دسته کلی قرار داد. اما پیش از بررسی کنترل ربات‌ها، نخست اشاره‌ای مختصر به پژوهش‌های انجام شده بر روی دینامیک این سیستم‌ها می‌گردد و سپس بحث‌های کنترلی به طور مفصل‌تر بیان می‌شود. معادلات دینامیکی ربات‌های تعادلی دوچرخ به دلیل توانایی حرکت چرخ‌ها بر روی صفحه افقی و ناپایداری ذاتی بدنه بسیار وابسته و غیرخطی است.

تاکنون برای مدل‌سازی دینامیکی این سیستم‌ها تحقیقات بسیاری انجام شده است. گریسر و همکاران به مدل‌سازی دینامیکی سیستم به روش نیوتن اولی‌ر پرداخته‌اند و برای طراحی کنترلر معادلات بدست آمده را حول نقطه کاری خطی کرده‌اند [۶]. سلمو و آنجل [۷] معادلات دینامیکی ربات را با در نظر گرفتن زوایای پیچ و دوران به عنوان متغیرهای حالت بدست آورده‌اند. گوهر و همکاران با استفاده از روش لاگرانژ معادلات دینامیکی ربات تعادلی دوچرخ را محاسبه و درجات آزادی اضافی را نسبت به کار محققان پیشین به سیستم اضافه کردند [۸].

غفاری و همکاران [۹] معادلات دینامیکی ربات تعادلی دوچرخ را یکبار دیگر بدست آورده و آن را معادلات بهبودیافته نامیدند، نویسندگان معادلات خود را با معادلات کیم مقایسه نموده و نشان دادند که در معادلات بهبودیافته ترمی وجود دارد که در معادلات کیم و سایر محققان نیامده است. وجود این ترم غیرخطی و وابسته که ترم بهبودیافته نامیده شده، و همچنین صحت معادلات دینامیکی، با بدست آوردن معادلات با دو روش کین و لاگرانژ نشان داده شده است. از لحاظ کنترلی نیز تحقیقات بسیاری نیز بر روی مسأله کنترل و پایداری این دسته از ربات‌ها صورت گرفته است. در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده مدل و کنترل کننده به صورت خطی در نظر گرفته شده است.

در برخی پژوهش‌های دیگر تقریب‌های خطی برای مدل با توجه به غیرخطی زیاد سیستم به کار نمی‌رود و کنترل کننده غیرخطی طراحی می‌گردد. در برخی دیگر مقالات کنترل کننده‌های هوشمند برای ربات پیشنهاد گردیده است. لی و همکاران معادلات دینامیکی را از دو روش لاگرانژ و کین به دست آورده‌اند [۱۰] و مقایسه‌ای انجام دادند. این بررسی از نقاط قوت این مقاله است که در پژوهش‌های دیگر کمتر دیده شده است. سپس معادلات دینامیکی حول نقطه تعادل خطی شده است و برای حفظ تعادل ربات یک کنترل کننده LQR طراحی شده است.

نووی و همکارانش [۱۱] یک کنترل کننده مد لغزشی مرتبه کامل را ارائه نموده‌اند. در این مقاله معادلات دینامیکی بعد از خطی سازی به فضای حالت برده شده و یک کنترل کننده مقاوم برای پایدارسازی و یک کنترل کننده تناسبی برای حذف اغتشاش طراحی شده است. آن‌ها همینطور [۱۲] اقدام به طراحی یک کنترل کننده تناسبی-مشتقی مد لغزشی، که در آن ردیابی مسیر نسبت به کنترل کننده مد لغزشی معمولی بهبود یافته است؛ نموده‌اند. در هر دو مقاله خطی سازی، عدم ساخت ربات و نداشتن نتایج تجربی را می‌توان از کاستی‌های این پژوهش‌ها به شمار آورد.

هوانگ و همکاران [۱۳] یک ربات تعادلی را به منظور حرکت بر روی سطوح شیبدار بررسی کرده‌اند. هرچند این کنترل کننده تعادل ربات را به خوبی حفظ می‌کند، اما با خطای ردیابی در کنترل سرعت ربات مواجه است. از دیگر نقایص این مقاله می‌توان به این مطلب اشاره کرد که مدل دینامیکی سیستم تنها دارای دو درجه آزادی، زاویه حفظ تعادل و موقعیت ربات می‌باشد و از زاویه چرخش ربات صرف نظر شده است. کاسور و همکارانش از کنترل کننده‌های غیرخطی بر پایه تابع لیاپانوف در تحقیقات خود [۱۴] و [۱۵] استفاده نمودند. در انتها طرح پیشنهادی آن‌ها با یک کنترل کننده LQR مقایسه شده است.

چینگ و همکاران [۱۶] برای دستیابی به حفظ تعادل ربات و کنترل زاویه چرخش از کنترل تطبیقی به همراه شبکه عصبی RBF استفاده شده است. کنترل کننده پیشنهادی از تجزیه سیستم ربات به دو زیرسیستم زاویه چرخش ربات و حرکت آونگ معکوس تشکیل شده است.

در این مقاله نیز مدل دینامیکی سیستم خطی سازی شده است. پژوهش‌های دیگری نیز در این رابطه انجام شده است. کانگ برای کنترل ربات تعادلی، یک کنترلر مود لغزشی مرتبه کامل ارائه داده است. وی معادلات دینامیکی را بعد از خطی سازی به فرم فضای حالت برده و یک کنترلر مقاوم برای پایدارسازی و حذف اغتشاشات طراحی کرد [۱۷]. پایداری در قبال اغتشاشات از ویژگی‌های این پژوهش به شمار می‌رود.

لین یک روش تطبیقی مقاوم برای کنترل زاویه انحراف ربات از وضعیت تعادل ارائه داد. در پژوهش وی معادلات دینامیکی بعد از ساده‌سازی در دو قسمت مجزا از هم نوشته شده و برای هر قسمت کنترلر مقاوم تطبیقی طراحی شده است و پارامترهای قوانین کنترلی براساس تئوری پایداری لیاپانوف به دست آمده است [۱۸]. سو [۱۹] یک ساختار کنترلی هوشمند برای کنترل ربات تعادلی خود ارائه داد. در الگوریتم کنترلی پیشنهادی وی از یک استنتاج گر فازی به عنوان کنترلر اصلی و از یک شبکه عصبی به عنوان کنترلر کمکی استفاده شده است. رن و همکاران [۲۰] از کنترلی که ترکیبی از یک کنترلر تناسبی - انتگرالی - مشتقی و یک شبکه عصبی است برای کنترل ربات خود استفاده کرده‌اند. در کنترلر ارائه شده ضرایب به وسیله یک شبکه عصبی تنظیم می‌شود.

این سیستم کنترل حرکت، وسایل دوچرخ را پایدار و دستورات حرکتی مطلوب را دنبال می‌کند. موسکینیجی و توورکین [۲۱] با استفاده از کنترلر پایدارساز خطی پیشنهاد یک کنترلر فازی برای تاب خوردن به بالا نمودند. این برنامه و روش فازی عملکرد بهتری را در قیاس با استراتژی کنترل انرژی نمایش داد؛ اما از نقایص مقاله این است که پایداری کنترلر پایدارساز بحث نشده است.

کیانگی و همکارانش [۲۲] الگوریتم کنترل مسیر دوبعدی برای ربات پیشنهاد نموده و بر روی یک ربات کنترل خودکار اجرا نمودند. نقص کار آنها و الگوریتم پیشنهادی در این بود که فقط وقتی ربات آهسته حرکت می‌کند، نتیجه‌بخش است. وانگ و همکارانش [۲۳] با فراهم آوردن یک کنترلر فازی پی دی سی اقدام به کنترل سیستم آونگ معکوس مدل شده تاکاگی سوگونو نمود. با این حال چندین نیرو و قیودی که در سیستم گاری آونگ معکوس واقعی وجود دارد مورد بحث قرار نگرفته است. همچنین این تکنیک کنترل فازی برای بالا آوردن و پایداری پاندول استفاده شده است و مقاومت کنترلر فازی دقت نشده است.

در پژوهشی که اخیراً انجام گرفته است؛ روسه [۲۴] و همکارانش کنترل منطق فازی اعمالی بر پاندول معکوس مستقر روی گاری را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در پژوهش خود ضمن توضیحات درباره غیرکارایی کنترلرهای خطی چون PID برای تضمین پایداری چنین سیستمی به دلیل ماهیت غیرخطی به معرفی منطق فازی و PDC برای کنترل سیستم پاندول معکوس پرداختند. کنترلر به سیستم اعمال و عملکرد آن در نرم افزار متلب نشان داده شده است. کنترلر PDC فازی وابسته به مدل فازی تاکاگی سوگونو به منظور یافتن بهره‌های حلقه پس‌خورد و با استفاده از حل LMI به کار برده شده است. LMI نتایج قابل قبولی برای زوایای مختلف اولیه پاندول نشان می‌دهد.

در این پژوهش طراحی کنترل کننده برای حرکت ربات سگویی روی سطح صاف مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور معادلات دینامیکی سیستم با استفاده از روش کین استخراج می‌شود. سپس برای کنترل و پایدارسازی آن از کنترلر فازی نوع ممدانی استفاده می‌شود. طراحی کنترلر فازی برای چنین سیستمی میتواند به خوبی بر ناپایداری و طبیعت غیرخطی سیستم غلبه کند، اما آن به مقدار زیادی به تجربه انسان خبره وابسته است. بنابراین استفاده از کنترلر بالادست به دلیل تنظیم خودکار و هوشمند می‌تواند به طراحی ساده‌تر این کنترلر کمک کند. کنترل کننده‌ها برای کنترل زاویه بدنه و سرعت آن و با توجه به نقصان عملکرد طراحی می‌گردد. ویژگی کنترل کننده‌های پیشنهادی این است که با وجود نقصان عملکرد و طراحی براساس دینامیک غیرخطی، با واگذاری تنظیم قوانین به کنترلر بالادست، می‌تواند بر ناپایداری‌ها، عدم قطعیت‌ها، طبیعت غیرخطی و اغتشاشات غلبه و هدف کنترلی را به شکل مناسبی برآورده نماید که این امر حاکی از عملکرد مناسب این روش در قیاس با روش‌های ذکر شده می‌باشد.

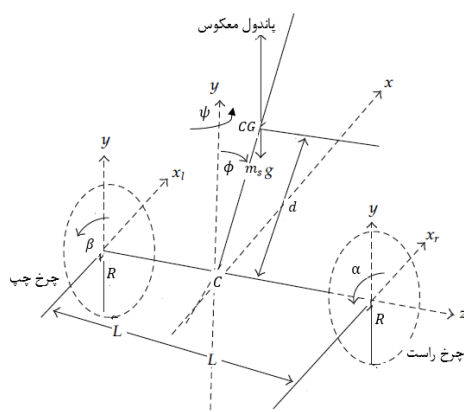
۲- دینامیک مدل

به منظور طراحی و کنترل سیستم، به مدل دینامیکی سیستم نیاز است. همانطور که در شکل شماتیک (۱) نشان داده شده است، سیستم اساساً از یک پلتفرم سوار بر دو چرخ که به طور مستقل از هم توسط دو عملکرد عمل می‌کنند تشکیل شده است. گاری در نظرگیری شده، محدودیتی برای جهت حرکت در صفحه ندارد و هر جهتی توسط زاویه θ قابل دسترسی است.

در تحقیقات قبلی معادلات حرکت پاندول معکوس چرخ دار با استفاده از روش‌های لاگرانژ و نیوتن اوپلر به دست آمده است. در این مقاله از معادلات حرکت دقیق توسعه داده شده توسط کیم بر اساس روش کین استفاده می‌شود. تعاریف برخی از پارامترهای مهم در جدول (۱) لیست شده است. با مراجعه به مرجع [۲۵] سه معادله حرکت به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} (3m_c + m_s)\ddot{x} + m_s d \cos\varphi \ddot{\phi} - m_s d \sin\varphi (\dot{\phi}^2 + \dot{\psi}^2) &= -\frac{\alpha_3 + \beta_3}{R} \\ m_s d \cos\varphi \ddot{x} + (m_s d^2 + I_3)\ddot{\phi} - m_s d^2 \sin\varphi \cos\varphi \dot{\phi}^2 - m_s g d \sin\varphi &= \alpha_3 + \beta_3 + M_r \\ \{(3L^2 + .5R^2)m_c + (m_s d^2 \sin^2\varphi + I_2)\ddot{\psi} + m_s d^2 \sin\varphi \cos\varphi \dot{\psi} \dot{\phi}\} &= L \frac{\alpha_3 - \beta_3}{R} \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن x موقعیت خط مستقیم، φ زاویه انحراف پاندول و ψ زاویه چرخش گاری می‌باشد. همانطور که رابطه (۱) نشان می‌دهد معادلات حرکت غیرخطی و کوپل هستند. حالت شبه تعادل سیستم در زاویه صفر پاندول با راستای قائم است؛ بنابراین می‌تواند فرض شود که زاویه پاندول با راستای قائم و تغییرات آن به اندازه‌ی کافی برای صرفنظر کردن از ترم‌های مرتبه بالا کوچک است.



شکل ۱- شماتیکی از ربات سگوی

جدول ۱- برخی پارامترهای مکانیکی مهم

نماد	توضیحات
m_s	جرم پاندول
d	فاصله C تا C.G
L	نصف فاصله بین دو چرخ
R	شعاع چرخ
m_c	جرم چرخ (گاری)
α	گشتاور عملگر راست
β	گشتاور عملگر چپ

به منظور ساده‌تر شدن معادلات دو تعریف به صورت (۲) ارائه می‌گردد.

$$\begin{aligned} T_{\psi} &= \alpha_3 + \beta_3 \\ T_{\varphi} &= \alpha_3 - \beta_3 \end{aligned} \quad (2)$$

تاکنون تعداد قابل توجهی مقاله برای طراحی کنترلر پاندول معکوس دو چرخ ارائه شده است. برای یک پاندول معکوس معمولی، x و φ پارامترهای متداولی هستند که بایستی کنترل شوند. اما در مقاله حاضر این کنترلر با توجه به توضیحات قبلی برای \dot{x} و $\dot{\varphi}$ انجام شده و با توجه به دینامیک غیرخطی سیستم استفاده از کنترلر فازی مناسب به نظر می‌رسد. کنترلر بالادست ناظر فازی نیز برای عملکرد بهتر و تطبیقی کردن کنترلر اعمال می‌گردد. این نوع روش کنترلی موسوم به کنترل یادگیری مرجعی مدل فازی (FMRLC) می‌باشد. در این تحقیق تنها خطی سازی صورت گرفته در زاویه پاندول φ می‌باشد که به دلیل زاویه مطلوب نزدیک صفر فرض معقول و مناسبی است.

برخی ترم‌های غیرخطی را نمی‌توان به سادگی خطی‌سازی نمود چون شرایط و فرضیات مورد نیاز برای خطی سازی را دارا نیستند؛ بنابراین سایر موارد و معادلات به همان صورت غیرخطی و کوبله، کاملاً دقیق در نظر گرفته شده است. در ادامه با مقدمه‌ای راجع به این روش، طراحی کنترلر آغاز می‌شود. در FMRLC نیازهای تکنیکی و رفتار ورودی-خروجی مطلوب سیستم حلقه بسته توسط دینامیک مربوطه مدل مرجع داده شده است. بنابراین کار اصلی برای طراحی چنین کنترلی این است که کمترین خطا بین مدل مرجع و خروجی پلنت علی‌رغم عدم قطعیت‌ها و تغییرات پارامترهای سیستم و شرایط کاری وجود داشته باشد. طراحی کنترلر با استفاده از تکنیک‌های کانونشنال (مرسوم و قدیمی) برای سیستم‌های با دینامیک‌های غیرخطی و مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها اغلب اوقات سخت است. کنترل فازی یک راهبرد عملی برای انواع کاربردهای کنترلی چالش برانگیز است زیرا این روش یک روش ساده و مناسب برای ساخت کنترلرهای غیرخطی با استفاده از اطلاعات ابتکاری است. با این حال برخی از مسائل کنترلی عملی با مشکلاتی نظیر عدم قطعیت‌های مدل یا مشکلات در انتخاب برخی از پارامترهای کنترلر فازی می‌شوند. در نتیجه نیاز به راهی برای تنظیم خودکار کنترلر فازی که بتواند خودش را در شرایط کاری مختلف وفق دهد؛ به نظر می‌رسد. در نتیجه در این مقاله از اعمال این الگوریتم (کنترل تطبیقی مدل مرجع) استفاده شده است.

۳- یادگیری مرجعی مدل فازی (FMRLC)

در این قسمت توضیح مختصری راجع به کنترل یادگیری مرجعی مدل فازی و شماتیک آن در قالب دیاگرام بلوکی ارائه می‌گردد. دیاگرام بلوکی FMRLC در شکل (۲) نشان داده شده است. با دقت در شکل مشخص می‌شود که FMRLC دارای چهار جزء اصلی است: پلنت، کنترلر فازی، مدل مرجع و مکانیزم یادگیری (تطبیق). FMRLC اطلاعات را از سیستم کنترل فازی مشاهده می‌کند. سپس از اطلاعات عددی اندازه‌گیری شده، عملکرد فعلی سیستم کنترل فازی را بررسی و به طور خودکار کنترلر فازی را تنظیم می‌کند به گونه‌ای که سیستم حلقه بسته شبیه مدل مرجع داده شده رفتار می‌کند. به طور کلی، حلقه کنترلر فازی (پایین شکل (۲)) با تنظیم ورودی باعث می‌شود $y(kT)$ که $r(kT)$ را تعقیب کند و حلقه کنترل یادگیری (بالای شکل (۲)) منجر به تعقیب خروجی پلنت از خروجی مدل مرجع با تنظیم پارامترهای کنترلر فازی می‌شود.

در این بخش توسعه روش کنترل یادگیری مرجعی مدل فازی هنگامیکه روی پاندول معکوس اعمال می‌شود؛ بحث می‌گردد. الگوریتم این روش در [۲۶] معرفی شده است. سیستم مورد مطالعه ما دارای دو کنترلر فازی - همانطور که قبلاً شرح داده شد- با ورودی‌های خطا و مشتق خطا برای هر کدام می‌باشد. خروجی کنترلر فازی اول T_{ψ} و خروجی کنترلر فازی دوم $T_{\dot{\psi}}$ می‌باشد. FMRLC به عنوان یک ناظر و روش تطبیقی، کنترلر فازی را برای رسیدن به زاویه ψ و سرعت \dot{x} تنظیم می‌کند. مدل مرجع با نماد ψ_m و \dot{x}_m با ورودی‌های ψ_r و \dot{x}_r برای پیگیری و تعقیب شدن توسط سیستم معرفی می‌گردد.

در این مقاله از مدل مرتبه ۱ استفاده شده است و سیستم پاندول معکوس به عنوان یک سیستم پیوسته در زمان در نظر گرفته شده است که توسط روش FMRLC کنترل می‌گردد. طبق کد ویژه نوشته شده در نرم افزار متلب و نتایج گرفته شده تطبیق مراکز توابع عضویت خروجی پایین دست کاملاً به کنترلر بالادست سپرده شده و در ابتدا تمامی مراکز توابع عضویت توسط ما به سادگی روی صفر قرار داده می‌شود. اثر تغییر پارامترهای پلنت روی عملکرد سیستم و اینکه چگونه FMRLC می‌تواند هنگام تغییر شرایط برای بهبود عملکرد تطبیق کند، نشان داده شده است. همچنین اثر نویز سنسورها و اغتشاشات پلنت (به طور مثال برخورد باد به یک طرف سیستم) بررسی و تطبیقی بودن روش نشان داده شده است.

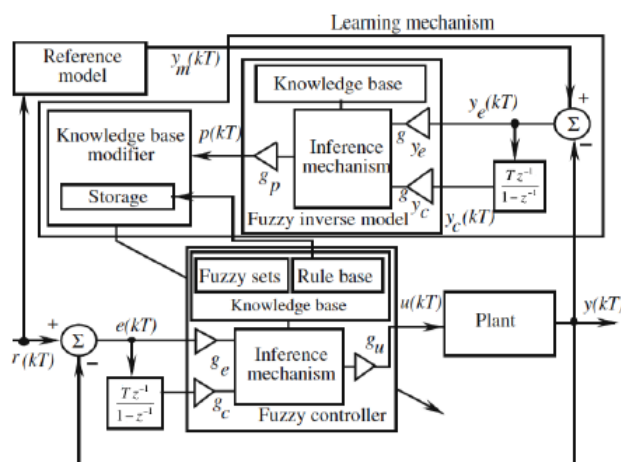
۳-۱- کنترل فازی مستقیم

طراحی کنترلر فازی مستقیم به انتخاب و پردازش ورودی‌ها و خروجی‌های کنترلر و طراحی چهار مولفه (قانون‌ها، موتور استنتاج، فازی‌سازی و غیرفازی‌سازی) خلاصه می‌شود. ورودی‌ها به سیستم فازی شامل خطا و مشتق خطا بوده و به صورت رابطه (۳) در نظر گرفته می‌شود (البته برای هر کدام جداگانه FMRLC طراحی شده است).

$$\begin{aligned} e_1(kT) &= \psi_r - \psi \\ e_2(kT) &= \dot{x}_r - \dot{x} \end{aligned} \quad (3)$$

همچنین مشتق خطا به صورت (۴) تعریف می‌شود.

$$c(kT) = (e(kT) - e(kT-T))/T \quad (4)$$



شکل ۲- دیاگرام بلوکی یادگیری مرجعی مدل فازی

متغیرهای خروجی یعنی گشتاورهای اعمالی را می‌توان به صورت (۵) در نظر گرفت.

$$\begin{aligned} T_{\psi} &= \alpha_3 + \beta_3 \\ T_{\varphi} &= \alpha_3 - \beta_3 \end{aligned} \quad (5)$$

دامنه و بازه متغیرها، در محدوده $[-1 \ 1]$ نرمالیزه شده و ضریب بهره‌های مقیاس بندی (g_e, g_c, g_u) برای نرمال کردن استفاده می‌شود. یک انتخاب استاندارد برای توابع عضویت با ۱۱ تابع عضویت مثلثی شکل که با هم تداخل دارند؛ برای متغیرهای فازی ورودی و خروجی در نظر گرفته شده و نیز ۱۲۱ قانون برای هر کنترلر نوشته شده است. توابع عضویت مثلثی نرمالیزه شده در شکل (۳) نشان داده شده است.

در این مقاله از روش COG برای غیرفازی‌سازی استفاده شده است.

لازم به ذکر است در پژوهش حاضر از جعبه ابزار فازی نرم افزار متلب استفاده نشده است و توابع عضویت به صورت نشان داده شده توسط مراکز و با در نظر گیری پهنای 0.4 کدنویسی شده است. نمونه توابع عضویت و مراکز آن‌ها به صورت (۶) کدنویسی می‌گردد:

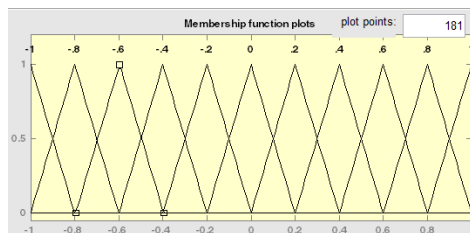
$$\begin{aligned} ce &= [-1 \ -0.8 \ -0.6 \ -0.4 \ -0.2 \ 0 \ 0.2 \ 0.4 \ 0.6 \ 0.8 \ 1] * (1/g_e) \\ cc &= [-1 \ -0.8 \ -0.6 \ -0.4 \ -0.2 \ 0 \ 0.2 \ 0.4 \ 0.6 \ 0.8 \ 1] * (1/g_c) \end{aligned} \quad (6)$$

ce به معنای مراکز توابع عضویت خطا و cc به معنای مراکز توابع عضویت مشتق خطاست. کنترلر فازی قانون‌های ساخته شده از نوع مجموعه اگر-آنگاه را به شکل نمونه زیر اعمال می‌کند.

«اگر e_i ، E_i^j و e_{c_i} ، C_i^k باشد آن‌گاه u_i را U_i^m قرار بده»

این قانون‌ها به طور ابتکاری و هیورستیک و براساس دانش فرد خبره تعیین می‌شوند. نمونه‌ای از قوانین در ادامه آورده می‌شود؛ این قوانین به صورت ماتریس (۷) داده شده است.

```
rules=[1  1  1  1  1  1  0.8  0.6  0.3  0.1  0;
1  1  1  1  1  0.8  0.6  0.3  0.1  0  -0.1;
1  1  1  1  0.8  0.6  0.3  0.1  0  -0.1  -0.3;
1  1  1  0.8  0.6  0.3  0.1  0  -0.1  -0.3  -0.6;
1  1  0.8  0.6  0.3  0.1  0  -0.1  -0.3  -0.6  -0.8;
1  0.8  0.6  0.3  0.1  0  -0.1  -0.3  -0.6  -0.8  -1;
0.8  0.6  0.3  0.1  0  -0.1  -0.3  -0.6  -0.8  -1  -1;
0.6  0.3  0.1  0  -0.1  -0.3  -0.6  -0.8  -1  -1  -1;
0.3  0.1  0  -0.1  -0.3  -0.6  -0.8  -1  -1  -1  -1;
0.1  0  -0.1  -0.3  -0.6  -0.8  -1  -1  -1  -1  -1;
0  -0.1  -0.3  -0.6  -0.8  -1  -1  -1  -1  -1  -1]*gf;
```



شکل ۳- نمونه توابع عضویت مثلثی

ضریب gf برای تغییر مراکز توابع عضویت خروجی و بررسی عملکرد تطبیقی استفاده می‌شود. به عنوان مثال مانند شکل (۴) می‌توان همه مراکز را ابتدا روی صفر قرار داده و به دلیل تطبیقی بودن الگوریتم، حساسیتی روی تعیین این ضرایب نشان داده نمی‌شود و در پژوهش حاضر نیز اینگونه قرار داده شده است.

با روش‌های طراحی و در نظر گرفتن محدودیت‌ها بهره‌ها به صورت (۸) به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} g_{e_1} &= 1/2\pi, g_{c_1} = 50, g_{u_1} = 1.5 \\ g_{e_2} &= 1/5, g_{c_2} = 100, g_{u_2} = 1.3 \end{aligned} \quad (8)$$

۳-۲- کنترل فازی تطبیقی (مدل معکوس فازی)

در این بخش، به طراحی و اعمال کنترل یادگیری مرجعی مدل فازی (FMRLC) که به صورت آنلاین مراکز توابع عضویت خروجی معرفی شده در مرحله قبل را به صورت تطبیقی تنظیم می‌کند؛ پرداخته می‌شود.

FMRLC از مکانیزم یادگیری استفاده می‌کند که

۱- اطلاعات را از سیستم کنترل فازی یعنی $r(KT)$ و $y(KT)$ مشاهده می‌کند.

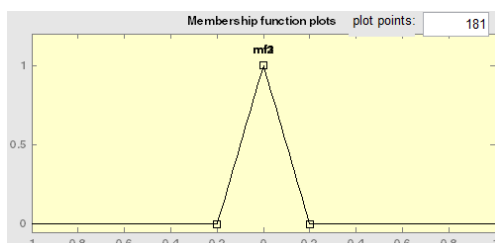
۲- عملکرد فعلی آن را مشخص کند.

۳- به طور خودکار سنتز و یا تنظیم کنترلر فازی را انجام دهد به گونه‌ای که برخی اهداف عملکردی از پیش تعیین شده محقق شود [۲۶].

۳-۳- مدل مرجع

به طور کلی، مدل مرجع که عملکرد مطلوب را توصیف می‌کند، می‌تواند هر شکلی داشته باشد (معادله خطی یا غیرخطی، تابع تبدیل، مقادیر عددی و ...). در پژوهش حاضر توابع تبدیل زیر به عنوان مدل مرجع در نظر گرفته شد.

$$\begin{aligned} \frac{\psi}{\psi_r} &= \frac{k_i}{s + a_i} \\ \frac{\dot{x}}{\dot{x}_r} &= \frac{k_i}{s + a_i} \end{aligned} \quad (9)$$



شکل ۴- مراکز توابع عضویت خروجی همه روی صفر

تبدیل دوخطی برای یافتن معادل گسسته تابع تبدیل زمان پیوسته با در نظر گرفتن $S = \frac{2}{T} \left(\frac{z-1}{z+1} \right)$ استفاده شده است. همچنین ضرایب k_i و a_i را به صورت (۱۰) در نظر گرفته می‌شود.

$$k_1 = 1/2, \quad a_1 = 1/2 \quad (10)$$

$$k_2 = 1/2, \quad a_2 = 1/2$$

سیستم فازی تطبیقی شبیه یک کنترلر دوم عمل می‌کند، که قوانین را با عمل روی متغیر خروجی آپدیت می‌کند. خروجی مدل فازی معکوس یک فاکتور تطبیق به نام $P(kT)$ که با استفاده از اصلاحگر قوانین اقدام به تنظیم مراکز توابع عضویت خروجی می‌کند، است. تطبیق هنگامی که $P(kT)$ خیلی کوچک شود متوقف می‌شود که برای این کار معیار 0.02 فاصله در کد متلب در نظر گرفته شده است. کنترلر فازی استفاده شده در ساختار FMRLC مشابه مورد توضیح داده شده در بخش قبل است. مدل معکوس فازی ساختاری شبیه کنترلر (قانون‌ها، توابع عضویت، ماشین استنتاج، فازی سازی و غیرفازی سازی) را داراست؛ و مدل مرجع شبیه مسیر مرجع است. تنها تفاوت قابل توجه بین دو سیستم فازی در مقادیر بهره‌های نرمال شده (g_{ye}, g_{yc}, g_p) است.

ورودی مدل معکوس فازی به صورت (۱۱)

$$\begin{aligned} ye(kT) &= ym(kT) - y(kT) = r(kT) - y(kT) \\ yc(kT) &= (ye(kT) - y(kT)) / T \end{aligned} \quad (11)$$

و متغیر خروجی فاکتور تطبیق $p(kT)$ است.

نمونه ماتریس قوانین برای مدل معکوس فازی و کنترلر بالادست به صورت زیر است :

$$\text{inverrules} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.8 & 0.6 & 0.4 & 0.2 & 0; \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.8 & 0.6 & 0.4 & 0.2 & 0 & -0.2; \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0.8 & 0.6 & 0.4 & 0.2 & 0 & -0.2 & -0.4; \\ 1 & 1 & 0.8 & 0.6 & 0.4 & 0.2 & 0 & -0.2 & -0.4 & -0.6 & -0.8; \\ 1 & 0.8 & 0.6 & 0.4 & 0.2 & 0 & -0.2 & -0.4 & -0.6 & -0.8 & -1; \\ 0.8 & 0.6 & 0.4 & 0.2 & 0 & -0.2 & -0.4 & -0.6 & -0.8 & -1 & -1; \\ 0.6 & 0.4 & 0.2 & 0 & -0.2 & -0.4 & -0.6 & -0.8 & -1 & -1 & -1; \\ 0.4 & 0.2 & 0 & -0.2 & -0.4 & -0.6 & -0.8 & -1 & -1 & -1 & -1; \\ 0.2 & 0 & -0.2 & -0.4 & -0.6 & -0.8 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1; \\ 0 & -0.2 & -0.4 & -0.6 & -0.8 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} *gp; \quad (12)$$

gp بهره برای خروجی مدل معکوس است. این ضریب وظیفه و مکانیزم یادگیری را برعهده دارد یعنی به نوعی این ضریب بهره تطبیقی می‌باشد. مراکز توابع عضویت (bj) در زمان kT مقدار زیر را خواهند داشت.

$$bj(kT) = bj(kT - T) + p(kT) \quad (13)$$

در ادامه برای خطا و مشتق خطای مدل معکوس به مانند قبل تعداد ۱۱ عدد تابع عضویت در نظر گرفته و با ضرایبی مقیاس بندی می‌شود. نمونه‌ی مراکز توابع عضویت مدل معکوس برای ورودی خطا و برای مکانیزم یادگیری به صورت (۱۴) می‌باشد.

$$cye = [-1 \ -0.8 \ -0.6 \ -0.4 \ -0.2 \ 0 \ 0.2 \ 0.4 \ 0.6 \ 0.8 \ 1] * (1/g_{ye}) \quad (14)$$

Rules (k,l) مراکز خروجی قانون است و p که خروجی مدل معکوس می باشد برای تطبیقی بودن محاسبه و برای اصلاح مراکز توابع عضویت خروجی اضافه شده است.

$$rules(k,l) = rules(k,l) + p(index) \quad (15)$$

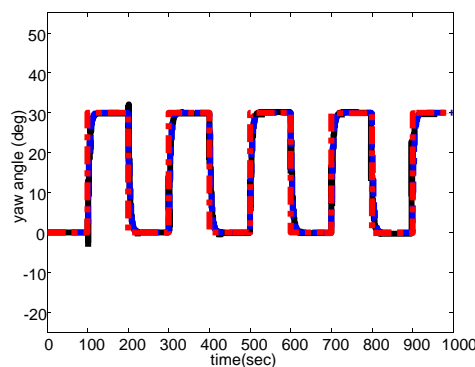
۴- نتایج شبیه سازی

در این بخش نتایج شبیه سازی برای تأیید موثر بودن روش کنترلی پیشنهادی ارائه شده است. تکنیک رانگ گوتا برای شبیه سازی سیستم و حل معادلات حرکت استفاده شده است که برای سیستم مورد نظر، از دقت کافی برخوردار است. پارامترهای پاندول معکوس چرخ دار به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

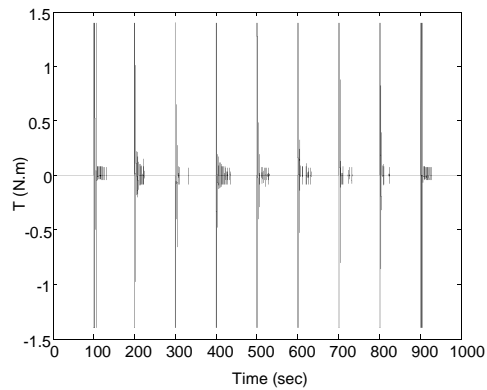
$$\begin{aligned} m_s &= 1 \text{ kg} \\ d &= 1 \text{ m} \\ L &= 0.35 \text{ m} \\ R &= 0.15 \text{ m} \\ m_c &= 1 \text{ kg} \end{aligned} \quad (16)$$

به طور کلی رنگ قرمز در نمودارها نمایانگر دستور ورودی، رنگ آبی پاسخ مدل مرجع مرتبه ۱ و رنگ مشکی پاسخ سیستم را نشان می دهد. دقت شود منظور از نمودارهای خروجی کنترلر بالادست همان انجام عمل تطبیق است که مقادیر غیر صفر در این نمودارها عمل تطبیق را نشان می دهد. نخست نمودارهای کنترل تغییر زاویه گاری در حالات با و بدون نویز و اغتشاش ارائه می شود. این بررسی در حالت بدون نویز در اشکال (۵) و (۶) و (۷) نشان داده شده است.

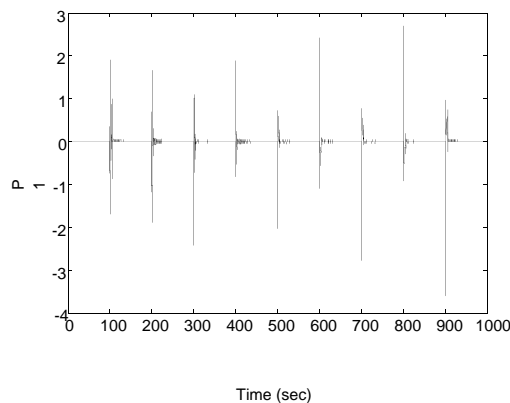
شکل (۵) نشان می دهد که پاسخ سیستم با اعمال گشتاور مناسب (شکل (۶)) پس از مدت زمان مناسبی به مطلوب خود رسیده و به طور کامل دستور ورودی را دنبال می کند. شکل (۷) بیانگر انجام عمل تطبیق توسط خروجی کنترلر بالادست می باشد. پس از بررسی کارایی روش در حالتی که نویزی به سیستم وارد نمی شود، روش پیشنهادی روی سیستم با وجود نویز نیز انجام می گیرد.



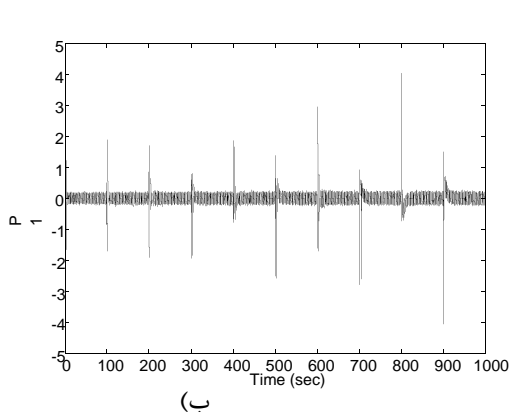
شکل ۵- زاویه یارو گاری بر حسب زمان بدون نویز



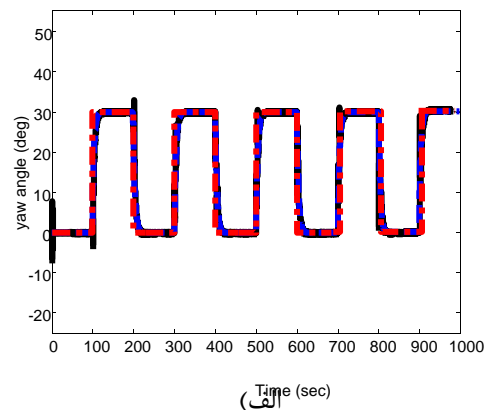
شکل ۶- گشتاور اعمالی بر حسب زمان بدون نویز



شکل ۷- خروجی کنترلر بالادست (مدل معکوس فازی) برای زاویه یاو بر حسب زمان بدون نویز



(ب)



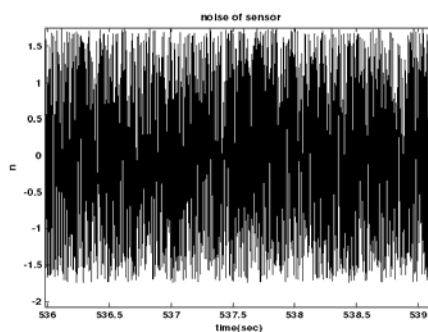
(الف)

شکل ۸- الف) زاویه یاو گاری بر حسب زمان با نویز معمولی (ب) خروجی مدل معکوس فازی

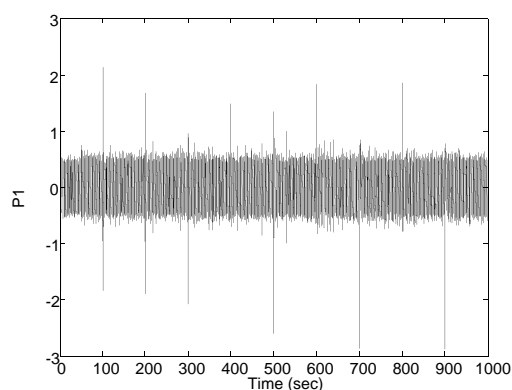
برای زاویه یاو بر حسب زمان با نویز معمولی

شکل (۸) نشان می‌دهد که هنگام اعمال نویز به سیستم نیز عمل تطبیق و تعقیب مسیر زاویه یاو گاری توسط سیستم به خوبی صورت می‌گیرد؛ لیکن به دلیل نویز وارده به سیستم و فراجهدش بیشتر در گام‌های آغازین، تعقیب در مدت زمان بیشتری نسبت به حالت بدون نویز انجام می‌گیرد که امری طبیعی است. در ادامه بررسی با افزایش شدت نویز اعمالی (۱۰ برابر کردن مقدار نویز (شکل (۹)) نیز نتایج شکل (۱۰) حاکی از عملکرد مناسب روش است. در شکل (۱۱) کارآمدی روش با حضور اغتشاش انجام می‌شود.

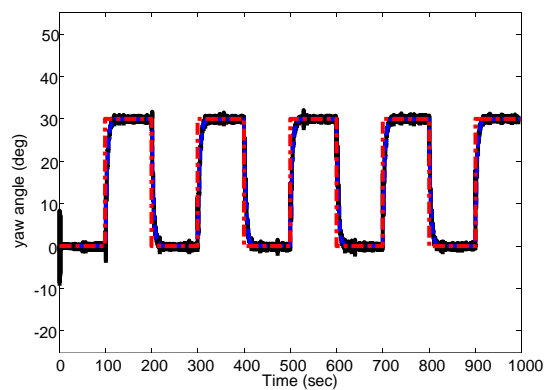
بدین منظور اغتشاشی از خارج سیستم به شکل سینوسی (شکل (۱۲)) به طور مثال توسط باد به سیستم وارد می‌گردد. نتایج شکل (۱۱) مقاوم بودن روش در مقابل اغتشاشات را نیز به وضوح نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که فراجهدش زیادی حتی با گذشت چندین گام در عملکرد تعقیب به دلیل وجود اغتشاشات وجود دارد اما در نهایت تعقیب به شکل مناسبی صورت گرفته است. در ادامه، فرامین حرکتی به اشکال مختلف برای بررسی عملکرد اجرا می‌گردد.



شکل ۹- نویز اعمالی



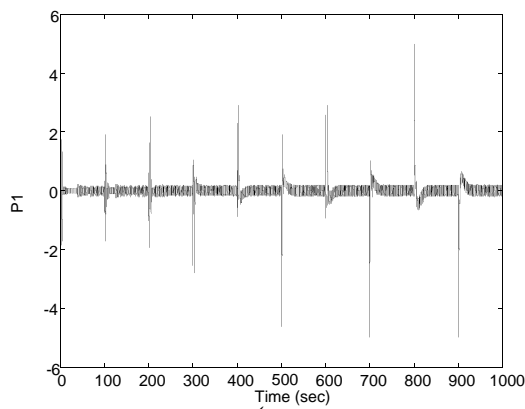
(ب)



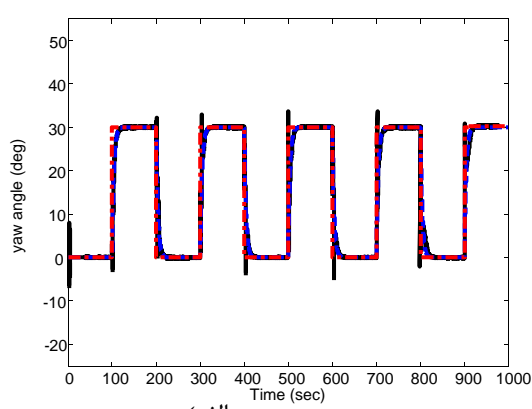
(الف)

شکل ۱۰- الف) زاویه یارگاری برحسب زمان با نویز قوی

ب) خروجی مدل معکوس فازی برای زاویه یار بر حسب زمان با نویز قوی



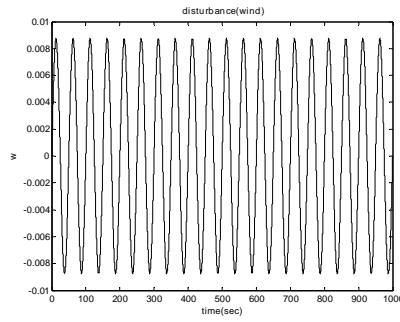
(ب)



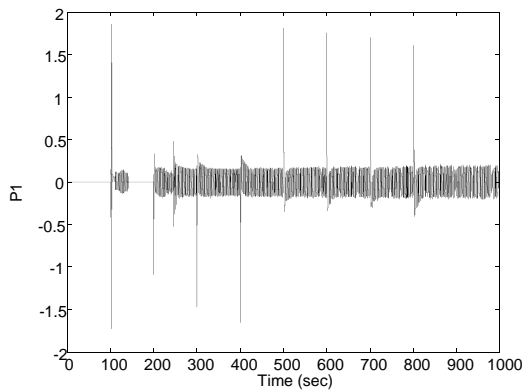
(الف)

شکل ۱۱- الف) زاویه یارگاری برحسب زمان با اغتشاش

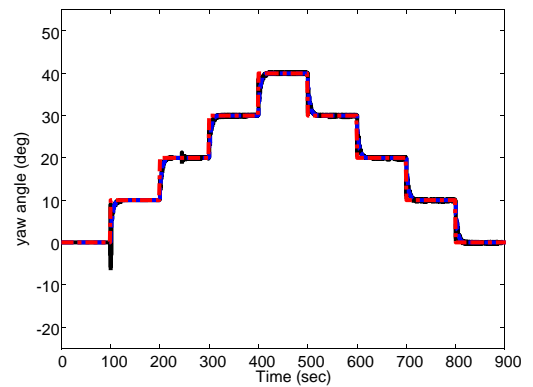
ب) خروجی مدل معکوس فازی برای زاویه یار بر حسب زمان با اغتشاش



شکل ۱۲- اغتشاش اعمالی مثلا باد



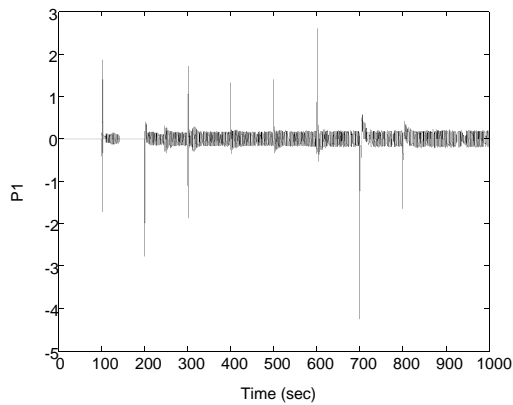
(ب)



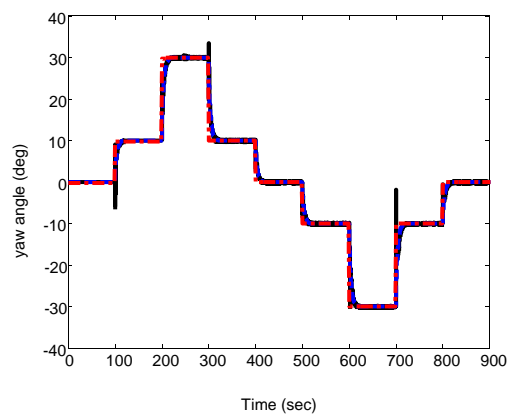
(الف)

شکل ۱۳- الف) تغییر زاویه یاو گاری به طور پیوسته برحسب زمان

ب) خروجی مدل معکوس فازی برای تغییر پیوسته زاویه یاو



(ب)



(الف)

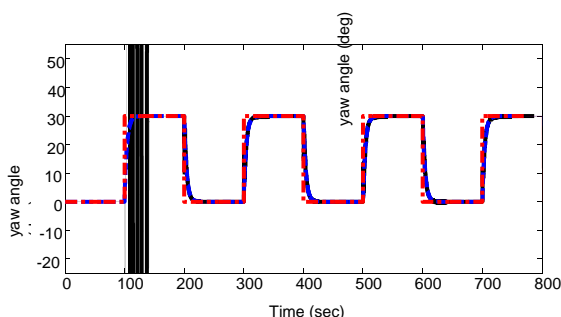
شکل ۱۴- الف) تغییر زاویه مثبت و منفی یاو گاری به طور پیوسته

ب) خروجی مدل معکوس فازی برای تغییر پیوسته مثبت و منفی زاویه یاو

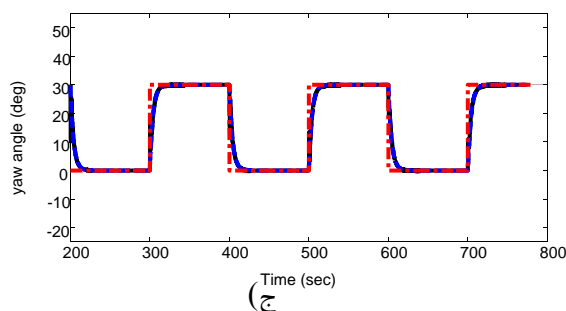
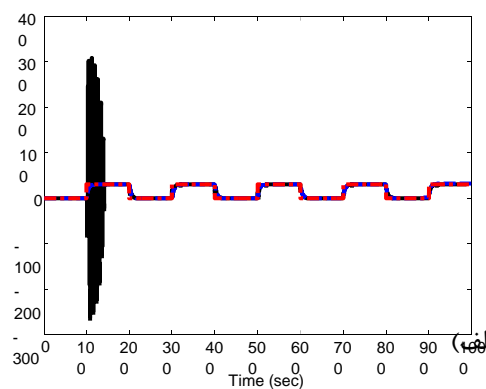
بدین منظور تغییر مکرر و به طور پیوسته زاویه یاو گاری در شکل (۱۳) و کارآیی روش نشان داده شده است. همچنین با در نظرگیری جهتی به عنوان زوایای مثبت، زوایای منفی (خلاف جهت) به صورت نشان داده شده در شکل (۱۴) نیز بررسی و عملکرد و تطبیق در دو حالت زوایای مثبت و منفی نشان داده شده است. یکی از پارامترهای مهم در بررسی عملکرد روش‌های کنترلی، ارزیابی مقاوم بودن روش در برابر عدم قطعیت‌های سیستم می‌باشد. بدین منظور عدم قطعیت‌ها و تغییر دو پارامتر جرم سیستم برای مسئله ربات سگویی بررسی و نتایج حاصل در اشکال (۱۵) و (۱۶) ارائه می‌گردد.

نتایج نشان می‌دهد که به دلیل عدم قطعیت، تعقیب در زمان و گام‌های آغازین بسیار نامناسب است اما با گذشت اندک زمانی به خوبی پیروی صورت می‌گیرد. پس از بررسی‌های انجام شده روی هدایت و کنترل زاویه یاو گاری، هدف دوم کنترلی پژوهش حاضر یعنی تعقیب و تغییر سرعت گاری تحلیل و موارد بررسی تکرار می‌گردد. بدین منظور نمودارهای هدف دوم کنترلی یعنی تغییر سرعت گاری در حالت با و بدون نویز، وجود اغتشاش، تغییرات مکرر و پیوسته سرعت و نیز عدم قطعیت‌ها در ادامه آورده می‌شود.

شکل (۱۷) این بررسی را در حالت بدون نویز نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که برای این هدف کنترلی نیز مانند هدف زاویه یاو گاری، روش پیشنهادی عملکرد مناسبی در تعقیب دستور نشان می‌دهد. در ادامه این بررسی با حضور نویز و اغتشاش که در اشکال (۱۸) و (۱۹) ارائه می‌گردد؛ انجام می‌شود. مقاومت و کارایی روش در این حالات واضح است.

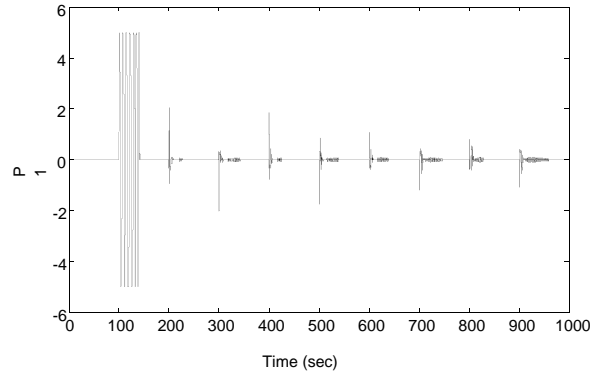


(ب)

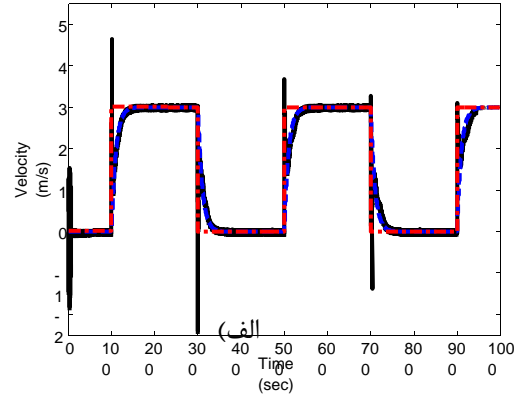
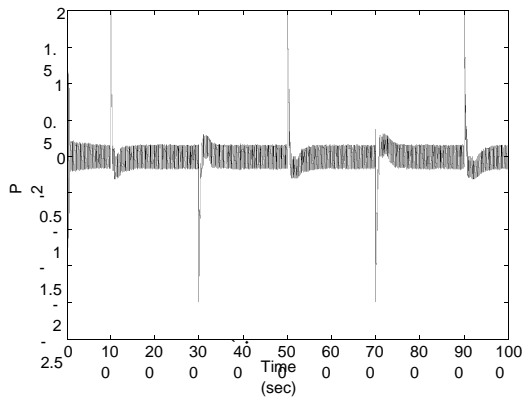


(ج)

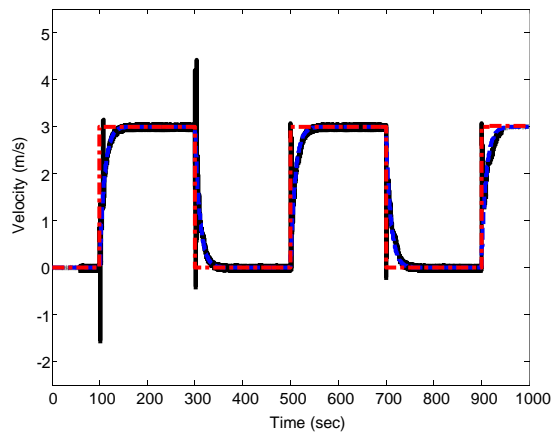
شکل ۱۵- بررسی و اعمال عدم قطعیت برای تغییر زاویه یاو گاری بر حسب زمان
(الف. حالت عادی، ب. نمای نزدیکتر، ج. تغییر بازه)



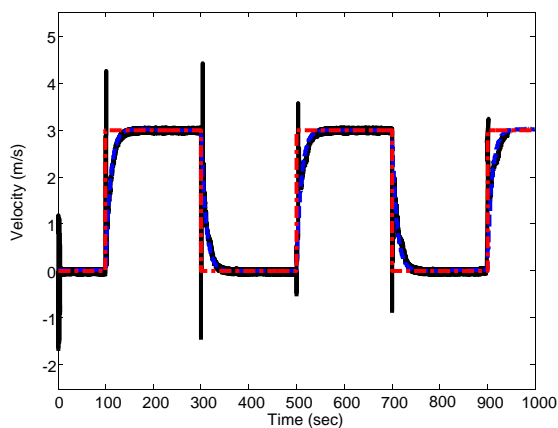
شکل ۱۶- خروجی مدل معکوس فازی برای بررسی عدم قطعیت زاویه یاو بر حسب زمان



شکل ۱۷- الف) سرعت گاری بر حسب زمان بدون نویز

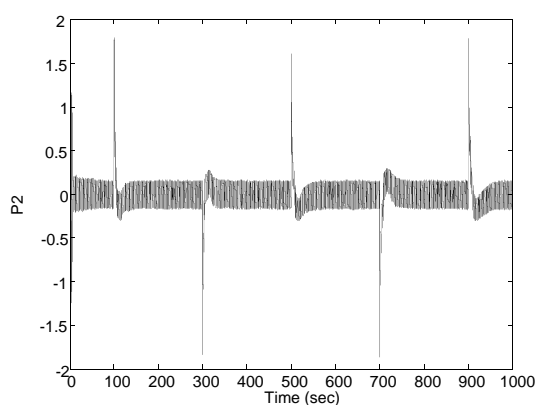


شکل ۱۸- سرعت گاری بر حسب زمان با نویز

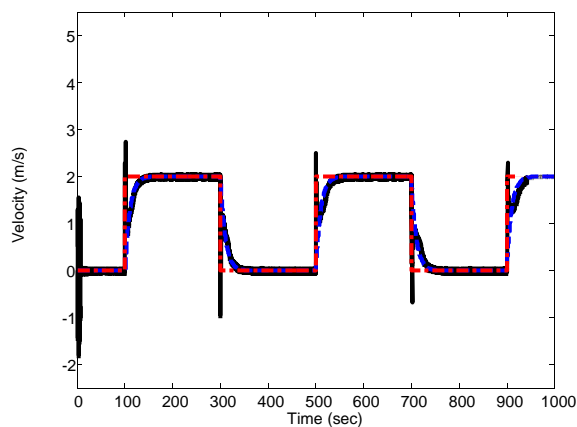


شکل ۱۹- سرعت گاری بر حسب زمان با اغتشاش

در شکل (۲۰) روش کنترلی برای سرعت‌های دیگر گاری و در شکل (۲۱) نیز تغییر سرعت به طور پیوسته و کارآیی روش بررسی شده است.



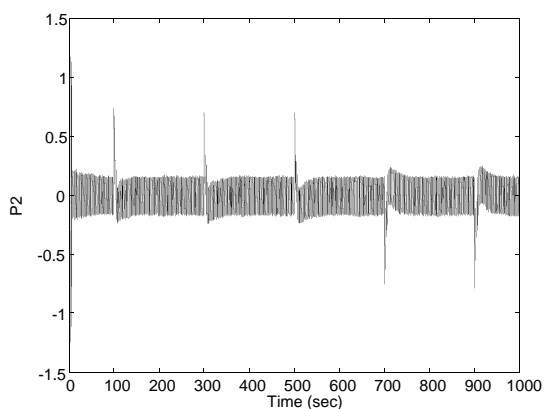
(ب)



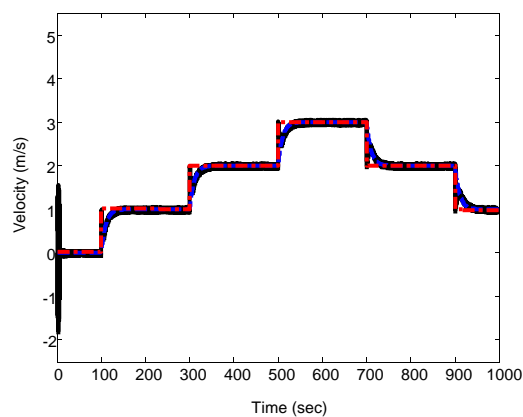
(الف)

شکل ۲۰- الف) بررسی سرعتی دیگر برای گاری بر حسب زمان ب) خروجی مدل معکوس فازی

برای بررسی سرعتی دیگر برای گاری بر حسب زمان



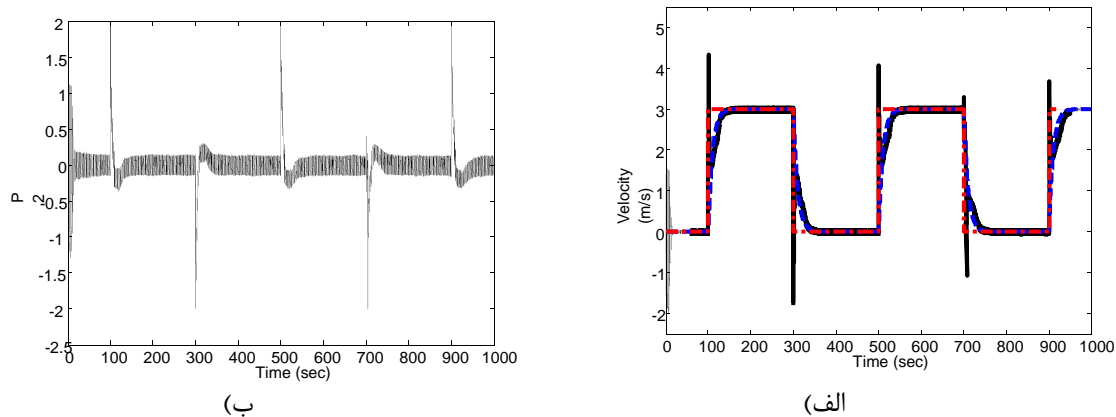
(ب)



(الف)

شکل ۲۱- الف) تغییر سرعت گاری به طور پیوسته بر حسب زمان

ب) خروجی مدل معکوس فازی برای تغییر پیوسته سرعت بر حسب زمان



شکل ۲۲- الف) بررسی و اعمال عدم قطعیت برای تغییر سرعت گاری بر حسب زمان
ب) خروجی مدل معکوس فازی برای بررسی عدم قطعیت سرعت بر حسب زمان

نمودارهای شکل (۲۲)، مقاومت روش در برابر عدم قطعیت‌ها و تغییر دو پارامتر جرم سیستم را نشان می‌دهد. از کلیه نمودارها واضح است که کنترل مورد نظر به خوبی انجام شده است و در اکثر موارد تطبیق و یادگیری و جابه جایی مراکز توابع عضویت خروجی از همان ابتدا به خوبی صورت گرفته است. در مواردی نیز مانند بررسی عدم قطعیت‌ها و یا در حضور اعمال نویز و اغتشاش این یادگیری پس از مدت زمان کمی طولانی‌تر نسبت به حالات قبل اما به طور مناسب و به خوبی صورت گرفته است. در کاربردهای عملی برای چنین مواردی می‌توان ابتدا یادگیری را به صورت افلاین انجام داد و سپس به سیستم اعمال نمود.

۵- جمع بندی

منطق فازی به عنوان یکی از قدرتمندترین و مفیدترین روش‌ها برای کاربردهای براساس اعمال فهم انسان شناخته شده است. این مقاله شماتیکی از کنترل هوشمند سطح بالا و کنترلر غیرخطی تطبیقی (FMRLC) برای ربات سگوی و پاندول معکوس چرخ دار با در نظرگیری دینامیک غیرخطی برای سیستم و نقصان عملگر را ارائه نموده است. در این پژوهش، کنترلر فازی بالادست به عنوان یک کنترلر ناظر اعمال شد که نتایج حاصله عملکرد صحیح و موثر کنترلر فازی به همراه کنترلر بالادست را تأیید می‌کند. نخست نمودارهای کنترل تغییر زاویه گاری در حالت بدون نویز و اغتشاش ارائه گردید. نتایج بیانگر پاسخ مطلوب سیستم با اعمال گشتاور مناسب پس از مدت زمان اندکی در حدود ۲۰۰ ثانیه است که به طور کامل دستور ورودی را دنبال می‌کند. پس از بررسی‌های انجام شده روی هدایت و کنترل زاویه یاو گاری، هدف دوم کنترلی یعنی تعقیب و تغییر سرعت گاری مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور نمودارهای هدف دوم کنترلی یعنی تغییر سرعت گاری در حالت بدون نویز، وجود اغتشاش، تغییرات مکرر و پیوسته سرعت و نیز عدم قطعیت‌ها بررسی و ارائه گردید. نتایج نشان می‌دهد که برای این هدف کنترلی نیز مانند هدف زاویه یاو گاری، روش پیشنهادی عملکرد مناسبی در تعقیب دستور و عمل تطبیق در زمان مناسب حدود ۳۰۰ ثانیه نشان می‌دهد. همچنین این امر نشان داده شد که سیستم کنترل پیشنهادی مقاومت بسیار خوبی در مقابل اغتشاشات و نویزهای وارده به سیستم را داراست و در مقابل عدم قطعیت‌ها و تغییر پارامترهای کنترلی عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهد که به دلیل تطبیقی و فازی بودن روش می‌باشد.

مراجع

- [1] Azizan, H., Jafarinasab, M., Behbahani, S., and Danesh, M., " Fuzzy Control Based on LMI Approach and Fuzzy Interpretation of the Rider Input for Two Wheeled Balancing Human Transporter", IEEE International Conference on Control and Automation, IEEE, Xiamen, China, pp. 192-197, (2010).
- [2] S. Inc, "Simply Moving", Available from: <http://www.segway.com/2015>
- [3] Yamajuji, K., and Kawamura, T., "Postural Control of a Monoaxial Bicycle", Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 7, No. 4, pp. 74–79, (1989).
- [4] Blackwell, T., "How to Build a Self Balancing Scooter", Available from: <http://www.tlb.org/scooter.html/2005>.
- [5] Clark, M., Field, J., Mc Mahon, S., and Phililps, "EDGAR, a Self-balancing Scooter", Final Report, Faculty of Engineering, Computer & Mathematical Sciences, University of Adelaide, (2005).
- [6] Grasser, F., D'Arrigo, A., Colombi, S., and Rufer, A., "JOE: A Mobile, Inverted Pendulum", IEEE Trans. Ind. Electron, Vol. 49, No. 1, pp. 107–114, (2002).
- [7] Salerno, A., and Angeles, J., "On the Nonlinear Controllability of a Quasi Holonomic Mobile Robot", IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, pp. 3379–3384, (2003).
- [8] Goher, K., Ahmad, S., and Tokhi, O.M., "A New Configuration of Two Wheeled Vehicles: Towards a more Workspace and Motion Flexibility", 4th Annual IEEE, System Conference, San Diego, CA, (2010).
- [9] Shariati, A., Ghaffari, A., and Shamekhi, A. H., "Dynamical Modeling of a Two-wheeled Self-balancing Vehicle using Lagrangian Approach", 22th International Conference on Mechanical Engineering, ISME 2013, K.N. Toosi University, Tehran, Iran, (2013).
- [10] Lee, D.Y., Kim, Y.H., Kim, B.S., and Kwak, Y.K., "Dynamics Analysis of Non-holonomic Two Wheeled Inverted Pendulum Robot", Journal of Intelligent and Robotic Systems, Springer, Vol. 44, No. 1, pp. 373-381, (2006).
- [11] Nawawi, S.W., Ahmad, M.N., and Osman, J.H.S., "Control of Two-wheels Inverted Pendulum Mobile Robot using Full Order", Proceedings of the International Conference on Man-Machine Systems, Langkawi, Malaysia, (2006).
- [12] Nawawi, S.W., Ahmad, M.N., Osman, J.H.S., Husain, A.R., and Abdollah, M.F., "Controller Design for Two Wheels Inverted Pendulum Mobile Robot using PISMC", Proceeding of the IEEE/SCORED, Shah Alam, Selangor, Malaysia, pp. 194–199, (2006).
- [13] Huang, J., Guan, Z.H., Matsuno, T., Fukuda, T., and Sekiyama, K., "Sliding-mode Velocity Control of Mobile-wheeled Inverted Pendulum Systems", IEEE Trans. on Robotics, Vol. 26, No. 4, pp. 750-758, (2010).

- [14] Kausar, Z., Stol, K., and Patel, N., "Stability Region Estimation of Statically Unstable Two Wheeled Mobile Robots", Proceeding of the IEEE/ROBIO, Karon Beach, Phuket, Thailand, pp. 1379–1384, (2011).
- [15] Kausar, Z., Stol, K., and Patel, N., "Nonlinear Control Design using Lyapunov Function for Two Wheeled Mobile Robots", Proceeding of the IEEE/ M2VIP, Auckland, New Zealand, pp. 123-128, (2012).
- [16] Ching-Chih, T., Hsu-Chih, H., and Shui-Chun, L., "Adaptive Neural Network Control of a Self-balancing Two-wheeled Scooter", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 4, pp. 1420-1428, (2010).
- [17] Kang, M. T., and Vo, H. D., "Control System Design for a Mobile Inverted Pendulum via Sliding Mode Technique", Proceedings of International Conference on Mechatronics, Kumamoto, Japan, (2007).
- [18] Lin, S.C., Tsai, C.C., and Huang, H.C., "Adaptive Robust Self-balancing and Steering of a Two Wheeled Human Transportation Vehicle", Journal of Intelligent & Robotic Systems, Vol. 62, No. 1, pp. 103-123, (2011).
- [19] Su, K.H., Chen, Y.Y., and Su, S.F., "Design of Neural-fuzzy-based Controller for Two Autonomously Driven Wheeled Robot", Neuro Computing, Vol. 73, No. 13, pp. 2478-2488, (2010).
- [20] Ren, T., and Che, T., "Motion Control for a Two-wheeled Vehicle using a Self-tuning PID Controller, Control Engineering Practice", Vol. 16, No. 3, pp. 365-375, (2008).
- [21] Muskinja, N., and Tovornik, B., "Swinging up and Stabilization of a Real Inverted Pendulum", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 53, No. 2, pp. 631-639, (2006).
- [22] Koyanagi, K., Iida, S., Kimoto, K., and Yuta, S., "A Wheeled Inverse Pendulum Type Self-contained Mobile Robot and its Two Dimensional Trajectory Control", Proc of ICMCR 92, Tsukuba, Japan, pp. 891-898, (1992).
- [23] Wang, H.O., Tanaka, K., and Griffin, M.F., "An Approach to Fuzzy Control of Nonlinear Systems: Stability and Design Issues", IEEE Trans. Fuzzy Systems, Vol. 4, No. 1, pp. 14-23, (1996).
- [24] Roose, A.I., Yahya, S., and Al-Rizzo, H., "Fuzzy-logic Control of an Inverted Pendulum on a Cart", Computers and Electrical Engineering, Vol. 61, pp. 31-47, (2017).
- [25] Kim, Y.H., Kim, S.H., and Kwak, Y.K., "Dynamic and Control of a Nonholonomic Two-wheeled Inverted Pendulum Robot", Proc. of the Eighth Int. Symp. on Artificial Life and Robotics, Beppu, Oita, Japan, (2005).
- [26] Layne, J. R., and Passino, K. M., "Fuzzy Model Reference Learning Control for Cargo Ship Steering", IEEE Control Systems Magazine, Vol. 13, pp. 23-34 (1993).

Abstract

The problem of the Segway robot and wheeled inverse pendulum is one of the most important classical issues in engineering control. The control of speed and cart body angle is a well-known example of nonlinear control issues. The main purpose of the control in this paper is achieving the cart body to the desired angle and the speed of the body as quickly as demanded velocity by controlling of the applied torque to the inverted pendulum wheels. This paper presents an intelligent control method for Segway robot, in which the downstream fuzzy controller, like any other controller, using the calculated error from the plant output, provides the proper input to the dynamic system. But, there is a learning mechanism in the upstream controller that compares the output of the controller VS the reference model and then improves it using fuzzy inverse controller. it makes method more robust and efficient. Dynamic equations of the system are extracted by the Kane method.

Then, fuzzy model reference learning control of the mamdani type is utilized to control and stabilization it. The design of the fuzzy controller, based on the experience of the expert human for such a system, can perfectly overcome the instability and nonlinear nature of the system. Therefore, the use of the supervisor controller, due to automatic and intelligent adjustment, can help simpler design of this controller. The performance of the proposed control algorithm on Segway robot case study is evaluated and demonstrated by simulation in MATLAB. Also, considering the system's uncertainty in design and disturbances, the controllers are robust against the uncertainties and disturbances in the problem. Figures and results are evidence of this issue.