

کنترل ربات اسکلت خارجی میان تنه با استفاده از کنترل کننده جبران ساز توزیع یافته موازی

میثم اسفندیارفر

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

بهروز رحمانی*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

عباس دهقانی

استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

چکیده

بیماری‌های اسکلتی-عضلانی ناشی از حمل بار سنگین در کارگران بسیار شایع است که بر سلامتی کارگران و بازدهی کار تأثیر منفی دارد. در این راستا، ایده طراحی ربات اسکلت خارجی پیشنهاد شده است. این ربات مشابه یک لباس بر بدن کاربر پوشیده شده و موازی با بدن، شخص را همراهی و کمک می‌نماید تا نیروهای وارد بر عضلات حساس بدن در مشاغل صنعتی را کاهش دهد. در این مقاله، روش کنترلی جبران ساز توزیع یافته موازی جهت اعمال بر یک ربات اسکلت خارجی چهار درجه آزادی میان تنه ارائه می‌گردد. در ابتدا، معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم استخراج می‌گردد و با توجه به ماهیت غیرخطی سیستم، کنترل کننده جبران ساز توزیع یافته موازی با رهیافت خطی سازی تاکاگی-سازینو طراحی می‌شود. پاسخ سیستم حلقه بسته این کنترل کننده در محیط سیمولینک نرم افزار متلب مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که رهیافت خطی سازی تاکاگی-سازینو به صورت دقیق سیستم غیرخطی را تخمین می‌زند و همچنین کنترل کننده پیشنهادی، به خوبی پاسخ حلقه بسته مطلوب را رهگیری می‌کند.

واژه‌های کلیدی: ربات اسکلت خارجی، کنترل کننده جبران ساز توزیع یافته موازی، رهیافت تاکاگی-سازینو.

Control of the Exoskeleton Waist Robot by Using Parallel Distributed Compensation Controller

M. Esfandiarnfar

Department of Mechanical Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

B. Rahmani

Department of Mechanical Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

A. Dehghani

Department of Computer Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

Abstract

Musculoskeletal disorders caused by heavy workloads are very common in workers, which negatively affects workers' health and productivity. In this regard, the idea of designing an exoskeleton robot is proposed. This robot is similar to a dress which worn on the user's body and parallels the body, accompanying and helping the person. In this paper, the parallel distributed compensation control method is proposed to be applied to a four degrees of freedom exoskeleton waist robot. Initially, the dynamical equations governing the system are extracted. According to the nonlinear nature of the system, the parallel distributed compensator controller is designed with a Takagi-Sugeno linearization approach. The closed loop system response of this controller is investigated in the Simulink environment of the MATLAB software. The results show that the Takagi-Sugeno linearization approach accurately estimates the nonlinear system, and also the proposed controller perfectly intercepts the optimal closed loop response.

Keywords: Exoskeleton Robot, Parallel Distributed Compensation Controller, Takagi-Sugeno Approach.

بوده است [۲]. در پژوهشی که از بین ۱۲۲۶ نفر از پرستاران شاغل در بیمارستان‌های وابسته به دانشگاه علوم پزشکی مازندران انجام شد، به‌طور میانگین ۴۴٪ از پرستاران دچار کمردرد شدند و ۳۴٪ از غیبت‌های کاری به علت کمردرد گزارش شده است [۳]. بنابراین، ارتباط تنگاتنگ محیط کاری و حجم کار با سلامت کارگران بسیار مشهود است که این منجر به اختلالات اسکلتی-عضلانی می‌شود به نحوی که کارایی کارکنان را به شدت کاهش می‌دهد. در همین راستا، طراحی ربات‌های اسکلت خارجی به عنوان یک راه‌حل کارآمد جهت افزایش سلامت نیروهای کار و بازدهی کارخانه‌ها، مطرح شده است [۴].

با توجه به پیشرفت‌های چشم‌گیر در صنعت رباتیک، شاهد ورود ربات‌های مختلف به زندگی انسان هستیم. امروزه در زمینه‌های مختلف، ربات به عنوان یک بازوی توانمند در صنعت، نقش به‌سزایی را ایفا می‌کند چراکه ربات‌ها توانایی انجام کارها در شرایط سخت، با دقت و سرعت بالا، بازدهی و کیفیت بیشتر را دارند. سیستم‌های رباتیک اسکلت خارجی، ساختاری الکترومکانیکی دارد که توسط کاربر پوشیده می‌شود و به‌صورت موازی و هماهنگ با بدن انسان عمل می‌کند. این

۱- مقدمه

کمردرد یکی از شایع‌ترین اختلالات اسکلتی-عضلانی مربوط به کار است که بر حضور مؤثر کارگران و کارمندان یک کشور، اثر مستقیم دارد. یکی از علت‌های اصلی بروز کمردرد، اعمال بارهای سنگین و همچنین بارهای مداوم و تکراری بر ناحیه کمر است. مهم‌ترین وظیفه‌ی مهره‌های کمری تحمل وزن بدن است. با این تفاسیل، اعمال بارهای سنگین بر بدن، باعث بروز مشکل در ستون فقرات می‌گردد. این موضوع باعث افزایش هزینه‌های درمانی می‌شود که جبران خسارت ناشی از آن، یک چالش جدی ایجاد می‌کند. به عنوان مثال، سالانه ۵٪ کارگران حداقل یک روز از کار به علت کمردرد مرخص می‌شوند و حدود ۲۰ میلیارد دلار در سال جهت درمان اختلالات اسکلتی-عضلانی مرتبط با کار، هزینه می‌شود که هزینه‌های کمردرد، یکی از بخش‌های اصلی آن به شمار می‌رود [۱]. همچنین پژوهشگران دریافته‌اند که شیوع کمردرد در میان پرستاران آمریکایی با میانگین سن ۴۵ ساله برابر ۴۷٪، در میان پرستاران آلمانی با میانگین سن ۳۱/۹ ساله برابر ۶۱٪

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: b_rahmani@yu.ac.ir

سیستم، به کمک هوش انسان و قدرت مکانیکی ربات، سعی در جبران ضعف‌های بدن انسان (با افزایش قدرت به کمک عملگر مکانیکی) و جبران ضعف‌های ربات (افزایش هوشمندی آن) دارد و این امکان باعث ایجاد توانمندی جدیدی می‌شود که انسان و ربات به‌تنهایی قابلیت دستیابی به آن را به‌صورت جداگانه ندارد. در ربات اسکلت خارجی، پس از تحلیل داده‌ها، دستورات به سامانه اعمال گردد [۵].

ربات‌های اسکلت خارجی، از منظر کاربرد به دو دسته‌ی کلی تقسیم می‌شود؛ دسته‌ی اول، ربات‌هایی است که از بیماران مبتلا به مشکلات حرکتی (افراد معلول) پشتیبانی می‌کند تا ضعف توانایی‌های فیزیکی آن‌ها را جبران کند. این ضعف حرکتی، عمدتاً ناشی از آسیب ناگهانی، سکت و یا بیماری است. دسته دوم، ربات‌هایی است که هدف افزایش نیروی عضلانی کاربر و حمایت از حمل بار سنگین، را دنبال می‌کند [۶]. این سیستم‌ها از طریق تماس فیزیکی، امکان انتقال مستقیم قدرت مکانیکی و سیگنال‌های اطلاعاتی، بین کاربر و ربات را فراهم می‌کند که منجر به افزایش قدرت، سرعت و استقامت کاربر می‌شود [۷]. در ربات‌های اسکلت خارجی، با استفاده از حسگرهای^۱ مختلف مانند حسگرهای زاویه و موقعیت، گشتاور، حسگر نیرو^۲ و حسگرهای تشخیص اعصاب، وضعیت سامانه را در هر لحظه ثبت می‌کند و با ارسال این اطلاعات به یک پردازنده مرکزی، تصمیمات کنترلی برای عملکرد مطلوب ربات اتخاذ می‌گردد. همان‌طور که اشاره شد، کاربردهای این ربات‌ها، به دو دسته درمانی و صنعتی قابل تقسیم‌بندی است. در حوزه درمانی می‌توان به مواردی از قبیل مساعدت در پیاده‌روی برای سالمندان، توان‌بخشی بیماران مبتلا به اختلالات جسمی [۸]، فعال کردن کودکان فلج شده به راه رفتن [۹]، توان‌بخشی بیماران مبتلا به صدمات مزمن نخاعی [۱۰] و توان‌بخشی اندام‌های فوقانی و تحتانی [۱۱] اشاره کرد. در حوزه کاربرد صنعتی و نظامی، می‌توان به مواردی جهت کمک به پرستاران در انتقال بیماران [۱۲] و تقویت قدرت سربازان و کارگران [۱۳ و ۱۴] اشاره کرد.

در پژوهشی، هو و همکاران [۱۵]، یک ربات اسکلت خارجی بالاتنه (اندام‌های فوقانی) بر اساس ویژگی‌های پویای سیستم، با ایجاد یک مدل خطی فضای حالت، راه‌حلی بر مبنای الگوریتم پیش‌بینی رفتار سیستم، جهت رفع عدم قطعیت‌های سیستم ارائه شد تا با کاهش اختلالات موجود در سیستم، بازدهی آن را افزایش دهند. لونا و همکاران [۱۶]، روش کنترلی تجزیه مجازی^۳ را بر روی یک ربات اسکلت خارجی بازوی انسان دارای هفت درجه آزادی، اعمال نمودند و در حالت کنترل پیوسته، نتایج مفیدی از این روش به دست آوردند. روش کنترلی تجزیه مجازی شامل تجزیه سیستم‌های پیچیده به زیرسیستم‌ها و استفاده از پویایی ساده‌تر برای انجام محاسبات کنترل است.

در پژوهشی که توسط هوانگ و همکاران [۱۷] انجام گرفت، یک ربات انسان‌نما جهت برآورد قصد حرکتی اندام‌های فوقانی با استفاده از حسگرهای نیرو طراحی شد و راه‌حلی برای افزایش دقت پیش‌بینی رفتار انسان ارائه شد. گاریدو و همکاران [۱۸]، یک اسکلت خارجی به

روش مازولار^۴، طراحی نمودند تا امکان مونتاژ راحت‌تری داشته باشد و یک کنترل‌کننده PID^۵، بدون نیاز به سینماتیک معکوس ربات ارائه نمودند. ویتکوسکی و همکاران [۱۹]، یک سیستم تعامل کامپیوتری مغز-عصبی^۶، برای افزایش قابلیت اطمینان حرکات انگشتان دست، به کمک آزمایش‌های نوار مغزی و الکترواکولوگرافی^۷، معرفی نمودند. لئوناردیس و همکاران [۲۰]، با هدف بهبود عملکرد انگشتان دست، یک ربات توانبخشی دوطرفه به نام براوو^۸ طراحی نموده و ساختند تا برای افرادی که به علت سکت مغزی، قدرت حرکتی انگشتان دست خود را از دست داده‌اند، درمان مناسبی باشد. برای صحت‌سنجی عملکرد ربات براوو، آزمایش‌هایی بر گروهی از افراد سالم و بیمار انجام گرفت و نتایج ثمربخش این ربات اثبات شد. در پژوهشی در حوزه ربات‌های اسکلت خارجی پایین‌تنه (اندام‌های تحتانی)، مورای و همکاران [۲۱]، یک روش کنترلی برای اسکلت خارجی پایین‌تنه ارائه نمودند، که به‌منظور تسهیل و بهبود پیاده‌روی در افراد مبتلا به ناتوانی پایین‌تنه به علت سکت مغزی، استفاده می‌گردد. در تلاشی دیگر، انور و الجعیملی [۲۲]، یک کنترل‌کننده مبتنی بر قاعده‌ی فازی پیشنهاد کردند که جهت کنترل نیروی متقابل در نقطه تماس بیمار، مورد استفاده قرار گرفت و با کنترل امیدانس، گشتاور و سرعت زاویه‌ای، نیروی کنترل‌شده را به سیستم اعمال نمود. لی و همکاران [۲۳]، روش جدیدی برای تشخیص قصد انسانی و تعامل آن با روش کنترلی پیشنهاد نمودند. در این روش، قصد انسان را به عنوان مرجع حفظ تعادل بدن تعریف گردید و با طراحی الگوریتم تشخیص قصد کاربر، گشتاور موردنیاز برای حمل بار بهینه‌سازی شد.

ربات‌های اسکلت خارجی تقویت قدرت، عموماً به‌صورت پوشش کاملی از اندام‌های فوقانی یا تحتانی یا تمام‌تن ارائه شده است. این‌گونه ربات‌ها، علی‌رغم اینکه قدرت قابل‌توجهی برای افراد ایجاد می‌کند، اما با مسائلی از جمله محدودیت‌های حرکتی و هزینه بالای محصول، روبرو است. از طرفی، در کاربردهایی مانند حمل وزنه‌های نیمه سنگین، ربات‌های اسکلت خارجی با پوشش کامل موردنیاز نیست. بنابراین طراحی ربات‌هایی که تنها بعضی از عضلات را پوشش دهند، مطرح شده است که این منجر به کاربری ساده‌تر ربات و هزینه کمتر آن می‌شود. در این پژوهش، کنترل یک ربات افزایش قدرت چهار درجه آزادی اسکلت خارجی میان‌تنه پیشنهادی جهت کاربردهای صنعتی از جمله استفاده کارگران و پرستاران مد نظر قرار گرفته است. پس از معرفی ربات پیشنهادی و استخراج دینامیک حاکم بر مسئله، کنترل‌کننده جبران‌ساز توزیع‌یافته موازی با رهیافت خطی‌سازی تاکاگی-سازینو ارائه می‌گردد. پس از شبیه‌سازی رفتار کنترل‌کننده پیشنهادی در محیط سیمولینک متلب، نتایج شبیه‌سازی مورد بحث و نتیجه‌گیری قرار می‌گیرد.

۲- معرفی سیستم

در این پژوهش، ربات اسکلت خارجی پیشنهادی در حالت برداشت

⁴ Modular

⁵ Proportional-Integral-Derivative (PID)

⁶ Brain-Neural Computer Interaction

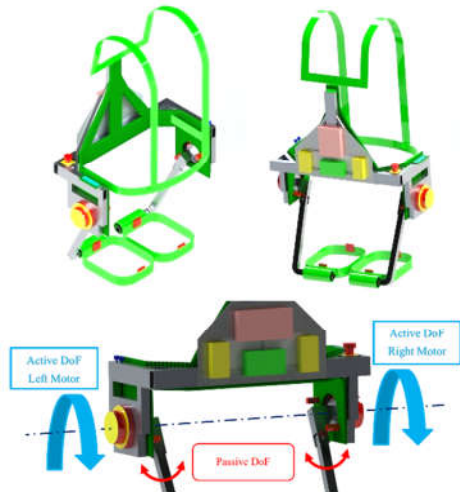
⁷ Electrooculography (EOG)

⁸ Bravo

¹ Sensor

² Load cell

³ Virtual Decomposition Control (VDC)



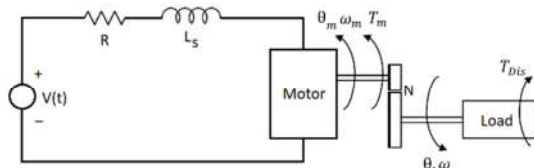
شکل ۱- هندسه ربات طراحی شده و درجات آزادی

ساختار مکانیکی ربات به گونه‌ای است که جهت مرتبط کردن ران و کمر، دو بازوی مکانیکی تعبیه شده است و گشتاور تولیدی موتور الکتریکی از طریق لینک متصل به کمر، به بدن منتقل می‌شود. در کمک به بالا بردن، هنگامی که کمر در حالت برداشت بار قرار گیرد، گشتاور موتور الکتریکی به کمر اعمال می‌شود و نیروی کمکی به کمر کاربر اعمال می‌گردد. مکانیزم این ربات، جهت همکاری در هنگام برداشتن و گذاشتن بار (یا حین خم و راست شدن کمر) طراحی می‌گردد و در حین پیاده‌روی، ربات وظیفه‌ای ندارد و در این حالت، هماهنگ با حرکت شخص قرار می‌گیرد.

حسگر نیروی تعبیه شده در ربات، وظیفه تشخیص اندرکنش‌های بین ران کاربر و بازوی ربات را بر عهده دارد که این اطلاعات را به صورت پالس‌های الکتریکی به پردازنده مرکزی ارسال می‌شود. هر لینک دارای دو لودسل است که تشخیص حرکت جلو و عقب ران کاربر را انجام می‌دهد و با پردازش اطلاعات حسگر نیرو، گشتاور موردنیاز جهت ره‌گیری زاویه لینک به‌عنوان ورودی کنترلی تولید می‌شود و به موتورهای اعمال می‌گردد. نحوه عملکرد سیستم تشخیص حرکت با استفاده از داده‌های حسگرهای نیرو، در بخش ۳-۵ تشریح شده است.

۲-۲- معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم

این سامانه از دو بخش مکانیکی و الکتریکی تشکیل شده است. تصویر نمای آزاد موتور الکتریکی و بخش مکانیکی به ترتیب در شکل ۲ و شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۲- نمای آزاد مدار الکتریکی [۲۴]

معادله بخش مکانیکی ربات با استفاده از روش لاگرانژ و معادله

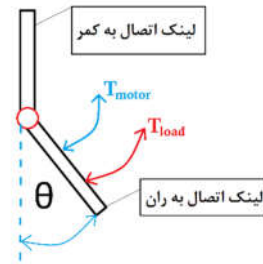
و گذاشتن بار توسط کاربر، سعی دارد تا نیروهایی در جهت کمک به کاربر، اعمال کند. طبق بررسی‌های انجام شده، عمده‌ی بارهای حمل‌شونده توسط کارگران به صورت تک نفره، در محدوده‌ی جرمی ۱۵ الی ۲۰ کیلوگرم است و همانطور که در مقدمه اشاره گردید، حمل بارها به‌صورت مداوم باعث ایجاد عوارض اسکلتی-عضلانی در کارگران و مشاغل مشابه می‌شود. به‌عنوان نمونه، در صورتی که یک کارگر، جرمی ۲۰ کیلوگرمی را بلند نماید و در طول این فعالیت، ربات میان‌تنه فعال باشد، می‌توان گفت با فرض ۱۵ کیلوگرم کمک از جانب ربات، تنها نیروی معادل بلند کردن یک جرم ۵ کیلوگرمی به مهره‌های کمر وارد می‌شود، بنابراین در دراز مدت، اثرات مثبت این سیستم مشهود می‌گردد. بنابراین ماهیت این ربات، صرفاً کاهش گشتاور اعمالی بر مهره‌های کمر می‌باشد تا آسیب‌های جدی به مهره‌های کمر مانند بیرون‌زدگی دیسک کمر و سایر عوارض اسکلتی-عضلانی مرتبط را کاهش دهد.

در این قسمت، ربات پیشنهادی و عملکرد آن معرفی می‌شود و در ادامه، دینامیک حاکم بر سیستم جهت اعمال کنترل‌کننده، ارائه می‌گردد. ربات اسکلت‌خارجی، می‌بایست به گونه‌ای طراحی گردد تا علاوه بر احساس راحتی کاربر، بتواند زیرسیستم‌های موردنیاز مانند موتورها، مدارهای الکتریکی و الکترونیکی و سایر اجزاء را در خود جا دهد. طراحی این ربات، با توجه به استاندارد هندسی ارگونومی بدن انسان و بر اساس ابعاد بدن یک فرد با قد حدود ۱۷۵ سانتی‌متر انجام شده است. این طراحی در محیط نرم‌افزار Solid work انجام گرفته است.

۲-۱- ربات اسکلت خارجی میان‌تنه

ربات پیشنهادی، ران کاربر را تکیه‌گاه قرار می‌دهد و با اعمال نیروی کمکی بر کمر، تنش وارده به مهره‌های کمر را کاهش می‌دهد و سعی دارد تا سلامتی اسکلتی-عضلانی کارگران را بهبود بخشد. چهار درجه آزادی ربات از دو درجه آزادی فعال و دو درجه آزادی انفعالی تشکیل شده است. درجات آزادی فعال مربوط به موتورهای الکتریکی و درجات آزادی انفعالی جهت افزایش آزادی حرکتی کاربر تعبیه می‌گردد. با توجه به محدوده‌ی تماسی و کاری این ربات که شامل کمر، لگن و ران است، به آن ربات "میان‌تنه" گفته می‌شود. شکل ۱، هندسه طراحی شده ربات و درجات آزادی آن را نشان می‌دهد.

مدار الکتریکی (با فرض وجود موتور جریان مستقیم^۱) طبق قانون اختلاف پتانسیل کیرشهف استخراج شد [۲۴].



شکل ۳- نمای آزاد بخش مکانیکی

معادلات دینامیکی سیستم برای سمت راست ربات اسکلت خارجی میان تنه به دست آمد و این معادلات برای نیمه چپ نیز مشابه است. همان طور که در معادله (۷) مشهود است، جمله غیرخطی سینوسی باعث شده که دینامیک سیستم در دسته‌ی غیرخطی قرار گیرد. با توجه به ماهیت غیرخطی سیستم، کنترل کننده‌های غیرخطی برای اعمال بر سیستم بررسی خواهد شد.

۳- کنترل کننده

کنترل کننده به عنوان یک واحد تحلیل گر برای مدیریت یک سیستم دینامیکی مطرح می‌شود. در راستای هدایت یک سیستم دینامیکی و رساندن آن به پاسخ حلقه بسته^۲ مطلوب، استفاده از یک کنترل کننده با کیفیت ره‌گیری مناسب، الزامی است.

از یک منظر می‌توان کنترل کننده‌ها را در دو دسته ی خطی و غیرخطی قرار داد که با توجه به دینامیک سیستم موردنظر، می‌توان کنترل کننده‌ی مناسب را مورد استفاده قرار داد. در مجموعه‌های صنعتی جهت بهبود بازدهی فرآیند کاری، می‌بایست از سیستم‌های کنترلی استفاده کرد. در این مقاله، با توجه به ماهیت غیرخطی دینامیک ربات پیشنهادی، در ابتدا از رهیافت خطی‌سازی تاکاگی-سازینو^۴ برای تخمین دقیق مدل غیرخطی ربات میان تنه با ترکیبی فازی از دو زیرسیستم فازی استفاده می‌گردد و سپس از کنترل کننده جبران ساز توزیع یافته‌ی موازی برای کنترل این ربات استفاده می‌شود. قابل ذکر است که هر موتور تعبیه شده در ربات، به طور مستقل توسط این سیستم کنترلی هدایت می‌شود و در واقع دو سیستم کنترلی مجزا این موتورها را هدایت می‌کند.

۳-۱- رهیافت تاکاگی-سازینو و کنترل کننده جبران ساز

مدل‌های فازی تاکاگی-سازینو با قرار دادن مدل‌های غیرخطی در یک مجموعه محدب می‌تواند رفتار سیستم‌های غیرخطی را به صورت کامل توصیف نماید. برای این هدف، هر عبارت غیرخطی سیستم تحت کنترل که شرط غیرخطی ناحیه ای را ارضاء نماید، به صورت ترکیب فازی دو عبارت خطی معرفی می‌شود. بر همین اساس، معادلات دینامیکی غیرخطی سیستم به مجموعه‌ای از زیرسیستم‌های خطی با درجه عضویت مشخص تقسیم می‌شود به گونه‌ای که تلفیق فازی این مجموعه‌ها باعث بازبایی دقیق مدل دینامیکی سیستم غیرخطی گردد. با استفاده از منطق فازی امکان استفاده از کنترل کننده‌های خطی برای سیستم‌های غیرخطی به کمک این روش فراهم می‌شود و این یک برتری برای رهیافت مدل تاکاگی-سازینو است [۲۵]. جهت بیان ساز و کار این رهیافت، مدل دینامیکی یک سیستم غیرخطی با n متغیر حالت، m ورودی و q خروجی زمان به فرم زیر است:

^۲ یک سامانه‌ی دینامیکی می‌تواند در دو حالت "حلقه باز" و "حلقه بسته" عملیات انجام دهد. در حالت حلقه باز، سیستم هیچ بازخوردی از خروجی ندارد و عملاً نتیجه‌ی حاصل در خروجی فاقد اهمیت است، بنابراین به صورت یک سیکل کاری به کار خود ادامه می‌دهد. اما در حالت حلقه بسته، خروجی سیستم به صورت یک بازخورد با ورودی مقایسه شده و اختلاف آن برای رسیدن به مقدار مطلوب خروجی تنظیم می‌شود، بنابراین مقدار خروجی سیستم، بسیار حائز اهمیت است.

^۴ Takagi-Sugeno (TS)

معادله دینامیکی حاکم بر بخش مکانیکی و الکتریکی سیستم به ترتیب به فرم معادله (۱) و (۲) استخراج گردید که T_{Load} گشتاور سمت بار (که می‌تواند شامل گشتاور اغتشاشی T_{Dis} باشد)، T_{motor} گشتاور تولیدی موتور، m وزن بازوی متصل به ران، g شتاب گرانش، L طول لینک متصل به ران، θ موقعیت زاویه‌ای لینک متصل به ران، $V(t)$ ولتاژ اعمالی و $i(t)$ جریان الکتریکی اعمالی به موتور است و موتور الکتریکی دارای مقاومت الکتریکی R و اندوکتانس L_s است.

$$\left(1 + \frac{mL^2}{4}\right)\ddot{\theta} + \frac{mgl}{2}\sin\theta = T_{motor} - T_{Load} \quad (1)$$

$$V(t) = L_s \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + V_{emf} \quad (2)$$

جعبه‌دنده با نسبت تبدیل N جهت کاهش دور موتور و افزایش گشتاور آن استفاده می‌شود. در حالت ایده‌آل با صرف نظر از اصطکاک در جعبه‌دنده، معادله (۳) ارتباط بین گشتاور و سرعت زاویه‌ای را نشان می‌دهد.

$$N = \frac{\omega_m}{\omega} = \frac{T_{Load}}{T_e} \quad \& \quad \frac{1}{N} = \frac{T_m}{T} \quad (3)$$

گشتاور تولید شده توسط موتور T_m در موتورهای جریان مستقیم طبق معادله (۴) به دست می‌آید.

$$T_m = K_m i \quad (4)$$

ولتاژ ضد محرکه^۲ موتور الکتریکی متناسب با سرعت موتور مطابق معادله (۵) معرفی می‌گردد.

$$V_{emf} = K_m \omega_m \quad (5)$$

معادله (۶) برای مدل‌سازی حرکت زاویه‌ای موتور از قانون اویلر استفاده می‌کند.

$$J_m \dot{\omega}_m = T_m - T_{Load} = -(T_e + b\omega_m) \quad (6)$$

که در آن T_e گشتاور منتقل شده از موتور به سمت بار، J_m ممان اینرسی موتور، $J_m \dot{\omega}_m$ گشتاور اینرسی حرکتی موتور و b ضریب دمپر موتور است. در نهایت با جایگذاری $I = \frac{mL^2}{12}$ در معادله ۲، معادله (۷) به دست می‌آید و همچنین ترکیب معادلات (۲) و (۵)، معادله (۸) به عنوان شکل نهایی معادلات سیستم استخراج می‌گردد.

$$\left(\frac{mL^2}{3}\right)\ddot{\theta} - \frac{mgl}{2}\sin\theta = NK_m i - T_{Dis} \quad (7)$$

$$L_s \frac{di(t)}{dt} = -Ri(t) - NK_m \omega + V(t) \quad (8)$$

^۱ Direct Current (DC)

^۲ Back Electro-Motive Force (emf)

با هر زیرسیستم استفاده می‌گردد تا کنترل‌کننده بازخورد حالت برآیند (حلقه بسته برآیند) طراحی شود. برای یک سیستم غیرخطی، ساختار این کنترل‌کننده به شرح زیر است:

قانون i^{th} : اگر $z_1(t)$ برابر با h_{i1} ، $z_2(t)$ برابر با h_{i2} ... و $z_p(t)$ برابر با h_{ip} باشد، آنگاه:

$$u(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) K_i x(t)}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \quad (15)$$

$$= - \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) K_i x(t)$$

نکته‌ی بسیار حائز اهمیت این است که کنترل‌کننده جبران‌ساز توزیع یافته موازی و مدل فازی تاکاگی-سازینو از توابع عضویت یکسان استفاده می‌کند و دارای شمار مساوی قوانین فازی است [۲۵].

۲-۳- طراحی کنترل‌کننده جبران‌ساز توزیع یافته موازی

همان‌گونه که در سمت چپ معادله (۷) مشاهده می‌شود، وجود عبارت غیرخطی $\sin\theta$ در معادله حاکم بر سیستم، نشان دهنده‌ی غیرخطی بودن معادله‌ی حاکم بر آن است. در ابتدا عبارت غیرخطی به کمک رهیافت تاکاگی-سازینو به زیرسیستم‌های خطی تبدیل می‌گردد. برای این کار، عبارت غیرخطی به‌عنوان یک متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود:

$$z_1 = \sin\theta \quad (16)$$

با جایگذاری معادله (۱۶) در معادله (۷)، نتیجه به‌صورت معادله (۱۷) استخراج می‌گردد:

$$\left(\frac{mL^2}{3}\right)\ddot{\theta} - \frac{mgl}{2} z_1 = NK_m i - T_{Dist} \quad (17)$$

با توجه به اینکه عبارت غیرخطی در صورت پایداری سیستم نسبت به متغیر θ پیوسته است، بنابراین شرط غیرخطی ناحیه‌ای برای z_1 برقرار است و می‌توان آن را به‌صورت $z_1 \in [a_1, a_2]$ در نظر گرفت که $a_1 = -\frac{\pi}{2}$ کران پایین و $a_2 = \frac{\pi}{2}$ کران بالای این معادل‌سازی است به‌گونه‌ای که در هر لحظه بتوان z_1 را به‌طور دقیق ساخت.

$$z_1 = a_1 M_1 + a_2 M_2 = \sum_{j=1}^2 a_j M_j \quad (18)$$

که در آن، M_1 و M_2 بیانگر وزن‌های ترکیب فازی جهت ساخت متغیر تصمیم است و به‌صورت معادله (۱۹) با یکدیگر ارتباط دارند:

$$M_1(z_1(t)) + M_2(z_1(t)) = 1 \quad (19)$$

با استفاده از معادلات (۱۸) و (۱۹)، وزن‌های فازی به‌صورت معادله (۲۰) به‌دست می‌آید.

$$\begin{cases} M_1(z_1(t)) = \frac{z_1(t) - a_2}{a_1 - a_2} \\ M_2(z_1(t)) = 1 - M_1(z_1(t)) \end{cases} \quad (20)$$

با جایگذاری معادله (۱۸) در معادله (۱۷)، رابطه (۲۱) را نتیجه می‌دهد:

$$\left(\frac{mL^2}{3}\right)\ddot{\theta} - \frac{mgl}{2} \sum_{j=1}^2 a_j M_j = NK_m i - T_{Dist} \quad (21)$$

معادله (۲۱) که عبارت غیرخطی آن از رهیافت تاکاگی-سازینو به زیرسیستم‌های خطی تبدیل شده است، به‌صورت دقیق معادله غیرخطی (۷) را توصیف می‌نماید. این معادله به دو زیرسیستم فازی زیر قابل‌بیان است:

قانون یک: اگر z_1 بزرگ باشد، آنگاه:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, u) \\ y(t) = x(t) \end{cases} \quad (9)$$

که در آن $x(t) \in R^n$ و $u(t) \in R^m$ به ترتیب نشانگر بردار حالت و ورودی سیستم است. در صورتی که عبارت غیرخطی در معادله (۷)، یعنی درایه‌های بردار $f(x, u)$ شرط غیرخطی ناحیه‌ای را ارضا نماید، قانون فازی مطابق با زیرسیستم i^{th} را برای $i = 1, 2, \dots, r$ می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$\text{قانون } i^{th}: \text{ اگر } z_1(t) \text{ برابر با } M_{i1}, z_2(t) \text{ برابر با } M_{i2}, \dots \text{ و } z_p(t) \text{ برابر با } M_{ip} \text{ باشد، آنگاه:}$$

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t) \end{cases} \quad \exists i = 1, 2, \dots, r \quad (10)$$

که در آن M_{ij} به ازای $j = 1, 2, \dots, p$ مشخص‌کننده مجموعه‌های فازی، p تعداد متغیرهای تصمیم (عبارت‌های غیرخطی موردنظر)، $r = 2^p$ تعداد قوانین مدل $A_i \in R^{n \times n}$ ، $B_i \in R^{n \times m}$ و $C_i \in R^{q \times n}$ معرفی می‌شود.

در ضمن $z_1(t), z_2(t), \dots, z_p(t)$ معرف متغیرهای تابع ورودی، متغیرهای حالت و یا اغتشاش خارجی است که از معادله (۹) استخراج می‌گردد و به فرم معادله (۱۱) بیان می‌شود.

$$z(t) = [z_1(t) \ z_2(t) \ \dots \ z_p(t)] \quad (11)$$

از طرفی $M_{ij}(z_j(t))$ بیانگر درجه عضویت $z_j(t)$ در مجموعه فازی M_{ij} معرفی می‌شود. زیرسیستم‌ها به فرم $A_i x(t) + B_i u(t)$ برای هر سیستم خطی نشان داده می‌شود.

بنابراین با ترکیب فازی زیرسیستم‌های خطی، خروجی نهایی مجموعه فازی به‌صورت معادله (۱۲) بیان می‌گردد:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\}}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \\ &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\} \\ y(t) &= C_i x(t) \end{aligned} \quad (12)$$

که در آن:

$$h_i(z(t)) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{p=1}^r w_p(z(t))} \quad (13)$$

$$w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p M_{ij}(z_j(t))$$

برای کل زمان t معادله ۱۴ قابل اثبات است [۲۵]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1 \\ h_i(z(t)) \geq 0 \\ \sum_{i=1}^r w_i(z(t)) > 0 \\ w_i(z(t)) \geq 0 \end{cases} \quad \text{for: } i = 1, 2, \dots, r \quad \blacksquare \quad (14)$$

پس از اعمال روش خطی‌سازی تاکاگی-سازینو، مدل خطی شده سیستم غیرخطی استخراج می‌گردد و با استفاده از این رهیافت، ضرایب بهره را برای یک کنترل‌کننده دینامیکی به‌دست می‌آید و می‌توان سیستم خطی معادل را توسط یک کنترل‌کننده مناسب، پایدار و هدایت نمود. این سیستم کنترلی، کنترل‌کننده‌ی جبران‌ساز توزیع یافته موازی^۱ نام دارد.

ترکیب ضرایب بازخورد حالت پایدارساز $r, i = 1, 2, \dots, r$ k_i متناظر

¹ Parallel Distributed Compensation (PDC)

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t))h_i(z(t))G_{ii}x(t) + 2 \sum_{i=1}^r \sum_{i < j} h_i(z(t))h_j(z(t)) \left\{ \frac{G_{ij} + G_{ji}}{2} \right\} x(t) \quad (28)$$

با اعمال شرط پایداری حلقه باز در معادله (۲۶)، می‌توان شرایط پایداری را برای معادله (۲۸) مورد بررسی قرار داد.

لم: اگر تعداد قوانین فازی برای کل زمان t مساوی یا کمتر از s باشد، به گونه‌ای که $1 < s \leq r$ باشد، آنگاه:

$$\sum_{i=1}^r h_i^2(z(t)) - \frac{1}{s-1} \sum_{i=1}^r \sum_{i < j} 2h_i(z(t))h_j(z(t)) \geq 0$$

که در آن:

$$\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1, \quad h_i(z(t)) \geq 0 \quad \blacksquare$$

است [۲۵].

قضیه دو: معادله سیستم فازی پیوسته (۲۸)، پایدار مجانبی فراگیر است اگر ماتریس مثبت معین P موجود باشد که در معادلات (۲۹) و (۳۰) صدق کند [۲۵].

$$G_{ii}^T P + P G_{ii} < 0 \quad (29)$$

$$\left(\frac{G_{ij} + G_{ji}}{2} \right)^T P + P \left(\frac{G_{ij} + G_{ji}}{2} \right) \leq 0, \quad i < j \ni h_i \cap h_j \neq \emptyset \quad (30)$$

اثبات: برای اثبات پایداری، تابع لیاپانوف^۱ کاندید به فرم $V(x(t)) = x^T(t) P x(t)$ با فرض اینکه $P > 0$ در نظر گرفته شود. آنگاه:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x(t)) &= \sum_{i=1}^r \sum_{i=1}^r h_i(z(t))h_i(z(t))x^T(t) \\ &\times \left[(A_i - B_i K_i)^T P + P(A_i - B_i K_i) \right] x(t) \\ &= \sum_{i=1}^r h_i^2(z(t))x^T(t) [G_{ii}^T P + P G_{ii}] x(t) \\ &+ \sum_{i=1}^r \sum_{i < j} 2h_i(z(t))h_j(z(t))x^T(t) \\ &\times \left[\left(\frac{G_{ij} + G_{ji}}{2} \right)^T P + P \left(\frac{G_{ij} + G_{ji}}{2} \right) \right] x(t) \end{aligned}$$

با توجه به اینکه شرط پایداری مجانبی فراگیر، منفی معین بودن کاندید لیاپانوف $\dot{V}(x(t))$ است، بنابراین:

$$\dot{V}(x(t)) < 0 | x(t) \neq 0, \text{ Then}$$

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^r h_i^2(z(t))x^T(t) [G_{ii}^T P + P G_{ii}] x(t) \\ &+ \sum_{i=1}^r \sum_{i < j} 2h_i(z(t))h_j(z(t))x^T(t) \\ &\times \left[\left(\frac{G_{ij} + G_{ji}}{2} \right)^T P + P \left(\frac{G_{ij} + G_{ji}}{2} \right) \right] x(t) < 0 \quad \blacksquare \end{aligned} \quad (31)$$

با توجه به لم گفته شده و نامساوی (۳۱)، معادلات (۲۹) و (۳۰) به‌دست می‌آید و قضیه دو به اثبات می‌رسد.

۴-۳- طراحی کنترل کننده پایدارساز توزیع یافته موازی

روش تاکاگی-سازینو یک سیستم غیرخطی را به صورت دقیق به ترکیبی از زیرسیستم‌های خطی تبدیل می‌کند، بنابراین طراحی یک کنترل کننده برای روابط تولید شده از رهیافت تاکاگی-سازینو دقیقاً

$$\left(\frac{mL^2}{3} \right) \ddot{\theta} - \frac{mgL}{2} M_1 a_1 = NK_m i - T_{Dist} \quad (22)$$

قانون دو: اگر z_1 کوچک باشد، آنگاه:

$$\left(\frac{mL^2}{3} \right) \ddot{\theta} - \frac{mgL}{2} M_2 a_2 = NK_m i - T_{Dist} \quad (23)$$

جهت پایدارسازی دینامیک سیستم، از کنترل کننده‌ی جبران‌ساز توزیع یافته موازی استفاده می‌شود. دینامیک فضای حالت خطی سازی شده سیستم، به صورت زیر معرفی می‌گردد:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{3mgLa_1}{2mL^2} & 0 & \frac{-3K_m}{mL^2} \\ 0 & \frac{-NK_m}{L_s} & \frac{-R}{L_s} \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{3mgLa_2}{2mL^2} & 0 & \frac{-3K_m}{mL^2} \\ 0 & \frac{-NK_m}{L_s} & \frac{-R}{L_s} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_s} \end{bmatrix} \quad (24)$$

بازخورد حالت سیستم کنترل جبران‌ساز به فرم معادله (۲۵) استخراج می‌گردد:

$$u(t) = -(h_1 k_1 x + h_2 k_2 x) \quad (25)$$

در ادامه، مسئله‌ی بررسی پایداری و همچنین طراحی بهره‌های کنترل کننده مورد توجه قرار می‌گیرد. در این راستا، ابتدا با فرض معلوم بودن بهره‌های جبران‌ساز توزیع یافته موازی، پایداری سیستم حلقه بسته بررسی شده و سپس روشی برای طراحی بهره‌های پایدارساز ارائه خواهد شد.

۳-۳- شرایط پایداری سیستم‌های فازی

عمومی‌ترین هدف سیستم‌های کنترل کننده، تنظیم یا ردیابی پارامترهای سیستم است، اما مسئله‌ی مهم دیگری به‌عنوان پایداری نیز باید مورد توجه قرار گیرد. پایداری سیستم‌ها یکی دیگر از اهداف مهم مهندسان طراح در حوزه‌ی سیستم‌های کنترل به شمار می‌رود. در صورتی که پایداری یک سامانه‌ی کنترلی مختل شود، کیفیت پاسخ های ماندگار و گذرا از دست رفته و بدیهی است در این حالت، ردیابی پارامترهای مطلوب سیستم، امکان پذیر نیست. بنابراین، بررسی پایداری هر سیستم کنترلی، یک امر مهم است [۲۴]. جهت بررسی پایداری جبران‌ساز توزیع یافته موازی، در ابتدا شرایط پایداری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

قضیه یک: در سیستم فازی پیوسته معادله (۱۲)، با فرض $u(t) = 0$ زمانی پایدار مجانبی فراگیر است که یک پاسخ مثبت معین برای ماتریس P در معادله (۲۶) وجود داشته باشد به گونه‌ای که برای همه‌ی زیرسیستم‌ها صدق کند [۲۵].

$$A_i^T P + P A_i < 0 \quad i = 1, 2, \dots, r \quad \blacksquare \quad (26)$$

حال با فرض پایداری یک سیستم حلقه بسته و ترکیب معادلات (۱۲) و (۱۵)، معادله (۲۷) محاسبه می‌شود.

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t))h_j(z(t)) \{A_i - B_i K_j\} x(t) \quad (27)$$

با فرض $G_{ij} = A_i - B_i K_j$ ، معادله (۲۷) می‌تواند به فرم معادله ۲۸ استخراج شود.

¹ Lyapunov

که در آن θ_a زاویه مطلوب جهت ارسال به کنترل کننده، a بهره شدت رهگیری، s شیب رهگیری برگرفته از مشتق زمانی حسگر نیرو، θ_0 موقعیت زاویه‌ای لینک در لحظه شروع کار ربات، θ_p موقعیت زاویه-ای لینک در یک پله‌ی زمانی قبل، $LC1$ مشتق زمانی حسگر نیروی جلوی ران و $LC2$ مشتق زمانی حسگر نیروی پشت ران است. بهره شدت رهگیری (a)، توسط کلیدهای تنظیم تعبیه شده روی ربات توسط کاربر تنظیم می‌شود تا با توجه به فیزیک بدنی و سرعت حرکتی کاربر، بیشترین هماهنگی بین ربات و کاربر ایجاد شود. آنالیز شیب رهگیری s ، اطلاعات مربوط به شتاب حرکت ران را در اختیار قرار می‌دهد، بدین معنی که هرچه سرعت حرکت کاربر بیشتر باشد، متناسب با آن شتاب زاویه‌ای موتور جهت هماهنگی ربات و کاربر محاسبه می‌شود.

هر کدام از شروط معادله‌ی (۳۵) برقرار گردد، زاویه رهگیری مطابق با آن افزایش یا کاهش می‌یابد و یا در حالت سوم ثابت می‌ماند. به‌عنوان مثال، در هنگام حرکت ران به سمت جلو، نیروی بین ران و لینک افزایش می‌یابد و حسگر نیرو جلو، افزایش نرخ نیروی اندرکنش بین ران و لینک را رؤیت می‌کند. با دریافت این اطلاعات توسط زیرسیستم تصمیم، شروط سه‌گانه بررسی می‌شود و در حالت ذکر شده، شرط (a) برقرار است و باید زاویه رهگیری متناسب شیب رهگیری، طبق معادله (۳۵) افزایش یابد تا لینک ربات بتواند حرکت کاربر را رهگیری کند. مشابه با حالت اول، شرط (b) باعث کاهش زاویه و شرط (c) باعث حفظ موقعیت ربات می‌گردد.

بر اساس این الگوریتم، ربات به صورت خودکار، فرآیند برداشت و گذاشت بار را تشخیص می‌دهد. برای هر لینک، یک زیرسیستم تصمیم مجزا تعبیه می‌گردد تا به صورت مستقل زاویه رهگیری هر لینک را تولید نموده و به کنترل کننده ارسال نماید و کنترل کننده فرآیند رهگیری را با اعمال ورودی کنترلی مناسب انجام دهد. هدف این مقاله، بررسی عملکرد سیستم کنترلی جبران‌ساز توزیع‌یافته موازی برای ربات میان‌تنه پیشنهادی می‌باشد و با فرض اطلاعات تولید شده توسط زیرسیستم تصمیم به عنوان مقدار مطلوب، این شبیه‌سازی صورت می‌پذیرد.

۴- ابزار شبیه‌سازی

Simulink یک ابزار شبیه‌سازی بسیار قدرتمند است که به صورت یک کتابخانه در داخل نرم افزار MATLAB گنجانده شده است و مدل‌سازی توسط بلوک‌های این کتابخانه به صورت دیگرام‌های بلوکی انجام می‌شود. با استفاده از Simulink می‌توان رفتار یک سیستم را بدون نیاز به ساختن آن تحلیل نمود و در نتیجه، یک مهندس با استفاده از آن می‌تواند علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه و زمان، به بررسی تأثیر اغتشاشات و سایر عوامل ورودی بر عملکرد یک سیستم دینامیکی بپردازد. این شبیه‌سازی‌ها شرایطی را در اختیار می‌گذارد تا عکس‌العمل یک سیستم در صورت تغییر پارامترهای ورودی آن به خوبی شناخته شود. Simulink دارای کتابخانه‌های زیادی در زمینه رشته‌های مختلف از جمله برق، مکانیک و هوافضا است [۲۶].

کنترل کننده‌ی جبران‌ساز توزیع‌یافته موازی در محیط Simulink MATLAB مدل‌سازی گردید و نحوه عملکرد آن با استفاده از رهیافت خطی‌سازی تاکاگی-سازینو مورد بررسی قرار گرفت.

معادل طراحی کنترل کننده برای یک سیستم غیرخطی است.

پس از بررسی شرایط پایداری سیستم فازی در بخش قبل، از شروط پایداری استخراج شده، بهره‌های کنترل کننده جبران‌ساز توزیع-یافته موازی محاسبه می‌شود.

$$G_{ij} = A_i - B_i K_j \quad (32)$$

برای این هدف، از معادلات (۲۹)، (۳۰) و (۳۲) استفاده شده و مجموعه نامعادلات (۳۳) و (۳۴) برای تولید بهره‌های کنترلی استخراج می‌شود.

$$-XA_i^T - A_i X + XK_j^T B_i^T + B_i K_j X > 0 \quad (33)$$

$$\begin{aligned} -XA_i^T - A_i X - XA_j^T - A_j X + XK_j^T B_i^T \\ + B_i K_j X + XK_j^T B_j^T + B_j K_j X \geq 0 \end{aligned} \quad (34)$$

با فرض $M_i = K_i X$ طوری که $X > 0$ باشد، آنگاه عبارت $K_i = M_i X^{-1}$ در نامعادله‌های ۳۳ و ۳۴ جایگذاری می‌گردد.

$$-XA_i^T - A_i X + M_i^T B_i^T + B_i M_i > 0$$

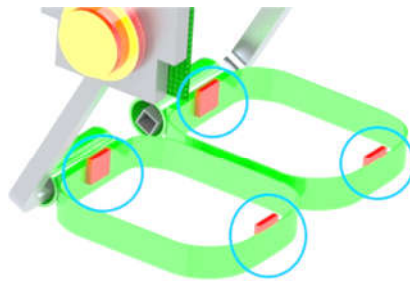
$$\begin{aligned} -XA_i^T - A_i X - XA_j^T - A_j X + M_i^T B_i^T \\ + B_i M_i + M_j^T B_j^T + B_j M_j \geq 0 \end{aligned}$$

نامعادلات به‌دست آمده برای محاسبه ضرایب بهره کنترل کننده-

ی جبران‌ساز توزیع‌یافته موازی استفاده می‌شود [۲۵]. این بهره‌ها با استفاده از روش حل نامعادلات ماتریسی خطی^۱ در نرم‌افزار MATLAB محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه ضرایب تولید شده در این بخش، از نامعادلاتی استنتاج می‌گردد که خود از شرایط پایداری به‌دست آمده است، بنابراین پایداری این کنترل کننده تضمین می‌شود.

۳-۵- زیرسیستم تصمیم (واحد تشخیص نیت حرکت)

با توجه به اینکه در هنگام حرکت کاربر، اندرکنش بین ربات و اعضای بدن ایجاد می‌گردد، با جایگذاری صحیح تعدادی از حسگرها در نقاط کلیدی، می‌توان اطلاعات شاخصی به دست آورد تا بتوان یک الگوریتم رفتاری مطلوب بر اساس اطلاعات حسگرها طراحی نمود. شکل ۴، نشان‌دهنده‌ی محل قرارگیری حسگرهای نیرو است که وظیفه‌ی اندازه‌گیری اندرکنش بین ربات و بدن کاربر را دارد.

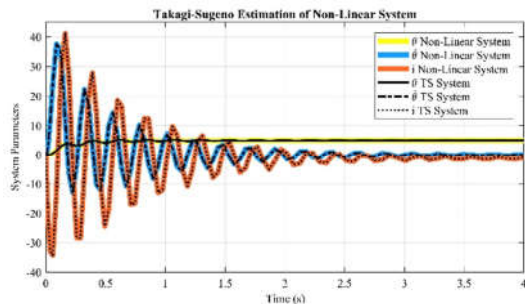


شکل ۴- پیکربندی حسگرهای نیرو

جهت تشریح این مسئله، روابط حاکم بر زیرسیستم تصمیم و شرایط آن به‌صورت معادله (۳۵) ارائه می‌شود:

$$\begin{cases} \theta_a = (a \times s) + \theta_0 + \theta_p & \text{if: } LC1 > 0 & (a) \\ \theta_a = -(a \times s) + \theta_0 + \theta_p & \text{if: } LC2 > 0 & (b) \\ \theta_a = \theta_p & \text{if: } LC1 \cong 0 \cap LC2 \cong 0 & (c) \end{cases} \quad (35)$$

^۱ Linear matrix inequality (LMI)

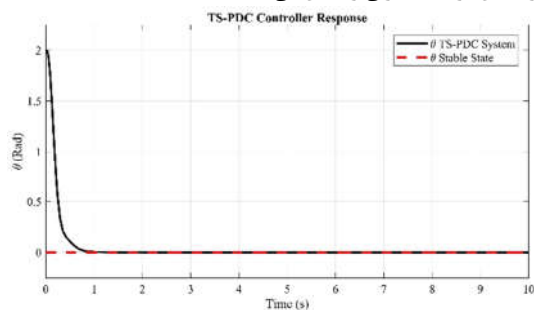


شکل ۷- تخمین توسط رهیافت تاکاگی-ساژینو

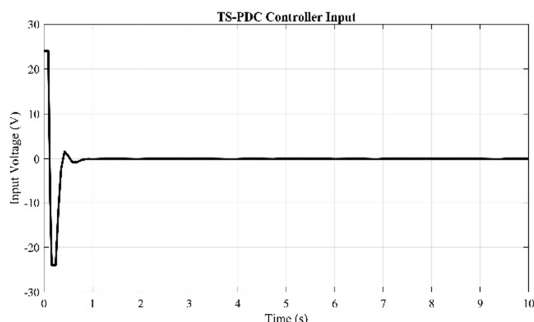
همچنین پاسخ شبیه‌سازی کل سیستم غیر خطی با سیستم خطی- سازی شده با این رهیافت در نمودار شکل ۷ ارائه می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که رهیافت تاکاگی-ساژینو به صورت دقیق مدل غیر خطی سیستم اصلی را معادل‌سازی نموده است.

۵-۲- پاسخ حلقه بسته کنترل‌کننده جبران‌ساز توزیع- یافته موازی

در شبیه‌سازی‌های انجام شده، ولتاژ ورودی موتور به عنوان ورودی کنترلی و زاویه لینک ربات به عنوان خروجی سیستم، در نظر گرفته می‌شود. جهت بررسی رفتار کنترل‌کننده جبران‌ساز، با اعمال یک شرایط اولیه غیر صفر به خروجی، رفتار کنترل‌کننده در راستای پایدارسازی سیستم بررسی می‌شود. نمودار شکل ۷ پاسخ حلقه بسته سیستم کنترلی را نشان می‌دهد و مشهود است که کنترل‌کننده توانسته خروجی سیستم را به پایداری برساند. شکل ۸ ورودی کنترلی برای این فرآیند کنترلی را نشان می‌دهد.



شکل ۷- پاسخ حلقه بسته سیستم کنترلی

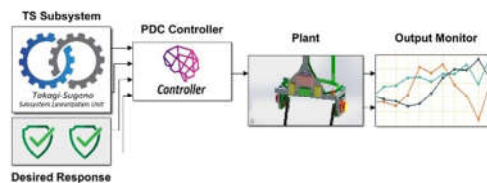


شکل ۸- ورودی سیستم کنترلی

شکل ۵ پیکربندی مدل‌سازی انجام شده در محیط Simulink MATLAB را نشان می‌دهد که واحدهای مختلف آن به شرح جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱- واحدهای شبیه‌سازی در سیمولینک

نام زیرسیستم	توضیحات
TS Subsystem	زیرسیستم مربوط به رهیافت خطی- سازی تاکاگی-ساژینو
PDC Controller	کنترل‌کننده جبران‌ساز توزیع‌یافته موازی
Desired Response	زیرسیستم تعیین پاسخ مطلوب (زیرسیستم تصمیم)
Plant	سیستم غیرخطی موردنظر جهت خطی‌سازی و اعمال ورودی کنترلی
Output Monitor	زیرسیستم نمایش نتایج و خروجی- های کنترل‌کننده

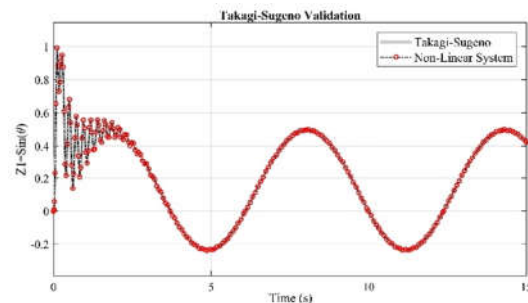


شکل ۵- پیکربندی شبیه‌سازی در Simulink

۵- نتایج شبیه‌سازی

۵-۱- صحت‌سنجی رهیافت خطی‌سازی تاکاگی-ساژینو

جهت صحت‌سنجی کنترل‌کننده جبران‌ساز که با استفاده از رهیافت تاکاگی-ساژینو طراحی شده است، عبارت غیرخطی سیستم با معادل خطی‌سازی شده به روش تاکاگی-ساژینو طبق شکل ۶ مقایسه می‌گردد.



شکل ۶- تخمین عبارت غیرخطی با رهیافت تاکاگی-ساژینو

پس از معرفی ربات پیشنهادی و استخراج دینامیک حاکم بر مسئله، کنترل کننده جبران ساز توزیع یافته موازی با رهیافت خطی سازی تاکاگی-ساژینو ارائه شد و رفتار کنترل کننده پیشنهادی در محیط سیمولینک متلب شبیه سازی شد. بر اساس نتایج ارائه شده، رهیافت خطی سازی تاکاگی-ساژینو، به صورت دقیق معادلات غیرخطی را به فرم زیرسیستم های خطی تخمین می زند. همچنین کنترل کننده جبران ساز توزیع یافته موازی در حفظ پایداری سیستم و رهگیری پاسخ حلقه بسته، عملکرد مطلوبی را برای کنترل لینک ربات اسکلت خارجی ارائه نمود. در نتیجه، این سیستم کنترلی جهت اعمال بر موتورهای ربات به طور مستقل، می تواند ورودی کنترلی مناسب در راستای ره گیری مطلوب را تولید نماید و پاسخ حلقه بسته سیستم را به مقدار مورد نظر میل دهد.

۷- نمادها

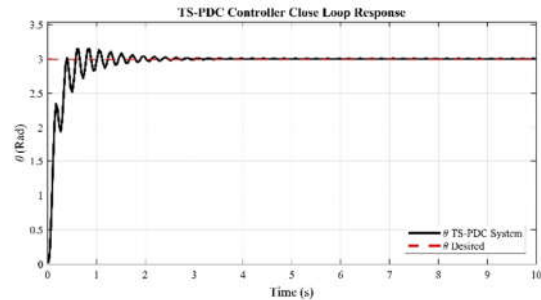
J_m	ممان اینرسی ($Kg.m^2$)
m	جرم (Kg)
T	گشتاور پیچشی ($N.m$)
L	طول (m)
N	ضریب جعبه دنده
R	مقاومت الکتریکی (ohm)
i	جریان الکتریکی (A)
L_s	اندوکتانس موتور الکتریکی (mH)
K_m	ضریب القایی موتور الکتریکی ($N.m/A$)
θ	زاویه (Rad)
V	اختلاف پتانسیل الکتریکی ($Volt$)

۸- مراجع

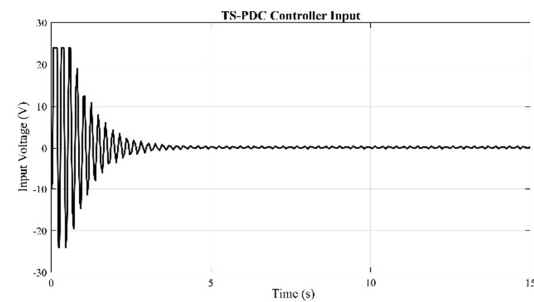
- [1] Govindu N.K., & Babski-Reeves K. Effects of personal, psychosocial and occupational factors on low back pain severity in workers. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 44, 335-341, 2014.
- [2] Shieh S.-H., Sung F.-C., Su C.-H., Tsai Y., and Chia-Rong Hsieh V. Increased low back pain risk in nurses with high workload for patient care: A questionnaire survey. *Taiwanese Journal of Obstetrics & Gynecology*, Vol. 55, 525-529, 2016.
- [3] محسنی بندپی م.ع، فخری م، احمدشیروانی م، باقری نسلمی م، و خلیلیان ع. بررسی اپیدمیولوژیک کمردرد در پرستاران. *مجله دانشگاه علوم پزشکی بابل، سال هفتم، شماره ۲ (پیاوردی ۲۶)، صفحه ۳۵ الی ۴۰، ۱۳۸۴.*
- [4] O'Sullivan L., Nugent R., and Van Der Vorm J. Standards for the safety of exoskeletons used by industrial workers performing manual handling activities: A contribution from the Robo-Mate project to their future development. *Procedia Manufacturing*, Vol. 3, 1418-1425, 2015.
- [5] کریم ع. طراحی کنترل کننده غیرخطی بهینه مقاوم بالانتهای بیرون-پوش اسکلت خارجی با هدف افزایش توان. *پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان، ۱۳۹۳.*
- [6] Tran H., Cheng H., Rui H., Lin X., Duong M., and Chen Q. Evaluation of a Fuzzy-Based Impedance Control Strategy on a Powered Lower Exoskeleton. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 8, 103-123, 2015.
- [7] Lu R., Li Z., Su C.-Y., and Xue, A. Development and Learning Control of a Human Limb With a Rehabilitation

پس از اطمینان از پایداری کنترل کننده جبران ساز و صحت عملکرد واحد خطی سازی تاکاگی-ساژینو، این کنترل کننده جهت رسیدن به پاسخ حلقه بسته دلخواه بررسی می شود. همانطور که از نمودار شکل ۹ مشهود است، سیستم کنترلی توانسته به صورت پایدار، پاسخ مطلوب حلقه بسته را رهگیری نماید.

شکل ۱۰، ولتاژ ورودی کنترلی تولید شده توسط کنترل کننده جهت اعمال به موتور الکتریکی را نشان می دهد که در راستای رهگیری پاسخ حلقه بسته، در محدوده ولتاژ استاندارد موتور (حداکثر ۲۴ ولت) اعمال شده است.



شکل ۹- پاسخ حلقه بسته سیستم کنترلی



شکل ۱۰- ورودی سیستم کنترلی

قابل ذکر است که پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی طبق جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- پارامترهای شبیه سازی

پارامتر	اندازه	پارامتر	اندازه
J_m	۰/۰۰۰۸	R	۱/۲
m	۲	L_s	۰/۰۵
K_m	۰/۰۵	L	۰/۳۵
N	۱۰	V_{max}	۲۴

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، روش کنترلی جبران ساز توزیع یافته موازی جهت اعمال بر یک ربات اسکلت خارجی چهار درجه آزادی میان تنه ارائه شد.

- [۲۴] تقی‌راد ح. ر. مقدمه‌ای بر کنترل مدرن (ویرایش سوم)، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۹۳.
- [25] Tanaka K., and Wang H.O. *Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach*. John Wiley & Sons incorporated, New York, 2001.
- [26] Kumar Tyagi A. *MATLAB and Simulink for Engineers*. Oxford University Press, London, 2012. ISBN: 978-0-19-807244-7.
- Exoskeleton. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, 3776-3785, 2014.
- [8] Stopforth, R. Customizable Rehabilitation Lower Limb Exoskeleton System. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 9, NO. 4, 152-158, 2012.
- [9] Sanz-Merodio D., Cestari M., Arevalo J.C., Carrillo X.A., and Garcia E. Generation and control of adaptive gaits in lower-limb exoskeletons for motion assistance. *Advanced Robotics*, Vol. 28, 32-338, 2014.
- [10] Cruciger O., Schildhaue T.A., Meindl R.C., Tegenthoff M., Schwenkreis P., Citak M., & Aach M. Impact of locomotion training with a neurologic controlled hybrid assistive limb (HAL) exoskeleton on neuropathic pain and health related quality of life (HRQoL) in chronic SCI: a case study. *Disability and Rehabilitation Assistive Technology*, Vol. 11, 529-534, 2014.
- [11] Agarwal P., Fox J., Yun Y., O'Malley M.-K., and Deshpande A.D. An index finger exoskeleton with series elastic actuation for rehabilitation: Design, control and performance characterization. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 34, 1747-1772, 2015.
- [12] Chen B., Ma H., Qin L.-Y., Gao F., Chan K.-M., Law S.-W., Qin L., and Liao W.-H. Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons. *Journal of Orthopaedic Translation*, Vol. 5, 26-37, 2016.
- [13] Wu Q., Wang X., Du F., and Zhang X. Design and Control of a Powered Hip Exoskeleton for Walking Assistance. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 12, NO. 3, 18-28, 2014.
- [14] Desbrosses K. Manual handling tasks performed with an upper limbs exoskeleton at the workplace. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, Vol. 60, 100-101, 2017.
- [15] Hu J., Xu X., and Zhu K. Arm Exoskeleton Based on Model Predictive Control with Input/Output Feedback Linearization. *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, Vol. 3, 432-439, 2013.
- [16] Luna C.O., Rahman M.H., Archambault P., and Zhu W.-H. Virtual decomposition control of an exoskeleton robot arm. *Robotica*, Vol. 34, 1747-1772, 2014.
- [17] Huang J., Huo W., Xu W., Mohammed S., and Amirat Y. Control of Upper-Limb Power-Assist Exoskeleton Using a Human-Robot Interface Based on Motion Intention Recognition. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 12, 1257-1270, 2015.
- [18] Garrido J., Yu W., and Li X. Modular design and control of an upper limb exoskeleton. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, 2265-2271, 2016.
- [19] Witkowski M., Cortese M., Cempini M., Mellinger J., Vitiello N., and Soekadar, S.R. Enhancing brain-machine interface (BMI) control of a hand exoskeleton using electrooculography (EOG). *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, Vol. 11, 165-170, 2014.
- [20] Leonardis D., Barsotti M., Loconsole C., Solazzi M., Troncossi M., Mazzotti C., Castelli V.P., Procopio C., Lamola G., Chisari C., Bergamasco M., and Frisoli A. An EMG-Controlled Robotic Hand Exoskeleton for Bilateral Rehabilitation. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 8, 140-151, 2015.
- [21] Murray S.A., Ha K.H., Hartigan C., and Goldfarb M. An Assistive Control Approach for a Lower-Limb Exoskeleton to Facilitate Recovery of Walking Following Stroke. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 23, 441-449, 2014.
- [22] Anwar T., and Al Juamily A. Adaptive Trajectory Control to Achieve Smooth Interaction Force in Robotic Rehabilitation Device. *Procedia Computer Science*, Vol. 42, 160-167, 2014.
- [23] Lee J.-W., Kim H., Jang J., and Park S. Virtual model control of lower extremity exoskeleton for load carriage inspired by human behavior. *Auton Robot*, Vol. 38, 211-223, 2014.