

بررسی اثر پارامترهای مختلف طراحی مسیر بر روی گشتاور مفصل زانوی ربات انسان- نما سورنا ۳

مهیار اشکوری^۱، عقیل یوسفی کما^۲، مسعود شریعت‌پناهی^۳ و مجید خدیو^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران mahyar.ashkvari@ut.ac.ir

^۲ هیات علمی دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، aykoma@ut.ac.ir

^۳ هیات علمی دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، mshariatp@ut.ac.ir

^۴ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی mkhadiv@mail.kntu.ac.ir

چکیده - مفصل زانو در ربات‌های انسان‌نما به عنوان یک مفصل تاثیرگذار در تحلیل این دسته از سیستم‌های دینامیکی پیشرفته محسوب می‌شود. از این رو، نیاز به بررسی اثر پارامترهای مختلف از جمله پارامترهایی که در طراحی مسیر حرکت ربات نقش اساسی را ایفا می‌کنند، بر روی گشتاور این مفصل لازم است. لذا در این تحقیق، با ارائه مدل دینامیکی ربات انسان‌نما سورنا ۳، گشتاورهای مورد نیاز مفاصل محاسبه شده است. با توجه به فرم کلی معادلات بدست آمده و ضرورت پایداری ربات در فازهای مختلف حرکت، نقش طراحی مسیر پایدار بیش از پیش نمایان خواهد شد. این مسئله با در نظر گرفتن برخی پارامترهای طراحی مسیر که از تجربه عملی موجود در ساخت ربات سورنا ۳ بدست آمده‌اند، لحاظ شده است. برای بررسی تاثیر این پارامترها، به بهینه‌سازی حرکت ربات به کمک الگوریتم ژنتیک با استفاده از این پارامترها بر اساس تابع هدفی که ماکزیمم گشتاور مفصل زانو را حداقل می‌کند، پرداخته شده است. در نتیجه این روند، پارامترهای طراحی مسیر بهینه به نحوی بدست آمده‌اند که امکان رسیدن ربات سورنا ۳ را به حداکثر سرعت ۲ کیلومتر بر ساعت (که در واقع ۰.۸ کیلومتر بر ساعت از سرعت فعلی ربات بیشتر می‌باشد) در محیط شبیه‌سازی شده فراهم کرده است.

کلید واژه- الگوریتم ژنتیک، ربات انسان‌نما سورنا ۳، طراحی مسیر پایدار

۱- مقدمه

با پیشرفت روزافزون علم و فناوری، نیاز به استفاده از ربات‌ها در حوزه‌های مختلف شامل صنعت، حمل و نقل، اکتشافات به جز جدایی‌ناپذیر زندگی بشر تبدیل شده است. حال در این میان، با توجه به شرایط حاکم بر زندگی انسان‌ها، ساخت ربات‌هایی که ساختاری شبیه به بدن انسان داشته باشند، می‌تواند یک موضوع جذاب و بسیار کاربردی باشد. از این رو، از سالیان نه چندان دور فعالیت‌های گوناگونی بر روی این ربات‌ها در زمینه‌های افزایش قابلیت‌ها و توانایی‌ها، چه از نظر سخت‌افزاری و چه از نظر حرکتی، صورت گرفته است. در این میان، یکی از چالش‌هایی که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است، مسئله افزایش سرعت حرکت ربات می‌باشد.

مسئله افزایش سرعت حرکت در ربات‌های انسان‌نما از دیدگاه‌های مختلفی بررسی شده است. یکی از این دیدگاه‌ها، بررسی اثر افزودن مفصل پنجه به پای ربات می‌باشد. به عنوان نمونه، نیشیواکی با افزودن مفصل پنجه به ربات اچ ۶، ماکزیمم سرعت ربات را به میزان ۸۰٪ افزایش داد [۱]. آن با اضافه کردن

مفصل پنجه به ربات ۱۴ درجه آزادی نشان داد که بیشینه طول گام پایدار ۲.۳۵ برابر می‌شود که در نتیجه این افزایش طول گام، بیشینه سرعت ربات نیز افزایش پیدا می‌نماید [۲]. کاجیتا نیز توانست با در نظر گرفتن این اثر بر روی ربات، دویدن با سرعت ۳ کیلومتر بر ساعت را شبیه سازی کند [۳، ۴]. عامل دیگری که در افزایش سرعت حرکت ربات نقش دارد، اثر مرکز جرم پای ربات می‌باشد. ایده بالا بردن مرکز جرم پاهای ربات، منجر به سبک‌تر شدن انتهای پا می‌شود که این مسئله باعث می‌شود در هنگام گذاشتن پا بر روی زمین ضربات ناخواسته کمتری ایجاد شود. از آنجایی که این ضربات یکی از عوامل محدود کننده سرعت ربات تشخیص داده شده‌اند، لذا این ایده منجر به افزایش سرعت حرکت شده است [۵]. فعالیت دیگری که در راستای افزایش سرعت انجام شده است، استفاده از موتورهای جدید و طراحی سخت‌افزارهای پیشرفته می‌باشد [۶]. در این راستا، یکی از راه‌های رسیدن به سرعت‌های بالاتر، پایداری و مقاومت بالاتر ربات‌ها معرفی شده است که بدین منظور سیستم‌های کنترلی پیشرفته‌تری مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۷]. مورد دیگری که برای افزایش سرعت در نظر گرفته

نیاز برای موتور در طول حرکات مختلف (در این پژوهش، به بررسی حرکت بر روی سطح صاف پرداخته شده است). استخراج شود.

۲-۱- مدلسازی دینامیک سمت بار

منظور از سمت بار، تمام اجزا بعد از خروجی سیستم تحریک (خروجی هارمونیک درایو) است که با توجه به اینکه در این حالت، فقط اینرسی و وزن لینک‌های ربات دو عامل تعیین کننده هستند، لذا استخراج معادلات به فرم تحلیلی می‌تواند بسیار کارساز باشد. به علت درجات آزادی بالا، حجم بالای محاسبات و احتمال خطا در محاسبات صحنه گذاری معادلات ضروری است. در این حالت، معادلات کلی به صورت معادله (۱) خواهد بود که در این معادله ترم‌های سمت چپ به ترتیب شامل اثرات اینرسی، گریز از مرکز، کوریولیس و گرانشی می‌باشد.

$$M_{18 \times 18}(q)\ddot{q}_{18 \times 1} + C_{18 \times 1}(q, \dot{q}) + G_{18 \times 1}(q) \quad (1) \\ = Q_{18 \times 1}$$

ترم سمت راست معادله (۱)، بردار نیروهای تعمیم یافته می‌باشد که در واقع، گشتاورهای تحریک مفاصل و نیروها و گشتاورهای داخلی را به فضای مختصات تعمیم یافته نگاشت می‌کند و به صورت معادله (۲) قابل بیان است.

$$Q = B\tau + J_V^T F_E + J_\omega^T \tau_E \quad (2)$$

در معادله (۲) ماتریس B ، نگاشت اثرات گشتاورهای تحریک مفاصل به فضای مختصات تعمیم یافته، J ماتریس زاکوبین نقطه تماس، τ بردار گشتاورهای تحریک و F بردار نیروهای داخلی می‌باشد.

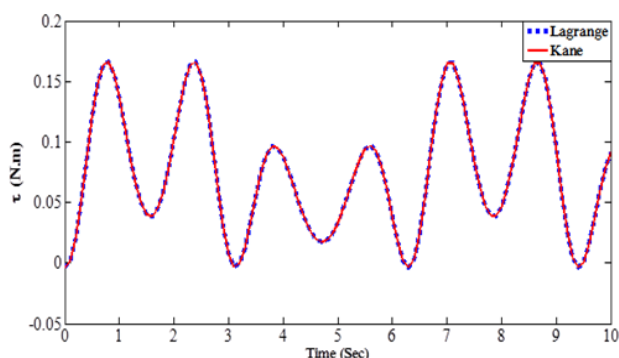
در واقع، برای استخراج معادلات حرکت، ابتدا ربات بدون هیچ گونه تعاملی با محیط در نظر گرفته شده و معادلات برای این حالت توسعه داده می‌شوند. سپس در فازهای مختلف حرکتی، قیدهای ناشی از تعامل با محیط را به صورت نیروهای مجهول وارد معادلات می‌شوند. در نهایت، برای هر حالت و برای حرکتی مشخص، معادلات دینامیک معکوس حل می‌شود تا گشتاورهای مورد نیاز در سمت بار برای تحقق حرکت مورد نظر و نیروها و ممان‌های تکیه‌گاهی بدست آیند. با توجه به معادلات حرکت در فاز تک تکیه‌گاهی که در معادله (۳) و (۴) آورده شده‌اند، مشخص است که نیروها و گشتاورهای یکتایی، طبق معادله (۵)، برای حرکت بدست می‌آیند:

شده است، عامل وزن ربات می‌باشد که در این راستا، جینجر و همکاران با بهینه سازی بر اساس تابع هدف وزن و در نظر گرفتن قیدها به صورت تنش‌های مجاز در قطعات، امکان دستیابی به سرعت ۲.۴ کیلومتر بر ساعت را برای ربات جانیه فراهم کردند [۸].

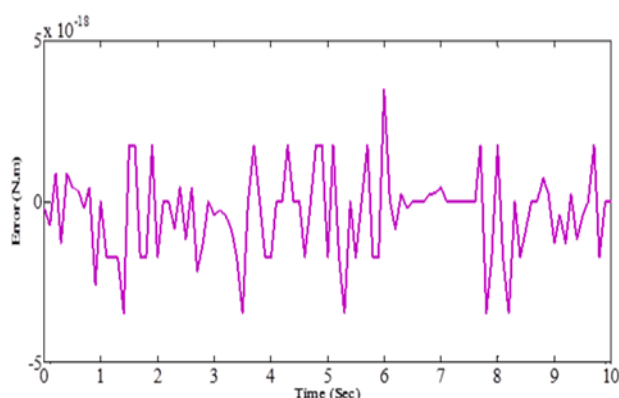
از آنجایی که بزرگترین مشکل برای دستیابی ربات‌های انسان‌نما به سرعت ۱ کیلومتر بر ساعت و بالاتر از آن، محدودیت جریان موتورهای یا به عبارت دیگر گشتاور مفاصل می‌باشد، لذا برای حل این مشکل می‌توان دو عامل مهم را مورد بررسی قرار داد. عامل اول، که رایج‌ترین راه حل محسوب می‌شود و در نمونه‌های خارجی نیز مورد استفاده قرار گرفته است، این است که با تغییر پارامترها و طراحی جدید سرعت حرکت افزایش پیدا کند. این پارامترها عبارت‌اند از ویژگی‌های فیزیکی لینک‌ها از جمله جرم اعضا طول آنها، تغییر پارامترهای مفاصل مانند تغییر اینرسی در سمت موتور مفصل و یا کاهش اصطکاک در مفصل. اما عامل دوم، که می‌توان گفت منحصر به تحقیق پیش رو است، بررسی اثر پارامترهای طراحی مسیر بر روی گشتاور مفاصل است. در این حالت، در واقع این طور می‌توان مسئله را بیان کرد که با ساختار موجود ربات، چه کارهایی می‌توان انجام داد که ربات به سرعت‌های بالاتر با محدودیت‌های موجود دست یابد. از این رو، با توجه به اهمیت گشتاور مفصل زانو، برای بررسی تاثیر این پارامترها، به بهینه سازی حرکت ربات بر اساس تابع هدفی که ماکزیمم گشتاور زانو را مینیمم کند، پرداخته شده است. لازم به ذکر است که این پارامترهای طراحی مسیر که همان پارامترهای بهینه‌سازی محسوب می‌شوند، بر اساس تجربه عملی بدست آمده از ساخت ربات سورنا ۳ انتخاب شده‌اند و در هیچ نمونه خارجی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. نتیجه این بهینه سازی به این صورت خواهد بود که ربات سورنا ۳ که دارای ماکزیمم سرعت ۱.۲ کیلومتر بر ساعت بود، به کمک این پارامترهای جدید قابلیت رسیدن به سرعت ۲ کیلومتر بر ساعت را در محیط شبیه سازی خواهد داشت.

۲-۲ مدلسازی مسئله

با توجه به پیچیدگی‌های دینامیکی موجود در ربات‌های انسان‌نما، روند مدلسازی به دو قسمت مجزا تقسیم شده است. در واقع، پس از استخراج معادلات به فرم تحلیلی برای سمت بار و استخراج معادلات با استفاده از شناسایی برای سیستم تحریک، کافی است این دو دینامیک با هم ترکیب شوند تا گشتاور مورد



شکل ۱: خروجی گشتاور مفصل ران به ازای ورودی سینوسی به دو روش لاگرانژ و کین



شکل ۲: خطای بین دو روش

۲-۲- مدلسازی سیستم تحریک

سیستم تحریک متشکل از موتور، تسمه-پولی و هارمونیک درایو است. برای این قسمت، مدلسازی هر قسمت به صورت مجزا و به صورت تحلیلی نمی‌تواند راه‌گشا باشد. علت این است که در هر قسمت اجزای زیادی وجود دارد که به علت وجود اصطکاک خشک و ویسکوز و عدم قطعیت‌های ناشی از مدلسازی زیاد خواهد بود. در نتیجه، برای مدلسازی سیستم تحریک، یک بستر تست مناسب مطابق شکل (۳) شامل موتور، تسمه-پولی و هارمونیک درایو طراحی و ساخته شده و با استفاده از داده‌های به دست آمده از اندازه‌گیری ورودی و خروجی‌ها و شناسایی مدل، معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم تحریک استخراج می‌شود.

$$M_{18 \times 18}(q)\ddot{q}_{18 \times 1} + C_{18 \times 1}(q, \dot{q}) + G_{18 \times 1}(q) = B_{18 \times 12}\tau_{12 \times 1} + J_{18 \times 6}^T f_{6 \times 1} \quad (3)$$

$$M_{18 \times 18}(q)\ddot{q}_{18 \times 1} + C_{18 \times 1}(q, \dot{q}) + G_{18 \times 1}(q) = [B, J^T]_{18 \times 18} \begin{bmatrix} \tau \\ f \end{bmatrix}_{18 \times 1} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \tau \\ f \end{bmatrix} = [B, J^T]_{18 \times 18}^{-1} (M_{18 \times 18}(q)\ddot{q}_{18 \times 1} + C_{18 \times 1}(q, \dot{q}) + G_{18 \times 1}(q)) \quad (5)$$

اما برای فاز دوتکیه‌گاهی که معادلات آن در رابطه (۶) آورده شده است، به علت اینکه پاها یک زنجیره بسته سیستماتیکی را تشکیل می‌دهند، ربات دارای افزونگری عملگر است و در نتیجه در این حالت مسئله دینامیک معکوس دارای بینهایت جواب است. یکی از این جواب‌ها، جوابی است که با استفاده از شبه معکوس استخراج می‌شود و نرم مربعی بهینه پاسخ را بدست می‌دهد (معادله (۷)):

$$\begin{bmatrix} \tau \\ f \end{bmatrix}_{24 \times 1} = [B, J^T]_{24 \times 18}^{-1} (M_{18 \times 18}(q)\ddot{q}_{18 \times 1} + C_{18 \times 1}(q, \dot{q}) + G_{18 \times 1}(q)) \quad (6)$$

$$[B, J^T]_{24 \times 18}^{-1} = \text{pseudoinverse}([B, J^T]) \quad (7)$$

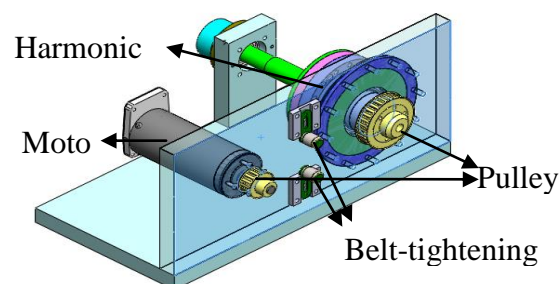
با توجه به تعداد درجات آزادی بالا، استخراج معادلات برای سمت بار بسیار پرخطا است. در نتیجه، برای اطمینان از صحت معادلات استخراج شده، از دو روش تحلیلی لاگرانژ و کین استفاده شده و معادلات دینامیکی با استفاده از هر دو رهیافت استخراج شده است. سپس، به هر دو مدل ورودی‌های یکسانی اعمال شده و نتایج با هم مقایسه شده‌اند. به عنوان نمونه، در دو شکل (۱) و (۲)، خروجی گشتاور مفصل ران، به ازای ورودی سینوسی به عنوان ورودی، بدست آمده از هر دو روش رسم شده‌اند. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، خطای بین دو روش از مرتبه بسیار کوچکی است که ناشی از خطای گرد کردن در نرم‌افزار است. این صحت‌گذاری نشان می‌دهد که در روند استخراج معادلات در سمت بار خطای محاسباتی رخ نداده است.

مدل دینامیکی کلی که مجموع دو دینامیک بیان شده است، با دقت خوبی استفاده کرد.

۳- طراحی مسیر و معرفی پارامترهای تاثیرگذار بر آن

روند کلی طراحی مسیر برای ربات‌های انسان‌نما بدین گونه است که با طراحی مسیر حرکت مچ پاها (به عنوان فضای کاری) متناسب با سطحی که ربات بر روی آن حرکت می‌کند و طراحی مسیر حرکت لگن (به عنوان فضای کاری) متناسب با حرکت پاها به گونه‌ای که پایداری حرکت را تضمین کند و استفاده از سینماتیک معکوس برای نگاشت از فضای کاری به فضای مفصلی، مسیرهای طراحی شده در فضای کاری، با استفاده از حل تحلیلی سینماتیک معکوس برای هر یک از پاها به فضای مفاصل نگاشت داده می‌شوند. این زوایای مفصلی بدست آمده در محاسبه گشتاور موتورها و در مسئله پایداری ربات نقش اساسی را ایفا می‌کنند. در واقع، مسئله طراحی مسیر و پایداری را می‌توان اینگونه به هم مرتبط کرد که با طراحی مسیر برای نقطه گشتاور صفر که در واقع نقطه ایست که در آن، برآیند نیروهای وارده از طرف زمین به پای ربات وارد می‌شود، به نحوی که مجموع ممان‌هایی که در صفحه افقی به کف پای ربات وارد می‌شود صفر باشد [۹]، مسیر نقطه گشتاور صفر مطلوب حاصل می‌شود و تا وقتی نقطه گشتاور صفر درون چندضلعی تکیه‌گاهی قرار دارد، ربات می‌تواند حرکت پایدار داشته باشد.

با توجه به اهمیت و نقش اساسی فرآیند طراحی مسیر در تحلیل ربات‌های انسان‌نما، لذا از تعدادی از این پارامترهای طراحی که در سرعت‌های بالا تاثیر زیادی بر روی پایداری ربات داشته و تغییرات آنها به میزان کوچک هم منجر به خارج شدن نقطه گشتاور صفر از محدوده پایداری می‌شود، به عنوان پارامترهای کلیدی استفاده خواهد شد. در جدول (۱) به معرفی این پارامترها با مفهوم فیزیکی آنها پرداخته شده است. ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که این پارامترها بر اساس تجربه عملی بکار گرفته شده در ساخت ربات سورنا ۳ انتخاب شده‌اند و در هیچ نمونه خارجی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند.

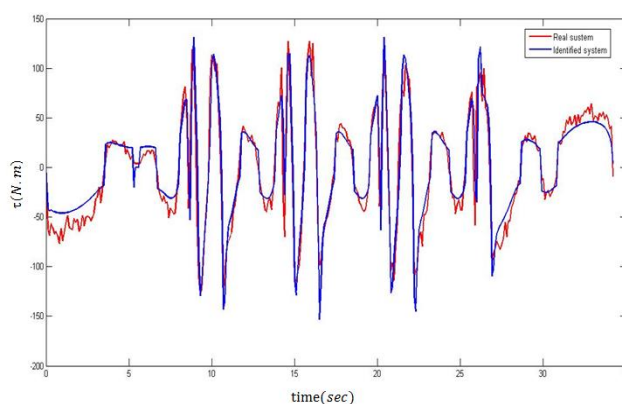


شکل ۳: بستر ساخته شده برای مدل‌سازی سیستم درایو از دو نمای مختلف

در شکل (۴) یک نمونه از مسیر زمانی گشتاور موتور و مدل شناسایی رسم شده‌اند. همانطور که مشخص است مدل خطی به خوبی توانسته است رفتار دینامیکی مفصل را تخمین بزند. مدل در نظر گرفته شده برای شناسایی پارامترها به صورت معادله (۸) می‌باشد:

$$\tau = J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + d\dot{\theta}^3 + m \operatorname{sign}(\dot{\theta}) \quad (8)$$

در معادله فوق پارامترها به صورت $J = -10.1776$ ، $b = -64.8774$ ، $d = 15.2394$ و $m = -20.1202$ شناسایی شده‌اند.



شکل ۴: مسیر زمانی گشتاور موتور بر اساس مدل شناسایی شده و آزمایش

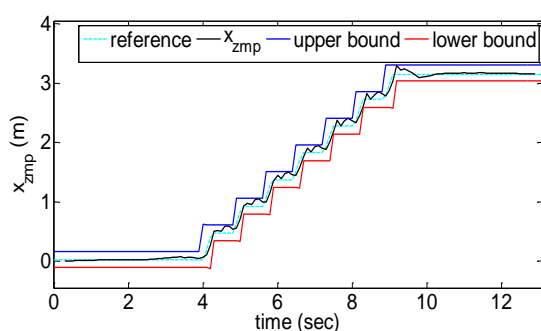
با توجه به نتایج بدست آمده از این دو بخش، می‌توان از

پارامترهای بدون بعد طراحی	
SC	میزان مشارکت فاز تک تکیه گاهی در یک گام از حرکت
R_d	نسبت موقعیت پلويس در راستای y به ترتیب در انتهای فاز دو تکیه گاهی و حداکثر مقدار آن در فاز تک تکیه گاهی
R_m	نسبت حداکثر انحراف ربات در راستای y
R_{zp}	ضربیتی که در محاسبه مینیمم ارتفاع پلويس اعمال می شود
R_{se}	نسبت فاصله مفصل ران از مچ پای تکیه گاه در شروع و پایان فاز تک تکیه گاهی

پایدار است.

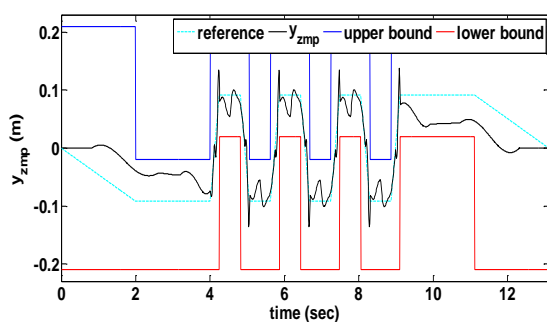
جدول ۲. پارامترهای طراحی بهینه شده

پارامترهای بهینه شده طراحی	
SC	۰.۷۴۹۸
R_d	۰.۵۵۵۵
R_m	۰.۴۹۴۳
R_{zp}	۰.۸۱۲۶
R_{se}	۱.۶۰۶۹



شکل ۵: مسیر زمانی مولفه افقی نقطه گشتاور صفر به همراه حدود بالا و پایین چندضلعی تکیه گاهی

در شکل (۶)، مشابه شکل (۵)، مسیر مولفه عمودی نقطه گشتاور صفر با گذشت زمان، به همراه محدوده های بالا و پایین چندضلعی تکیه گاهی رسم شده است. در این نمودار نیز مشخص است که این مولفه نیز همواره پایدار باقی خواهد ماند.



شکل ۶: مسیر زمانی مولفه عمودی نقطه گشتاور صفر به همراه حدود بالا و پایین چندضلعی تکیه گاهی

در شکل (۷)، مسیر کلی نقطه گشتاور صفر در حین حرکت رسم شده است. از این نمودار مشاهده می شود که این نقطه همواره در داخل چندضلعی تکیه گاهی باقی می ماند. همچنین، زمان انتقال این نقطه دارای کمترین نوسان نسبت به زمان

۴- بهینه سازی به کمک الگوریتم ژنتیک

با توجه به نیاز به کاهش گشتاورهای مفصل به منظور افزایش سرعت و بررسی پارامترهای طراحی مسیر بر روی این گشتاورها، پارامترهای طراحی مسیر معرفی شده، به عنوان پارامترهای بهینه سازی در نظر گرفته شده اند. در واقع، هدف، یافتن این پارامترها به گونه ای است که مسیری برای ربات تولید کند که گشتاور مفصل زانو (با توجه به اهمیت این مفصل) مینیمم گردد. این بهینه سازی باید سه شرط پایداری مسیر تولید شده، محدودیت حرکت زانو (به منظور جلوگیری از پدیده تکیه گاهی در حل سینماتیک معکوس مفصل زانو) و محدودیت سرعت مفصل به کمتر از ۱۰۰۰ دور در دقیقه را ارضا کند. روند بهینه سازی، بر اساس الگوریتم ژنتیک که می توان از آن به عنوان شناخته شده ترین الگوریتم بهینه سازی نام برد، می باشد. در این فرآیند، تابع هدف به صورت ماکزیمم گشتاور زانو در نظر گرفته شده است.

۵- نتایج

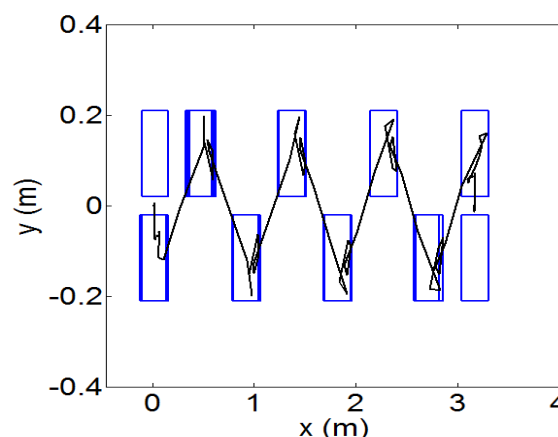
با توجه به پارامترهای طراحی مسیر بهینه شده که در جدول (۲) آورده شده اند، در قالب نمودارهای زیر پایداری ربات در سرعت ۲ کیلومتر بر ساعت، بررسی شده است. در شکل (۵)، مسیر مولفه افقی نقطه گشتاور صفر با گذشت زمان، به همراه محدوده های بالا و پایین چندضلعی تکیه گاهی رسم شده است. مطابق شکل، در حین حرکت، همواره مولفه افقی نقطه گشتاور صفر در محدوده مذکور باقی می ماند، لذا این مولفه همواره

از تجربه ساخت ربات انسان نما سورنا ۳ بدست آمده‌اند و در هیچ نمونه خارجی معرفی نشده‌اند، به بهینه‌سازی گشتاور موتور زانوی ربات سورنا ۳ به منظور افزایش سرعت ربات پرداخته شد که این فرآیند منجر به رسیدن ربات به سرعت ۲ کیلومتر بر ساعت (افزایش سرعت فعلی ربات به میزان ۰.۸ کیلومتر بر ساعت) در محیط شبیه‌سازی شده است.

مراجع

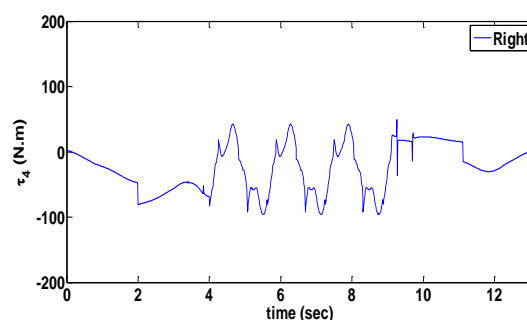
- [1] K. Nishiwaki, S. Kagami, Y. Kuniyoshi, M. Inaba, and H. Inoue, "Toe joints that enhance bipedal and fullbody motion of humanoid robots," in *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on*, 2002, pp. 3105-3110.
- [2] C. K. Ahn, M. C. Lee, and S. J. Go, "Development of a biped robot with toes to improve gait pattern," in *Advanced Intelligent Mechatronics, 2003. AIM 2003. Proceedings. 2003 IEEE/ASME International Conference on*, 2003, pp. 729-734.
- [3] S. Kajita, T. Nagasaki, K. Kaneko, K. Yokoi, and K. Tanie, "A hop towards running humanoid biped," in *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on*, 2004, pp. 629-635.
- [4] S. Kajita, K. Kaneko, M. Morisawa, S. Nakaoka, and H. Hirukawa, "ZMP-based biped running enhanced by toe springs," in *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, 2007, pp. 3963-3969.
- [5] S. Lohmeier, "Design and realization of a humanoid robot for fast and autonomous bipedal locomotion," Technische Universität München, 2010.
- [6] S. Lohmeier, T. Buschmann, and H. Ulbrich, "Humanoid robot LOLA," in *Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on*, 2009, pp. 775-780.
- [7] S. Lohmeier, T. Buschmann, M. Schwienbacher, H. Ulbrich, and F. Pfeiffer, "Leg design for a humanoid walking robot," in *Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on*, 2006, pp. 536-541.
- [8] M. Gienger, K. Löffler, and F. Pfeiffer, "Towards the design of a biped jogging robot," in *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, 2001, pp. 4140-4145.
- [9] M. Vukobratović and J. Stepanenko, "On the stability of anthropomorphic systems," *Mathematical biosciences*, vol. 15, pp. 1-37, 1972.

خواهد بود.



شکل ۷: مسیر زمانی نقطه گشتاور صفر به همراه شماتیک گام‌برداری ربات

در شکل (۸)، تغییرات گشتاور مفصل زانو با گذشت زمان به ازای فرآیند بهینه‌سازی و به کمک پارامترهای طراحی بهینه شده رسم شده است.



شکل ۸: نمودار گشتاور زانو (راست) بر حسب زمان

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در مقاله حاضر، با بکارگیری پارامترهای طراحی مسیری که