



کنترل مدلغزشی هیپربولیک دوگانه بر مبنای فیلتر کالمن خنثی برای بازوی رباتیک سه پا

سید علیرضا قریشی، امیرفرهاد احيائي*، مهدی رحمانی

گروه مهندسی برق-کنترل، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۹

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۲۶

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۱۲

کلمات کلیدی:

بازوی متحرک رباتیک

ربات سه پا

کنترل مد لغزشی هیپربولیک

دوگانه

فیلتر کالمن خنثی

خلاصه: در این مقاله ابتدا مدل‌سازی ریاضی و سه بعدی یک بازوی رباتیک سه پا با قابلیت حمل اجسام در سطوح ناهموار ارائه می‌شود، سپس با در نظر گرفتن اغتشاشات محیط و نویز، روش کنترلی مناسبی پیشنهاد می‌شود. کنترل این ساختار به دلیل دینامیک غیر خطی و خاص آن و حضور اغتشاشات و تأثیرات محیطی مساله‌ای بسیار مهم و پیچیده است و کنترل ربات باید قادر باشد تا در سریعترین زمان ممکن ضمن غلبه بر اغتشاشات و نویز محیط، ربات را در وضعیت مناسب قرار دهد. در این راستا، در مقاله حاضر روش کنترل مدلغزشی هیپربولیک دوگانه بر مبنای فیلتر کالمن خنثی برای سیستم‌های رباتیک سه پا شامل بازو توسعه داده شده و پایداری سیستم با بکارگیری تئوری توابع لیاپانوف اثبات می‌شود. در طراحی کنترلر پیشنهادی ضمن در نظر گرفتن اغتشاش در مدل دینامیکی سیستم از فیلتر کالمن خنثی برای کاهش اثر نویز بهره گرفته شده است که خود سبب بهبود عملکرد مقاوم سیستم در شرایط سخت می‌شود. در انتها عملکرد کنترلر ارائه شده در مقایسه با دو کنترلر دینامیک معکوس و کنترل مدلغزشی انتگرالی بر روی سیستم رباتیک انتخابی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که نتایج، نشان‌دهنده سرعت عمل و دقت بیشتر در پاسخ سیستم است.

۱- مقدمه

نکته را باید در نظر داشت که با افزایش تعداد پاها، تعداد راه‌اندازها و اتصالات افزایش می‌یابد که سبب افزایش هزینه، پیچیدگی کنترل و تحلیل گام‌برداری ربات می‌شود. بر این اساس، ساختار ربات سه پا به عنوان مصالحه‌ای بین تعادل و پیچیدگی پیشنهاد می‌شود که به دلیل داشتن دو نقطه تماس با زمین در زمان حرکت از تعادل مناسبی برخوردار است. از سوی دیگر به دلیل تعداد کمتر پا تحلیل گام‌برداری آن پیچیدگی کمتری خواهد داشت [۸]. از دیگر مسائل پراهمیت در کنترل این ربات‌ها حرکت پایدار در حضور نامعینی‌ها و اغتشاشات می‌باشد که تاکنون روش‌های مختلفی برای حل آن ارائه شده است [۹-۱۱]. در مراجع [۱۲-۱۴] برای پایداری حرکت ربات دوپای پنج لینیکی از کنترل فیدبک خطی‌ساز استفاده می‌شود. ساختار کنترل مقاوم تطبیقی برای ربات دوپای نیز در مرجع [۱۵] پیشنهاد شده

بیشتر موجودات زنده بر روی کره زمین از پا برای حرکت استفاده می‌کنند و این امر در سال‌های اخیر الهام‌بخش پژوهشگران در زمینه طراحی ربات‌های پادار بوده است. این ربات‌ها در مقایسه با انواع دیگر ربات‌های متحرک دارای مزایای بسیاری از جمله تماس ناپیوسته با سطح [۱]، قدرت مانور بالا، توانایی حرکت در مسیرهای ناهموار، قابلیت عبور از موانع و بالا رفتن از پله‌ها می‌باشند [۲-۷]. یکی از چالش‌های اصلی در طراحی ربات‌های پادار حفظ تعادل و پایداری ربات در زمان حرکت است. به غیر از ربات‌های دوپا، تعادل و پایداری انواع دیگر ربات‌های پادار تا حدودی قابل تضمین است، زیرا در هنگام حرکت دست کم دو نقطه تماس با زمین دارند. اما از طرف دیگر این

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: f.ehyaei@eng.ikiu.ac.ir



کالمن توسعه یافته^۲ استفاده نمود. این تخمینگر از مدل خطی شده سیستم حول نقطه کار که به وسیله ژاکوبین محاسبه می شود در هر گام استفاده می کند. به همین دلیل شرط اول استفاده از این تخمینگر مشتق پذیر بودن حالت های دینامیکی سیستم می باشد. از این رو روش فیلتر کالمن خنثی^۳ برای حل این مشکل در مراجع معرفی شده است. این تخمینگر به طور مستقیم از دینامیک غیرخطی استفاده می کند، در نتیجه محاسبه ژاکوبین مانند فیلتر کالمن توسعه یافته مورد نیاز نیست [۲۸]. روش فیلتر کالمن برای سیستم های خطی و انواع مختلف آن در سیستم های غیرخطی به منظور تخمین حالت ها در مراجع [۲۹-۳۲] آمده است.

در این مقاله روش کنترل مدلزغشی هیپربولیک دوگانه^۴ بر مبنای فیلتر کالمن خنثی برای کنترل یک بازوی متحرک سه پا در حضور اغتشاشات محیط و نویز توسعه داده می شود و کارایی آن در مقایسه با سایر روش ها مورد ارزیابی قرار می گیرد. طراحی ساختار بازوی رباتیک سه پا به عنوان مصالحه ای بین پایداری و پیچیدگی در میان ربات های پادار با قابلیت حمل بار و به دست آوردن سینماتیک و دینامیک سه بعدی آن، بازنویسی و طراحی کنترلر مدلزغشی هیپربولیک دوگانه برای بازوی رباتیک سه پا به منظور افزایش سرعت و دقت ردیابی و کاهش چترینگ، پیاده سازی تخمینگر فیلتر کالمن خنثی برای بازوی رباتیک سه پا به منظور تخمین حالت ها در حضور نویز اندازه گیری و کاهش سنسورها و هزینه، از نوآوری های انجام شده در این مقاله می باشند. در این راستا، پس از معرفی مدل ربات و تخمینگر حالت مبتنی بر فیلتر کالمن خنثی در بخش های ۲ و ۳، در بخش ۴ روش کنترلی پیشنهادی ارائه می شود. نتایج حاصل از شبیه سازی در بخش ۵ آمده است و نهایتاً در بخش ۶ جمع بندی و نتیجه گیری انجام می شود.

۲- مدل ربات سه پا

مدل ربات سه پا معرفی شده در این مقاله، جهت حمل اجسام در محیط های ناهموار، در شکل ۱ نشان داده شده است. در این ربات هر پا از سه درجه آزادی تشکیل شده که متصل به بدنه با شش درجه آزادی است و یک بازو سه درجه آزادی نیز بر روی بدنه ربات

است که شامل کنترل تعادل و موقعیت مرکز جرم می باشد. کنترل مدلزغشی، کنترل مدلزغشی فازی و همچنین مدلزغشی مرتبه دو برای ربات دوپا به ترتیب در [۱۸-۱۶] بررسی شده است. در مرجع [۱۹] از کنترل مقاوم مدلزغشی برای یک ربات پنج لینکی در حضور عدم قطعیت ها استفاده می شود. در مرجع [۲۰] کنترلر مقاوم برای حرکت ربات پادار با بهینه کردن گام زمانی و گام مکانی معرفی شده است. همچنین کنترل مقاوم با قابلیت دفع اغتشاش برای ربات پادار با استفاده از رویکرد حالت تعمیم یافته مرتبه بالا در [۲۱] استفاده می شود. در [۲۲] کنترلی تعادلی با استفاده از عملگرهای کمتر در سطوح شیب دار برای ربات دوپا پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۳] سه روش کنترل تناسبی- مشتقگیر، کنترل مدلزغشی و کنترل فیدبک خطی ساز روی ربات دوپا مطالعه شده است که نتایج نشان دهنده برتری چشمگیر روش کنترل مدلزغشی است. در میان روش های ارائه شده تاکنون، کنترل مدلزغشی علاوه بر ردیابی مسیر مطلوب، عملکرد مقاومی در برابر اغتشاشات از خود نشان می دهد [۱۶]. اما یکی از معایب کنترل مدلزغشی، وجود پدیده چترینگ در سیگنال کنترلی و پاسخ سیستم در اطراف سطح لغزش است که منجر به فرسودگی و آسیب رسیدن به محرک ها خواهد شد. بر همین اساس رویکردهای متفاوتی مانند استفاده از تابع اشباع به جای تابع علامت، استفاده از منطق فازی و کنترل لغزشی مرتبه دو و نیز روش های متفاوتی مانند کویسی- هوماجنیو [۲۴] و الگوریتم پیچش [۲۵] برای رفع این مشکل ارائه شده است. در کنار موارد ذکر شده روش های کنترل مدلزغشی دیگری نیز برای همگرایی سریع تر به سمت سطح لغزش ارائه شده است که از نمونه های اخیر آن می توان به استفاده از توابع نمایی [۲۶] و یا دو تابع هیپربولیک [۲۷] اشاره کرد. از مزایای روش هیپربولیک دوگانه می توان سرعت همگرایی بیشتر و حذف بهتر لغزش در مقایسه با روش های مشابه را نام برد.

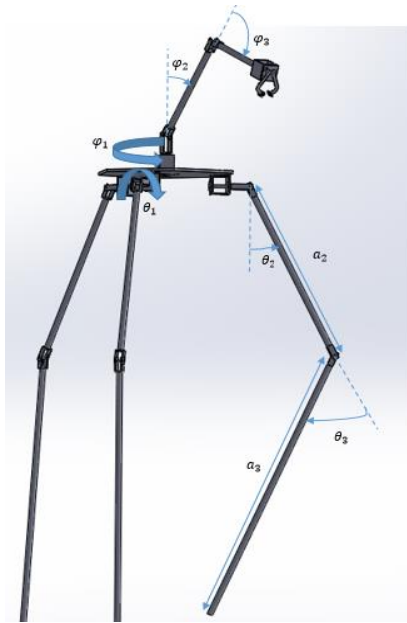
یکی دیگر از مشکلات در طراحی سیستم های کنترل، عدم دسترسی به حالت ها و یا وجود نویز بر روی مقادیر اندازه گیری شده است که به عنوان یک راهکار می توان از تخمینگرهای حالت در سیستم استفاده نمود. یکی از مشهورترین و بهترین روش های موجود به منظور تخمین حالت ها فیلتر کالمن^۱ می باشد که در سیستم های خطی کاربرد دارد. در سیستم های غیرخطی نظیر ربات ها می توان از فیلتر

2 Extended Kalman Filter(EKF)

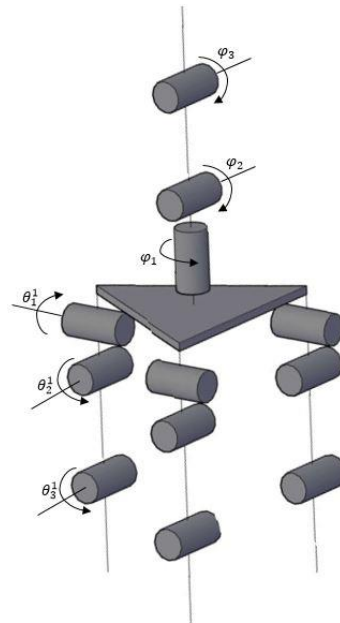
3 Unscented Kalman Filter(UKF)

4 Double Hyperbolic Sliding Mode Control(DHSMC)

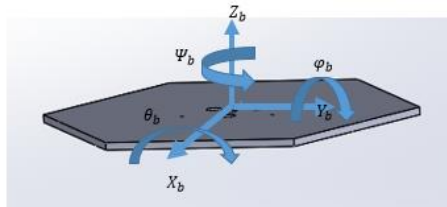
1 Kalman Filter(KF)



الف) مفاصل و زوایای ربات



ب) مدل مفصلی ربات



ج) بدنه و درجات آزادی آن

شکل ۱. مدل ربات سه پا

Fig. 1. Three-legged robot model

اتصال لینک‌ها به یکدیگر از نوع دورانی می‌باشد. در قسمت بالاتنه، ربات دارای یک بازو با سه درجه آزادی می‌باشد و اتصال کف‌گرد بازو به بدنه آن را قادر می‌سازد تا به تمام نقاط افقی محیط اطراف خود دسترسی داشته باشد. دو مفصل دیگر جهت افزایش دسترسی ربات در راستای عمودی، بصورت پیچشی در نظر گرفته شده است.

در شکل ۱ $[x_b, y_b, z_b]$ مختصات دکارتی بدنه در چارچوب مرجع و $[\theta_b, \phi_b, \psi_b]$ جهت‌گیری‌های فضایی نسبت به چارچوب مرجع می‌باشد. با در نظر گرفتن ربات شکل ۱ و تعیین چارچوب‌ها [۳۲-۳۵] جدول دناویت هارتنبرگ هر پا مطابق جدول ۱ استخراج می‌شود.

حال بر اساس مدل سینماتیکی ربات و شماره‌گذاری هر پا مطابق جدول ۲:

مختصات تعمیم‌یافته ربات شامل بدنه، هر یک از پاها و بازو را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

قرار گرفته است. به منظور انعطاف‌پذیری بیشتر در گام‌برداری و در عین حال جلوگیری از پیچیده‌شدن محاسبات، پاها دو لینکی در نظر گرفته می‌شود. در این صورت ربات از زانو برخوردار است که سبب عملکرد منعطف‌تر آن می‌شود و از حرکات اضافی در صفحه طولی نیز جلوگیری می‌کند. استفاده از مفصل دورانی در محل اتصال پا و بدنه نه تنها انعطاف‌پذیری را افزایش می‌دهد بلکه سبب جلوگیری از گسستگی در زنجیره‌های بسته می‌شود و همچنین تغییر مسیر سریع ربات را ممکن می‌سازد. از طرف دیگر این مفاصل به تغییر زوایای بدنه نیز کمک خواهند کرد.

همچنین به دلیل سادگی و کم‌شدن حجم محاسبات و تحلیل‌ها کف پاها از نوع نقطه‌ای در نظر گرفته شده است. به طور خلاصه اتصال انتهای پای ربات به زمین در حالتی که هر سه پا بر روی زمین قرار دارند، همانند دو مفصل دورانی عمود برهم و هنگامی که پا از روی زمین برداشته می‌شود دارای حرکتی آزادانه خواهد بود. همچنین

که در آن M ماتریس جرم، C ماتریس کوریولیس، G ماتریس گرانی، τ بردار گشتاور و d بردار اغتشاش و نامعینی در سیستم است. سرعت خطی نقاط انتهایی پاهایی از ربات که بر روی سطح زمین قرار دارند صفر است. در نتیجه به بیان ریاضی خواهیم داشت:

$${}^wV_s^s = J_s \dot{q} = 0 \quad (2)$$

که در آن s شماره پاهایی که بر روی زمین قرار دارد و ${}^wV_s^s$ سرعت خطی نقاط انتهایی پا می باشد و J_s به صورت زیر تعریف می شود:

$$J_s = \frac{\partial {}^wP_s^s}{\partial q}, s = 1:3 \quad (3)$$

حال اگر به عنوان نمونه سه پا بر روی زمین باشد، مجموعه قیود به صورت زیر خواهد بود:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} J_{1(3 \times 18)} \\ J_{2(3 \times 18)} \\ J_{3(3 \times 18)} \end{bmatrix}}_{A_{(9 \times 18)}} \dot{q}_{(18 \times 1)} = 0 \Rightarrow A \dot{q} = 0 \quad (4)$$

رابطه‌ی ماتریسی فوق، بیان کننده‌ی ۹ قید اسکالر است و A ماتریس قیدی است. با نوشتن بردار نیروی تعمیم یافته و جایگذاری در معادله حرکت خواهیم داشت:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau + A^T \lambda \quad (5)$$

که در آن λ برداری مجهول، موسوم به بردار ضرایب لاگرانژ است. برای حذف ضرایب لاگرانژ λ از معادله‌ی حرکت می توان از روش مکمل های متعامد طبیعی^۱ [۳۵] استفاده نمود. در این مقاله طراحی کنترلر در فاز تکیه گاهی انجام می شود. در فاز تکیه گاهی هر سه پا بر روی زمین قرار دارند. از طرف دیگر پایداری ربات با استفاده از روش معیار تصویر مرکز جرم^۲ بررسی می شود. براساس این روش در صورتی که تصویر افقی مرکز جرم داخل چند

1 Natural Orthogonal Complement
2 Center of Gravity(COG)

جدول ۱. مشخصات دناویت هارتنبرگ پا در ربات سه پا
Table 1 . Denavit-Hartenberg parameters for each leg

θ_i	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	i
θ_1	.	.	.	۱
θ_2	.	۹۰	.	۲
θ_3	a_2	.	.	۳
.	a_3	۹۰	.	۴

جدول ۲. شماره گذاری پاها در ربات سه پا
Table 2 . Numbering of each leg

محل قرارگیری پا	چپ عقب	راست عقب
شماره پا	۲	۳

$$q_b = \begin{pmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \\ \theta_b \\ \varphi_b \\ \Psi_b \end{pmatrix} \quad q_L^i = \begin{pmatrix} \theta_1^i \\ \theta_2^i \\ \theta_3^i \end{pmatrix} \quad q_L^r = \begin{pmatrix} \theta_1^r \\ \theta_2^r \\ \theta_3^r \end{pmatrix}$$

$$q_L^r = \begin{pmatrix} \theta_1^r \\ \theta_2^r \\ \theta_3^r \end{pmatrix} \quad q_{ARM} = \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{pmatrix}$$

که در آن q_b مختصات بدنه q_L^i مختصات تعمیم یافته پا با شماره i و q_{ARM} مختصات تعمیم یافته بازو می باشد و مختصات تعمیم یافته کلی ربات به صورت زیر حاصل می شود:

$$q = \begin{pmatrix} q_b \\ q_L^i \\ q_L^r \\ q_{ARM} \end{pmatrix}$$

با استفاده از روش تعمیم یافته لاگرانژ در نهایت فرم بسته مدل ربات سه پای انتخابی به صورت زیر بدست می آید [۳۵]:

$$M(q)\ddot{q} + C(\dot{q}, q)\dot{q} + G(q) = \tau + d \quad (1)$$

ضلعی تکیه‌گاهی^۱ قرار داشته باشد سیستم پایدار است.

۳- تخمین حالت‌ها با استفاده از فیلتر کالمن خنثی

در فیلتر کالمن توسعه‌یافته از خطی‌سازی مرتبه اول به منظور تخمین دینامیک غیرخطی سیستم استفاده شده و از جملات با مرتبه بالاتر صرف‌نظر می‌شود. از اشکالات اساسی فیلتر کالمن توسعه‌یافته در سیستم‌های غیرخطی می‌توان به واگرایی، پیاده‌سازی دشوار و همگرایی آهسته پارامترهای تخمین به دلیل حذف جملات با مرتبه بالاتر در خطی‌سازی اشاره کرد [۳۶]. به منظور غلبه بر این کمبودهای فیلتر کالمن توسعه‌یافته، فیلتر کالمن خنثی معرفی شد [۲۸]. این فیلتر از نقاط سیگما به منظور نگاشت میانگین و کواریانس متغیرهای حالت، که به نام تبدیل خنثی شناخته می‌شود، استفاده می‌کند. انتخاب مناسب وزن نقاط سیگما سبب ثبت صحیح میانگین و کواریانس پیشین خواهد شد. از این رو فیلتر کالمن خنثی از عملکرد بهتری نسبت به فیلتر کالمن توسعه‌یافته برخوردار است. سیستم غیرخطی زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} x_k &= f(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_{k-1} \\ y_k &= g(x_k) + v_k \end{aligned} \quad (۶)$$

که در آن $x \in R^n$ ، $y \in R^m$ و $u \in R^r$ به ترتیب بردار حالت، بردار اندازه‌گیری و خروجی کنترلی می‌باشد. f و g توابع دینامیک غیرخطی و مدل خروجی اندازه‌گیری شده است. w_k و v_k نیز توابع توزیع نویز سفید گوسی با میانگین صفر و ماتریس کواریانس Q و R می‌باشند. الگوریتم فیلتر کالمن خنثی با حدس اولیه برای ماتریس خطای کواریانس P و تخمین حالت‌ها x آغاز می‌شود:

$$\begin{aligned} \hat{x} &= E[x] \\ P &= E[(x - \hat{x})(x - \hat{x})^T] \end{aligned} \quad (۷)$$

سپس نقاط سیگما به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\chi_{k-1} = [\hat{x}_{k-1} \quad \hat{x}_{k-1} + \sqrt{(L+\lambda)P_{k-1}} \quad \hat{x}_{k-1} - \sqrt{(L+\lambda)P_{k-1}}] \quad (۸)$$

در اینجا L تعداد حالت‌ها و λ پارامتر مقیاس‌دهی می‌باشد که به صورت $\lambda = \alpha^r(L + \kappa) - L$ تعریف می‌شود. $\kappa \geq 0$ باید به درستی انتخاب شود تا مثبت نیمه‌معین بودن ماتریس کواریانس را تضمین کند (معمولاً $\kappa = 0$ انتخاب مناسبی است). پارامتر α اندازه توزیع نقاط سیگما را کنترل می‌کند و می‌بایست در بازه $0 < \alpha \leq 1$ تنظیم شود. همچنین جمله $\sqrt{(L+\lambda)P_{k-1}}$ فاکتور چولسکی P_{k-1} می‌باشد. اکنون این نقاط سیگما می‌بایست در تابع غیرخطی f توزیع شوند (به روزرسانی زمانی):

$$\chi_k^* = f(\chi_{k-1}, u_{k-1}) \quad (۹)$$

حال با استفاده از این نقاط توزیع‌شده، ماتریس‌های میانگین و کواریانس پیشین به دست می‌آیند.

$$\begin{aligned} \hat{X}_k^- &= \sum_{i=1}^{\nu L} W_i^{(m)} \chi_{k,i}^* \\ P_k^- &= \sum_{i=1}^{\nu L} W_i^{(c)} (\chi_{k,i}^* - \hat{X}_k^-)(\chi_{k,i}^* - \hat{X}_k^-)^T \end{aligned} \quad (۱۰)$$

که در آن :

$$\begin{aligned} W_i^{(m)} &= \frac{\lambda}{L + \lambda} \\ W_i^{(c)} &= \frac{\lambda}{L + \lambda} (1 - \alpha^r + \beta) \\ W_i^{(c)} &= W_i^{(m)} = \frac{1}{\nu(L + \kappa)} \end{aligned} \quad (۱۱)$$

که β پارامتر تنظیم غیرمنفی است و $\beta = 2$ انتخاب می‌شود.

در مرحله بعد می‌بایست به روزرسانی اندازه‌گیری انجام شود، اما پیش از آن نقاط سیگما به روزرسانی خواهند شد:

$$\chi_k^- = [\chi_k^* \quad \chi_{k,i}^* + \sqrt{(L+\lambda)Q} \quad \chi_{k,i}^* - \sqrt{(L+\lambda)Q}] \quad (۱۲)$$

$$Y_k^- = g(\chi_k^-) \quad (۱۳)$$

$$\hat{y}_k^- = \sum_{i=1}^{\nu L} W_i^{(m)} Y_{k,i}^- \quad (۱۴)$$

و در انتها به روزرسانی اندازه‌گیری به صورت زیر انجام می‌شود:

1 چند ضلعی تکیه‌گاهی، چند ضلعی است که رؤس آن نقاط تماس پا با زمین را تشکیل می‌دهند.

$$\dot{S} = \dot{e} + \lambda e \quad (21)$$

که در آن $e = q - q_d$ خطا می‌باشد، می‌توان نوشت:

$$\dot{S} = \dot{q} - \dot{q}_d + \lambda e = \dot{q} - (\dot{q}_d - \lambda e) \quad (22)$$

$$\dot{S} = \dot{q} - \dot{q}_r$$

و $\dot{q}_r = (\dot{q}_d - \lambda e)$ خواهد بود. حال با انتخاب تابع لیاپانوف به

صورت زیر:

$$V = \frac{1}{2} S S^T \quad (23)$$

و با مشتق‌گیری از تابع لیاپانوف و جایگذاری داریم:

$$\dot{V} = S^T \dot{S} \quad (24)$$

$$\dot{V} = S^T (\dot{q} - \dot{q}_r)$$

با بازنویسی معادله (۱):

$$\ddot{q} = -M^{-1}(C\dot{q} + g - \tau - d) \quad (25)$$

و با استفاده از معادلات (۲۵) و (۲۴) خواهیم داشت:

$$\dot{V} = S^T (-M^{-1}(C\dot{q} + g - \tau - d) - \dot{q}_r) \quad (26)$$

حال با انتخاب گشتاور اعمالی به صورت:

$$\tau = C\dot{q} + g + M\ddot{q}_r - MK_v \tanh(as) - MK_v |S| \operatorname{asinh}(bS^q) \quad (27)$$

و جایگذاری معادله (۲۷) در (۲۶) و ساده‌سازی آن:

$$\dot{V} = -S^T (K_v \tanh(as) - M^{-1}d) - S^T K_v |S| \operatorname{asinh}(bS^q) \quad (28)$$

با در نظر گرفتن $|M^{-1}d| \leq \varepsilon$ و بازنویسی معادله (۲۸) داریم:

$$\dot{V} = -|S^T| (K_v \tanh(a|S|) - \varepsilon) - S^T K_v |S| \operatorname{asinh}(bS^q) \quad (29)$$

از آنجا که $K_v \tanh(a|S|) \geq 0$ می‌باشد، به منظور

پایداری سیستم می‌بایست:

$$K_v \tanh(a|S|) \geq \varepsilon$$

$$P_{\bar{y}_k \bar{y}_k} = \sum_{i=1}^{\nu L} W_i^{(c)} (Y_{k,i}^- - \hat{y}_k^-) (Y_{k,i}^- - \hat{y}_k^-)^T + R \quad (15)$$

$$P_{x_k y_k} = \sum_{i=1}^{\nu L} W_i^{(c)} (X_{k,i}^{x-} - \hat{X}_k^-) (Y_{k,i}^- - \hat{y}_k^-)^T \quad (16)$$

$$K_k = P_{x_k y_k} P_{\bar{y}_k \bar{y}_k}^{-1} \quad (17)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k (y_k - \hat{y}_k^-) \quad (18)$$

$$P_k = P_k^- - K_k P_{\bar{y}_k \bar{y}_k} K_k^T \quad (19)$$

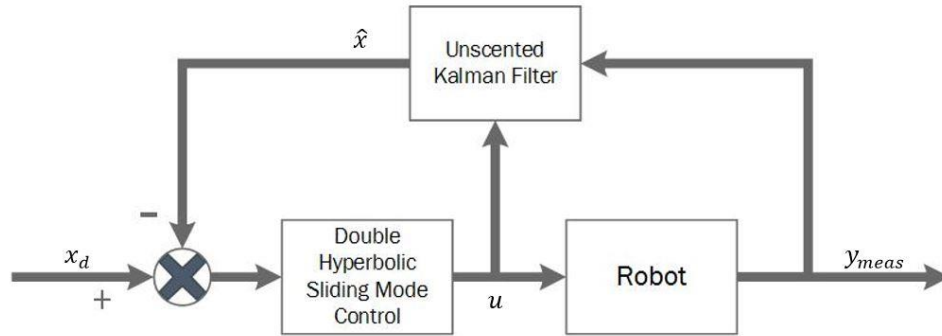
در میان همه پارامترهای فیلتر کالمن خنثی ماتریس‌های کواریانس اندازه‌گیری و فرآیند تاثیر بیشتری در عملکرد الگوریتم دارند.

۴- کنترل مدلغزشی هیپربولیک دوگانه

در کنترل مدلغزشی هیپربولیک دوگانه تغییرات سطح لغزش به صورت زیر انتخاب می‌شود [۲۷]:

$$\dot{s} = -k_1 \tanh(as) - k_2 |s| \operatorname{asinh}(bS^q) \quad (20)$$

که در آن s سطح لغزش، k_1 ، k_2 ، a و b پارامترهای مثبت تنظیم و q توان مثبت و فرد می‌باشد. \tanh تابع تانژانت هیپربولیک و asinh تابع معکوس سینوس هیپربولیک بوده که این دو تابع در ساختار تغییرات سطح لغزش به دلیل دو ویژگی انتخاب شده‌اند: نخست آنکه برد تابع تانژانت هیپربولیک و مشتق آن در بازه $[-1, 1]$ می‌باشد و این تابع با تغییرات آرام، در اطراف صفر رفتار شبه‌خطی دارد؛ دوم آنکه تابع معکوس سینوس هیپربولیک در نزدیکی صفر رفتار خطی مشابه تانژانت هیپربولیک داشته اما مقدار آن بسیار بزرگ‌تر و یکنواخت‌تر می‌باشد و از سوی دیگر مشتق معکوس سینوس هیپربولیک مانند تانژانت هیپربولیک است. در صورتی که سطح لغزش s از صفر دور باشد، تغییرات \dot{s} توسط $-k_2 |s| \operatorname{asinh}(bS^q)$ کنترل می‌شود و در هنگام نزدیکی سطح لغزش به صفر تغییرات توسط $-k_1 \tanh(as)$ صورت می‌گیرد. در نتیجه \dot{s} می‌تواند به دلیل ویژگی شبه‌خطی بودن $-k_1 \tanh(as)$ به طور نامحدود به صفر نزدیک شود و مساله چترینگ را بهبود بخشد. حال با انتخاب سطح لغزش به صورت زیر:



شکل ۲. بلوک دیاگرام طرح کنترلی پیشنهادی
Fig.2 . Proposed control scheme

و یا به عبارت دیگر:

جدول ۳. مشخصات فیزیکی ربات سه پا
Table3 . Three-legged robot parameters

نام متغیر	مقدار	پارامتر
a	۰/۳m	طول ضلع شش وجهی بدنه
b	۰/۰۵m	ضخامت بدنه
a_p	۰/۸m	طول لینک اول پاها
a_r	۰/۹m	طول لینک دوم پاها
m_b	۱Kg	جرم بدنه
m_1	۱Kg	جرم لینک اول پاها
m_p	۱Kg	جرم لینک دوم پاها
m_1^{arm}	۱Kg	جرم لینک اول بازو
m_p^{arm}	۱Kg	جرم لینک دوم بازو
l_1	۰/۳m	طول لینک اول بازو
l_p	۰/۲m	طول لینک دوم بازو

$$|S| \geq \frac{1}{a} \tanh^{-1} \left(\frac{\varepsilon}{K_1} \right)$$

در اینصورت علاوه بر برقراری شرایط مورد نیاز بیان شده برای \dot{S} ، شرایط پایداری $\dot{V} \leq 0$ نیز برقرار می‌شود. ساختار کلی طرح کنترلی پیشنهادی در شکل ۲ آمده است. با توجه به مطالب گفته شده در بخش‌های قبل به دلیل غیرخطی بودن سیستم و به منظور تخمین حالت‌های سیستم از فیلتر کالمن خنثی استفاده می‌شود. تخمین همه حالت‌ها با استفاده از این فیلتر، ضمن حذف اثر نویز از مقادیر اندازه‌گیری شده زوایای مفصلی، سبب کاهش هزینه‌های پیاده‌سازی در نتیجه حذف سنسورهای سرعت خواهد شد. همچنین با عدم استفاده از سنسورهای سرعت می‌توان تاثیر نامطلوب نویز اندازه‌گیری بر عملکرد سیستم را به طور چشم‌گیری کاهش داد. کنترلر مدل‌گزشی هیپربولیک دوگانه نیز به منظور کنترل سیستم در حضور اغتشاشات محیط و افزایش سرعت پاسخ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵- نتایج شبیه‌سازی

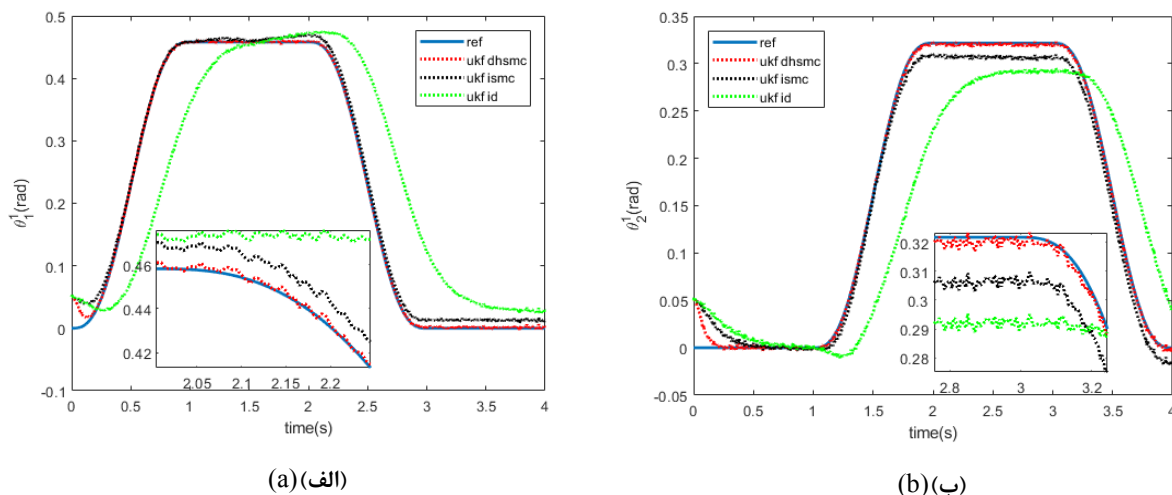
در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترل ربات سه پا با استفاده از مدل‌گزشی هیپربولیک دوگانه مبتنی بر فیلتر کالمن خنثی^۱ ارائه می‌شود؛ همچنین عملکرد این کنترلر با کنترلرهای دینامیک معکوس^۲ و مدل‌گزشی انتگرالی^۳ که از تخمینگر فیلتر کالمن خنثی به منظور تخمین حالت‌ها استفاده می‌کنند نیز مقایسه شده

است. پارامترهای ربات سه پا در شبیه‌سازی به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

پارامترهای کنترلی برای کنترل مدل‌گزشی هیپربولیک دوگانه به ترتیب $a=5$ ، $b=10$ ، $\lambda=20$ ، $k_p=5I_{15 \times 15}$ ، $k_1=10I_{15 \times 15}$ و $q=3$ در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور مقایسه بهتر پارامترهای کنترل مدل‌گزشی انتگرالی به صورت $\lambda=20$ ، $k=10^{-11}$ ، $k_p=100I_{15 \times 15}$ و $k_d=20I_{15 \times 15}$ ، و پارامترهای کنترل دینامیک وارون معرفی به صورت $k_1=15I_{15 \times 15}$ و $k_p=50I_{15 \times 15}$ در انتخاب می‌شوند.

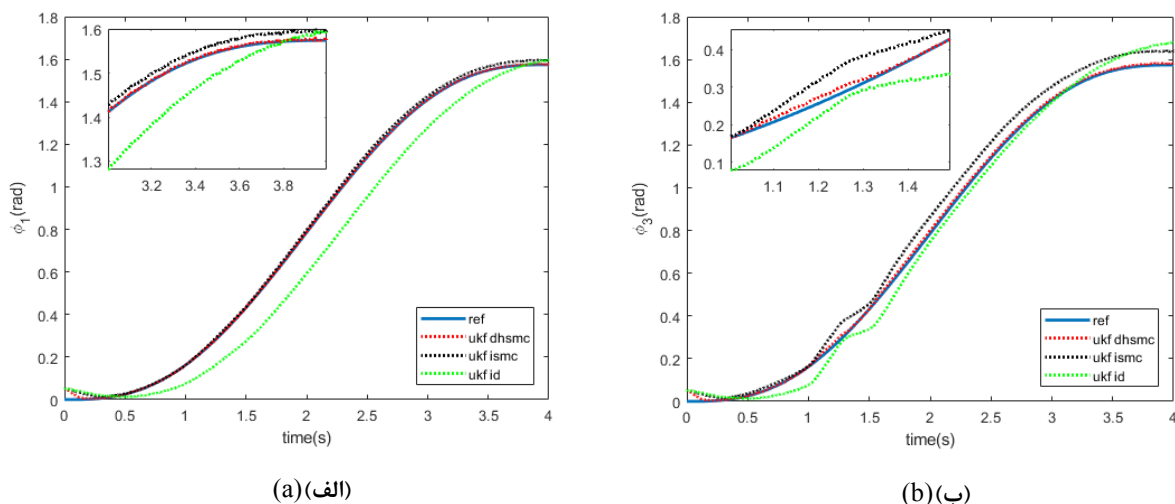
پارامترهای تخمینگر فیلتر کالمن خنثی نیز به صورت $K=0$ ، $\alpha=0.001$ و $\beta=2$ در نظر گرفته شده است. ماتریس‌های R و Q

- 1 UKF-DHSMC
- 2 Inverse Dynamic(ID)
- 3 Integral Sliding Mode Control



شکل ۳. الف) تغییر مفصل اول پای جلو، ب) تغییر مفصل دوم پای جلو

Fig. 3. a) Angle change in the first joint of the front leg; b) angle change in the second joint of the front leg



شکل ۴. الف) تغییر مفصل اول بازو، ب) تغییر مفصل سوم بازو

Fig. 4. a) Angle change in the first joint of the arm; b) Angle change in the third joint of the arm

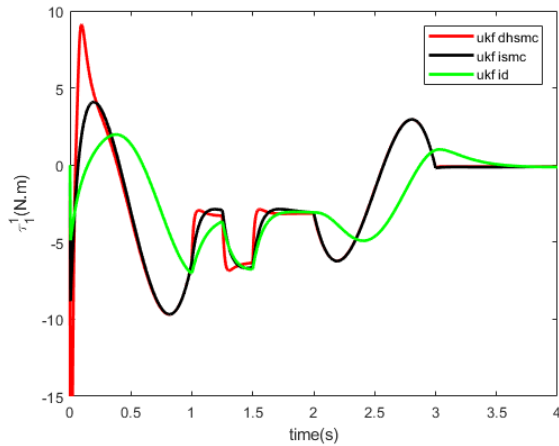
گذار ارائه می‌شوند.

همانطور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، فیلتر کالمن خنثی توانسته است تخمین خوبی از حالت‌ها در حضور نویز داشته باشد و در نتیجه از تاثیر منفی نویز اندازه‌گیری بر عملکرد سیستم کنترلی بکاهد، از طرف دیگر کنترلر مدل‌گزشی هیبریدولیک دوگانه نه تنها پاسخ سریعتری نسبت به روش‌های دیگر داشته است، بلکه به خوبی در برابر اغتشاشات به صورت ضربه و نیروی اعمالی مقاومت کرده و در نزدیکی مقدار مطلوب باقی بماند.

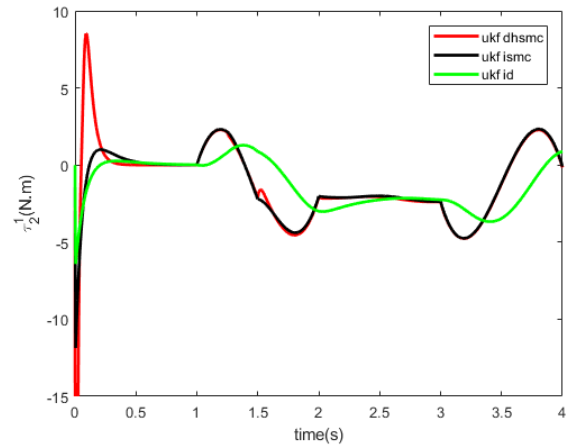
در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب گشتاور مفصل اول و دوم پا جلو و

نیز به ترتیب به صورت $R = 10^{-6} I_{3 \times 3}$ و $Q = 10^{-6} I_{3 \times 3}$ خواهند بود. شبیه‌سازی در حضور اغتشاش به صورت ضربه اعمالی در بازه زمانی $t = 1s$ الی $t = 1.5s$ و اغتشاش به صورت نیروی اعمالی از $t = 1.5s$ به بعد انجام شده است که به مفصل اول پای جلو اعمال می‌شود.

هدف کنترلی حرکت بدنه ربات بر روی مربعی به ضلع ۹cm در صفحه xy و همچنین حرکت انتهای بازو در یک ربع دایره می‌باشد، که منجر به تغییر زوایای مفصل اول و سوم از صفر تا ۹۰ درجه می‌شود. به دلیل زیادبودن حالت‌ها تنها حالت‌ها و گشتاورهای تاثیر



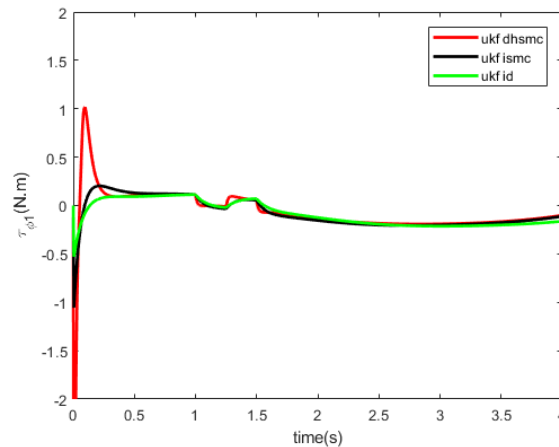
(الف) (a)



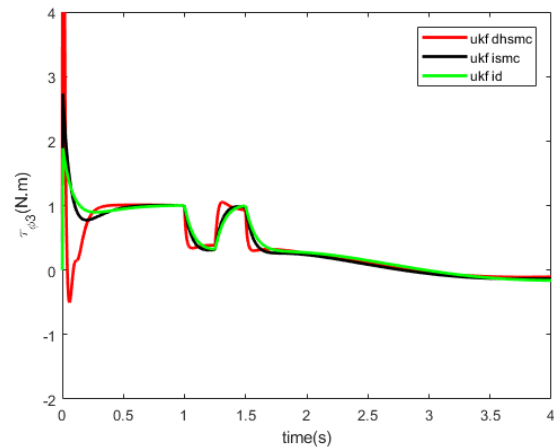
(ب) (b)

شکل ۵. (الف) گشتاور مفصل اول پای جلو ، (ب) گشتاور مفصل دوم پای جلو

Fig. 5. a) First joint of the front leg torque; b) Second joint of the front leg torque



(الف) (a)



(ب) (b)

شکل ۶. (الف) گشتاور مفصل اول بازو ، (ب) گشتاور مفصل سوم بازو

Fig. 6. a) First joint of the arm torque; b) Third joint of the arm torque

قرار دارد، ربات پایدار می‌باشد.

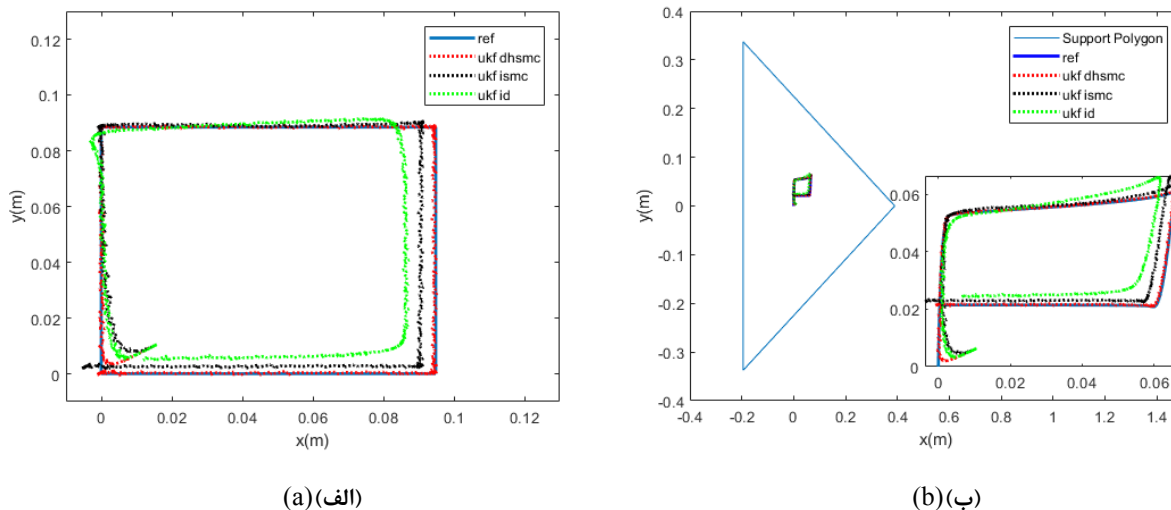
در شکل ۸ میانگین مربعات خطا در سه روش در حضور نویز با یکدیگر مقایسه شده است، میانگین مربعات خطا در روش پیشنهادی حدود چهار برابر بهتر از مقدار آن در روش کنترل مد لغزشی انتگرالی و کنترل مد لغزشی انتگرالی در حدود ۶۰ برابر بهتر از مقدار آن در روش دینامیک معکوس می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

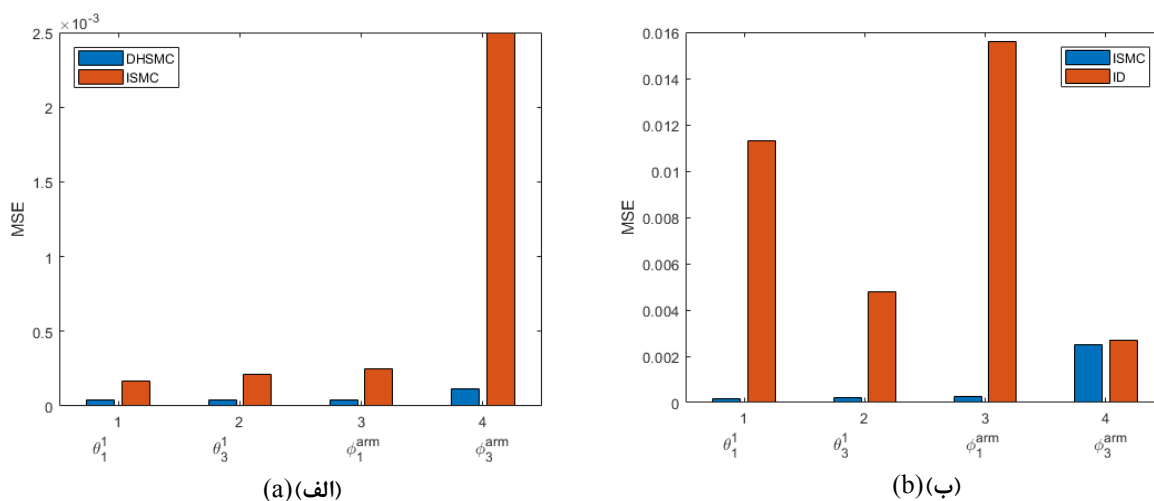
در این مقاله پس از استخراج مدل یک بازوی متحرک سه‌پا به

گشتاور مفصل اول و سوم بازو آورده شده است. در اثر اغتشاش ناشی از ضربه و یا نیروی اعمالی، مفاصل عکس‌العمل نشان داده و در برابر تغییر حالت از مقدار مطلوب مقاومت نشان می‌دهند.

در شکل ۷- الف مسیر طی‌شده توسط بدنه ربات در هریک از روش‌های کنترلی آمده است، همانطور که مشخص است بهترین و نزدیکترین ردیابی توسط کنترل مد لغزشی هیپربولیک دوگانه صورت گرفته است، در شکل ۷- ب نیز تغییرات تصویر مرکز جرم به ازای حرکت بدنه ربات و بازو آمده است. از آنجا که تصویر مرکز جرم در طی مسیر مورد نظر برای بازو و بدنه در داخل چند ضلعی تکیه‌گاهی



شکل ۷. (الف) مسیر طی شده توسط بدنه در صفحه XY ، (ب) تغییرات تصویر مرکز جرم در چندضلعی تکیه‌گاهی
Fig. 7. a) Path pass by the robot base, b) changes in the image of the center of mass.



شکل ۸. (الف) مقایسه مجموع مربعات خطا در دو روش هیپربولیک دوگانه و مدلزغشی، (ب) مقایسه مجموع مربعات خطا در دو روش مدلزغشی و دینامیک وارون
Fig. 8. a) Comparison of the sum of squares of error in double hyperbolic sliding mode and integral sliding mode; b) Comparison of the sum of squares of error in inverse dynamic and integral sliding mode

ضربه و نیروی اعمالی و همچنین نویز برخوردار می‌باشد. در کارهای آینده می‌توان از شبکه‌های عصبی به منظور بهبود عملکرد سیستم فوق و یا از کنترل نیرو جهت گام‌برداری هرچه بهتر ربات بهره برد.

منابع

- [1] D.W. Hong, R.J. Cipra, Optimal Force Distribution for Tethered Climbing Robots in Unstructured Environments, in, 2002, pp. 1135-1144.
- [2] D.W. Hong, R.J. Cipra, Analysis and Visualization of the Contact Force Solution Space for Multi-Limbed Mobile

عنوان مصالحه بین پایداری و پیچیدگی مکانیزم، کنترلر مدلزغشی هیپربولیک دوگانه بر مبنای فیلتر کالمن خنثی جهت تخمین حالت‌های آغشته به نویز سیستم غیرخطی ربات و کنترل آن در حضور اغتشاشات خارجی پیشنهاد شد. همچنین پایداری سیستم حلقه بسته برای کنترلر پیشنهادی با استفاده از تئوری توابع لیاپانوف مورد بررسی و اثبات قرار گرفت. براساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی و در مقایسه با کنترل مدلزغشی و کنترل دینامیک وارون، روش ارائه‌شده علاوه بر سرعت همگرایی بیشتر در شرایط یکسان نسبت به دو روش دیگر از مقاومت بیشتری در حضور اغتشاشات به صورت

- [14] H.K. Lum, M. Zribi, Y.C. Soh, Planning and control of a biped robot, *International Journal of Engineering Science*, 37(10) (1999) 1319-1349.
- [15] Z. Li, S.S. Ge, Adaptive robust controls of biped robots, *IET Control Theory & Applications*, 7(2) (2013) 161-175.
- [16] F. Takemori, A. Kitamura, D. Kushida, Constraint of center of gravity in a biped walking robot via sliding mode approach, in: 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566), 2004, pp. 1960-1965 vol.1962.
- [17] A. Takhmar, M. Alghooneh, S.A. A.Moosavian, Chattering Eliminated and Stable Motion of Biped Robots using a Fuzzy Sliding Mode Controller, *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, 7(1) (2012)
- [18] H.B. Oza, Y.V. Orlov, S.K. Spurgeon, Y. Aoustin, C. Chevallereau, Continuous second order sliding mode based robust finite time tracking of a fully actuated biped robot, in: 2014 European Control Conference (ECC), 2014, pp. 2600-2605.
- [19] S. Tzafestas, M. Raibert, C. Tzafestas, Robust sliding-mode control applied to a 5-link biped robot, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 15(1) (1996) 67-133.
- [20] H. Jeong, I. Lee, O. Sim, K. Lee, J.-H. Oh, A robust walking controller optimizing step position and step time that exploit advantages of footed robot, *Robotics and Autonomous Systems*, 113 (2019) 10-22.
- [21] N. Martínez-Fonseca, L.Á. Castañeda, A. Uranga, A. Luviano-Juárez, I. Chairez, Robust disturbance rejection control of a biped robotic system using high-order extended state observer, *ISA transactions*, 62 (2016) 276-286.
- [22] S. Ito, S. Nishio, M. Ino, R. Morita, K. Matsushita, M. Sasaki, Design and adaptive balance control of a biped robot with fewer actuators for slope walking, *Mechatronics*, 49 (2018) 56-66.
- [23] M.H. Raibert, I.E. Sutherland, *Machines That Walk*, *Scientific American*, 248(1) (1983) 44-53.
- [24] S. Riachy, Y. Orlov, T. Floquet, R. Santiesteban, J.P. Richard, Second-order sliding mode control of underactuated mechanical systems I: Local stabilization with application Robots With Three Feet Contact, in, 2003, pp. 1239-1248.
- [3] D.W. Hong, R.J. Cipra, Choosing the Optimal Contact Force Distribution for Multi-Limbed Mobile Robots With Three Feet Contact, in, 2003, pp. 1249-1258.
- [4] S.-M. Song, K.J. Waldron, Geometric Design of a Walking Machine for Optimal Mobility, *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, 109(1) (1987) 21-28.
- [5] J.E. Bares, D.S. Wettergreen, Dante II: Technical Description, Results, and Lessons Learned, *The International Journal of Robotics Research*, 18(7) (1999) 621-649.
- [6] D. Wettergreen, H. Thomas, C. Thorpe, Planning strategies for the Ambler walking robot, in: 1990 IEEE International Conference on Systems Engineering, 1990, pp. 198-203.
- [7] S. Hirose, K. Yoneda, H. Tsukagoshi, TITAN VII: quadruped walking and manipulating robot on a steep slope, in: *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, 1997, pp. 494-500 vol.491.
- [8] J.R. Heaston, D.W. Hong, Design Optimization of a Novel Tripedal Locomotion Robot Through Simulation and Experiments for a Single Step Dynamic Gait, in, 2007, pp. 715-724.
- [9] L. Zhang, L. Liu, Z. Wang, Y. Xia, Continuous finite-time control for uncertain robot manipulators with integral sliding mode, *IET Control Theory & Applications*, 12(11) (2018) 1621-1627.
- [10] R.M. Asl, Y.S. Hagh, R. Palm, Robust control by adaptive non-singular terminal sliding mode, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 59 (2017) 205-217.
- [11] S. Yi, J. Zhai, Adaptive second-order fast nonsingular terminal sliding mode control for robotic manipulators, *ISA transactions*, 90 (2019) 41-51.
- [12] J.-S. Yang, Control of a five-link biped using an adaptive inverse dynamics method, *Control and computers*, 25(2) (1997) 56-63.
- [13] M. Xiuping, W. Qiong, Dynamic modeling and sliding mode control of a five-link biped during the double support phase, in: *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, 2004, pp. 2609-2614 vol.2603.

- kalman filter, ISA transactions, 66 (2017) 262-274.
- [30] D. Simon, Optimal state estimation: Kalman, H infinity, and nonlinear approaches, John Wiley & Sons, 2006.
- [31] F. Auger, M. Hilaret, J.M. Guerrero, E. Monmasson, T. Orłowska-Kowalska, S. Katsura, Industrial applications of the Kalman filter: A review, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 60(12) (2013) 5458-5471.
- [32] R. Van Der Merwe, Sigma-point Kalman filters for probabilistic inference in dynamic state-space models, OGI School of Science & Engineering at OHSU, 2004.
- [33] J.J. Craig, Introduction to robotics: mechanics and control, 3/E, Pearson Education India, 2009.
- [34] F.L. Lewis, D.M. Dawson, C.T. Abdallah, Robot manipulator control: theory and practice, CRC Press, 2003.
- [35] H. Abedini, S.A. A.Moosavian, Dynamic Modeling of a Quadraped robot, K.N.TOOSI University of technology, 2011.(In persian).
- [36] S. Haykin, Kalman filtering and neural networks, John Wiley & Sons, 2004.
- to an inverted pendulum, International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC-Affiliated Journal, 18(4-5) (2008) 529-543.
- [25] S. Kurode, P. Trivedi, B. Bandyopadhyay, P. Gandhi, Second order sliding mode control for a class of underactuated systems, in: 2012 12th International Workshop on Variable Structure Systems, IEEE, 2012, pp. 458-462.
- [26] H. Ma, J. Wu, Z. Xiong, A novel exponential reaching law of discrete-time sliding-mode control, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64(5) (2017) 3840-3850.
- [27] L. Tao, Q. Chen, Y. Nan, C. Wu, Double hyperbolic reaching law with chattering-free and fast convergence, IEEE Access, 6 (2018) 27717-27725.
- [28] S.J. Julier, J.K. Uhlmann, Unscented filtering and nonlinear estimation, Proceedings of the IEEE, 92(3) (2004) 401-422.
- [29] Y.S. Hagh, R.M. Asl, V. Cocquempot, A hybrid robust fault tolerant control based on adaptive joint unscented

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S.A. Ghoreishi, A.F. Ehyaei, M. Rahmani, Double hyperbolic sliding mode control based on unscented Kalman filter for three-legged mobile manipulator, AmirKabir J. Mech Eng., 53(4) (2021) 2105-2116.

DOI: [10.22060/mej.2020.17517.6609](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17517.6609)

