



حفظ تعادل دینامیکی ربات بازودار دوچرخ دیفرانسیلی با کمبود عملگر توسط چرخ عکس‌العملی

سیدرضا لاریمی^۱، سیدعلی اکبر موسویان^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی ۴۳۳۴۴ ۱۹۹۹۱، moosavian@kntu.ac.ir

چکیده- در این مقاله، یک مکانیزم جدید پایدارسازی برای ربات دوچرخ دارای بازو ارائه شده است. ربات‌های دوچرخ، به دلیل آنکه دارای یک مفصل غیرفعال در محل تماس چرخ‌های پایه متحرک خود همانند یک پاندول معکوس می‌باشند، برای حفظ تعادل نیاز به کنترل و پایدارسازی به صورت دینامیکی دارند. روش کنترل تعادل این گونه ربات‌ها، با استفاده از به حرکت در آوردن ربات و کمک گرفتن از گشتاور اینرسی حاصل از این حرکت می‌باشد. این روش محدودیت‌هایی چون وابستگی شدید تعادل به سطح زمین و همچنین عدم توانایی انجام مانورهای بازو در حالت سکون پایه را دارد که به نوبه خود توانایی ربات در جابجایی جسم و میزان دقت عملکرد آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در مکانیزم ارائه شده، جهت برطرف نمودن چنین نقایصی، از یک چرخ عکس‌العملی استفاده شده است. به این صورت که جهت حفظ تعادل از عکس‌العمل ناشی از اعمال گشتاور موتور به این چرخ استفاده می‌شود. با بکارگیری این روش، به دلیل استقلال عملکرد این زیرمجموعه از حرکت یا سکون پایه حین پایدارسازی، در عملکرد مجموعه ربات و بازوان رباتیک اختلالی ایجاد نکرده و نیز وابستگی تعادل را به سطح حرکت به طور کامل حذف کرده است. مدل دینامیکی این مجموعه جهت شبیه‌سازی عملکرد، به صورت یک مدل تحلیلی استخراج و صحت‌گذاری شده است. سیستم کنترلی استفاده شده بر روی این مجموعه نیز در حالات کاری مختلف شبیه‌سازی شده و نتایج آن مورد بحث قرار می‌گیرد.

کلیدواژه‌ها: ربات، دیفرانسیلی، مفصل غیرفعال، چرخ عکس‌العملی.

Dynamic balancing of an under-actuated differential two wheeled manipulator by a reaction wheel

S.R. Larimi¹, S.A.A. Moosavian^{2*}

1-M.Sc., Dept. of Mech. Eng., K.N. Toosi Univ., Tehran, Iran.

2-Prof., Dept. of Mech. Eng., K.N. Toosi Univ., Tehran, Iran.

* P.O.B. 19991 43344 Tehran, moosavian@kntu.ac.ir

Abstract-In this article, a new stabilizing mechanism for a two wheel robot is proposed. Such systems, due to inherent instability, require dynamic stabilization. The conventional method for stabilizing these robots is moving the base back and forth, to use its inertia effects. Therefore, such strategies drastically depend on the ground surface, besides the robot is not able to reconfigure its manipulator to do any desired task. These limitations reduce the capability of the robot to manipulate objects, and to perform accurate tasks. In order to omit these restrictions, in the developed mechanism, a reaction wheel is used. The proposed mechanism exploits the inertia moment of reaction wheel to stabilize motion of the robot. Therefore, since there is no interaction between the reaction wheel and the ground surface, by using this mechanism there would be no concern about the surface that the robot moves on that. Also, manipulator of the robot can track the given trajectories, without considering stability limitations. In order to show the performance of proposed mechanism, a verified dynamics model of the robot is used and the control algorithm with various initial conditions is simulated.

Keywords: Two-Wheeled Robot, Non-Holonomic constraint, Under-Actuated Joint, Reaction Wheel.

۱- مقدمه

ربات‌های متحرک به دلیل قابلیت جابجایی و پوشش وسیعی از محیط به عنوان فضای کاری، از کاربردهای گسترده‌ای در صنعت و زندگی برخوردار می‌باشند که می‌توان به عنوان نمونه به ربات‌های خدماتی خانگی، ربات‌های شست‌وشوگر کف در کارخانجات، مدل‌های پرنده و کاوشگرها اشاره کرد. این گونه از ربات‌ها، دارای یک بخش پایه متحرک بوده که عمل جابجایی ربات را برعهده می‌گیرند. در این بین بخشی از ربات‌های متحرک برای افزایش سرعت و چالاکی حین حرکتشان، به نحوی طراحی می‌شوند که پایداری و حفظ تعادلشان به صورت برخط و دینامیکی تأمین شود [۱]. با این کار ربات توانایی بهتری در حفظ تعادل خود پیدا کرده و از مشکلات موجود در تعادل استاتیکی دور خواهد ماند [۲]. از ربات‌هایی با پایداری دینامیکی، می‌توان به ربات انسان نما، ربات‌های پرنده، ربات‌های دوچرخ و غیره نام برد [۳، ۴]. اگرچه این گونه ربات‌ها، رفتار بسیار مقاومی حین انجام فعالیتشان از خود نشان می‌دهند، ولی به محض اینکه از کار بیفتند به راحتی تعادلشان بر هم خورده و واژگون می‌شوند. به همین علت اصولاً برای جلوگیری از واژگونیشان، تکیه‌گاه‌هایی برای جلوگیری از این پدیده بر روی آنها تعبیه می‌شود [۵]. همان طور که بیان شد، ربات دو چرخ نیز یک نمونه از این دسته است که به حفظ تعادل دینامیکی نیاز دارد. ربات دو چرخ به دلیل آرایش چرخ‌های بخش متحرک‌ساز آن، دارای یک مفصل غیر فعال بوده که تماماً تعادل ربات را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۶]. در سیستم‌هایی با مفصل غیرفعال، جهت کنترل چنین مفاصلی، از ارتباط مفاصل و عملگرهای موجود بر روی آنها و استفاده از دینامیک وابسته به هم اجزاء استفاده می‌شود [۷-۹]. در ربات دو چرخ نیز باید با استفاده از چنین عملی، مفصل غیرفعال را کنترل کرده و در نتیجه تعادل کل ربات را حفظ کرد. اصولاً در ربات دو چرخ با استفاده از کنترل چرخ‌های متحرک و انتقال ربات به سمت جلو و عقب و بهره یافتن از عکس‌العمل حاصل از چنین حرکتی بر روی ربات، به کنترل و تنظیم مفصل غیرفعال می‌پردازند. در این روش، مکان ربات همواره وابسته به این مفصل بوده و حفظ تعادل ربات، اهمیت بیشتری نسبت به حرکت کل ربات خواهد داشت و کنترل همزمان این حالت‌ها به همراه حفظ تعادل، سرعت عمل بالا و چالاکی کل ربات،

بسیار دشوار خواهد بود [۱۰]. یکی از کاربردهای مهم ربات‌های متحرک، جابجایی اجسام توسط آنها می‌باشد که این عمل وابستگی ویژه‌ای به مکان نهایی ربات دارد [۱۱]. اما همان طور که بیان گشت، ربات مزبور، به علت داشتن مفصل غیرفعال و استفاده از چرخ‌های متحرک خود برای حفظ تعادل، به هیچ عنوان امکان کنترل مکان نهایی به طور مستقل را نداشته و همواره وابستگی جابجایی به تعادل و موقعیت مفصل غیرفعال در آن وجود دارد [۱۲، ۱۳]. همین طور، استفاده از چرخ‌های بخش متحرک‌ساز ربات، برای حفظ تعادل، وابستگی تعادل ربات به محیط و نوع سطح آن را به وجود می‌آورد که محققان را وادار کرده جهت کاهش این وابستگی، عدم قطعیت‌های هر چند ناچیز، چه در پارامترهای ساختاری و چه غیرساختاری، را در مدل‌های کنترلی خود اعمال کنند. اما این وابستگی محدودیت‌هایی همچون عدم توانایی حفظ تعادل ربات در سطوحی با اصطکاک پایین را به وجود می‌آورد که کارایی ربات را به طور مستقیم کاهش می‌دهد. این مسأله در ربات دو چرخ که تنها در یک حالت مشخص تعادل دارد نسبت به ربات‌های انسان نما که در یک محدوده پایدار می‌باشند و تعادلشان را می‌توانند حفظ کنند، بسیار پررنگ‌تر است [۱۴].

برای حفظ تعادل، ربات دو چرخ بایستی به گونه‌ای قرار بگیرد که طبق معیار نقطه صفر گشتاوری^۱، گشتاور حاصل از برآیند نیروهای ثقلی، اینرسی و خارجی برابر صفر شود [۱۵]. برای رسیدن به این حالت‌ها، می‌بایستی محل مرکز ثقل ربات را به صورت بر خط محاسبه نموده و با توجه به حرکت پایه و همچنین گشتاور حاصل از نیروهای خارجی، آن را پیدا کرد.

به علت پیچیدگی معادلات این گونه ربات‌ها و برای ساده‌سازی معادلات، ربات دو چرخ بازودار با درجات آزادی بالا، به یک پاندول معکوس دوگانه متحرک ساده‌سازی شده است. این کار طبق پژوهش‌های به عمل آمده جهت ساده‌سازی و سرعت بیشتر عملیات محاسباتی بسیار کارآمد می‌باشد [۱۶، ۱۷].

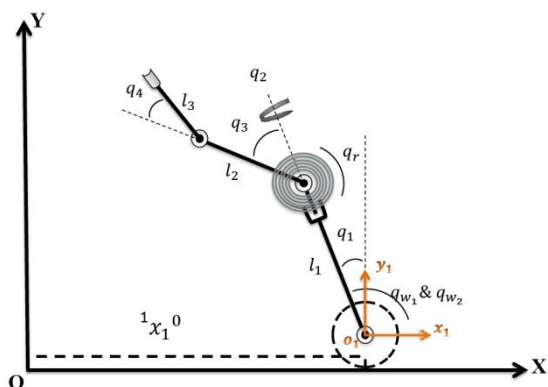
در این مقاله، با ارائه یک مکانیزم ارتقا یافته نسبت به مدل ربات دو چرخ غیرهولونوم و افزایش یک درجه آزادی به درجات آزادی ربات و استفاده از آن صرفاً جهت حفظ و کنترل مفصل غیرفعال، سعی شده مشکلات فوق، حذف شوند. در این مدل، با

1. ZMP

بازوی سه لینکی متصل بر روی بخش متحرک، به آن اجازه می‌دهد تا قابلیت جابجایی جسم را داشته باشد. اما در این مدل بازو، با توجه به ساختار بخش پایه متحرک، می‌توان بدنه اصلی را نیز به عنوان لینک اول بازو فرض کرد که در این صورت، بازو دارای سه لینک با چهار درجه آزادی به همراه سه عملگر می‌باشد و ربات را به یک مکانیزم با کمبود عملگر تبدیل می‌کند. به همین خاطر استفاده از یک چرخ عکس‌عملی و افزودن یک درجه آزادی بیشتر روی این ربات، صرفاً برای کنترل مفصل غیرفعال اول بازو بوده که هم پایداری ربات و هم افزایش قابلیت جابجایی ربات را به همراه می‌آورد. این چرخ مستقیماً توسط یک عملگر به بدنه اصلی یا همان اولین لینک بازوی ربات متصل می‌باشد. پارامترهای موجود در مدل ربات دو چرخ در شکل ۲ نمایش داده و در جدول ۱، تعریف شده است.



شکل ۱ طرح سه بعدی ربات دو چرخ بازودار به همراه چرخ عکس‌عملی



شکل ۲ طرح کلی ربات دو چرخ بازودار به همراه چرخ عکس‌عملی

استفاده از یک چرخ عکس‌عملی و نصب آن بر روی بدنه اصلی ربات و اعمال گشتاور بر روی آن و بکارگیری از تأثیر پذیری مفصل غیرفعال از عکس‌عمل ناشی از چرخ عکس‌عملی، به کنترل مفصل غیرفعال و حفظ تعادل آن پرداخته می‌شود. در این روش به دلیل جدا کردن بخش کنترل حرکت پایه متحرک ربات از تأمین پایداری آن، پیچیدگی حاصل از وجود مفصل غیرفعال و قید غیرهولونومیک در ساختار پیچیده و وابسته به هم دینامیکی ربات در کنترلرهای بکاررفته بسیار کاهش می‌یابد [۱۸]. همچنین استفاده از چرخ عکس‌عملی، وابستگی تعادل ربات نسبت به سطح محیط را به طور کامل حذف کرده و ربات قادر است حتی در سطوحی با اصطکاک بسیار پایین نیز تعادل خود را حفظ کند.

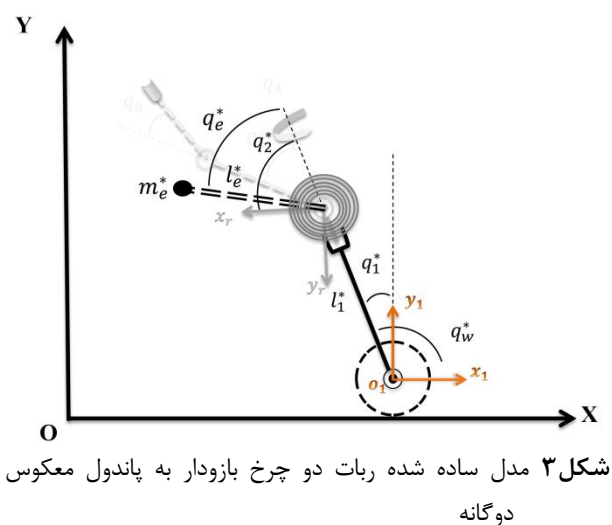
مدل دینامیکی استخراجی از ساختار ارتقا یافته، به کمک معادلات لاگرانژ به دست آمده و صحنه‌گذاری آن با استفاده از نرم‌افزار آدامز انجام شده است. مدل بیان شده با استفاده از مکانیزم ارائه شده، در حالات مختلف اولیه و کاری بررسی شده و نتایج آنها در بخش شبیه‌سازی بیان گشته است. در تمام این حالت‌ها، ربات به خوبی توانسته بدون نیاز به چرخ‌های پایه متحرک و به طبع آن، جابجا نمودن کل مجموعه به جلو و عقب، بلکه تنها با استفاده از عکس‌عمل گشتاور اعمالی به چرخ عکس‌عملی، پایداری و تعادل خود را حفظ کرده و از واژگونی مجموعه جلوگیری کند.

۲- مدل‌سازی ربات دوچرخ بازودار و صحنه‌گذاری آن

در این بخش به مدل‌سازی یک ربات بازودار دوچرخ به همراه مکانیزم چرخ عکس‌عملی جهت کنترل پایداری آن پرداخته شده است. با توجه به ربات مذکور، طبق شکل ۱، بخش پایه متحرک این ربات دارای دو چرخ می‌باشد که به صورت مجزا به دو موتور متصل هستند و حرکت خود را از این دو موتور تأمین می‌کنند. با توجه به ساختار موجود در پایه ربات که باعث به وجود آمدن یک مفصل غیرفعال می‌شود و در نتیجه آن تعادل ربات را تحت تأثیر قرار می‌دهد، پایداری آن باید به صورت دینامیکی تأمین شود. همچنین ساختار چیدمان چرخ‌ها، قید غیرهولونومیک را نیز برای ربات به همراه می‌آورد. وجود یک

ماتریس‌های: اینرسی^۱، نیروهای کریولیس و سانتریفیوژال^۲ و ماتریس جاذبه^۳ می‌باشند.

ربات دو چرخ بازودار، به دلیل وجود درجات آزادی بالا، قید غیرهولونومیک و همچنین خاصیت کمبود عملگر در آن، دارای معادلات پیچیده‌ای می‌باشد [۱۸]. به همین علت، یک روش کارآمد برای ساده‌سازی معادلات استفاده از مدل ساده شده پاندول معکوس دوگانه^۴ خواهد بود [۱۹-۲۱]. در این صورت با توجه به شکل ۳ و جدول ۲، می‌توان فرض کرد که لینک دوم موجود در مدل پاندول معکوس دوگانه، معادل سه لینک آخر بازوی موجود بر روی ربات باشد.



شکل ۳ مدل ساده شده ربات دو چرخ بازودار به پاندول معکوس دوگانه

جدول ۲ پارامترهای بکار رفته در مدل ساده شده

پارامترها	توضیحات
q_w^*	میزان زاویه دوران چرخ
q_1^*	میزان زاویه انحراف بدنه اصلی
q_2^*	میزان دوران چرخ عکس‌العملی
q_e^*	میزان زاویه انحراف لینک مجازی دوم پاندول معکوس
l_1^*	طول بازوی اول پاندول معکوس مجازی
l_e^*	طول بازوی دوم پاندول معکوس مجازی
m_e^*	جرم معادل برای بازوی دوم
d_1^*	مرکز جرم بدنه اصلی تا محور چرخ‌ها

برای محاسبه مختصات کارترین $x_{m_e}^*$ و $y_{m_e}^*$ و همچنین طول (l_e^*) ، زاویه (q_e^*) و جرم (m_e^*) لینک دوم معادل داریم [۲۲]:

1. The Inertia Matrix
2. The Centrifugal and Coriolis Force Matrix
3. The Gravity Matrix
4. Double Inverted Pendulum Model

پارامترها	توضیحات
O_{XYZ}	دستگاه اینرسی مرجع
$o_1-x_1y_1z_1$	دستگاه متصل به بدنه
q_{w2} و q_{w1}	میزان زاویه دوران چرخ‌ها
q_1	میزان زاویه انحراف بدنه اصلی
$q_{i(2,3,4)}$	میزان زاویه بازوهای ربات نسبت به یکدیگر
q_r	میزان دوران چرخ عکس‌العملی
r	شعاع چرخ‌های پایه
l	فاصله بین دوچرخ
$l_{i(1,2,3)}$	طول لینک‌های بازو

۲-۱- مدل‌سازی بازوی ربات

همان‌طور که اشاره شد با توجه به ساختار ربات، بازوی آن را می‌توان با سه لینک چهار درجه آزادی و سه عملگر در نظر گرفت. در این صورت برای سینماتیک مستقیم خواهیم داشت:

$$x = f(q) \quad (1)$$

که $x \in R^m$ بردار موقعیت کارترین فضایی است. همچنین با استفاده از مشتق این بردار برای سرعت و شتاب تمام لینک‌های بازو خواهیم داشت:

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (2)$$

$$\ddot{x} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q)\dot{q} \quad (3)$$

که در آنها $J \in R^{m \times n}$ ، $m \leq n$ ماتریس ژاکوبین می‌باشد و m و n به ترتیب درجات آزادی و تعداد بعدهای فضای کاری می‌باشند.

برای استخراج مدل دینامیکی ربات، می‌توان از روش لاگرانژ استفاده کرد. در این صورت داریم:

$$L = T - V \quad (4)$$

که در آن L تابع لاگرانژ و T و V به ترتیب توابع انرژی جنبشی و پتانسیل می‌باشند. با توجه به فرمول (۵) می‌توان معادلات دینامیکی ربات را به صورت رابطه (۶) بدست آورد:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad (5)$$

$$\tau = M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (6)$$

که در آن پارامترهای برداری:

$$q = [q_{w1}, q_{w2}, q_1, q_2, q_3, q_4, q_r]^T$$

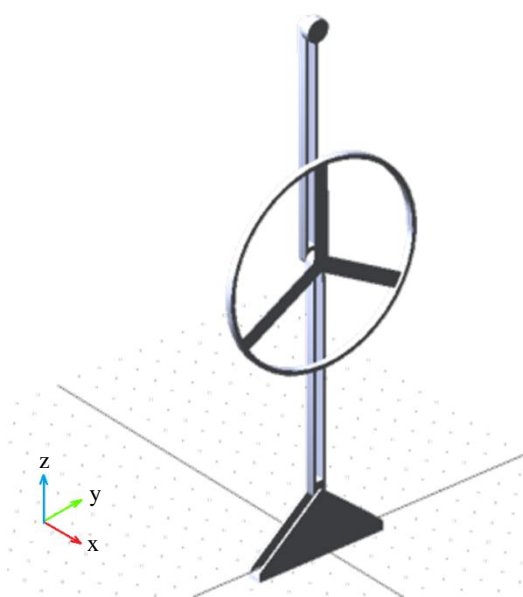
$$\tau = [\tau_{w1}, \tau_{w2}, \tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_r]^T$$

هستند و همچنین ماتریس‌های M, H, G به ترتیب

۲-۲- صحنه‌گذاری مدل دینامیکی استخراجی

به دلیل این که مدل بیان شده یک مدل ارتقا یافته از پاندول معکوس دوگانه می‌باشد، معادلات دینامیکی آن متفاوت بوده و بایستی این معادلات مورد بررسی و صحنه‌گذاری قرار گیرند. لذا به کمک شبیه‌سازی با نرم‌افزار آدامز رفتار دینامیکی ربات در حضور چرخ عکس‌عملی، مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. نرم‌افزار آدامز یک نرم‌افزار معتبر برای تحلیل‌های دینامیکی سیستم‌ها می‌باشد. لذا اگر رفتار سیستم در برابر حرکت چرخ عکس‌عملی و گشتاور وارد شده به آن، با معادلات نوشته شده در بخش قبل نسبت به رفتار سیستم توسط تحلیل این نرم‌افزار یکی باشد، می‌توان از صحت این معادلات با خبر شد و در بخش‌های بعدی از آن به عنوان مدل دینامیکی صحیح ربات مذکور، استفاده کرد.

مدل سه بعدی طراحی شده از ربات پاندول معکوس دوگانه با چرخ عکس‌عملی و همچنین مقادیر عددی پارامترهای اجزاء آن به ترتیب در شکل ۴ و جدول ۳ آورده شده است. با قرار دادن این دو مدل تحلیلی و عددی، در شرایط اولیه یکسان، چندین حالت زیر، بررسی خواهد شد. لازم به ذکر است، نتایج تحلیلی از معادلات و نتایج عددی از نرم‌افزار آدامز استخراج شده است.



شکل ۴ مدل شبیه‌سازی شده از پاندول معکوس دوگانه با چرخ عکس‌عملی در نرم‌افزار آدامز

$$x_{m_e}^* = \frac{\sum_{i=2}^3 m_i x_i}{\sum_{i=2}^3 m_i} \quad (7)$$

$$y_{m_e}^* = \frac{\sum_{i=2}^3 m_i y_i}{\sum_{i=2}^3 m_i} \quad (8)$$

$$l_e^* = \sqrt{(x_{m_e}^* - x_1^*)^2 + (y_{m_e}^* - y_1^*)^2} \quad (9)$$

$$q_e^* = \sin^{-1} \left(\frac{x_1^* - x_{m_e}^*}{l_{m_e}^*} \right) - q_1^* \quad (10)$$

$$m_e^* = \sum_{i=1}^2 m_i \quad (11)$$

با محاسبه تابع اوپلر-لاگرانژ (L)، از ترم‌های انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم، معادلات حرکتی ربات نیز به صورت برداری به شکل $\tau^* = M^*(q^*)\ddot{q}^* + H^*(q^*, \dot{q}^*) + G^*(q^*) \cdot g$ خواهند بود که در آن پارامترهای برداری:

$$q^* = [q_w^*, q_1^*, q_2^*, q_e^*]^T \in \mathbb{R}^4$$

$$\tau^* = [\tau_w^*, \tau_1^*, \tau_2^*, \tau_e^*]^T \in \mathbb{R}^4$$

هستند. لازم به ذکر است، در این معادلات q_1^* به عنوان درجه آزادی غیرفعال موجود می‌باشد که به نوبه آن \hat{t}_1 همواره برابر صفر می‌باشد، همچنین درایه‌های ماتریس‌های $M^* \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ ، $H^* \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ ، $G^* \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ عبارت‌اند از:

$$M_{11} = (m_w^* + m_1^* + m_2^* + m_e^*)r^2$$

$$M_{12} = M_{21} = (d_1^* m_1^* + m_e^*(l_1^* + l_e^* \cos(q_e^*)) + l_1^* m_2^*)r \cos(q_1^*) + m_w^* r^2$$

$$M_{14} = M_{41} = m_e^* l_e^* r \cos(q_1^* + q_e^*)$$

$$M_{22} = l_1^{*2} + i_2^* + d_1^{*2} m_1^* + l_1^{*2} m_2^* + l_1^{*2} m_e^* + l_e^{*2} m_e^* \cos^2 q_e^* + 2l_1^* l_e^* m_e^* \cos q_e^* + m_w^* r^2$$

$$M_{23} = M_{32} = M_{33} = i_2^*$$

$$M_{24} = l_e^{*2} m_e^* \cos^2 q_e^* + l_1^* l_e^* m_e^* \cos q_e^*$$

$$M_{13} = M_{31} = M_{34} = M_{43} = 0$$

$$M_{44} = l_e^{*2} m_e^*$$

$$H_1 = -\dot{q}_1^* (m_e^* r (\dot{q}_1^* \sin(q_1^*) (l_1^* + l_e^* \cos(q_e^*)) + l_e^* \dot{q}_e^* \sin(q_1^* + q_e^*)) + l_1^* m_2^* \dot{q}_1^* r \sin(q_1^*) + d_1^* m_1^* \dot{q}_1^* r \sin(q_1^*)) - m_e^* r \dot{q}_e^* (l_e^* \dot{q}_e^* \sin(q_1^* + q_e^*) + l_e^* \dot{q}_1^* \cos(q_1^*) \sin(q_e^*))$$

$$H_2 = -2m_e^* l_e^* \dot{q}_1^* (l_e^* \dot{q}_e^* \cos(q_e^*) \sin(q_e^*) + l_1^* \dot{q}_e^* \sin(q_e^*)) + m_e^* l_e^* \dot{q}_e^* (\dot{q}_w^* r \cos(q_1^*) \cos(q_e^*) - \dot{q}_e^* \sin(q_e^*) (l_1^* + 2l_e^* \cos(q_e^*)))$$

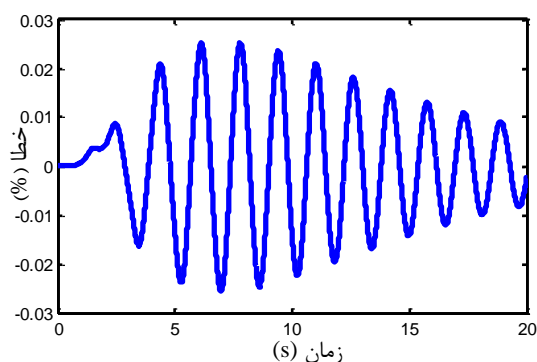
$$H_3 = c_2 \dot{q}_2^*$$

$$H_4 = -m_e^* l_e^* r \dot{q}_1^* \dot{q}_w^* \cos(q_e^*) \sin(q_e^*) + m_e^* l_e^* \dot{q}_1^{*2} \sin(q_e^*) (l_1^* + l_e^* \cos(q_e^*)) + c_e \dot{q}_e^*$$

$$G_1 = G_3 = 0$$

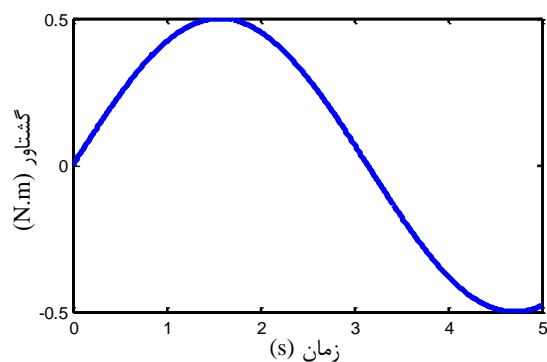
$$G_2 = -d_1^* m_1^* \sin(q_1^*) - l_1^* \sin q_1^* (m_2^* + m_e^*) - l_e^* m_e^* (\cos q_1^* \sin q_e^* + \sin q_1^* \cos q_e^*)$$

$$G_4 = -l_e^* m_e^* \sin(q_1^* + q_e^*)$$

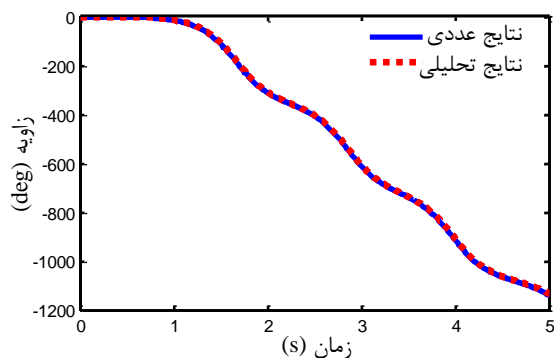


شکل ۷ درصد خطای حاصل از دو نتایج تحلیلی و عددی برای میزان تغییرات زاویه بدنه اصلی ربات

حال، به چرخ عکس‌العملی یک گشتاور متغیر وارد می‌شود. در این حالت منحنی مقادیر گشتاور اعمالی به چرخ عکس‌العملی و همچنین میزان تغییرات زاویه بدنه اصلی نسبت به محور قائم به ترتیب در زیر نمایش داده شده است (شکل‌های ۸ تا ۱۰).



شکل ۸ گشتاور وارد شده به چرخ عکس‌العملی

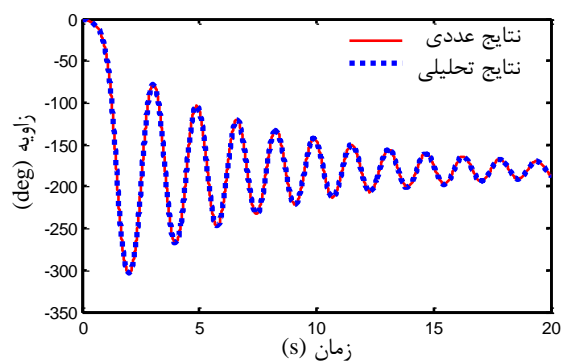


شکل ۹ میزان تغییرات زاویه بدنه اصلی ربات

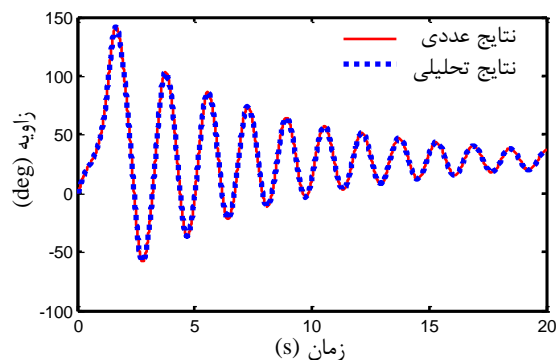
در اولین حالت، به چرخ عکس‌العملی، گشتاوری به صورت ضربه واحد، وارد می‌شود. تغییرات زاویه بدنه اصلی نسبت به محور قائم (q_1^*) و میزان دوران چرخ عکس‌العملی، (q_2^*) و همچنین میزان درصد خطای آن را در شکل‌های ۵ تا ۷ آورده شده است.

جدول ۳ پارامترهای فیزیکی و مقادیر عددی آنها در مدل مجازی پاندول معکوس دوگانه با چرخ عکس‌العملی در شبیه‌سازی

توضیحات	پارامترها	مقادیر عددی
طول لینک اول	l_1^*	۰/۵ (m)
محل مرکز ثقل لینک اول	d_1^*	۰/۲۵ (m)
طول لینک دوم	l_e^*	۰/۵ (m)
ضریب اصطکاک موجود در مفصل q_e	c_e	۰/۲ (N·m/rad·s)
ضریب اصطکاک موجود در مفصل q_2	c_2	۰/۲ (N·m/rad·s)
جرم چرخ‌ها	m_w^*	۰/۳ (kg)
جرم لینک اول	m_1^*	۰/۴۵ (kg)
جرم چرخ عکس‌العملی	m_2^*	۱/۶ (kg)
جرم معادل لینک دوم	m_e^*	۰/۳ (kg)
ممان اینرسی لینک اول نسبت به محور Z_1	i_1^*	۰/۰۱۲ (kg·m ²)
ممان اینرسی چرخ عکس‌العملی نسبت به محور Z_1	i_2^*	۰/۰۷۴ (kg·m ²)



شکل ۵ مقدار تغییرات زاویه بدنه اصلی ربات



شکل ۶ میزان دوران چرخ عکس‌العملی ربات

همچنین جهت محاسبه مکان نهایی ربات نسبت به یک مرجع ثابت، همواره یا نیاز به جمع تغییرات پارامترهای مکانی در هر لحظه و به صورت برخط داشته و یا با استفاده از محاسبه‌گرهای خارجی همچون پردازش تصویر و غیره داریم [۲۳-۲۴]. در روش انتگرال‌گیری به صورت برخط، باید موقعیت ربات را در هر لحظه محاسبه نموده و تغییرات آن، همواره حساب و اعمال شود. در این صورت با توجه به شکل ۱۱، برای بدست آوردن موقعیت و مکان مرکز دستگاه $[x_I, y_I, z_I]$ متصل به بدنه اصلی ربات در صفحه مرجع، سرعت دورانی و سرعت خطی دستگاه $[x_I, y_I, z_I]$ بر حسب پارامترهای دورانی دو چرخ ربات داریم:

$$V_{x_1} = \frac{(\dot{q}_{w_1} + \dot{q}_{w_2})r}{2} - \dot{q}_1 r \quad (12)$$

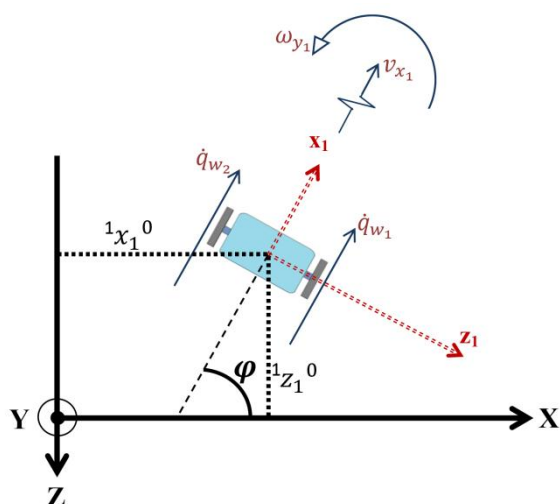
$$\omega_{y_1} = \frac{(\dot{q}_1 - \dot{q}_2)r}{2L} \quad (13)$$

پارامترهای ${}^1X^0$ و ${}^1Z^0$ و φ با استفاده از انتگرال‌گیری در هر لحظه به روش زیر قابل استحصال می‌باشند:

$$\varphi(n) = \omega_{y_1(n-1)} \cdot \Delta t + \varphi(n-1) \quad (14)$$

$${}^1X_{(n)}^0 = V_{x_1(n-1)} \cos \varphi(n) \cdot \Delta t + {}^1X_{(n-1)}^0 \quad (15)$$

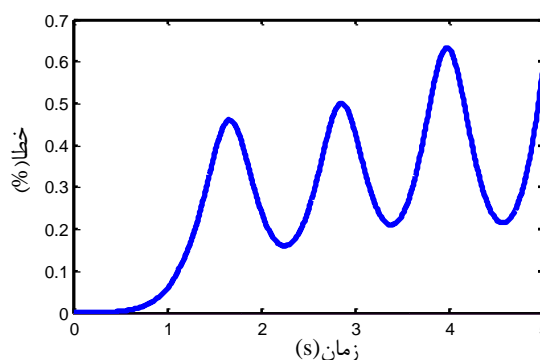
$${}^1Z_{(n)}^0 = -V_{x_1(n-1)} \sin \varphi(n) \cdot \Delta t + {}^1Z_{(n-1)}^0 \quad (16)$$



شکل ۱۱ تصویر پایه متحرک ربات دوچرخ غیرهولونومیک

۳- کنترل ربات

از آنجا که پایداری ربات توسط چرخ عکس‌العملی انجام می‌شود و مستقل از حرکت چرخ‌های پایه می‌باشد، می‌توان مدل کنترلی ربات را برای حفظ تعادل و پیمایش مسیر به دو بخش مجزا تقسیم کرد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.



شکل ۱۰ خطای حاصل از نتایج تحلیلی و عددی برای میزان تغییرات زاویه بدنه اصلی ربات

همان طور که مشاهده شده، مقادیر عددی شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار آدامز با مقادیر استخراجی توسط معادلات بکار گرفته شده، تا حد قابل قبولی با هم مشابه می‌باشند. لذا امکان استفاده از معادلات نوشته شده در بخش‌های آتی با تکیه بر این شبیه‌سازی صورت می‌پذیرد.

در شبیه‌سازی‌های به عمل آمده، به دلیل اینکه هدف، صرفاً بررسی مدل دینامیکی استخراجی برای ربات مورد نظر و میزان تطابق خروجی‌های دو مدل‌سازی با هم بوده، لذا محدودیتی از سوی زمین اعمال نشده است. به همین علت، پاندول‌ها می‌توانند دوران کامل داشته باشند و همان طور که از منحنی‌ها مشخص است، در حالت اول پاندول پس از مقداری نوسان بر روی نقطه تعادل پایداریش قرار گرفته و در حالت دوم به دلیل اعمال گشتاور به چرخ عکس‌العملی، ربات حدود سه دور حول نقطه تکیه‌گاهش می‌زند.

در خصوص میزان خطای حاصل از دو شبیه‌سازی نیز شایان ذکر است که با توجه به منحنی‌های شکل ۷ و شکل ۱۰، این طور به نظر می‌رسد که خطا به میزان زاویه بدنه اصلی مرتبط می‌باشد و در مقادیر کم، مقدار محدودی خواهد داشت و چون در شبیه‌سازی‌های اصلی، این زوایا در بازه‌ی 90° تا -90° درجه قرار دارند، لذا خطای حاصل از مدل نیز در محدوده‌ی مشخصی قرار خواهد گرفت.

۳-۲- مدل‌سازی پایه متحرک و بررسی موقعیت آن در صفحه حرکت

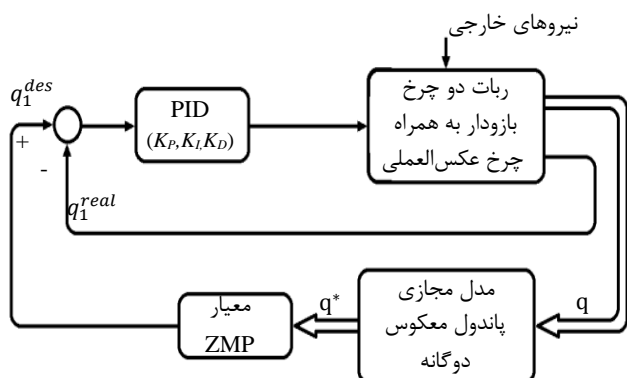
به دلیل وجود قید غیرهولونومیک در پایه متحرک، ربات قادر به پیمودن مسیر در جهت محور Z_1 نمی‌باشد (شکل ۱۱).

۳-۱- پایدارسازی

ربات دو چرخ به دلیل وجود مفصل غیرفعال در زیر چرخ‌ها، توانایی حفظ تعادل را به صورت استاتیکی نداشته و به همین دلیل بایستی به طور دینامیکی و برخط پایداری و تعادل خود را حفظ کند. از جمله فعالیت‌های صورت پذیرفته شده در این موضوع، استفاده از معیار نقطه صفر گشتاوری و کنترل آن توسط ربات می‌باشد. معیار نقطه صفر گشتاوری، محدوده‌ای که گشتاور حاصل از نیروهای ثقلی، اینرسی و نیروهای خارجی در آن صفر می‌باشند را محاسبه نموده و بیان می‌کند که ربات در این محدوده توانسته بدون اعمال هیچ فعالیتی تعادل خود را حفظ کند که در این مسأله خاص، محدوده مورد نظر و مطلوب، تنها یک نقطه می‌باشد. لازم به ذکر است، فرض می‌شود نیروهای مذکور برای بدست آوردن نقطه مطلوب معلوم می‌باشند. با استفاده از چنین معیاری، مطابق شکل ۱۲، مقدار و موقعیت مرکز جرم مجموعه ربات را محاسبه نموده و سپس حالت مطلوب ربات، با استفاده از این معیار به دست می‌آید.

$$X_{CoG} = \frac{\sum X_i m_i}{\sum m_i} \quad (17)$$

پس از محاسبه محل مناسب مرکز جرم توسط معیار نقطه صفر گشتاوری، با استفاده از عکس‌العمل حاصل از اعمال گشتاور به چرخ عکس‌العملی، موقعیت فعلی مرکز جرم، به موقعیت مطلوب بدست آمده انتقال داده می‌شود. بلوک دیاگرام کنترلی ربات، جهت حفظ تعادل در شکل ۱۳، آورده شده است.

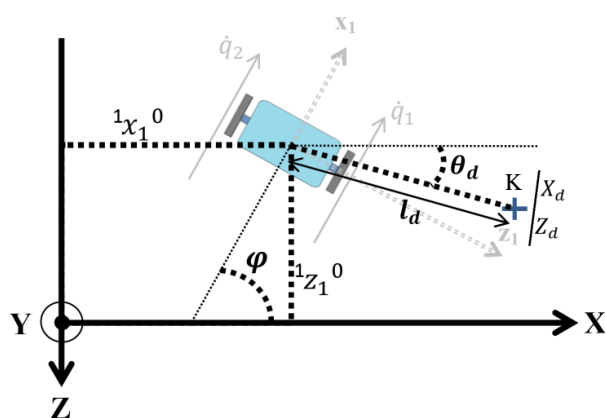


شکل ۱۳ بلوک دیاگرام کنترلی بخش پایدارساز

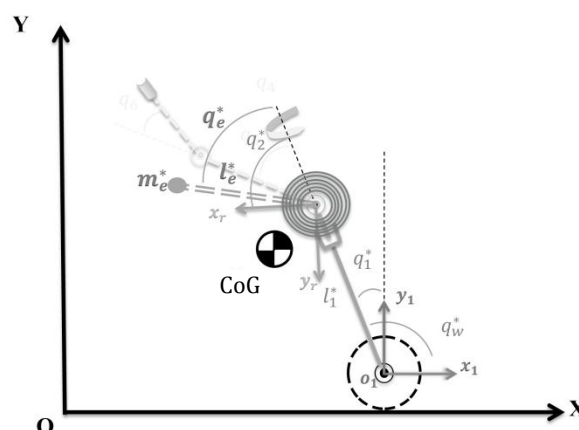
با این روش سعی می‌شود، ربات در تمام حالت‌ها پایداری و تعادلش را حفظ کند.

۳-۲- کنترل پیمایش مسیر حرکت زمانی

در این بخش به بیان مدل کنترلی جهت پیمایش مسیر مطلوب توسط ربات، پرداخته می‌شود. طبق شکل ۱۴، موقعیت و حالت ربات نسبت به مرجع ثابت در زمان n ام، به صورت ${}^1x(n)$ و ${}^1z(n)$ ، نمایش داده شده است. با فرض این که نقطه K ، نقطه مطلوب طراحی در آن زمان مشخص باشد، در این صورت مدل کنترلی می‌تواند با محاسبه میزان فاصله و همچنین جهت خط فرضی واصل بین موقعیت و حالت ربات با نقطه مطلوب، به بخش متحرک ربات دستورات لازم را ارائه دهد [۲۵]. در شکل ۱۵، بلوک دیاگرام الگوریتم کنترلی این بخش به نمایش در آمده است.



شکل ۱۴ پایه متحرک ربات و پارامترهای مورد نیاز جهت کنترل مسیر حرکت زمانی



شکل ۱۲ مرکز جرم مجموعه ربات دو چرخ بازودار به همراه چرخ عکس‌العملی

جدول ۵ مقادیر ضرایب بخش کنترل مسیر در شبیه‌سازی

مقادیر عددی	ضرایب کنترل مسیر
۵	K_p
۰/۵	K_i
۰/۱	K_d
۱	K'_p
۰/۵	K'_i

جدول ۶ مقادیر عددی ضرایب کنترلی بخش پایدارساز در شبیه‌سازی

مقادیر عددی	ضرایب پایدارساز
۳/۹۱۶	K_p
۱	K_I
۰/۰۶۲۴	K_D

در تعیین این مقادیر، سرعت عمل بالا و کاهش نوسانی بودن جواب در کنار فیلترهای حد اشباع برای ورودی سیستم، مد نظر گرفته شده است. در ادامه به شبیه‌سازی مدل ربات و تست آن در سه شرایط مختلف پرداخته می‌شود.

۴-۱- حالت اول

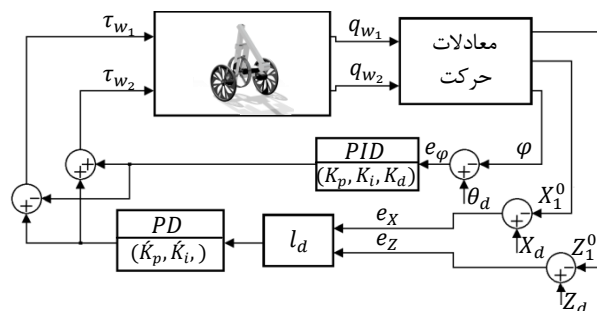
در این حالت فرض شده است که ربات با یک شرایط اولیه مشخص شروع به کار کرده و بازوهای خود را در طول زمان تغییر می‌دهد. مقادیر عددی شرایط اولیه ربات در جدول ۷ آورده شده است. همچنین نحوه تغییرات بازوها طوری فرض شده است که مقدار معادل آنها در لینک دوم مدل پاندول معکوس دوگانه به صورت منحنی شکل ۱۶ باشد.

در طول مدت، ربات حالت اجزاء خود را به صورت برخط مشاهده و میزان تغییرات نقطه مطلوب را طبق معیار نقطه صفر گشتاوری محاسبه کرده و با استفاده از گشتاور اعمالی به چرخ عکس‌العملی، شرایط ربات را به حالت مطلوبش تغییر می‌دهد.

جدول ۷ مقادیر اولیه زوایای مدل ساده شده ربات

توضیحات	پارامترها	مقادیر (زاویه)
زاویه بدنه اصلی نسبت به محور قائم	q_1^*	-۳۰
زاویه راستای لینک مجازی دوم نسبت به راستای لینک اول	q_e^*	-۶۰

با توجه به معیار نقطه صفر گشتاوری، در شکل ۱۷، میزان تغییرات محل مطلوب زاویه بدنه اصلی و همچنین مقدار آن روی ربات در هر لحظه را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۵ الگوریتم کنترلی پایه متحرک ربات

طبق شکل ۱۵، خطای حاصل از زاویه انحراف جهت حرکت ربات (e_ϕ) توسط یک بلوک کنترلر کلاسیک (تناسبی- مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر)، یک دستور دیفرانسیلی را به چرخ‌ها اعمال می‌کند که باعث چرخش ربات حین حرکت می‌شود. همچنین با محاسبه فاصله موقعیت ربات با نقطه طراحی شده در آن لحظه، میزان سرعت پیشروی با استفاده از یک بلوک کنترلر کلاسیک (تناسبی- مشتق‌گیر) تعیین و اعمال می‌شود.

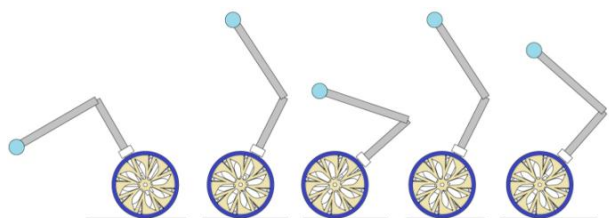
۴- شبیه‌سازی عملکرد

پارامترهای عددی مدل بدست آمده از ربات دوچرخ بازودار با چرخ عکس‌العملی و همچنین مقادیر عددی ضرایب بهره کنترلی با توجه به استراتژی کنترلی بیان شده به ترتیب در جدول‌های ۴، ۵ و ۶ آورده شده‌اند. مقادیر کنترلی، با استفاده از سعی و خطا به روش دستی تعیین شده‌اند.

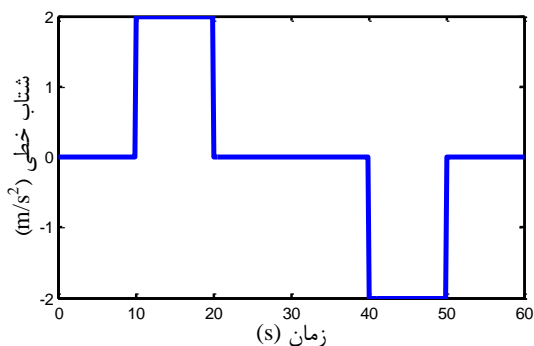
جدول ۴ پارامترهای فیزیکی و مقدار عددی مربوط به مدل ربات در شبیه‌سازی

توضیحات	پارامترها	مقادیر عددی
طول لینک اول	l_1^*	۰/۲۶ (m)
محل مرکز جرم لینک اول	d_1^*	۰/۰۰۳ (m)
محل قرار گرفتن جرم معادل لینک دوم (طول لینک مجازی دوم)	l_e^*	۰/۲۵ (m)
ضریب اصطکاک مفصل دوم	c_e	۰/۲ (N·m/rad·s)
ضریب اصطکاک مفصل چرخ عکس‌العملی	c_2	۰/۲ (N·m/rad·s)
جرم چرخ‌ها	m_w^*	۰/۱۵ (kg)
جرم لینک اول	m_1^*	۰/۰۶ (kg)
جرم چرخ عکس‌العملی	m_2^*	۰/۳۵ (kg)
جرم معادل لینک مجازی دوم	m_e^*	۰/۳ (kg)
ممان اینرسی لینک اول	i_1^*	۰/۰۰۷ (kg·m ²)
ممان اینرسی چرخ عکس‌العملی	i_2^*	۰/۰۰۱ (kg·m ²)

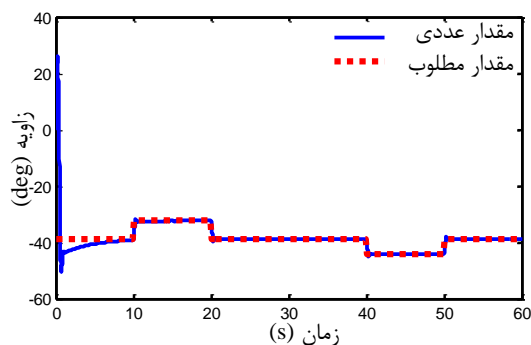
می‌باشد. منحنی تغییرات شتاب، زاویه بدنه اصلی ربات به همراه مقدار مطلوب محاسبه شده آن و میزان دوران چرخ عکس‌العملی، همچنین گشتاور اعمالی به آن، حین حرکت به ترتیب در شکل‌های ۲۰ تا ۲۳ آورده شده است.



شکل ۱۹ تصویر ربات در طول زمان و اصلاح حالت خود حین پایدارسازی



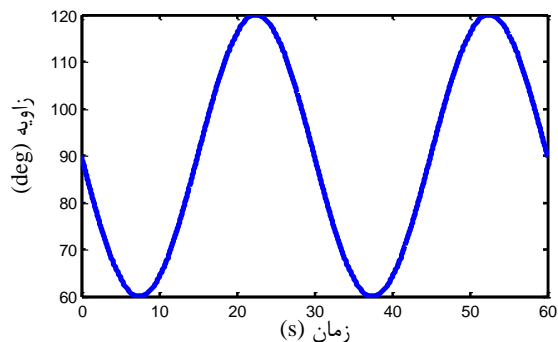
شکل ۲۰ منحنی تغییرات شتاب خطی ربات



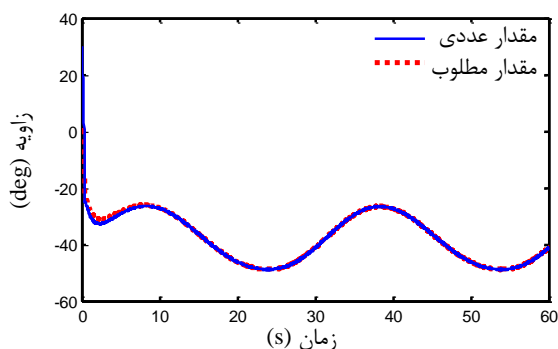
شکل ۲۱ منحنی تغییرات زاویه بدنه اصلی ربات و اصلاح نقطه مطلوب آن برای رسیدن حالت سیستم از شرایط موجود به حالت پایدار طبیعی طبق معیار نقطه صفر گشتاوری

با توجه به منحنی‌های شکل ۲۱ و ۲۲، ربات پس از خواندن مقادیر ورودی به کنترلر، به اصلاح مقدار مطلوب پرداخته و این مقدار را طوری تغییر داده است که بر اساس معیار نقطه صفر

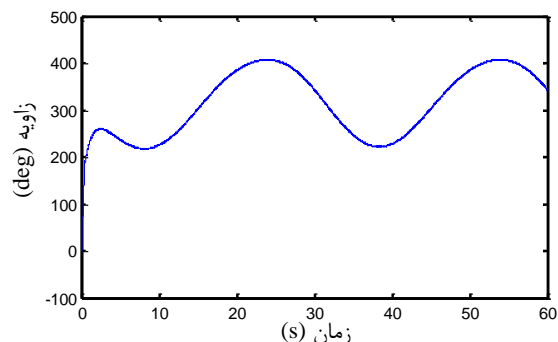
شکل ۱۸، میزان دوران انجام گرفته شده توسط چرخ عکس‌العملی جهت کنترل وضعیت ربات و حفظ تعادلش در هر لحظه را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۹، وضعیت کلی ربات را جهت حفظ تعادل در طول زمان نمایش داده است.



شکل ۱۶ منحنی تغییرات زاویه لینک دوم بازوی پاندول معکوس دوگانه



شکل ۱۷ منحنی تغییرات زاویه بدنه اصلی ربات و نقطه مطلوب آن



شکل ۱۸ منحنی تغییرات دورانی چرخ عکس‌العملی

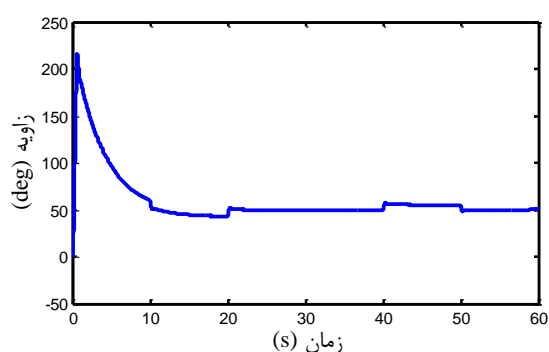
۴-۲- حالت دوم

در این حالت فرض می‌شود ربات در یک مسیر مستقیم‌الخط با شتاب متغیر حرکت کند. شرایط اولیه ربات همانند حالت قبل

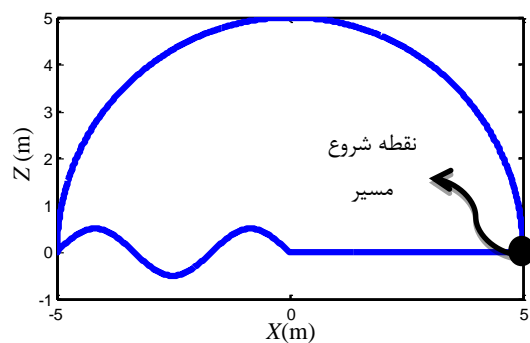
۳-۴- حالت سوم

در این قسمت ربات یک مسیر از پیش تعیین شده مطابق شکل ۲۵ را می‌پیماید. در این مسیر، تغییرات شتاب بسیار متنوع بوده و بخش کنترلی پیمایش مسیر حرکت زمانی ربات سعی در تطابق موقعیت و حالت ربات با توجه به زمان را دارد. این در حالی است که ربات جهت حفظ تعادل در تمام مدت باید با استفاده از محاسبات و دستورات لازم به چرخ عکس‌عملی، معیار نقطه صفر گشتاوری را اعمال کند تا بتواند پایدارش را در طول مدت پیمایش مسیر به خوبی حفظ کند. شکل ۲۶، نقطه شروع و جهت ربات را در زمان ابتدایی و همچنین مسیر پیموده شده توسط ربات را نمایش می‌دهد. شکل‌های ۲۷ و ۲۸، منحنی‌های تغییرات مختصات کارتیزین در راستای X و Z را طول زمان نمایش می‌دهند. شتاب حاصل از پیمایش این حرکت در راستای X_I و منحنی تغییرات زاویه بدنه اصلی به همراه مقدار مطلوب آن با توجه به چنین شتابی، به ترتیب در شکل‌های ۲۹ و ۳۰ آورده شده است. همچنین میزان تغییرات دوران چرخ عکس‌عملی برای حفظ تعادل ربات نیز در شکل ۳۱ به نمایش درآمده است.

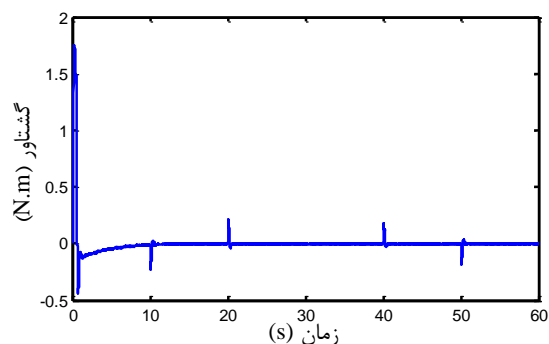
گشتاوری، گشتاور حاصل از تمام نیروهای داخلی و خارجی حول محور چرخ ربات صفر شود و همچنین با تغییرات شتاب حین حرکت ربات، مقدار مطلوب حالت تعادل را جهت حفظ پایداری تغییر داده تا کنترل ربات به خوبی انجام پذیرد. همان‌طور که از منحنی‌ها پیداست، تغییرات شتاب حین حرکت، پایداری ربات را به هیچ عنوان به خطر نمی‌اندازد و چرخ عکس‌عملی به خوبی از پس چنین تغییراتی برمی‌آید. شکل ۲۴، وضعیت کلی ربات را در طول زمان جهت ایجاد پایداری و حفظ تعادل نمایش می‌دهد.



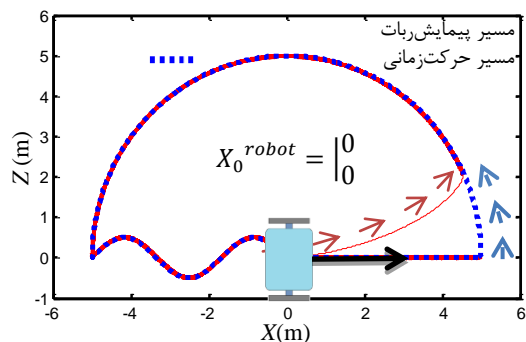
شکل ۲۲ منحنی تغییرات دورانی چرخ عکس‌عملی حین پایدارسازی و اصلاح حالت ربات



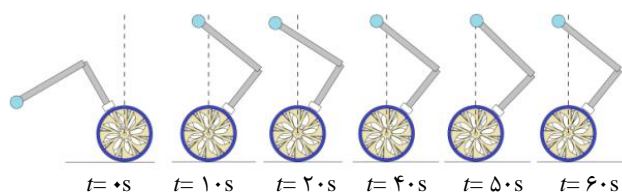
شکل ۲۵ مسیر حرکت زمانی طراحی شده برای حالت سوم



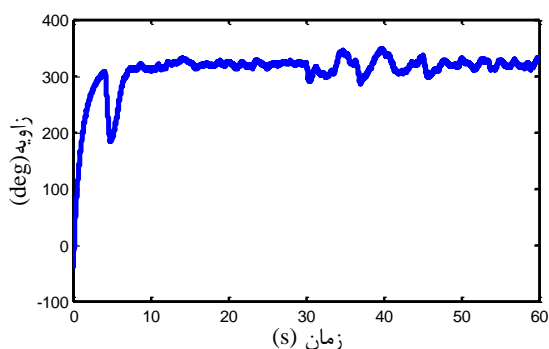
شکل ۲۳ گشتاور اعمالی به چرخ عکس‌عملی



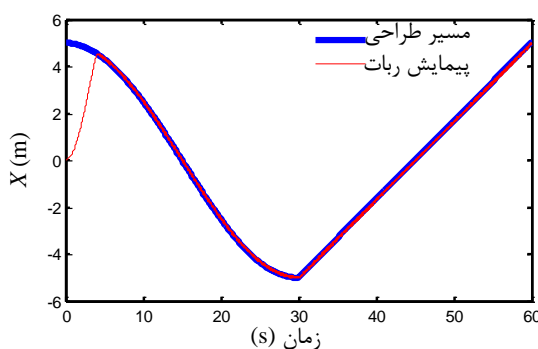
شکل ۲۶ شرایط اولیه و مسیر پیموده شده توسط ربات



شکل ۲۴ تصویر ربات در طول زمان و اصلاح حالت خود جهت حفظ تعادل حین انجام فعالیت



شکل ۳۱ میزان تغییرات زاویه چرخ عکس‌العملی

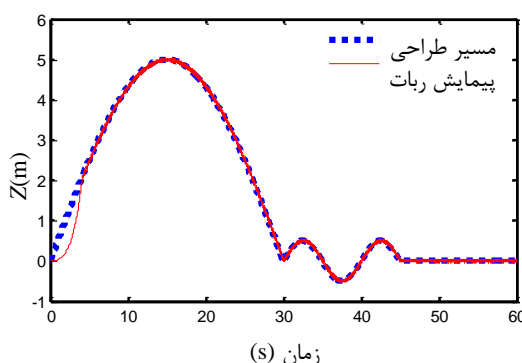


شکل ۲۷ منحنی پارامتر X در طول زمان و نحوه تعقیب ربات بر روی آن

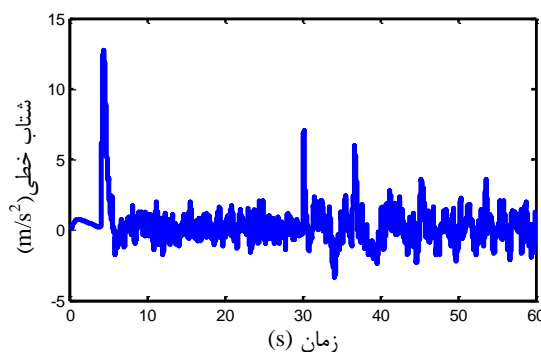
۵- نتیجه‌گیری

روبات‌های دوچرخ دیفرانسیلی که فاقد تعادل تکیه‌گاهی هستند، توانایی حفظ تعادلشان را به صورت استاتیکی نداشته و لذا باید به صورت دینامیکی آن را به وجود آورد. معمولاً این کار با استفاده از عقب و جلو بردن پایه متحرک ربات و استفاده از نیروهای اینرسی حاصل می‌شود. با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های ربات‌ها، جابجایی اجسام بر روی مسیرهای مشخص می‌باشد، لذا اگر پایداری ربات دوچرخ با چنین مکانیزمی صورت پذیرد، توانایی این ربات را برای انجام چنین پروژه‌هایی افزایش می‌دهد. در ضمن وابستگی تعادل ربات به سطح محیط کاری نیز از دیگر محدودیت‌های این گونه ربات‌ها می‌باشد که نیازمند شناسایی دقیق محیط کاری است و باعث به وجود آمدن محدودیت‌هایی در رفتار ربات می‌شود. در این مقاله، با ارتقای مکانیزم پایداری ربات دوچرخ و استفاده از یک چرخ عکس‌العملی توانسته است، تمام محدودیت‌ها و مشکلات بیان شده در ساختار رایج را برطرف کرده و کارایی ربات را به مراتب افزایش دهد. به طوری که جابجایی اجسام بر روی مسیرهای مشخص نیز با حذف حرکت نوسانی پایه از عهده‌ی ربات دوچرخ برخواهد آمد که با اضافه کردن بازوان کاری این امر مورد بررسی قرار گرفت.

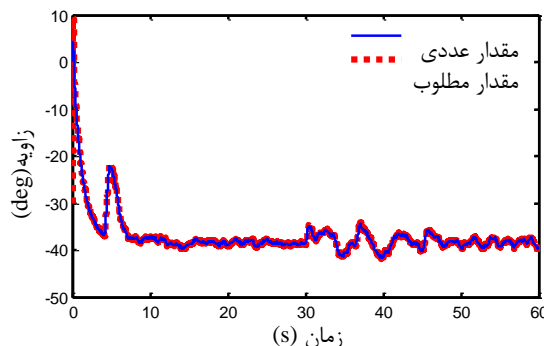
عدم وابستگی حفظ تعادل به سطح محیط کاری نیز یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های به وجود آمده در ربات دوچرخ با پایداری پیشنهادی است که به ربات اجازه می‌دهد تا بر روی سطوحی با اصطکاک پایین همانند سطوح یخ زده نیز تعادل خود را حفظ کند. لازم به ذکر است، تمام این مدل‌های شبیه‌سازی شده، توسط نرم‌افزار آدامز صحت‌گذاری شده است. همچنین ساده شدن کنترل حرکت این ربات و جدا شدن



شکل ۲۸ منحنی پارامتر Z در طول زمان و نحوه تعقیب ربات بر روی آن



شکل ۲۹ شتاب خطی حاصل از پیمایش مسیر



شکل ۳۰ تغییرات زاویه بدنه اصلی ربات و نقطه مطلوب آن

- IEEE Transactions on Robotics*, Vol.21, No.3, June 2005, pp.505-513.
- [11] Brooks R., Aryanada L., Edsinger A., Fitzpatrick P., Kemp C.C., Reilly O., Torres-jara E., Varshavskaya P. and Weber J., "Sensing and Manipulating Built-for Human Environments", *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 1, No. 1, 2004, pp. 1-28.
- [12] Miyashita T. and Ishiguro H., "Human-link Natural Behaviour Generation Based on Involuntary Motions for Humanoid Robots", *Robotics Autonomous Systems*, Vol. 48, 2004, pp. 203-212.
- [13] Gans N.R. and Hutchinson S.A., "Visual Servo Velocity and Pose Control of A Wheeled Inverted Pendulum through Partial-Feedback Linearization", *Proceeding of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006, pp. 3823-3828.
- [14] Tsai C.C., Huang H.C. and Lin S.C., "Adaptive Neural Network Control of A Self-Balancing Two-Wheeled Scooter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 4, April 2010, pp.1420-1428.
- [15] Furuta T., Tawara T., Shimizu M. And Tomiyama K., "Design and Construction of A Series of Compact Humanoid Robots and Development of Biped Walk Control Strategies", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 37, Issues 2-3, November 2001, pp. 81-100.
- [16] Acar C. and Murakami T., "Multi-Task Control for Dynamically Balanced Two-Wheeled Mobile Manipulator through Task-Priority", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2011, pp. 2195-2200.
- [17] Sasak K. and Murakami T., "Pushing Operation by Two-Wheel Inverted Mobile Manipulator", *IEEE International Workshop on Advance Motion Control*, 2008, pp. 33-37.
- [18] Abe H., Shibata T. and Murakami T., "A Realization of Stable Attitude Control in Two Wheels Driven Mobile Manipulator", *Papers of Technical Meeting on Industrial Instrumentation and Control*, IEE, Japan, 2006.
- [19] Rubi J., Rubio A. and Avello A., "Swing-up Control Problem for A Self-Erecting Double Inverted Pendulum", *IEEE Proceeding Control theory Application*, Vol. 149, No. 2, 2002, pp. 169-175.
- [20] Liu D., Gue W., Yi J. and Zhao D., "Double-Pendulum-Type Overhead Crane Dynamics and Its Adaptive Sliding Mode Fussy Control", *Proceeding Of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2004, pp.26-29.
- [21] Pathak K., Franch J. and Agrawal S.K., "Velocity and Position Control of A Wheeled Inverted Pendulum by Partial Feedback Linearization", *IEEE Transaction on Robotics*, Vol. 21, No. 3, 2005, pp. 505-513.
- بخش کنترل پایداری با بخش کنترل پایه متحرک به ساده شدن محاسبات و کاهش پیچیدگی معادلات منجر شده است. علاوه بر ویژگی‌های به وجود آمده توسط تغییر و ارتقای مکانیزم ارائه شده، حفظ تعادل ربات و رفتار عکس‌العملی آن جهت پایداری با شبیه‌سازی و مشاهده نتایج مورد بررسی و صحت‌گذاری قرار گرفته است.

۶- مراجع

- [1] Alipour K. and Moosavian S.Ali A., "How to Ensure Stable Motion of Suspended Wheeled Mobile Robots", *Journal of Industrial Robot*, Vol. 38, No. 2, 2011, pp. 139-152.
- [2] Nguyen H.G., Morrell J., Mullens K., Burmeister A., Miles S., Farrington N., Thomas K. and Gragee D.W., "Segway Robotic Mobility Platform", *Proceeding SPIE Mobile Robots*, Philadelphia, 2004.
- [3] Moosavian S.Ali A., Alghooneh M. and Takhmar A., "Cartesian Approach for Gait Planning and Control of Biped Robots on Irregular Surfaces", *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 6, No. 4, December 2009, pp. 675-697.
- [4] Moosavian S.Ali A., Rastegari R. and Papadopoulos E., "Multiple Impedance Control for Space Free-Flying Robots", *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 28, No. 5, September 2005, pp. 939-947.
- [5] Zohar I., Ailon A. And Rabinovici R., "Mobile Robot Characterized by Dynamic and Kinematic Equations and Actuator Dynamics: Trajectory Tracking and Related Application", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 59, Issue 6, June 2011, pp. 343-353.
- [6] Thibodeau B., Deegan P. And Grupen R., "Static Analysis of Control Forces with A Mobile Manipulator", *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Orlando, Florida, May15-19, 2006, pp.4007-4012.
- [7] Huang Ch. and Fu Li., "Passivity Based Control of The Double Inverted Pendulum Driven by A Linear Induction Motor", *Proceeding of IEEE Conference on control Applications*, Vol. 2, 2003, pp. 797-802.
- [8] Grasser F., D'Arrigo A., Colombi S. and Rufer A.C., "JOE: A Mobile, Inverted Pendulum", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. 49, No. 1, 2002, pp. 107-114.
- [9] Niki H. and Toshiyuki M., "An Approach to Self Stabilization of Bicycle Motion by Handle Controller", *Proceeding of the first Asia International Symposium on Mechatronics*, 2004.
- [10] Pathak K., Franch J., and Agrawal S.K., "Velocity and Position Control of A Wheeled Inverted Pendulum by Partial Feedback Linearization",

- [24] Klančar G., Matko D. And Blažič S., "A Control Strategy for Platoons of Differential Drive Wheeled Mobile Robot", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 59, Issue 2, February 2011, pp. 57-64.
- [25] Scaglia G., Rosales A., Quintero L., Mut V. And Agarwal R., "A Linear-Interpolation-Based Controller Design for Trajectory Tracking of Mobile Robots", *Control Engineering Practice*, Vol. 18, Issue 3, March 2010, pp. 318-329.
- [22] Acar C., "A Robust Control of Two-Wheeled Mobile Manipulator with Underactuated Joint by Nonlinear Backstepping Method", MSc Thesis, School of Integrated Design Engineering, Keio University, 2008.
- [23] Moustris G.P. And Tzafestas S.G., "Switching fuzzy Tracking Control for Mobile Robots Under Curvature Constraints", *Control Engineering Practice*, Vol. 19, Issue 1, January 2011, pp. 45-53.