



بازیابی تعادل یک ربات انسان نما با استفاده از درجه آزادی مج پا و لگن بر روی سطوح تماسی کوچک

میلاد شفیعی آشتیانی^۱، عقیل یوسفی کما^{۲*}، مسعود شریعت پناهی^۳، مجید خدیو^۴

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
 -۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
 -۳- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
 -۴- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۱۱۵۵-۴۵۶۳ aykoma@ut.ac.ir

چکیده

هدف از این مقاله ارائه الگوریتمی برای بازیابی تعادل ربات انسان نما در حضور اغتشاشات ناشناخته شدید بر روی سطوح تماسی کوچک است. انسان با بزرگ شدن اغتشاش وارد به ترتیب از سه استراتژی مج پا، لگن و گام برداری برای بازگرداندن تعادل خود بهره می برد. در شرایطی که اغتشاش وارد بزرگ باشد و شرایط محیطی اجازه گام برداری را نهد، و یا زمانی که ربات بر روی سنگ و یا قطمهای می ایستد، سطح تکیه گاهی پا کوچک می شود، انسان با بهره گیری از اثر دوران بالاتنه تعادل خود را حفظ می کند. در این راستا، روشی الهام یافته از رفتار انسان بر اساس کنترل پیش بین به منظور کنترل نقطه مهار ارائه می شود. الگوریتم پیشنهادی با بهینه سازی بلاذرگ مومنت دورانی بالاتنه، قادر است بدون گام برداری تعادل ربات را در حضور اغتشاشات شدید و در شرایطی که چندضلعی تکیه گاهی به یک نوار نازک کاوش یافته است، حفظ کند. روش پیشنهادی با هدف کنترل نقطه مهار از گشتاور مج پا به منظور تنظیم مکان نقطه گشتاور صفر زمانی که نقطه مهار درون چندضلعی تکیه گاهی است بهره می برد و در شرایطی که نقطه مهار بیرون از چندضلعی تکیه گاهی است از تغییر مومنت دورانی بالاتنه به منظور تنظیم مکان نقطه لولای ممان مرکزی، به صورت بهینه بهره می برد. نتایج شبیه سازی های صورت گرفته در سناریوهای مختلف بر اساس ویژگی های ربات سورنا ۳ است که شایستگی الگوریتم مورد نظر را تأیید می کند.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۱۶ آبان ۱۳۹۵
پذیرش: ۳۰ آذر ۱۳۹۵
ارائه در سایت: ۲۹ دی ۱۳۹۵
کلکید و از کران:
ربات انسان نما
بازیابی تعادل
کنترل پیش بین مبتنی بر مدل
نقطه مهار

Balance recovery of a humanoid robot using hip and ankle joints on small contact surfaces

Milad Shafiee Ashtiani¹, Aghil Yousefi-Koma^{2*}, Masoud Shariat-Panahi³, Majid Khadiv⁴

۱, ۲, ۳- School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

۴- School of Mechanical Engineering, K.N Toosi University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 11155-4563 Tehran, Iran, aykoma@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 06 November 2016

Accepted 20 December 2016

Available Online 18 January 2017

Keywords:

Humanoid robot

Push Recovery

Model Predictive Control

Capture point

ABSTRACT

In this paper a push recovery controller for balancing humanoid robot under severe pushes for situation when contact surface is small is presented. Human response to progressively increasing disturbances can be categorized into three strategies: ankle strategy, hip strategy and stepping strategy. The reaction of human to external disturbances in the situations that contact surface is small or stepping is not possible is generating upper body angular momentum. In this way, in this paper a single model predictive controller scheme is employed to control the capture point by modulating zero moment point and centroidal moment pivot. The proposed algorithm is capable of recovering balance of humanoid robot under severe pushes without stepping in situation in which contact surface is shrunk to a strip. The goal of the proposed controller is to control the capture point, employing the centroidal moment pivot when the capture point is out of the support polygon, and/or the zero moment point when the capture point is inside the support polygon. The merit of proposed algorithm is shown successfully in different simulation scenarios using characteristic of SURENA III humanoid robot.

یک ربات دوپا ارائه کنترلگری می باشد که بتواند تعادل ربات را حفظ کند. در

این راستا در طی دهه اخیر تحقیقات گسترده ای برای حفظ تعادل ربات های

پادار در حضور اغتشاشات خارجی صورت گرفته است [۵-۱].

نگهداشتن نقطه گشتاور صفر^۲ در داخل چندضلعی تکیه گاهی شاخص

² Zero Moment Point(ZMP)

Please cite this article using:

M. Shafiee Ashtiani, A. Yousefi-Koma, M. Shariat-Panahi, M. Khadiv, Balance recovery of a humanoid robot using hip and ankle joints on small contact surfaces, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 413-422, 2017 (in Persian)

-۱- مقدمه

ساخت یک ربات هوشمند دوپا که بتواند جایگزین انسان برای انجام کارهای پیچیده باشد، آرزوی دیرین بشری است. ربات های دوپا به دلیل کم عملگر^۱ بودن دارای طبیعت ناپایدار می باشند. بر این اساس اصلی ترین چالش توسعه

¹ Under-Actuated

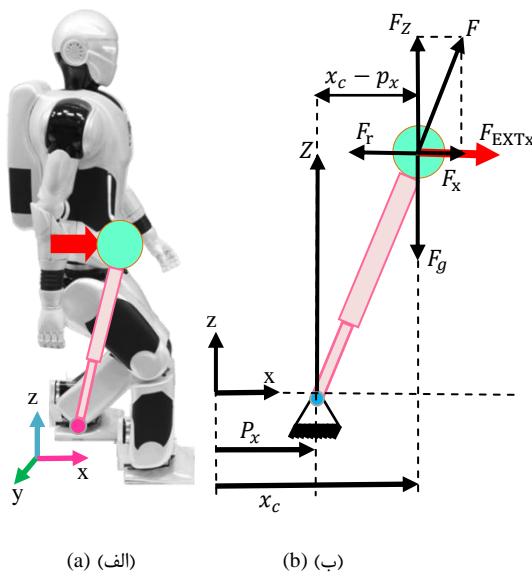


Fig. 1 (a) Surena Robot (b) Linear inverted pendulum

شکل ۱ (الف)، آونگ معکوس خطی ب، ربات سورنا

معکوس سه جرمه به منظور در نظر گرفتن دینامیک پای معلق ربات در سرعت های بالا پرداختند [21]. با توجه به اینکه ممان دورانی بالاتنه ربات نقشی اساسی در حفظ تعادل ربات ایفا می کند (استراتژی لگن)، پرت و همکارانش با اضافه کردن یک چرخ طیار به مدل پاندول معکوس اثر دورانی بالاتنه را نیز در نظر گرفتند [3]. بنابراین نقطه‌ی لولای ممان مرکزی^۴ با اضافه کردن این اثر به نقطه گشتاور صفر تعریف می شود [22]. زمانی که نقطه گشتاور صفر درون چندضلعی تکیه گاهی باشد این دو نقطه بهم منطبق می باشند و زمانی که نقطه گشتاور صفر به لبه پا می رسد نقطه لولای ممان مرکزی می تواند با تغییر مomentum دورانی بالاتنه از نقطه گشتاور صفر جدا شود و از چندضلعی تکیه گاهی خارج شود [23]. پس به منظور توسعه الگوریتم های کنترلی حفظ تعادل بدون گامبرداری، مدل پاندول معکوس به همراه چرخ طیار تقریب مناسبی از دینامیک ربات انسان نما را فراهم می کند.

با بررسی مطالعات انجام شده تاکنون حفظ تعادل ربات دوپا در حضور اغتشاش شدید خارجی در شرایطی که چندضلعی تکیه گاهی به یک نوار باریک کاهش یافته باشد، پرداخته نشده است. در این مقاله برای اولین بار به ارائه الگوریتمی واحد (بیان استراتژی مج پا و لگن بصورت همزمان) می کنترلگر واحد پیش بین مبتنی بر مدل به منظور دفع اغتشاشات شدید وارد بر ربات در شرایطی که گامبرداری ممکن نیست و سطح تکیه گاهی به یک نوار باریک و یا یک نقطه کاهش یافته است پرداخته می شود. الگوریتم پیشنهادی به کنترل نقطه مهار به وسیله تنظیم نقطه گشتاور صفر در شرایطی که نقطه مهار درون چندضلعی تکیه گاهی است و بواسیله تنظیم نقطه لولای ممان مرکزی در حالتی که نقطه مهار در خارج از چندضلعی تکیه گاهی است به صورت یک کنترلگر واحد می پردازد.

بخش های بعدی این مقاله بدین شرح است: در بخش دوم، دینامیک مرکز جرم و معادلات و نحوه استخراج نقطه مهار بصورت خلاصه مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم، استراتژی های بیومکانیکی حفظ تعادل انسان در حضور اغتشاشات خارجی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در بخش چهارم، الگوریتم کنترلی پیشنهادی برای بازیابی تعادل ربات بر مبنای کنترل

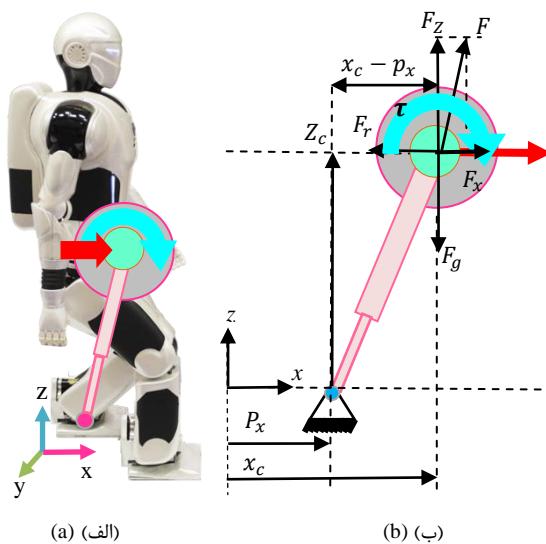
تعادل دینامیکی بیشتر الگوریتم های کنترلی ربات انسان نما است [1]. اگرچه این نقطه وضعیت تعادل دینامیکی ربات انسان نما را مشخص می کند ولی اطلاعاتی درباره توانایی بازگرداندن تعادل ربات در اختیار ما نمی گذارد. به طور مثال زمانی که نقطه گشتاور صفر به لبه چندضلعی تکیه گاهی می رسد ربات ممکن است وضعیت های تعادل دینامیکی مختلفی داشته باشد که در همه این شرایط نقطه گشتاور صفر در لبه پا قرار دارد. بر این اساس نقطه مهار^۱ معرفی شده است که میزان ناپایداری ربات را مشخص می کند و می تواند معیار مفیدی برای الگوریتم های پیشنهادی بازیابی تعادل باشد [8-3]. با توجه به موارد فوق می توان الگوریتم های کنترلی کارآمد برای حفظ تعادل را به دو دسته عمده کنترل پسخورد بر مبنای نقطه مهار [11-3] و یا کنترل پیش بین مبتنی بر مدل^۲ [12-16] تقسیم کرد.

کاجیتا و همکارانش به معرفی کنترل پیش نگر^۳ برای طراحی مسیر پایدار ربات انسان نما پرداختند [12]. وی برای بیان خاصیت پایداری نقطه گشتاور صفر به عنوان یک قید به مسئله طراحی مسیر این مسئله را به صورت یک مسئله کنترل پیش بین مبتنی بر مدل بیان کرد [13]. وی برای نشان داد الگوریتم ارائه شده در مقابل اغتشاشات با بزرگی 15 درصد وزن ربات مقاوم می باشد. هر دت و همکارانش با در نظر گرفتن جایهای ربات به عنوان یک وروדי کنترلی بر میزان توانمندی این الگوریتم افزودند [14]. بنابراین مکان گام آینده ربات با توجه به اغتشاش وارد می شود. در این راستا استفن و همکارانش به ارائه الگوریتمی مبتنی بر کنترل پیش بین برای بازیابی تعادل ربات انسان نما با استفاده از استراتژی گامبرداری پرداختند و الگوریتم مورد نظر نیرویی با بزرگی 410 نیوتون را خنثی کرد [15].

از طرف دیگر پرت و همکارانش با جدا کردن دینامیک مرکز جرم ربات به دو جزء واگرا و همگرای حرکت به معرفی نقطه مهار پرداختند [4,3]. جزء مربوط به قسمت ناپایدار دینامیک حرکت، نقطه مهار نامیده می شود. نقطه مهار میزان ناپایداری ربات را مشخص می کند. انسان با بزرگ شدن اغتشاش وارد به ترتیب از سه استراتژی مج پا، لگن و گامبرداری برای بازگرداندن تعادل خود بهره می برد [16]. نقطه مهار مشخص می کند که ربات باید از کدامین استراتژی برای بازیابی تعادل بهره ببرد. انگلزبرگر و همکارانش با توسعه مفهوم نقطه مهار از فضای این نقطه برای طراحی مسیر ربات انسان نما بهره گرفتند [6-8]. هاف و همکارانش در مسیری جدا به منظور بررسی گامبرداری انسان از نقطه مهار با عنوان مرکز جرم تعیین یافته استفاده کردند [9]. همچنین تاکنایا از نقطه مهار برای مقاوم سازی گامبرداری حرکت ربات آسیمو بهره برد [10]. خدیو و همکارانش با تنظیم زمان گامبرداری از نقطه مهار به منظور بازیابی تعادل ربات استفاده کردند [11].

به منظور توسعه الگوریتم های کنترلی اشاره شده، معادلات دینامیکی ربات مورد استفاده قرار می گیرد. توسعه الگوریتم های کنترلی بر اساس دینامیک کامل ربات هزینه محاسبات سیار بالایی دارد و قابل پیاده سازی عملی به صورت بلاذرگ نمی باشد [17-19]. برای حل این مسئله کاجیتا به معرفی مدل آونگ معکوس خطی به منظور تخمین مناسب دینامیک ربات دوپا پرداختند [20]. اکثر روش های مذکور از مدل آونگ معکوس به منظور توصیف دینامیک مرکز جرم ربات بهره می برند [16-3]. مطابق شکل ۱ این مدل، اثر دینامیک پای معلق و همچنین اثر دورانی بالاتنه ربات را در نظر نمی گیرد. بر این اساس اسلامی و همکارانش به ارائه روشی بر مبنای آونگ

¹ Capture Point(CP)² Model Predictive Control(MPC)³ Preview Control⁴ Centroidal Moment Pivot(CMP)



شکل 2 (الف) ربات سورنا (ب) آونگ معکوس خطی چرخ طیار
Fig. 2 (a) Surena Robot (b) Linear inverted pendulum+flywheel

با توجه به معادلات (5) نقطه لولای ممان مرکزی به صورت (6) تعریف می شود:

$$\ddot{x}_c = \omega^2(x_c - p_x) - \frac{\dot{H}_y}{mz} + \frac{F_{\text{EXT}x}}{m}$$

$$\ddot{y}_c = \omega^2(y_c - p_y) + \frac{\dot{H}_x}{mz} + \frac{F_{\text{EXT}y}}{m}$$

$$\tau_x = \dot{H}_x, \quad \tau_y = \dot{H}_y \quad (5)$$

بنابراین با ترکیب معادلات (5) و (6) معادله (9) بصورت زیر بدست می آید:

$$CMPl_x = p_x + \frac{\dot{H}_y}{F_z}$$

$$CMPl_y = p_y - \frac{\dot{H}_x}{F_z} \quad (6)$$

تغییر مومنت دورانی حول محور x و τ گشتاور وارد شده بر چرخ طیار است. با توجه به معادلات (6) و (7) زمانی که تغییرات مومنت دورانی بالاتنه صفر می باشد، نقطه گشتاور صفر و نقطه لولای ممان مرکزی برهمنطبق هستند. در شرایطی که به ربات اغتشاشی وارد می شود و نقطه گشتاور صفر به لبه چندضلعی تکیه گاهی می رسد، با ایجاد تغییرات مومنت دورانی بالاتنه، نقطه لولای ممان مرکزی از نقطه گشتاور صفر جدا می شود و به خارج از چندضلعی تکیه گاهی حرکت می کند.

2- دینامیک نقطه مهار

همانطور که در مقدمه بیان شد، متغیر حالت مربوط به جزء ناپایدار و واگرای دینامیک مرکز جرم ربات نقطه مهار نامیده شده است و به صورت (8) تعریف می شود:

$$\xi_x = x_c + \frac{\dot{x}_c}{\omega}$$

$$\xi_y = y_c + \frac{\dot{y}_c}{\omega} \quad (8)$$

با مرتبا سازی معادله (8)، معادله (9) بصورت زیر بدست می آید:

$$\dot{x}_c = \omega(\xi_x - x_c)$$

$$\dot{y}_c = \omega(\xi_y - y_c) \quad (9)$$

پیش بین ارائه شده است. در بخش پنجم، شبیه سازی برای سناریوهای مختلف و نتایج آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نهایتاً، در بخش ششم به نتیجه گیری و جمع بندی پرداخته شده است.

2- دینامیک مرکز جرم

دینامیک ربات های دوپا به شدت غیر خطی و پیچیده می باشد [17] و توسعه الگوریتم های کنترلی بلادرنگ را با جالشی بزرگ رو برو می کند. راه حل ارائه شده برای این مسئله تقریب دینامیک ربات انسان نما با یک مدل ساده می باشد. در این راستا تقریب دینامیک ربات های انسان نما با یک مدل آونگ معکوس خطی به صورت موفقیت آمیز و کارآمد صورت گرفته است [20]. مدل آونگ معکوس خطی تمام جرم ربات را به صورت متتمرکز در مرکز جرم در نظر می گیرد و از اثر دینامیک پاها و اثر دوران بالاتنه صرف نظر شده است. در بیان مدل آونگ معکوس خطی فرضیات زیر لحاظ شده است [20]:

- مرکز جرم در صفحه افقی با ارتفاع ثابت حرکت می کند.
- تغییرات مومنت دورانی بالاتنه صفر می باشد.
- مفصل پایه آونگ معکوس گشتاور می باشد.

با توجه به فرضیات فوق و شکل 1، معادلات آونگ معکوس خطی به صورت

(1) تا (3) استخراج می شود:

$$(m\ddot{x}_c)z_c = mg(z_c - p_x) \quad (1)$$

$$(m\ddot{y}_c)z_c = mg(y_c - p_y) \quad (1)$$

$$\ddot{x}_c = \omega^2(x_c - p_x) \quad (2)$$

$$\ddot{y}_c = \omega^2(y_c - p_y) \quad (2)$$

$$P_{\text{ZMP}} = [p_x, p_y, p_z]$$

$$P_{\text{com}} = [x_c, y_c, z_c]$$

$$\omega = \sqrt{g/z_c}$$

$$F_r = m\ddot{x}_c \quad (3)$$

که در آن m جرم کل ربات، g شتاب گرانشی و ω فرکانس طبیعی آونگ معکوس خطی است، موقعیت مرکز جرم و نقطه گشتاور صفر به ترتیب با بردارهای P_{ZMP} و P_{com} بیان شده است. با توجه به شکل 1 و فرض حرکت خطی افقی مرکز جرم، نیروی F_z با نیروی گرانشی F_g برابر هست. نیروی اینرسی F_r برابر با برآیند نیروهای افقی وارد بر ربات یعنی F_x به علاوه نیروی اغتشاش وارد F_{EXT} می باشد. x_c موقعیت مرکز جرم و موقعیت نقطه گشتاور صفر p_x می باشد. با توجه به اینکه نقطه مفصل پایه ای آونگ معکوس خطی بر روی نقطه گشتاور صفر در نظر گرفته شده است و تغییرات مومنت دورانی صفر در نظر گرفته شده است، بردار نیروی واکنشی تماسی زمین یعنی F از مرکز جرم عبور می کند. با توجه به فرضیات فوق معادلات حرکت در صفحات جانبی و طولی از هم مستقل می باشند. با اضافه کردن نیروهای اغتشاشی معادلات حرکت به صورت (4) به دست می آید:

$$\ddot{x}_c = \omega^2(x_c - p_x) + \frac{F_{\text{EXT}x}}{m}$$

$$\ddot{y}_c = \omega^2(y_c - p_y) + \frac{F_{\text{EXT}y}}{m} \quad (4)$$

مطلوب شکل 3 اثر مومنت دورانی بالاتنه نقش اساسی در بازیابی تعادل انسان در حضور اغتشاشات شدید خارجی بازی می کند ولی در معادلات آونگ معکوس خطی در نظر گرفته نشده است [23,22]. با استفاده از مفاصل بازوها و کمر می توان گشتاوری حول مرکز جرم وارد کرد در نتیجه می توان تغییرات مومنت دورانی بالاتنه را در به صورت مطلوب تنظیم کرد. مطابق شکل 2 با اضافه کردن یک چرخ طیار به بالاتنه، معادلات (4) به صورت (5) اصلاح می شود:

نقشه گشتوار صفر، یا در مفهوم کلی تر نقشه لولای ممان مرکزی، نقشه مهار را از خود می‌راند و زمانی که این نقطه بر روی نقطه مهار منطبق شود سرعت مرکز جرم صفر می‌شود و ربات به حالت تعادل ایستایی می‌رسد. به این ترتیب زمانی که اغتشاش خارجی وارد بر ربات کوچک می‌باشد نقطه مهار درون چندضلعی تکیه‌گاهی است. بنابراین با کنترل نقطه گشتوار صفر و یا به عبارت دیگر استراتژی مج (گشتوار مج) می‌توان نقطه مهار کنترل کرد.

با بزرگ شدن اغتشاشات وارد شده انسان علاوه بر استراتژی مج، از اثر دورانی بالاتنه (استراتژی لگن) نیز بهره می‌برد. در این شرایط نقطه مهار چندضلعی تکیه‌گاهی را ترک می‌کند و با نقطه گشتوار صفر نمی‌توان نقطه مهار را کنترل کرد بنابراین با ایجاد تغییر مومنتم دورانی می‌توان از طریق نقطه لولای ممان مرکزی نقطه مهار را کنترل کرد. در این مقاله منظور از اغتشاش شدید شرایطی می‌باشد که نقطه مهار چند ضلعی تکیه‌گاهی را ترک کند.

با شدیدتر شدن اغتشاش وارد شده انسان از استراتژی گام‌برداری استفاده می‌کند زیرا در این حالت فاصله نقطه مهار از چندضلعی تکیه‌گاهی زیاد می‌شود و با توجه به اینکه عملگرها انسان و یا ربات می‌توانند تغییر مومنتم دورانی محدودی تولید کنند بنابراین نقطه لولای ممان مرکزی تا محدوده مشخصی می‌تواند حرکت کند، درنتیجه برای حفظ تعادل باید چندضلعی تکیه‌گاهی را جابجا کرد. جزئیات این سه حالت بررسی شده به صورت شماتیک در شکل ۴ نشان داده است. در شکل ۴ منظور از ناحیه مهار مجموعه‌ای از نقطه‌های مهار می‌باشد.

شکل ۵ شرایطی را نشان می‌دهد که ربات قابلیت گام‌برداری ندارد و باید با بهره‌گیری از استراتژی مج پا-لگن تعادل ربات را حفظ کند. همان‌طور که در مقدمه مقاله اشاره شد، هدف این مقاله ارائه کنترلگری می‌باشد که عکس العمل بهمنه را در زمان اغتشاش وارد در شرایطی که گام‌برداری امکان‌پذیر نیست و یا چندضلعی تکیه‌گاهی به یک نقطه و یا خط کاهش‌یافته است، صورت دهد. بنابراین در ادامه با الگام از رفتار انسان، کنترلر پیش‌بین مبتنی بر مدل به عنوان راه حل موضوع ذکر شده، ارائه خواهد شد.

۴- کنترلگر بازیابنده تعادل مبتنی بر کنترل پیش‌بین

در بخش ۲ به توصیف دینامیک ربات انسان‌نما با یک آونگ معکوس پرداخته شد. به‌منظور کنترل حرکات آونگ معکوس، الگوریتم‌های کنترلی فراوانی توسعه‌یافته‌اند و در اولین نگاه به نظر می‌رسد که به‌طور مثال می‌توان با یک کنترلگر پسخورد متغیرهای حالت سیستم، این سیستم را کنترل کرد. مسئله‌ای که در جمله قبلي به آن توجه نشده است، وجود قید تمسی ایک‌طرفه در پایه آونگ معکوس به‌منظور توصیف دینامیک ربات دوپا است.

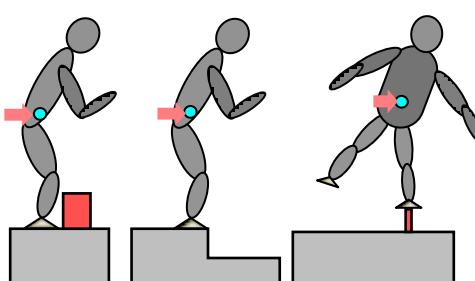


Fig. 5 Situations in which using stepping strategy is not possible.

شکل ۵ شرایطی که استفاده از استراتژی گام‌برداری ممکن نیست

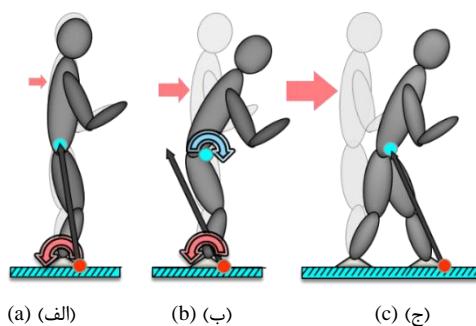


Fig. 3 Human-inspired Balancing strategies (a) Ankle Strategy (b) Hip Strategy (c) Stepping Strategy

شکل ۳ استراتژی‌های بازیابی تعادل الهام‌یافته از انسان (الف) استراتژی مج پا (ب) استراتژی مج پا-لگن (ج) استراتژی گام‌برداری

با یکبار مشتق‌گیری از معادله (8) و جایگذاری معادلات (6) و (5) در آن، برای دینامیک نقطه مهار، معادله (10) بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} \frac{F_{\text{EXTx}}}{mw} + \omega(\xi_x - CMP_x) &= \ddot{\xi}_x \\ \frac{F_{\text{EXTy}}}{mw} + \omega(\xi_y - CMP_y) &= \ddot{\xi}_y \end{aligned} \quad (10)$$

با توجه به معادلات فوق دینامیک نقطه مهار طبیعت ناپایداری دارد و سرعت نقطه مهار متناسب با فاصله نقطه مهار از نقطه لولای ممان مرکزی و جهت آن به سمت دور شدن از نقطه لولای ممان مرکزی می‌باشد. بنابراین نقطه لولای ممان مرکزی نقطه مهار را از خود می‌راند. اگر نقطه لولای ممان مرکزی بر روی نقطه مهار منطبق شود سرعت نقطه مهار صفر می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد می‌توان با نقطه لولای ممان مرکزی حرکت نقطه مهار را کنترل کرد. در بخش‌های بعدی به بحث در این مورد پرداخته می‌شود.

۳- استراتژی بازیابی تعادل الهام‌یافته از انسان

در بخش قبلی به ارائه معادلات دینامیک مرکز جرم و نقطه مهار پرداخته شد. در این بخش استراتژی‌های بیومکانیکی بازیابی تعادل و همچنین نقشه مهار و اهمیت این نقطه در بازیابی تعادل بررسی خواهد شد [16].

مطابق شکل‌های ۳ و ۴ عکس العمل انسان به اغتشاشات خارجی وارد شده به استراتژی‌های مج پا استراتژی لگن و استراتژی گام‌برداری تقسیم شده است.

زمانی که اغتشاش وارد شده کوچک باشد انسان از استراتژی مج پا برای بازیابی تعادل بهره می‌برد. در حقیقت در این حالت نقطه گشتوار صفر در داخل چندضلعی تکیه‌گاهی قرار دارد. همان‌طور که در بخش قبل بیان شد

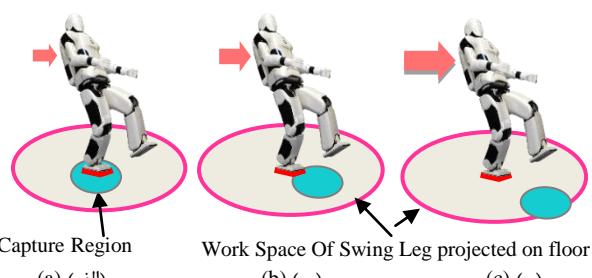


Fig. 4 Prioritizing of human-inspired Balancing strategies (a) Ankle Strategy (b) Hip Strategy (c) Stepping strategy

شکل ۴ تقسیم‌بندی استراتژی‌های بازیابی تعادل الهام‌یافته از انسان (الف) حفظ تعادل با مج پا (ب) حفظ تعادل با چرخش از ناحیه لگن (ج) استراتژی گام‌برداری

$$\begin{aligned}\hat{X} &= [X_{t+1}^T \quad X_{t+2}^T \quad \dots \quad X_{t+N}^T]^T \\ \hat{U} &= [U_t^T \quad U_{t+1}^T \quad \dots \quad U_{t+N-1}^T]^T\end{aligned}\quad (13)$$

که در آن \hat{A} و \hat{B} به صورت بازگشتی از معادله (11) حاصل می‌شود. همه‌ی این معادلات برای حرکت در صفحه جانی نیز تکرار می‌شوند.

4-2- کنترل پیش‌بینی مبتنی بر مدل

کنترل پیش‌بینی مبتنی بر مدل، در هسته‌اش از یک تکنیک بهینه‌سازی مسیر برای تولید مسیر بهینه از یک شرایط اولیه بهره می‌برد. در این بخش به ارائه یک کنترلگر پیش‌بین بر اساس مفهوم استراتژی‌های حفظ تعادل مچ پا و لگن پرداخته می‌شود که با بهینه‌سازی ورودی‌های کنترلی، یعنی تغییرات نقطه گشتاور صفر و نقطه لولای ممان مرکزی، به کنترل نقطه مهار پرداخته می‌شود. به دلیل خطی بودن مدل آونگ معمکوس خطی به علاوه چرخ طیار مسئله بهینه‌سازی به یک مسئله برنامه‌نویسی مرتبه دوم کاهش می‌یابد. بنابراین این مسئله به صورت بلاذرگ قابل پیاده‌سازی هست و در هر گام زمانی این مسئله برای تعداد مشخصی از گام‌های زمانی آینده حل می‌شود. بر این اساس پس از گسسته سازی معادلات حرکت تابع هدف استفاده شده در کنترل پیش‌بینی مبتنی بر مدل بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned}J = & \omega_{1x}(\xi_x - \xi_{\text{refx}})^2 + \omega_{2x}(\dot{\xi}_x)^2 + \omega_{3x}(\dot{H}_y)^2 \\ & + \omega_{4x}(\ddot{H}_y)^2 + \omega_{1y}(\xi_y - \xi_{\text{refy}})^2 + \omega_{2y}(\dot{\xi}_y)^2 \\ & + \omega_{3y}(\dot{H}_x)^2 + \omega_{4y}(\ddot{H}_x)^2\end{aligned}\quad (14)$$

که در آن \ddot{H}_x و \ddot{H}_y بردارهای ورودی کنترلی برای N گام زمانی آینده می‌باشد، اولین جمله تابع هدف فوق فاصله بین نقطه مهار و نقطه مهار مرجع را کمینه می‌کند. ترم دوم تغییرات نقطه گشتاور صفر را کمینه می‌کند که اولین ورودی کنترلی می‌باشد. جمله سوم به کمینه کردن تغییرات ممان دورانی بالاتنه می‌پردازد. جمله چهارم به بهینه‌سازی ورودی کنترلی دوم می‌پردازد. همه‌ی این جمله‌ها برای حرکت در صفحه جانی نیز تکرار می‌شود. ω_i ها ضریب اهمیت هر ترم می‌باشند که برای شرایط مختلف می‌توانند تغییر کنند. این تابع هزینه بدیع هر دو دینامیک خطی و دورانی را مورد استفاده قرار می‌دهد و کنترل پیش‌بین موردنظر با بهینه کردن ورودی‌های کنترلی و با تنظیم موقعیت نقطه گشتاور صفر و نقطه لولای ممان مرکزی نقطه مهار را به مکان مطلوب هدایت می‌کند. مکان مطلوب نقطه مهار در وسط چندضلعی تکیه‌گاهی می‌باشد.

تابع هزینه پیشنهادی می‌تواند به فرم استاندارد مرتبه دوم (15) بیان شود:

$$\begin{aligned}J = & \min \frac{1}{2} \hat{U}^T h Y + f^T \hat{U} \\ \text{s.t.} \quad & C \hat{U} + D = 0 \\ & E \hat{U} + F \leq 0\end{aligned}\quad (15)$$

که در آن C ، D و E ماتریس ضرایب هستند و h و f ماتریس هزینه و بردار گرادیان تابع هزینه می‌باشند.

4-3- قیود

همان‌طور که اشاره شد قدرت اصلی کنترلگر پیش‌بین در نظر گرفتن قیود آینده می‌باشد. همان‌طور که در بخش‌های قبلی اشاره شد به منظور رسیدن ربات به حالت تعادل ایستایی باید نقطه گشتاور صفر بر روی نقطه مهار قرار گیرد و مرکز جرم نیز بر آن منطبق شود. به دلیل اینکه در این مقاله هدف بازیابی تعادل ربات در حضور اغتشاشات خارجی می‌باشد، بنابراین از قیود

این قید یک‌طرفه منشأ ناکارآمدی الگوریتم‌های کنترلی متداول برای این مسئله می‌باشد. برای ارضا شدن قید تماسی یک‌طرفه باید نیروی واکنشی سطح با چندضلعی تکیه‌گاهی تقاطع داشته باشد یا به عبارت دیگر نقطه گشتاور صفر درون چندضلعی تکیه‌گاهی قرار گیرد. بنابراین برای کنترل حرکت ربات به دنبال کنترلگر هستیم که ورودی‌های کنترلی را به صورت بهینه تولید کند و قید تماسی یک‌طرفه پا را نیز در نظر بگیرد. از این رو استفاده از کنترلگر پیش‌بین در کارهای اخیر ربات انسان‌نما مورد استقبال قرار گرفته است. در این مقاله به کنترل نقطه مهار بدون گام‌برداری توسعه الگوریتم کنترلی بر مبنای کنترل پیش‌بین پرداخته می‌شود. در این مسیر ابتدا به گسسته سازی معادلات حرکت پرداخته شده و بعد مسئله کنترل پیش‌بین بیان می‌شود و نهایتاً قیود مسئله ارائه خواهد شد.

4-1- گسسته سازی دینامیک مرکز جرم

در این بخش به گسسته سازی معادلات حرکت در صفحه طولی می‌پردازیم، البته حرکت ربات در صفحه عرضی نیز دقیقاً مشابه حالت طولی می‌باشد و معادلات حرکت در این دو صفحه از هم مستقل هستند. با گسسته سازی معادلات (10) و (9) و جایگذاری معادله (6) در آن با گام زمانی گسسته سازی معادله (11) بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{aligned}x_{t+1} &= (1 - \omega T)x_t + \omega T \xi_t \\ \xi_{t+1} &= (1 + \omega T)\xi_t - \omega T(p_{x,t} + \frac{\dot{H}_{y,t}}{mg}) + \frac{F_{\text{EXT}}}{m\omega} \\ p_{x,t+1} &= p_{x,t} + \dot{p}_{x,t} T \\ \dot{H}_{y,t+1} &= \dot{H}_{y,t} + \ddot{H}_{y,t} T\end{aligned}\quad (11)$$

با توجه به معادلات، مشتق دوم تغییرات مومنتم بالاتنه و مشتق اول نقطه گشتاور صفر به عنوان ورودی‌های کنترلی در نظر گرفته می‌شوند. هدف از این کار کنترل نقطه مهار توسط این ورودی‌های کنترلی می‌باشد. با در نظر گرفتن مکان مرکز جرم، موقعیت نقطه مهار، موقعیت نقطه گشتاور صفر و تغییرات مومنتم دورانی به عنوان متغیرهای حالت، فرم فضایی حالت به صورت (12) حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned}X_{t+1} &= AX_t + BU_t \\ X_t &= [x, \xi, p_x, \dot{H}_y, F_{\text{EXT}}]^T \\ U_t &= [\dot{p}_x, \ddot{H}_y]^T \\ A &= \begin{bmatrix} (1 - \omega T) & \omega T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1 + \omega T) & -\omega T & \frac{-\omega T}{mg} & \frac{1}{m\omega} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & T \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (12)$$

که در آن بردار X_t متغیرهای حالت سیستم و بردار U_t ورودی کنترلی می‌باشد. متغیر حالت F_{EXT} به منظور واردسازی اغتشاش وارد شده به دینامیک ربات مورد استفاده قرار گرفته است. این متغیر حالت با تغییر ضریب μ از صفر به یک، تنها در یک لحظه فعال می‌شود تا تأثیر اغتشاش وارد شده در لحظه مورد نظر وارد دینامیک ربات شود.

با داشتن \hat{U} به عنوان توالی از ورودی‌های کنترلی، معادله خطی (11) را می‌توان به صورت توالی از متغیرهای حالت برای همه افق پیش‌بینی نوشت:

$$\hat{X} = \hat{A}X_t + \hat{B}\hat{U}$$

برای همه شبیه سازی ها از ضرایب وزنی جدول 2 در تابع هزینه استفاده شده است:

در حالت اول اغتشاشی به بزرگی 220 N در صفحه طولی و 150 N در صفحه عرضی و برای زمان 0.05 s به مرکز جرم ربات وارد می شود. نقطه مهار به نزدیکی لبه چندضلعی تکیه گاهی منتقل می شود و اما از چندضلعی تکیه گاهی خارج نمی شود. بنابراین نیاز به تولید تغییر مومنت دورانی بالاتنه نمی باشد. مطابق شکل 6 نقطه گشتاور صفر می تواند نقطه مهار را به مکان مطلوب هدایت کند. در شکل 7 جزیات تغییرات پارامترهای مختلف دینامیک ربات مربوط به شبیه سازی شکل 6 نسبت به زمان آورده شده است. مطابق شکل 7 در طی زمان 1.5 s نقطه مهار به مکان مطلوب صفر می رسد و همچنین شتاب و سرعت مرکز جرم نیز صفر می شود. تغییر مومنت دورانی بالاتنه نیز $4 \times 10^{-14} \text{ Nm}$ می باشد که تقریباً صفر می باشد در نتیجه تغییر زاویه بالاتنه نیز $4 \times 10^{-15} \text{ radian}$ می باشد و نقطه گشتاور صفر و نقطه لولای ممان مركزی برهمنطبق هستند.

در حالت دوم اغتشاشی به بزرگی 400 N در صفحه طولی و 200 N در صفحه عرضی و برای زمان 0.05 s به مرکز جرم ربات وارد می شود، همان طور که انتظار می رود این نیروی ناگهانی شدید که برابر با 45 درصد وزن ربات می باشد، نقطه مهار را به بیرون از چندضلعی تکیه گاهی پرتاب می کند. در این حالت دو شبیه سازی مختلف صورت گرفته شده است. در شبیه سازی اول از

جدول 2 ضرایب وزنی جمله های تابع هزینه استفاده شده در شبیه سازی
Table 2 Weight factor for the cost function that is used in simulation

ضرایب وزنی	مقادیر
ω_{1x}	1
ω_{2x}	1
ω_{3x}	10^{-4}
ω_{4x}	10^{-7}
ω_{1y}	3
ω_{2y}	1
ω_{3y}	10^{-4}
ω_{4y}	10^{-7}

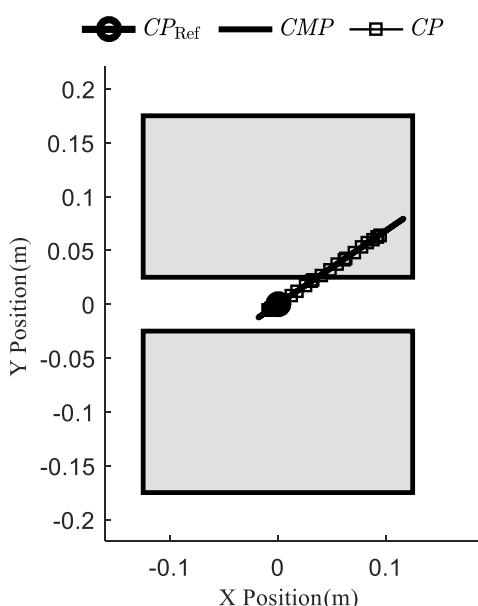


Fig. 6 Push recovery for the external force with magnitude of (220 N, 150 N).

شکل 6 بازیابی تعادل برای نیروهای خارجی با بزرگی (220 N, 150 N)

(16) برای مساله کنترل پیش بین بهره می برمی:

$$\begin{aligned} \xi_{\text{ref}x} &= \xi_{xN} \\ \dot{\xi}_{\text{ref}x} &= x_{c,N} \\ \dot{H}_{y,N} &= 0 \\ \sum_{i=1}^N ZMP_i &\in SP \end{aligned} \quad (16)$$

عبارت ξ_{ref} نقطه مهار مطلوب می باشد که در مرکز چندضلعی تکیه گاهی قرار دارد. هدف از دو قید اول بازگرداندن تعادل ربات در آخرین گام زمانی می باشد. قید سوم به منظور صفر کردن تغییرات مومنت دورانی بالاتنه در آخرین گام زمانی مسأله می باشد. قید چهارم مسأله می باشد که به منظور نگهداشتن نقطه گشتاور صفر در درون چندضلعی تکیه گاهی استفاده شده است. با توجه به در نظر گرفتن این قیود مسأله برنامه نویسی مرتبه دوم برای تابع هزینه معادله (13) طوری حل می شود که در آخرین گام زمانی حل مسأله تصویر مرکز جرم روی سطح تکیه گاهی، نقطه گشتاور صفر و نقطه مهار برهمنطبق شوند و ربات به حالت ایستا برسد و همچنین در تمام گام های زمانی نقطه گشتاور صفر درون چندضلعی تکیه گاهی باقی بماند. این قیود برای حرکت در صفحه جانسی نیز تکرار می شوند. قیود بیان شده به صورت هوشمندانه انتخاب شده اند که تضمین کننده تعادل ربات می باشند. با توجه به تابع هزینه ارائه شده و ارائه قیود، مسأله کنترل پیش بین برای بازیابی تعادل ربات کامل می شود.

5- نتایج شبیه سازی

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم ارائه شده در این بخش به شبیه سازی سناریوهای مختلف بازیابی تعادل در حضور اغتشاشات خارجی شدید در نرم افزار متلب پرداخته شده است. در شبیه سازی ها از مدل ساده شده و مشخصات فیزیکی ربات انسان نمای سورنا 3 استفاده شده است. مشخصات موردنظر در جدول 1 لیست شده است. زمان موردنیاز برای بازیابی تعادل پس از اغتشاش وارد شده 1.5 ثانیه می باشد. میزان تغییرات مومنت دورانی مجاز برای یک ربات انسان نمای 190 می باشد [16] و این حد در شبیه سازی ها رعایت شده است.

5-1- نتایج

در اولین سناریو، به شبیه سازی بازیابی تعادل برای دو حالت مختلف در حالتی که ربات بر روی دو پا و در حالت سکون ایستاده است، پرداخته می شود. در تمام نتایج شبیه سازی ها مستطیل ها نشان دهنده کف پای ربات می باشد.

جدول 1 خصوصیات فیزیکی مورد استفاده در شبیه سازی

Table 1 Physical parameters that is used in simulation

مشخصات فیزیکی ربات سورنا 3 استفاده شده در شبیه سازی	
ارتفاع ربات	
ارتفاع در نظر گرفته شده برای مسیر مرکز جرم	190 (cm)
طول کف پا	75 (cm)
عرض کف پا	25 (cm)
جرم ربات	15 (cm)
ممان اینرسی نیم تنه بالا	98 (kg)
ممان اینرسی بازوها	$8 \text{ (kgm}^2)$
ماکزیمم دوران مجاز بالاتنه [16]	$2 \text{ (kgm}^2)$
ماکزیمم دوران مجاز بازو [16]	$(\text{rad})\pi$
	$(\text{rad})2\pi$

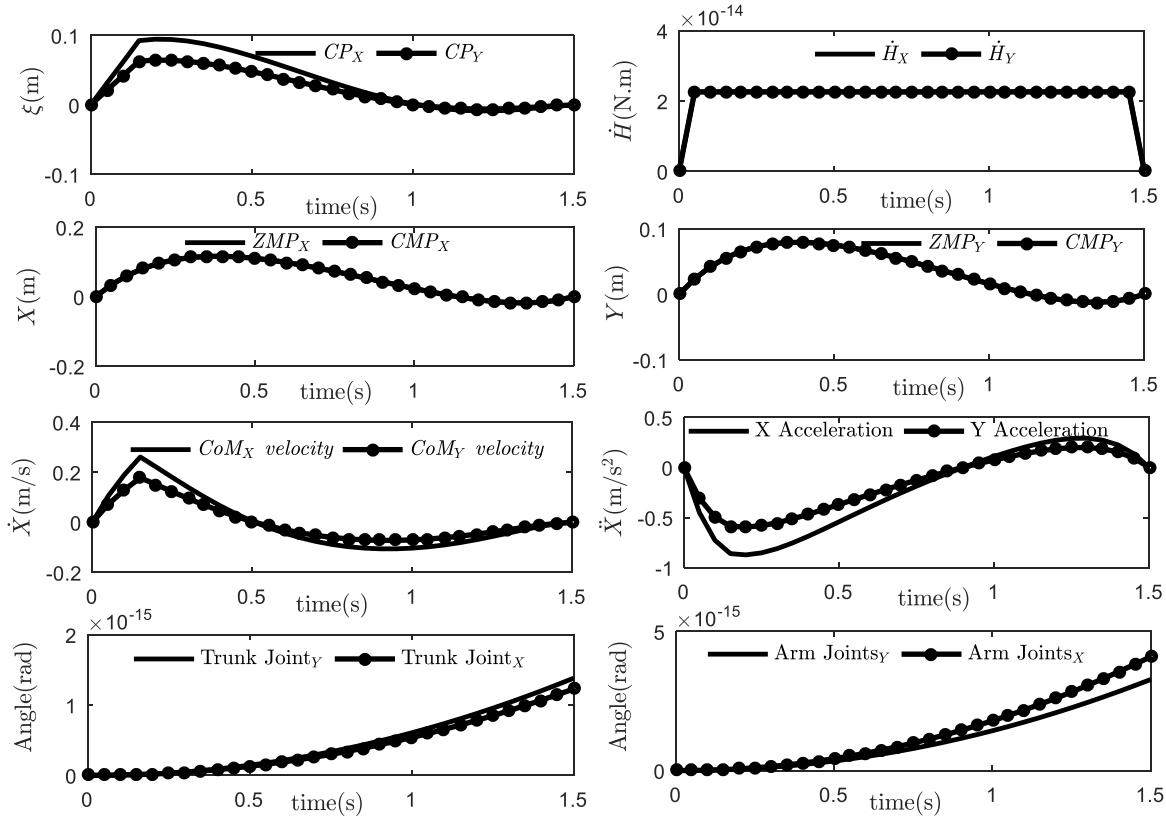


Fig. 7 Results of change of dynamical parameters of simulation Fig. 6. versus time

شکل 7 نتایج تغییرات پارامترهای دینامیکی شبیه‌سازی شکل 6 نسبت به زمان

تکیه‌گاهی به یک نوار کوچک کاوش یافته است و نقطه گشتاور صفر در محدوده بسیار کوچکی می‌تواند حرکت کند. از طرفی فرض می‌کنیم شرایط محیط طوری است که قابلیت گامبرداری وجود ندارد. بنابراین کنترل نقطه مهار توسط نقطه گشتاور صفر تنها در حضور اغتشاشات بسیار کوچک صورت می‌پذیرد. در این شرایط نقطه لولای ممان مرکزی و به عبارت دیگر تغییر مومنت دورانی بالاتنه می‌تواند از افتادن ربات در حضور اغتشاشات خارجی شدید جلوگیری کند. در این شبیه‌سازی در شرایطی که چندضلعی تکیه‌گاهی به یک مستطیل به طول 5 cm و عرض 3 cm کاوش یافته است نیرویی به بزرگی 150 N در راستای محور طولی و 120 در راستای عرضی به مرکز جرم وارد شده است. مطابق شکل 10 مستطیل بزرگتر نشان‌دهنده گفای ربات می‌باشد و مستطیل درونی، که بصورت یک نوار کوچک می‌باشد، نشان‌دهنده سطح تماس پا با زمین می‌باشد. پس از وارد شدن اغتشاش نقطه مهار از چندضلعی تکیه‌گاهی خارج شده است و نقطه لولای ممان مرکزی نیز از چندضلعی تکیه‌گاهی با تولید مومنت دورانی بالاتنه خارج می‌شود و حرکت نقطه مهار را به سمت مرکز چندضلعی تکیه‌گاهی هدایت و کنترل می‌کند. شکل 1 نیز تغییرات پارامترهای مربوط به دینامیک و تعادل ربات را در طول زمان ۱.۵ s نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است نقطه مهار به مکان مطلوب خود بازمی‌گردد. میزان تولید مومنت دورانی حدود 50 Nm می‌باشد که با توجه به جدول ۱ مقدار قابل قبولی می‌باشد. همچنین نقطه گشتاور صفر درون چندضلعی تکیه‌گاهی باقی‌مانده و نقطه لولای ممان مرکزی را بتدعا از نقطه گشتاور صفر جدا شده پس از بازگشت به چندضلعی تکیه‌گاهی دوباره بر نقطه گشتاور صفر منطبق می‌شود و در انتهای بر روی نقطه مهار منطبق می‌شود. در تمامی شبیه‌سازی‌ها ماکریم نیرویی خارجی

اثر تغییر مومنت دورانی بالاتنه صرف نظر شده است. مطابق نمودار شکل 8 الف، حلگر متلب جواب قابل قبولی برای این مسئله پیدا نمی‌کند. نقطه گشتاور صفر به خارج چندضلعی تکیه‌گاهی حرکت کرده است بنابراین قید مسئله رعایت نشده است و همچنان نقطه مهار نیز به صورت واگرا از مرکز چندضلعی تکیه‌گاهی دور شده است. بنابراین در این حالت ربات تعادل خود را از دست می‌دهد و کنترل پیش‌بین نمی‌تواند تنها با استفاده از نقطه گشتاور صفر تعادل ربات را بازگرداند. در شبیه‌سازی دوم اثر دورانی بالاتنه در نظر گرفته شده است. مقدار نیروی واردشده مانند شبیه‌سازی قبلی می‌باشد. همان‌طور که در نمودار شکل 8-ب نشان داده شده، نقطه مهار از چندضلعی تکیه‌گاهی خارج شده است بنابراین با ایجاد تغییر ممان دورانی نقطه لولای مومنت مرکزی از نقطه گشتاور صفر جدا می‌شود و به خارج از چندضلعی تکیه‌گاهی حرکت می‌کند درنتیجه نقطه لولای ممان مرکزی نقطه مهار را به مکان مطلوب هدایت می‌کند.

در شکل 9 نمودار پارامترهای مختلف توصیف‌کننده وضعیت تعادل و دینامیک ربات مربوط به شبیه‌سازی نمودار شکل 8-ب ترسیم شده است.

همان‌طور که در شکل 9 نشان داده شده است نقطه مهار پس از 1.5 s به مرکز چندضلعی تکیه‌گاهی بازمی‌گردد. مومنت دورانی بالاتنه حدود 50 Nm ایجاد شده است و تغییرات زاویه‌ای مربوط به بازوها و بالاتنه که موجب تولید این مومنت دورانی می‌شود نشان داده شده است، بنابراین مؤلفه‌ی محور x نشان‌دهنده از نقطه گشتاور صفر جدایده است.

در سناریوی آخر به شبیه‌سازی حالتی که ربات بر روی یک صخره و بر روی یک پایستاده است، پرداخته می‌شود. در این حالت چندضلعی

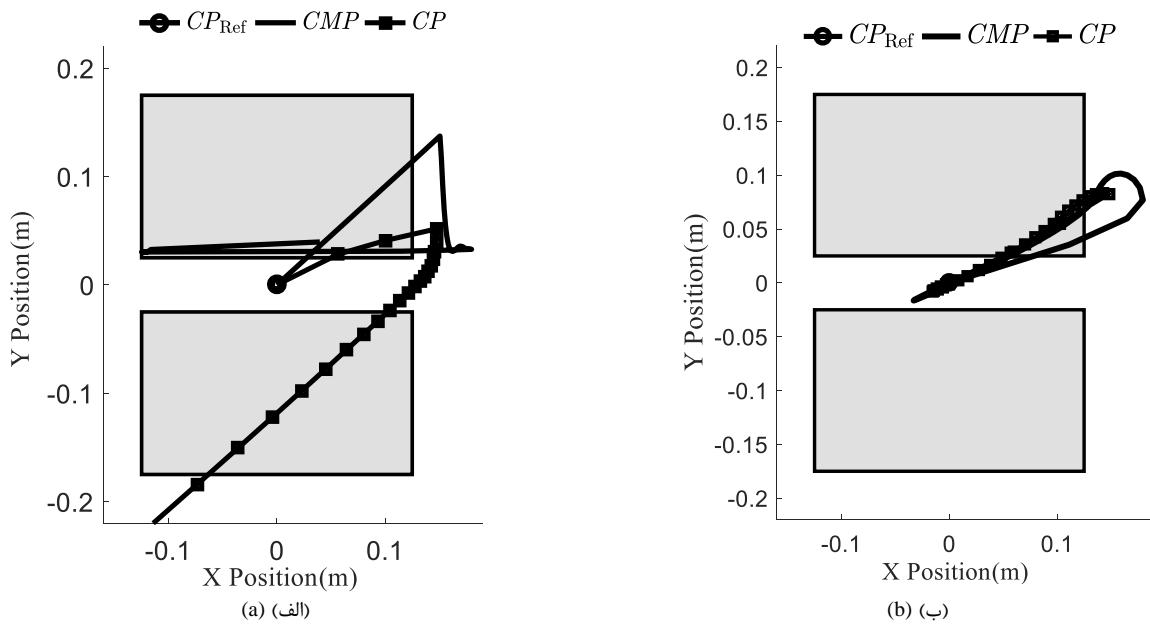


Fig. 8 Push recovery for the external force with magnitude of (400 N, 200 N) (a) without upper-body angular momentum (b) with upper-body angular momentum

شکل 8 بازیابی تعادل برای نیروهای خارجی با بزرگی (400 N, 200 N) (الف) بدون استفاده از مومنت دورانی بالاتنه ب) با استفاده از مومنت دورانی بالاتنه

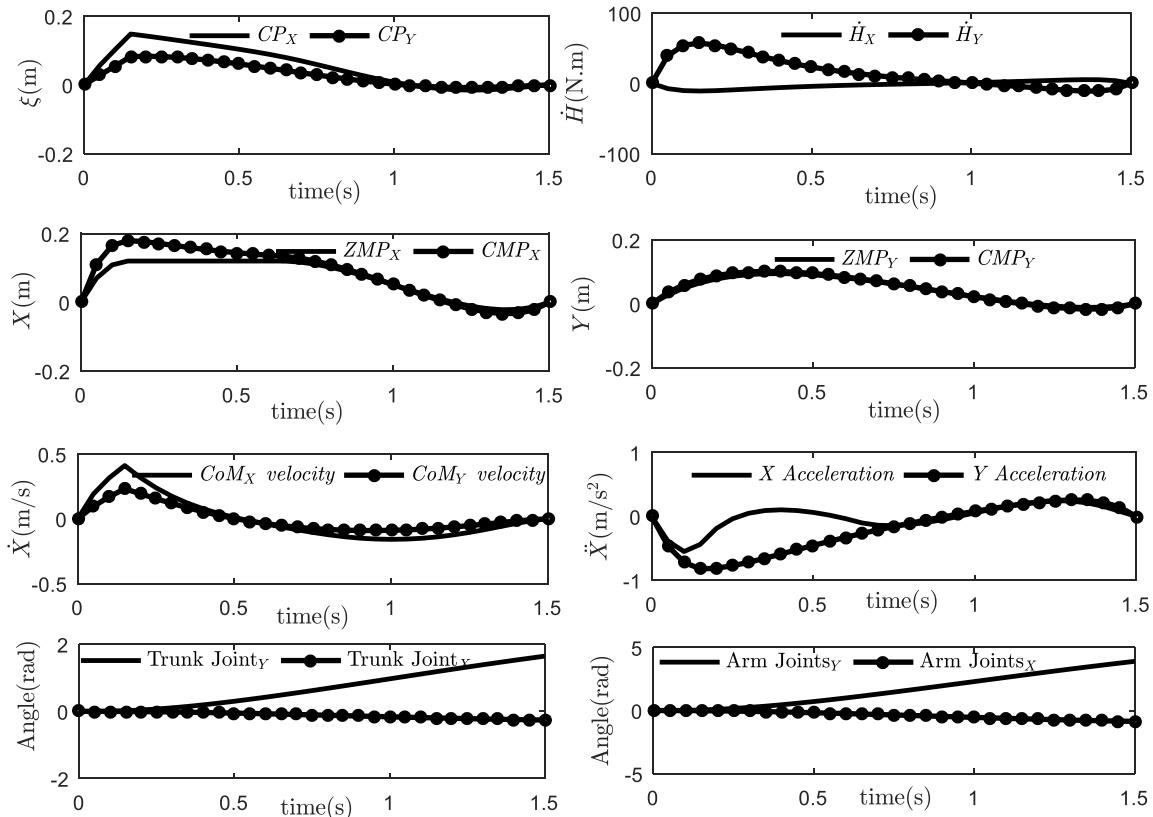


Fig. 9 Results of change of dynamical parameters of simulation Fig. 8.b versus time

شکل 9 نتایج تغییرات پارامترهای دینامیکی شبیه‌سازی شکل 8- ب نسبت به زمان

در بخش قبل شبیه‌سازی سناریوهای مختلف بازیابی تعادل بدون گامبرداری در حضور اختشاشات شدید با استفاده از کنترل‌گر پیش‌بین مبتنی بر مدل صورت گرفت و کنترلر موردنظر به صورت موفقیت‌آمیزی تعادل ربات را در شرایط مختلف و حتی زمانی که چندضلعی تکیه‌گاهی به یک نوار کوچک

که تعادل ربات در آن شرایط و توسط کنترلگر پیشنهادی حفظ می‌شود با استفاده از سعی و خطأ و امتحان نیروهای خارجی متفاوت به دست آمده است.

5-2- بحث و جمع‌بندی

شده است. به طور مثال تغییر دوران بالاتنه با توجه به قیود سینماتیکی ربات، دارای محدودیت می‌باشد. به منظور تولید تغییر مومنت بالاتنه موردنیاز در شبیه‌سازی‌ها به طور هم‌زمان از دوران بالاتنه و دوران بازوها استفاده شده است که در نمودارهای شبیه‌سازی‌ها قابل مشاهده می‌باشد.

عملگرهای ربات سورنا 3 از موتورهای مکسون و هارمونیک درایو می‌باشد که گشتاور اشعاع آن 100 Nm می‌باشد بنابراین مطابق شکل 11 مقدار ماکریم تغییرت مومنت دورانی بالاتنه موردنیاز که همان گشتاور مفصل لگن و یا شانه ربات که حدود 50 Nm است را می‌تواند به آسانی اعمال کند. لگن و یا شانه ربات که حدود 75 Nm خواهد بود که همانند عملگر لگن، عملگر مج پا سورنا 3 این گشتاور را تامین خواهد کرد. به دلیل اینکه مدل دینامیکی مورد استفاده خطی می‌باشد و الگوریتم موردنظر بر اساس برنامه‌ریزی مرتبه دوم بنا شده است، بنابراین مسئله کنترلگر پیش‌بین خطی می‌باشد و الگوریتم مورد نظر می‌تواند به صورت بلادرنگ پیاده‌سازی شود. مدت زمان پیاده سازی‌های صورت گرفته در متلب 0.1 s تا 0.2 s می‌باشد که به منظور کاهش سازی بلادرنگ به صورت کد نویسی به زبان سی این زمان به شدت کاهش می‌یابد. سنسورهای مورد نیاز برای پیاده سازی سنسورهای نیرو-گشتاور در هر مج پا و سنسورهای گشتاور و موقعیت در هر مفصل می‌باشد.

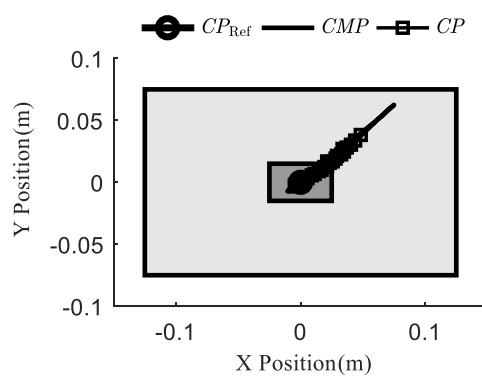


Fig. 10 Push recovery for the external force with magnitude of (150 N, 120 N) robot has stood on one leg on rock.

شکل 10 بازیابی تعادل برای نیروهای خارجی با بزرگی (150 N, 120 N) ربات بر روی یک پا و بر روی صخره ایستاده است

کاهش یافته است، حفظ می‌کند. الگوریتم موردنظر قادر است نیرویی به بزرگی 45 درصد از وزن ربات، که در مدت 0.1 s بر مرکز جرم ربات وارد شود را با استفاده از تنظیم و بهینه‌سازی مومنت دورانی بالاتنه و بدون گامبرداری خنثی کند. محدودیت‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها در جدول 1 آورده

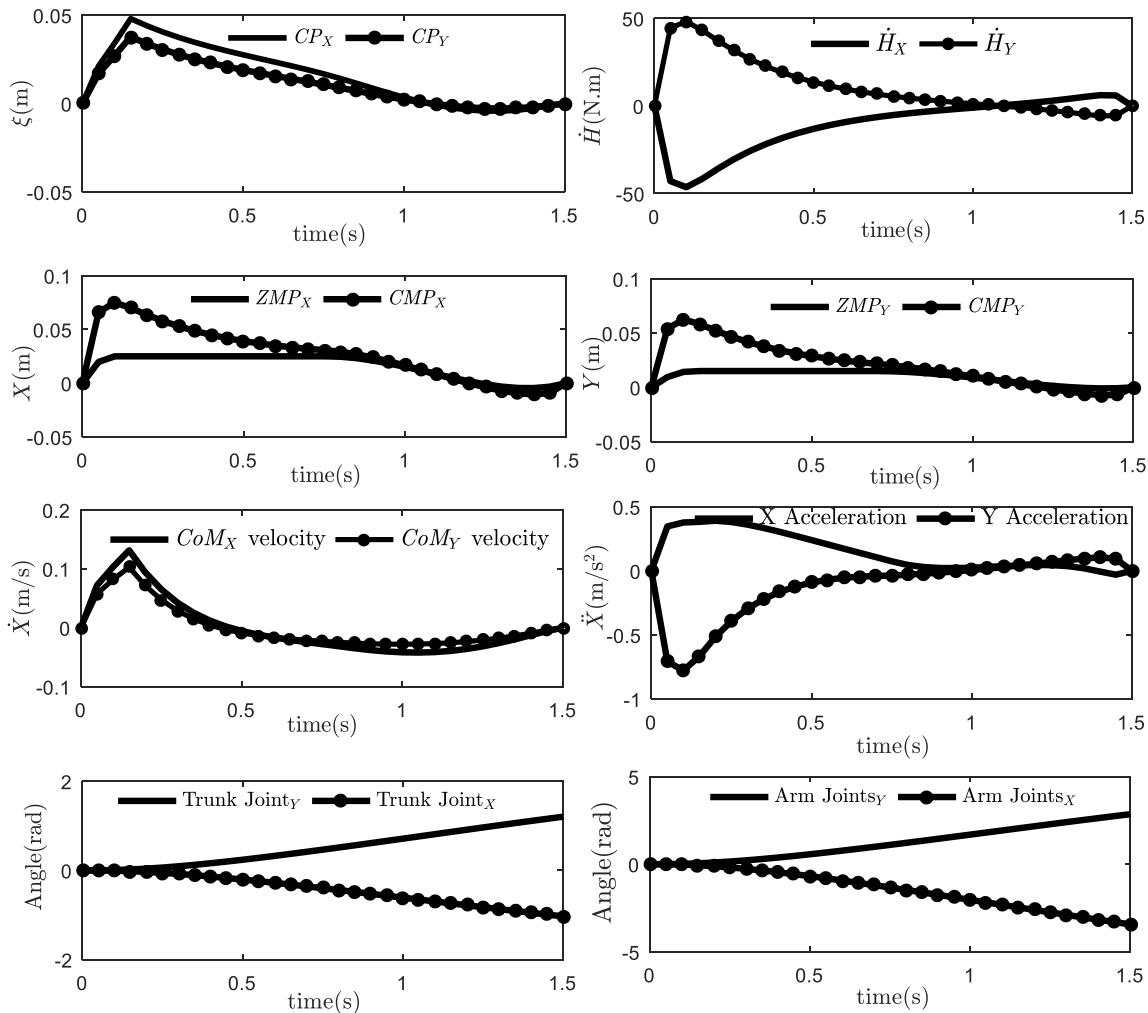


Fig. 11 Results of change of dynamical parameters of simulation Fig. 10. versus time

شکل 11 نتایج تغییرات پارامترهای دینامیکی شبیه‌سازی شکل 10 نسبت به زمان

2011.

- [9] A. L. Hof, The extrapolated center of mass concept suggests a simple control of balance in walking, *Human Movement Science* 27, No. 1, pp. 112-125, 2008.
- [10] T. Takenaka, T. Matsumoto, T. Yoshiike, Real time motion generation and control for biped robot 1-st report: Walking gait pattern generation, *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, St. Louise, USA. pp. 1084-1091, 2009.
- [11] M. Khadiv, S. Kleff, A. Herzog, S. A. A. Moosavian, S. Schaal, and L. Righetti, Stepping stabilization using a combination of dcm tracking and step adjustment, in *Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, 2016 4th RSI/ISM International Conference on, Available: <https://arxiv.org/abs/1609.09822v1>.
- [12] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, H. Hirukawa, Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point, 2003. *Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2. IEEE, Taipei, Taiwan. pp. 1620-1626, 2003.
- [13] P. B. Wieber, Trajectory free linear model predictive control for stable walking in the presence of strong perturbations, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, IEEE, Genoa, Italy, pp. 137-142, 2006.
- [14] A. Herdt, H. Diedam, P. B. Wieber, D. Dimitrov, K. Mombaur, M. Diehl, Online walking motion generation with automatic footstep placement, *Advanced Robotics*, Vol. 24, No. 5-6, pp. 719-737, 2010.
- [15] B. J. Stephens, C. G. Atkeson. Push recovery by stepping for humanoid robots with force controlled joints, 2010 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, IEEE Nashville, TN, USA, pp. 52-59, 2010.
- [16] M. S. Ashtiani, A. Y. Koma, M. S. Panahi, M. Khadiv. Push Recovery of a Humanoid Robot Based on Model Predictive Control and Capture Point, in *Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, 2016 4th RSI/ISM International Conference on, Available: <https://arxiv.org/abs/1612.08034>
- [17] M. Khadiv, S. A. A. Moosavian, A. Y. Koma, M. Sadadel, S. Mansouri, Optimal gait planning for humanoids with 3D structure walking on slippery surfaces, *Robotica*, pp. 1-19, 2015.
- [18] M. Ezati, M. Khadiv, S. A. A. Moosavian, Optimal Gait Planning for a Biped Robot by Employing Active Toe Joints and Heels, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 69-80, 2015. (in Persian) [\[فارسی\]](#)
- [19] M. Sadadel, K. A. Yousefi, F. Iranmanesh, Heel-Off And Toe-Off Motions Optimization For A2d Humanoid Robot Equipped With Active Toe Joints, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 87-97, 2016. (in Persian) [\[فارسی\]](#)
- [20] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Yokoi, H. Hirukawa, The 3D linear inverted pendulum mode: A simple modeling for a biped walking pattern generation, *Intelligent Robots and Systems, Proceeding. 2001 IEEE/RSJ International Conference*, IEEE, Maui, USA. pp. 239-246, 2001.
- [21] M. Eslami, K. A. Yousefi, M. Khadiv A Novel Model Based on the Three-Mass Inverted Pendulum for Real-Time Walking Pattern Generation of Biped Robots, *Modares Mechanical Engineering*, . Vol. 16, No. 8, pp. 326-334, 2016. (in Persian) [\[فارسی\]](#)
- [22] M. B. Popovic, A. Goswami, H. Herr, Ground reference points in legged locomotion: Definitions, biological trajectories and control implications, *The International Journal of Robotics Research*, vol. 24, pp. 1013-1032, 2005.
- [23] Y. S. kook, A. Goswami. Momentum-based reactive stepping controller on level and non-level ground for humanoid robot push recovery, *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, San Francisco, California, USA. pp. 3943-3950, 2011.

6- نتیجه گیری

در این مقاله یک کنترلگر واحد بر مبنای کنترل پیش بین بهمنظور بازیابی تعادل ربات در حضور اغتشاش خارجی ارائه شده است. هسته‌ی این کنترلگر از تنظیم همزمان نقطه گشتاور صفر و نقطه لولای ممان مرکزی بهمنظور کنترل نقطه مهار بهره می‌برد. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته شایستگی الگوریتم پیشنهادی برای بازیابی تعادل در سناریوهای مختلف از جمله در شرایطی که چندضلعی تکیه‌گاهی به یک نوار کاوش یافته است و همچنین گامبرداری ممکن نمی‌باشد، را تأیید می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد الگوریتم مورد نظر بدون نیاز به استفاده از استراتژی گامبرداری قادر به خنثی‌سازی نیروهای خارجی وارد شده تا بزرگی 40 درصد وزن ربات می‌باشد. مهمترین ویژگی الگوریتم ارائه شده تولید رفتار الهام‌گرفته از انسان می‌باشد که به طور همزمان و بهینه از تمامی قابلیت دینامیک ربات برای بازیابی تعادل بهره می‌برد.

7- فهرست عالیم

لوای ممان مرکزی	CMP
گشتاور صفر	ZMP
نقطه مهار	CP
مومنت دورانی	H
مرکز جرم	CoM
منحنی تکیه‌گاهی	SP

8- مراجع

- [1] M. Vukobratović, J. Stepanenko, On the stability of anthropomorphic systems, *Mathematical Biosciences*, Vol. 15, pp. 1-37, 1972.
- [2] M. Khoram, S. A. A. Moosavian, Balance recovery of a quadruped robot by optimal regulation of contact forces and body accelerations, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 95-106, 2015. (in Persian) [\[فارسی\]](#)
- [3] J. Pratt, J. Carff, S. Drakunov, A. Goswami, Capture Point: A step toward humanoid push recovery, *Proceedings of the 2006 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Genoa, Italy, pp. 200-207, December 4-6, 2006.
- [4] J. Rebula, F. Canas, J. Pratt, A. Goswami, Learning capture points for humanoid push recovery, 2007 7th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, IEEE, Pittsburgh, USA. pp. 65-72, 2007.
- [5] J. Pratt, T. Koolen, T. D. Boer, J. Rebula, S. Cotton, J. Carff, et al., Capturability-based analysis and control of legged locomotion, part 2: Application to m2v2, a lower body humanoid, *The International Journal of Robotics Research* No. 9, pp. 1094-1113, 2012.
- [6] J. Englsberger, C. Ott, A. A-Schaffer, Three-dimensional bipedal walking control based on divergent component of motion, *Robotics, IEEE Transactions on*, Vol. 31, No. 2, pp. 355-368, 2015.
- [7] K. Manuel, J. Englsberger, P. B. Wieber, C. Ott, Stabilization of the capture point dynamics for bipedal walking based on model predictive control, *IFAC Proceedings*, Vol. 45, No. 22, pp. 165-171, 2012.
- [8] J. Englsberger, C. Ott, M. A. Roa, A. A Schäffer, G. Hirzinger. Bipedal walking control based on capture point dynamics, 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, San Francisco, California, USA pp. 4420-4427,