مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1396، دوره 17، شماره 1، ص‌ص 413-422

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بازیابی تعادل یک ربات انسان‌نما با استفاده از درجه آزادی مچ پا و لگن بر روی سطوح تماسی کوچک

میلاد شفیعی آشتیانی[1]، عقیل یوسفی‌کما[2*]، مسعود شریعت پناهی[3]، مجید خدیو[4]

1- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
4- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران
* تهران، صندوق پستی 11155-4563، aykoma@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 16 آبان 1395
پذیرش: 30 آذر 1395
ارائه در سایت: 29 دی 1395

کلید واژگان:
ربات انسان‌نما
بازیابی تعادل
کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل
نقطه مهار

چکیده

هدف از این مقاله ارائه الگوریتمی برای بازیابی تعادل ربات انسان‌نما در حضور اغتشاشات ناشناخته شدید بر روی سطوح تماسی کوچک است. انسان با بزرگ شدن اغتشاش وارده به ترتیب از سه استراتژی مچ پا، لگن و گام‌برداری برای بازگرداندن تعادل خود بهره می‌برد. در شرایطی که اغتشاش وارده بزرگ باشد و شرایط محیطی اجازه گام‌برداری را ندهد، و یا زمانی که ربات بر روی سنگ و یا قطعه‌ای می‌ایستد، سطح تکیه‌گاهی پا کوچک می‌شود، انسان با بهره‌گیری از اثر دوران بالاتنه تعادل خود را حفظ می‌کند. در این راستا، روشی الهام‌یافته از رفتار انسان بر اساس کنترل پیش‌بین به منظور کنترل نقطه مهار ارائه می‌شود. الگوریتم پیشنهادی با بهینه‌سازی بلادرنگ مومنتم دورانی بالاتنه، قادر است بدون گام‌برداری تعادل ربات را در حضور اغتشاشات شدید و در شرایطی که چندضلعی تکیه‌گاهی به یک نوار نازک کاهش‌یافته است، حفظ کند. روش پیشنهادی با هدف کنترل نقطه مهار از گشتاور مچ پا به منظور تنظیم مکان نقطه گشتاور صفر زمانی که نقطه مهار درون چندضلعی تکیه‌گاهی است بهره می‌برد و در شرایطی که نقطه مهار بیرون از چندضلعی تکیه‌گاهی است از تغییر مومنتم دورانی بالاتنه به منظور تنظیم مکان نقطه لولای ممان مرکزی، به‌صورت بهینه بهره می‌برد. نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در سناریوهای مختلف بر اساس ویژگی‌های ربات سورنا 3 است که شایستگی الگوریتم مورد نظر را تأیید می‌کند.

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

Milad Shafiee Ashtiani[1], Aghil Yousefi-Koma[2*], Masoud Shariat-Panahi[3], Majid Khadiv[4]

1, 2, 3- School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
4- 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.

1- مقدمه

ساخت یک ربات هوشمند دوپا که بتواند جایگزین انسان برای انجام کارهای پیچیده باشد، آرزوی دیرین بشری است. ربات‌های دوپا به دلیل کم عملگر[1] بودن دارای طبیعت ناپایدار می‌باشند. بر این اساس اصلی‌ترین چالش توسعه یک ربات دوپا ارائه کنترلگری می‌باشد که بتواند تعادل ربات را حفظ کند. در این راستا در طی دهه اخیر تحقیقات گسترده‌ای برای حفظ تعادل ربات‌های پادار در حضور اغتشاشات خارجی صورت گرفته است[1-5].

نگه‌داشتن نقطه گشتاور صفر[2] در داخل چندضلعی تکیه‌گاهی شاخص

[1] Under-Actuated

[2] Zero Moment Point(ZMP)

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

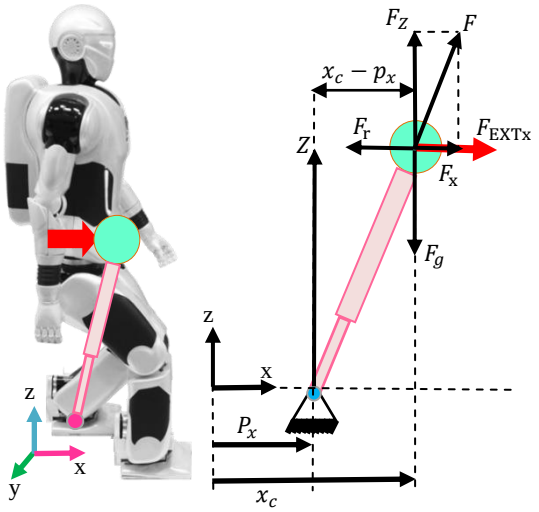
تعادل دینامیکی بیشتر الگوریتم‌های کنترلی ربات انسان‌نما است [1]. اگرچه این نقطه وضعیت تعادل دینامیکی ربات انسان‌نما را مشخص می‌کند ولی اطلاعاتی درباره توانایی بازگرداندن تعادل ربات در اختیار ما نمی‌گذارد. به‌طور مثال زمانی که نقطه گشتاور صفر به لبه چندضلعی تکیه‌گاهی می‌رسد ربات ممکن است وضعیت‌های تعادل دینامیکی مختلفی داشته باشد که در همه‌ی این شرایط نقطه گشتاور صفر در لبه پا قرار دارد. بر این اساس نقطه مهار[1] معرفی‌شده است که میزان ناپایداری ربات را مشخص می‌کند و می‌تواند معیار مفیدی برای الگوریتم‌های پیشنهادی بازیابی تعادل باشد [3-8]. با توجه به موارد فوق می‌توان الگوریتم‌های کنترلی کارآمد برای حفظ تعادل را به دو دسته عمده کنترل پسخورد بر مبنای نقطه مهار [3-11] و یا کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل[2] [12-16] تقسیم کرد.

کاجیتا و همکارانش به معرفی کنترل پیش نگر[3] برای طراحی مسیر پایدار ربات انسان‌نما پرداختند [12]. ویبر با بیان شاخص پایداری نقطه گشتاور صفر به‌عنوان یک قید به مسئله طراحی مسیر این مسئله را به‌صورت یک مسئله کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل بیان کرد [13]. ویبر نشان داد الگوریتم ارائه‌شده در مقابل اغتشاشات با بزرگی 15 درصد وزن ربات مقاوم می‌باشد. هردت و همکارانش با در نظر گرفتن جاپاهای ربات به عنوان یک ورودی کنترلی بر میزان توانمندی این الگوریتم افزودند[14]. بنابراین مکان گام آینده ربات با توجه به اغتشاش وارده تعیین می‌شود. در این راستا استفن و همکارانش به ارائه الگوریتمی مبتنی بر کنترل پیش‌بین برای بازیابی تعادل ربات انسان‌نما 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 [3,4]. جزء مربوط به قسمت ناپایدار دینامیک حرکت، نقطه مهار نامیده می‌شود. نقطه مهار میزان ناپایداری ربات را مشخص می‌کند. انسان با بزرگ شدن اغتشاش وارده به ترتیب از سه استراتژی مچ پا، لگن و گام‌برداری برای بازگرداندن تعادل خود بهره می‌برد[16] . نقطه مهار مشخص می‌کندکه ربات باید از کدامین استراتژی برای بازیابی تعادل بهره ببرد. انگلزبرگر و همکارانش با توسعه مفهوم نقطه مهار از صفحه به فضا از این نقطه برای طراحی مسیر ربات انسان‌نما بهره گرفتند [6-8]. هاف و همکارانش در مسیری جدا به منظور بررسی گام‌برداری انسان از نقطه مهار با عنوان مرکز جرم تعمیم یافته استفاده کردند [9]. همچنین تاکناکا از نقطه مهار برای مقاوم‌سازی 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 الگوریتم‌های کنترلی اشاره شده، معادلات دینامیکی ربات مورد استفاده قرار می‌گیرد. توسعه الگوریتم‌های کنترلی بر اساس دینامیک کامل ربات هزینه محاسبات بسیار بالایی دارد و قابل پیاده‌سازی عملی به‌صورت بلادرنگ نمی‌باشد [17-19]. برای حل این مسئله کاجیتا به معرفی مدل آونگ معکوس خطی به منظور تخمین مناسب دینامیک ربات دوپا پرداختند [20]. اکثر روش‌های مذکور از مدل آونگ معکوس به‌منظور توصیف دینامیک مرکز جرم ربات بهره می‌برند [3-16]. مطابق شکل 1 این مدل، اثر دینامیک پای معلق و همچنین اثر دورانی بالاتنه‌ی ربات را در نظر نمی‌گیرد. بر این اساس اسلامی و همکارانش به ارائه روشی بر مبنای آونگ

[1] Capture Point(CP)
[2] Model Predictive Control(MPC)
[3] Preview Control



(a) (الف) (b) (ب)

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

شکل 1 الف) آونگ معکوس خطی ب) ربات سورنا

معکوس سه جرمه به منظور در نظر گرفتن دینامیک پای معلق ربات در سرعت‌های بالا پرداختند [21]. با توجه به اینکه ممان دورانی بالاتنه ربات نقشی اساسی در حفظ تعادل ربات ایفا می‌کند(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[4] با اضافه کردن این اثر به نقطه گشتاور صفر تعریف می‌شود [22]. زمانی که نقطه گشتاور صفر درون چندضلعی تکیه‌گاهی باشد این دو نقطه برهم منطبق می‌باشند و زمانی که نقطه گشتاور صفر به لبه پا می‌رسد نقطه لولای ممان مرکزی می‌تواند با تغییر مومنتم دورانی بالاتنه از نقطه گشتاور صفر جدا شود و از چندضلعی تکیه‌گاهی خارج شود [23]. پس به منظور توسعه الگوریتم‌های کنترلی حفظ تعادل بدون گام‌برداری، مدل پاندول معکوس به همراه چرخ طیار تقریب مناسبی از دینامیک ربات انسان‌نما را فراهم می کند.

با بررسی مطالعات انجام‌شده تاکنون حفظ تعادل ربات دوپا در حضور اغتشاش شدید خارجی در شرایطی که چندضلعی تکیه‌گاهی به یک نوار باریک کاهش‌یافته باشد، پرداخته نشده است. در این مقاله برای اولین بار به ارائه الگوریتمی واحد (بیان استراتژی مچ پا و لگن بصورت هم‌زمان توسط یک کنترلگر واحد پیش بین) بر مبنای کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل به منظور دفع اغتشاشات شدید وارد بر ربات در شرایطی که گام‌برداری ممکن نیست و سطح تکیه‌گاهی به یک نوار باریک و یا یک نقطه کاهش‌یافته است پرداخته می شود. الگوریتم پیشنهادی به کنترل نقطه مهار به‌وسیله تنظیم نقطه گشتاور صفر در شرایطی که نقطه مهار درون چندضلعی تکیه‌گاهی است و بوسیله تنظیم نقطه لولای ممان مرکزی در حالتی که نقطه مهار در خارج از چندضلعی تکیه‌گاهی است به‌صورت یک کنترلگر واحد می‌پردازد.

بخش‌های بعدی این مقاله بدین شرح است: در بخش دوم، دینامیک مرکز جرم و معادلات و نحوه استخراج نقطه مهار بصورت خلاصه مورد بررسی قرارگرفته است. در بخش سوم، استراتژی‌های 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

[4] Centroidal Moment Pivot(CMP)

پیش‌بین ارائه‌شده است. در بخش پنجم، شبیه‌سازی برای سناریوهای مختلف و نتایج آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نهایتاً، در بخش ششم به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی پرداخته شده است.

2- دینامیک مرکز جرم

دینامیک ربات‌های دوپا به‌شدت غیرخطی و پیچیده می‌باشد [17] و توسعه الگوریتم‌های کنترلی بلادرنگ را با چالشی بزرگ روبرو می‌کند. راه‌حل ارائه شده برای این مسئله تقریب دینامیک ربات انسان‌نما با یک مدل ساده می‌باشد. در این راستا تقریب دینامیک ربات‌های انسان‌نما با یک مدل آونگ معکوس خطی به‌صورت موفقیت‌آمیز و کارآمد صورت گرفته است [20]. مدل آونگ معکوس خطی تمام جرم ربات را به‌صورت متمرکز در مرکز جرم در نظر می‌گیرد و از اثر دینامیک پاها و اثر دوران بالاتنه صرف‌نظر شده است. در بیان مدل آونگ معکوس خطی فرضیات زیر لحاظ شده است [20]:

- مرکز جرم در صفحه افقی با ارتفاع ثابت حرکت می‌کند.
- تغییرات مومنتم دورانی بالاتنه صفر می‌باشد.
- مفصل پایه آونگ معکوس فاقد گشتاور می‌باشد.

با توجه به فرضیات فوق و شکل 1، معادلات آونگ معکوس خطی به صورت (1) تا (3) استخراج می‌شود:

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

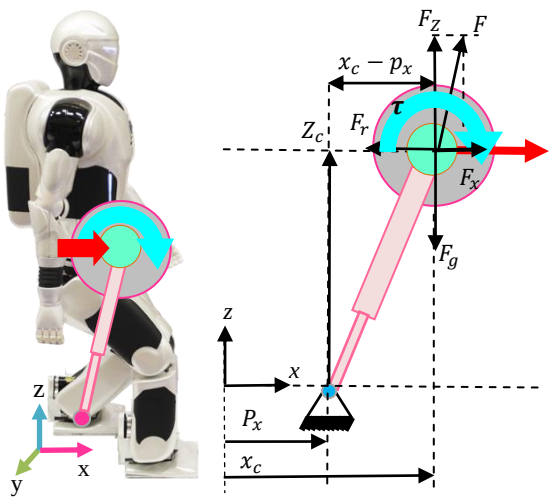
$$\ddot{x}_c = \omega^2(x_c - p_x)$$
$$\ddot{y}_c = \omega^2(y_c - p_y) \quad (2)$$

$$P_{zmp} = [p_x, p_y, p_z]$$
$$P_{com} = [x_c, y_c, z_c]$$
$$\omega = \sqrt{g/z_c}$$
$$F_r = m\ddot{x}_c \quad (3)$$

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_{com} و P_{ZMP} بیان‌شده 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 وارده F_{EXT} می باشد. x_c موقعیت مرکز جرم و موقعیت نقطه گشتاور صفر p_x می باشد. با توجه به اینکه نقطه مفصل پایه‌ی آونگ معکوس خطی بر روی نقطه گشتاور صفر در نظر گرفته‌شده است و تغییرات مومنتم دورانی صفر در نظر گرفته‌شده است، بردار نیروی واکنشی تماسی زمین یعنی F از مرکز جرم عبور می‌کند. با توجه به فرضیات فوق معادلات حرکت در صفحات جانبی و طولی از هم مستقل می‌باشند. با اضافه کردن نیروهای اغتشاشی معادلات حرکت به صورت (4) به دست می‌آیند:

$$\ddot{x}_c = \omega^2(x_c - p_x) + \frac{F_{EXTx}}{m}$$
$$\ddot{y}_c = \omega^2(y_c - p_y) + \frac{F_{EXTy}}{m} \quad (4)$$

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



(a) (الف) (b) (ب)

Fig. 2 (a) Surena Robot (b) Linear inverted pendulum+flywheel

شکل 2 الف) ربات سورنا ب) آونگ معکوس خطی+چرخ طیار

$$\ddot{x}_c = \omega^2(x_c - p_x) - \frac{\dot{H}_y}{mz} + \frac{F_{EXTx}}{m}$$
$$\ddot{y}_c = \omega^2(y_c - p_y) + \frac{\dot{H}_x}{mz} + \frac{F_{EXTy}}{m}$$
$$\tau_x = \dot{H}_x, \quad \tau_y = \dot{H}_y \quad (5)$$

با توجه به معادلات (5) نقطه لولای ممان مرکزی به‌صورت (6) تعریف می‌شود:

$$CMP_x = p_x + \frac{\dot{H}_y}{F_z}$$
$$CMP_y = p_y - \frac{\dot{H}_x}{F_z} \quad (6)$$

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

$$\ddot{x}_c = \omega^2(x_c - CMP_x) + \frac{F_{EXTx}}{m}$$
$$\ddot{y}_c = \omega^2(y_c - CMP_y) + \frac{F_{EXTy}}{m} \quad (7)$$

$\dot{H}_x$ تغییر مومنتم دورانی حول محور x و τ گشتاور وارد شده بر چرخ طیار است. با توجه به معادلات (6) و (7) زمانی که تغییرات مومنتم دورانی بالاتنه صفر می‌باشد، نقطه گشتاور صفر و نقطه لولای ممان مرکزی برهم منطبق هستند. در شرایطی که به ربات اغتشاشی وارد می‌شود و نقطه گشتاور صفر به لبه چندضلعی تکیه‌گاهی می‌رسد، با ایجاد تغییرات مومنتم دورانی بالاتنه، نقطه لولای ممان مرکزی از نقطه گشتاور صفر جدا می‌شود و به خارج از چندضلعی تکیه‌گاهی حرکت می‌کند.

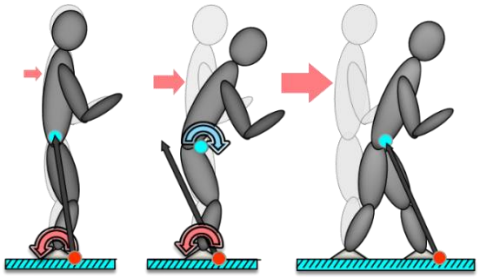
2-1- دینامیک نقطه مهار

همان‌طور که در مقدمه بیان شد، متغیر حالت مربوط به‌جزء ناپایدار و واگرای دینامیک مرکز جرم ربات نقطه مهار نامیده شده است و به‌صورت (8) تعریف می‌شود:

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

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

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



(a) (الف) (b) (ب) (c) (ج)

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

شکل 3 استراتژی‌های بازیابی تعادل الهام‌یافته از انسان الف) استراتژی مچ پا ب) استراتژی مچ 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 می آید:

$$\dot{\xi}_x = \omega(\xi_x - CMP_x) + \frac{F_{\mathrm{EXTx}}}{m\omega}$$
$$\dot{\xi}_y = \omega(\xi_y - CMP_y) + \frac{F_{\mathrm{EXTy}}}{m\omega} \qquad (10)$$

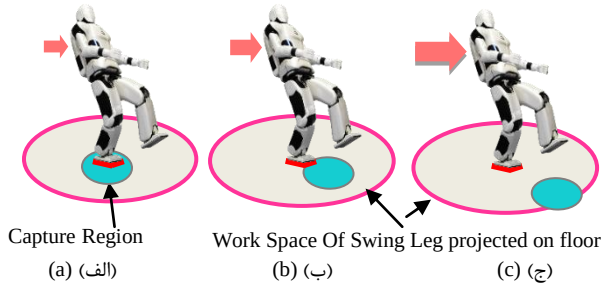
با توجه به معادلات فوق دینامیک نقطه مهار طبیعت ناپایداری دارد و سرعت نقطه مهار متناسب بافاصله نقطه مهار از نقطه لولای ممان مرکزی و جهت آن به سمت دور شدن از نقطه لولای ممان مرکزی می‌باشد. بنابراین نقطه لولای ممان مرکزی نقطه مهار را از خود می‌راند. اگر نقطه لولای ممان مرکزی بر روی نقطه مهار منطبق شود سرعت 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.

3- 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 نقش نقطه مهار و اهمیت این نقطه در بازیابی تعادل بررسی خواهد شد [16].

مطابق شکل‌های 3 و 4 عکس‌العمل انسان به اغتشاشات خارجی واردشده به استراتژی‌های مچ پا استراتژی لگن و استراتژی گام‌برداری تقسیم شده است.

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



(a) (الف) (b) (ب) (c) (ج)

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

شکل 4 تقسیم‌بندی استراتژی‌های بازیابی تعادل الهام‌یافته از انسان الف) حفظ تعادل با مچ پا ب) حفظ تعادل با چرخش از ناحیه لگن ج) استراتژی گام‌برداری

نقطه گشتاور صفر، یا در مفهوم کلی‌تر نقطه لولای ممان مرکزی، نقطه 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 گشتاور صفر و یا به عبارت دیگر استراتژی مچ (گشتاور مچ) می‌توان نقطه مهار کنترل کرد.

با بزرگ شدن اغتشاشات وارد شده انسان علاوه بر استراتژی مچ، از اثر دورانی بالاتنه (استراتژی لگن) نیز بهره می‌برد. در این شرایط نقطه مهار چندضلعی تکیه‌گاهی را ترک می‌کند و با نقطه گشتاور 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 می باشد که نقطه مهار چند ضلعی تکیه گاهی 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 عملگرهای 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. جزییات این سه حالت بررسی شده به‌صورت شماتیک در شکل 4 نشان داده شده است. در شکل 4 منظور از ناحیه مهار مجموعه‌ای از نقطه‌های مهار می‌باشد.

شکل 5 شرایطی را نشان می‌دهد که ربات قابلیت گام‌برداری ندارد و باید با بهره‌گیری از استراتژی مچ پا و لگن تعادل ربات را حفظ کند. همان‌طورکه در مقدمه مقاله اشاره شد، هدف این مقاله ارائه کنترلگری می‌باشد که عکس‌العمل بهینه را در زمان اغتشاش وارده در شرایطی که گام‌برداری امکان‌پذیر نیست و یا چندضلعی تکیه‌گاهی به یک نقطه و یا خط کاهش‌یافته است، صورت دهد. بنابراین در ادامه با الهام از رفتار انسان، کنترلر پیش‌بین مبتنی بر مدل به‌عنوان راه‌حل موضوع ذکر شده، ارائه خواهد شد.

4- کنترلگر بازیابنده تعادل مبتنی بر کنترل پیش‌بین

در بخش 2 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 قبلی به آن توجه نشده است، وجود قید تماسی یک‌طرفه در پایه آونگ معکوس به‌منظور توصیف دینامیک ربات دوپا است.

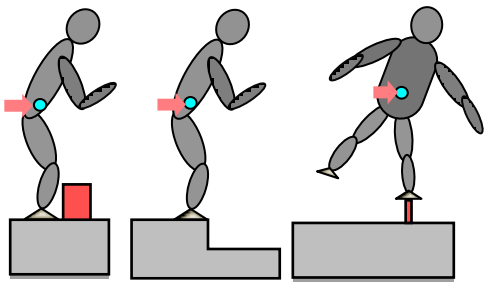


Fig. 5 Situations in which using stepping strategy is not possible.

شکل 5 شرایطی که استفاده از استراتژی گام‌برداری ممکن نیست

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 کنترلگری هستیم که ورودی‌های کنترلی را به‌صورت بهینه تولید کند و قید تماس یک‌طرفه پا را نیز در نظر بگیرد. از این رو استفاده از کنترلگر پیش بین در کارهای اخیر ربات انسان‌نما مورد استقبال قرار گرفته است. در این مقاله به کنترل نقطه مهار بدون گام‌برداری توسط 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 T معادله (11) بصورت زیر بدست می آید:

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

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 فضای حالت به‌صورت (12) حاصل می‌شود:

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

که در آن بردار X_t متغیرهای حالت سیستم و بردار U_t ورودی کنترلی می‌باشد. متغیر حالت F_{EXT} به‌منظور 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 واردشده در لحظه مورد نظر وارد دینامیک ربات شود.

با داشتن $\widehat{U}$ به‌عنوان توالی از ورودی‌های کنترلی، معادله خطی (11) را می‌توان به‌صورت توالی از متغیرهای حالت برای همه افق پیش بینی نوشت:

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

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

که در آن $\widehat{A}$ و $\widehat{B}$ به‌صورت بازگشتی از معادله (11) حاصل می‌شود. همه‌ی این معادلات برای حرکت در صفحه جانبی نیز تکرار می‌شوند.

4-2- کنترل پیش‌بینی مبتنی بر مدل

کنترل پیش‌بین 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 معکوس خطی به علاوه چرخ طیار مسئله بهینه‌سازی به یک مسئله برنامه‌نویسی مرتبه دوم کاهش می‌یابد. بنابراین این مسئله به‌صورت بلادرنگ 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 پیش‌بین مبتنی بر مدل بصورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{aligned} J = {} & \omega_{1x}(\xi_x - \xi_{\mathrm{refx}})^2 + \omega_{2x}\left(\dot{P}_x\right)^2 + \omega_{3x}\left(\dot{H}_y\right)^2 \\ & + \omega_{4x}\left(\ddot{H}_y\right)^2 + \omega_{1y}(\xi_y - \xi_{\mathrm{refy}})^2 + \omega_{2y}\left(\dot{p}_y\right)^2 \\ & + \omega_{3y}\left(\dot{H}_x\right)^2 + \omega_{4y}\left(\ddot{H}_x\right)^2 \end{aligned} \tag{14}$$

که در آن $\dot{P}_x, \dot{P}_y, \ddot{H}_y$ و $\ddot{H}_x$ 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 جانبی 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:

$$\begin{aligned} & J = min\frac{1}{2}\,\widehat{U}^{\mathrm{T}}hY + f^{\mathrm{T}}\widehat{U} \\ & s.t \\ & C\widehat{U} + D = 0 \\ & E\widehat{U} + F \leq 0 \end{aligned} \tag{15}$$

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

4-3- قیود

همان‌طور که اشاره شد قدرت اصلی کنترلگر پیش بین در نظر گرفتن قیود آینده می‌باشد. همان‌طور که در بخش های 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

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

$$\xi_{\mathrm{refx}} = \xi_{xN}$$
$$\xi_{\mathrm{refx}} = x_{c,N}$$
$$\dot{H}_{y,N} = 0$$
$$\sum_{i=1}^{N} ZMP_i \in SP \qquad (16)$$

عبارت ξ_{ref} نقطه مهار مطلوب می‌باشد که در مرکز چندضلعی تکیه‌گاهی قرار دارد. هدف از دو قید اول بازگرداندن تعادل ربات در آخرین گام زمانی می‌باشد. قید سوم به منظور صفر کردن تغییرات مومنتم دورانی بالاتنه در آخرین گام زمانی مسئله می‌باشد. قید چهارم قید نامساوی می‌باشد که به‌منظور نگه‌داشتن نقطه گشتاور صفر در درون چندضلعی تکیه‌گاهی استفاده شده است. با توجه به در نظر گرفتن این قیود مسئله برنامه‌نویسی مرتبه دوم برای تابع هزینه معادله (13) طوری حل می‌شود که در آخرین گام زمانی حل مسئله تصویر مرکز جرم روی سطح تکیه‌گاهی، نقطه گشتاور صفر و نقطه مهار برهم منطبق شوند و ربات به حالت ایستا برسد و همچنین در تمام گام‌های زمانی نقطه گشتاور صفر درون چندضلعی تکیه‌گاهی باقی بماند. این قیود برای حرکت در صفحه جانبی نیز تکرار می‌شوند. قیود بیان‌شده به‌صورت هوشمندانه انتخاب‌شده‌اند که تضمین‌کننده‌ی تعادل ربات می‌باشند. با توجه به تابع هزینه ارائه‌شده و ارائه قیود، مسئله کنترل پیش‌بین برای بازیابی تعادل ربات کامل می‌شود.

5- نتایج شبیه‌سازی

به‌منظور بررسی عملکرد الگوریتم ارائه‌شده در این بخش به شبیه‌سازی سناریوهای مختلف بازیابی تعادل در حضور اغتشاشات خارجی شدید در نرم‌افزار متلب پرداخته‌شده است. در شبیه‌سازی‌ها از مدل ساده شده و مشخصات فیزیکی ربات انسان‌نمای سورنا 3 استفاده شده است. مشخصات موردنظر در جدول 1 لیست شده است. زمان موردنیاز برای بازیابی تعادل پس از اغتشاش واردشده 1.5 ثانیه می‌باشد. میزان تغییرات مومنتم دورانی مجاز برای یک ربات انسان‌نما 190 Nm می‌باشد [16] و این حد در شبیه‌سازی‌ها رعایت شده است.

5-1- نتایج

در اولین سناریو، به شبیه‌سازی بازیابی تعادل برای دو حالت مختلف در حالتی که ربات بر روی دو پا و در حالت سکون ایستاده است، پرداخته می‌شود. در تمام نتایج شبیه‌سازی‌ها مستطیل‌ها نشان‌دهنده کف پای ربات می‌باشد.

جدول 1 خصوصیات فیزیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی

Table 1 Physical parameters that is used in simulation

مشخصات فیزیکی ربات سورنا 3 استفاده شده در شبیه‌سازی	
ارتفاع ربات	190 (cm)
ارتفاع در نظر گرفته شده برای مسیر مرکز جرم	75 (cm)
طول کف پا	25 (cm)
عرض کف پا	15 (cm)
جرم ربات	98 (kg)
ممان اینرسی نیم‌تنه بالا	8 (kgm^2)
ممان اینرسی بازوها	2 (kgm^2)
ماکزیمم دوران مجاز بالاتنه [16]	π(rad)
ماکزیمم دوران مجاز بازو [16]	2π(rad)

برای همه شبیه‌سازی‌ها از ضرایب وزنی جدول 2 در تابع هزینه استفاده شده است:

درحالت 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 می‌شود. نقطه مهار به نزدیکی لبه چندضلعی تکیه‌گاهی منتقل می‌شود و اما از چندضلعی تکیه‌گاهی خارج نمی‌شود. بنابراین نیاز به تولید تغییر ممتنم دورانی بالاتنه نمی‌باشد. مطابق شکل 6 نقطه گشتاور صفر می‌تواند نقطه مهار را به مکان مطلوب هدایت کند. در شکل7 جزییات 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 می‌رسد و همچنین شتاب و سرعت مرکز جرم نیز صفر می‌شود. تغییر مومنتم دورانی بالاتنه نیز 4×10^{-14} Nm می‌باشد که تقریباً صفر می‌باشد در نتیجه تغییر زاویه بالاتنه نیز 4×10^{-15} رادیان می‌باشد و نقطه گشتاور صفر و نقطه لولای ممان مرکزی برهم منطبق هستند.

درحالت 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 می‌شود، همان‌طور که انتظار می‌رود این نیروی ناگهانی شدید که برابر با 45 درصد وزن ربات می‌باشد، نقطه مهار را به بیرون از چندضلعی تکیه‌گاهی پرتاب می‌کند. دراین حالت دو شبیه‌سازی مختلف صورت گرفته شده است. در شبیه‌سازی اول از

جدول 2 ضرایب وزنی جمله‌های تابع هزینه استفاده شده در شبیه‌سازی

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}

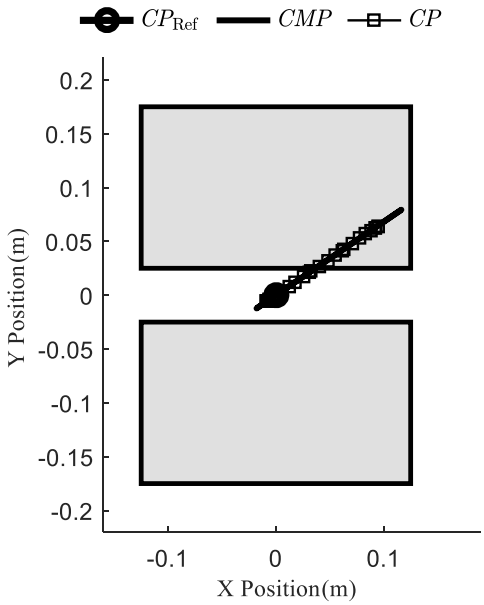


Fig. 6 Push recovery for the external force with magnitude of (220 N, 150 N).

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

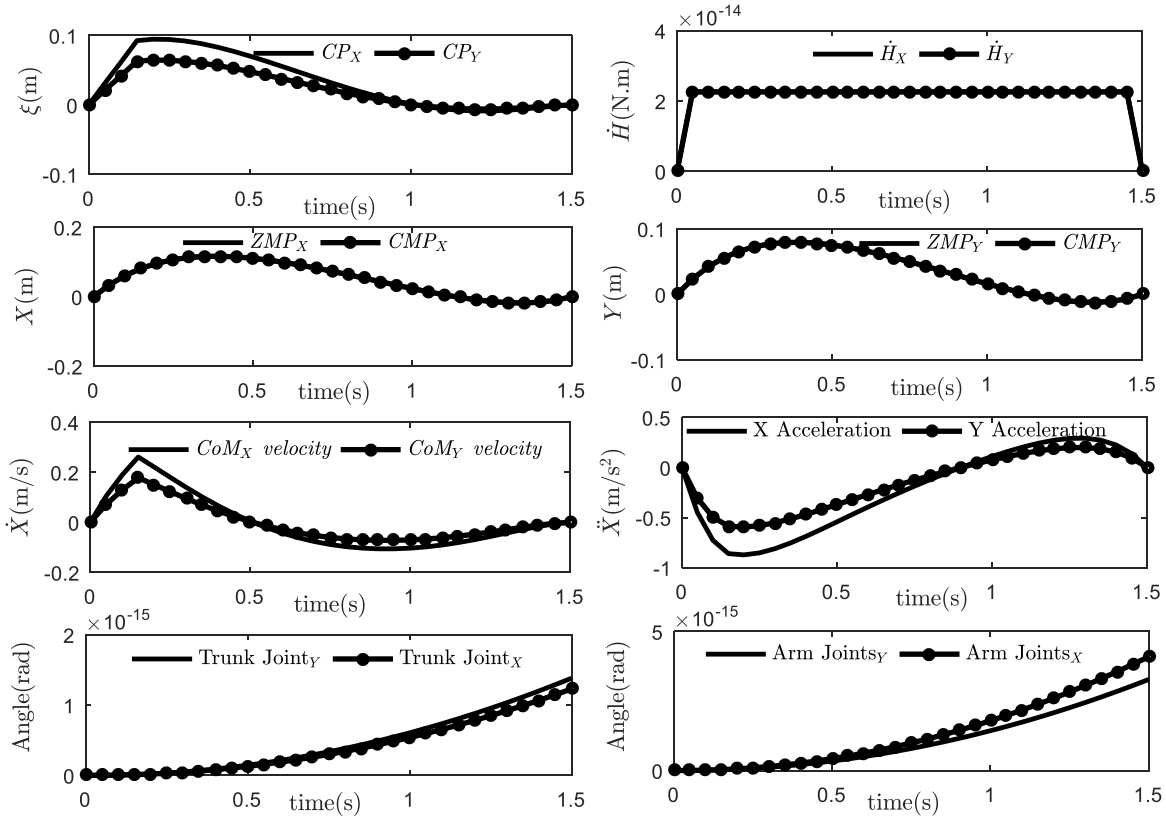


Fig. 7 Results of change of dynamical parameters of simulation Fig. 6. versus time

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

اثر تغییر مومنتم 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 همچنین نقطه مهار نیز به‌صورت واگرا از مرکز چندضلعی تکیه‌گاهی دور شده است. بنابراین در این حالت ربات تعادل خود را از دست می‌دهد و کنترلر پیش‌بین نمی‌تواند تنها با استفاده از نقطه گشتاور صفر تعادل ربات را بازگرداند. در شبیه‌سازی دوم اثر دورانی بالاتنه در نظر گرفته‌شده 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 مومنتم 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 توصیف‌کننده‌ی وضعیت تعادل و دینامیک ربات مربوط به شبیه‌سازی نمودار شکل 8- ب ترسیم‌شده است.

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

در سناریوی آخر به شبیه‌سازی حالتی که ربات بر روی یک صخره و بر روی یک پا ایستاده است، پرداخته می‌شود. در این حالت چندضلعی تکیه‌گاهی به یک نوار کوچک کاهش‌یافته است و نقطه گشتاور صفر در محدوده بسیار کوچکی می‌تواند حرکت کند. از طرفی فرض می کنیم 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 مومنتم 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 کاهش‌یافته است نیرویی به بزرگی 150 N در راستای محور طولی و 120 N در راستای عرضی به مرکز جرم وارد شده است. مطابق شکل 10 مستطیل بزرگتر نشان‌دهنده کف پای ربات می‌باشد و مستطیل درونی، که بصورت یک نوار کوچک می باشد، 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 مومنتم 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 1.5 s نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است نقطه مهار به مکان مطلوب خود بازمی‌گردد. میزان تولید مومنتم دورانی حدود 50 Nmمی‌باشد که با توجه به جدول 1 مقدار قابل قبولی می‌باشد. همچنین نقطه گشتاور صفر درون چندضلعی تکیه‌گاهی باقی‌مانده و نقطه لولای ممان مرکزی ر ابتدا از نقطه گشتاور صفر جدا شده پس از بازگشت به چندضلعی تکیه‌گاهی دوباره بر نقطه گشتاور صفر منطبق می‌شود و در اانتها بر روی نقطه مهار منطبق می‌شود. در تمامی شبیه‌سازی‌ها ماکزیمم نیرویی خارجی

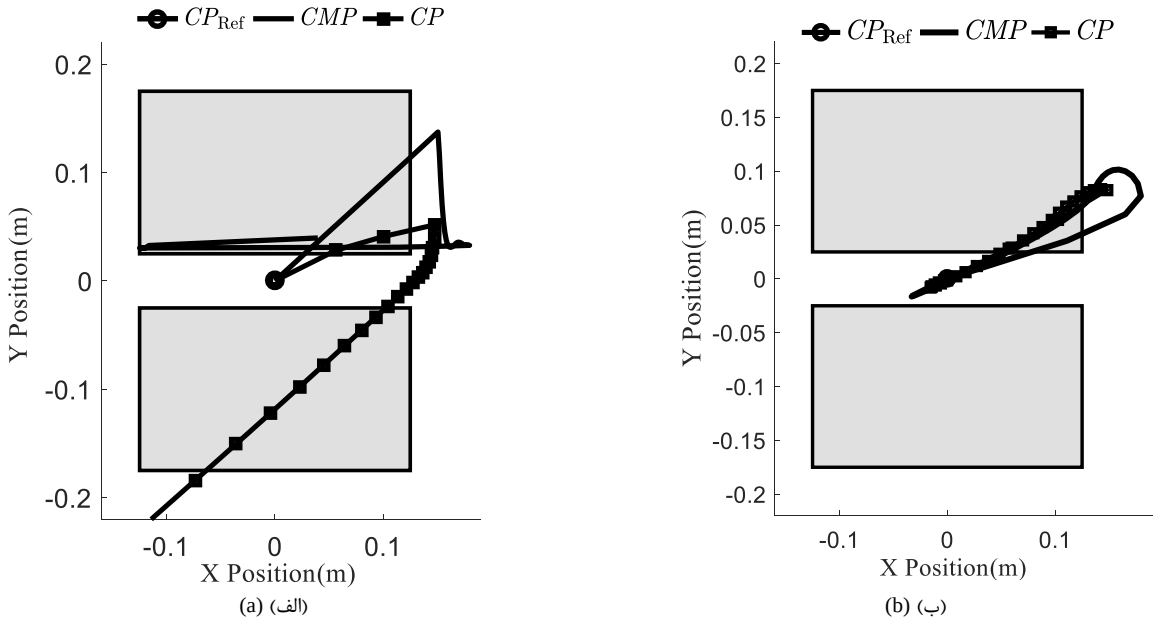


Fig. 8 Push recovery for the external force with magnitude of (400 N, 200 N) (a) without upper-body angular momentum (b) with upper-body angular momentum

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

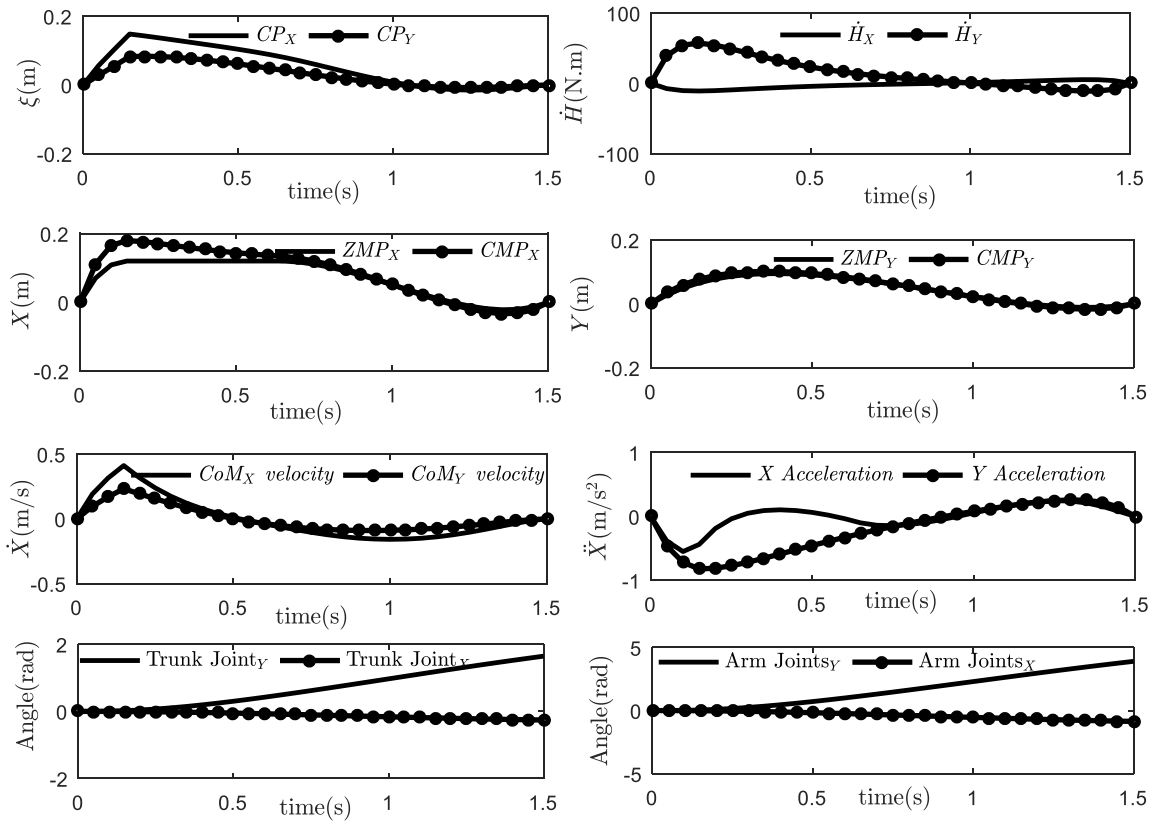


Fig. 9 Results of change of dynamical parameters of simulation Fig. 8.b versus time

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

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

5-2- بحث و جمع‌بندی

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

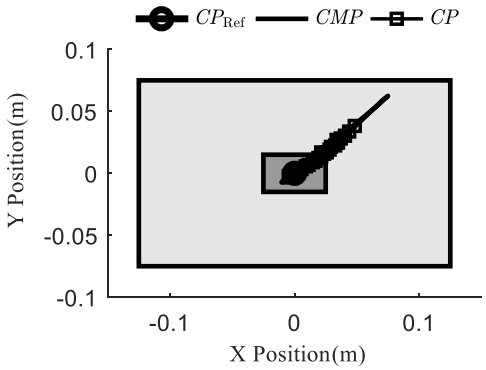


Fig. 10 Push recovery for the external force with magnitude of (150 N, 120 N) robot has stood on one leg on rock.

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

کاهش‌یافته 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 می‌شود را با استفاده از تنظیم و بهینه‌سازی مومنتم دورانی بالاتنه و بدون گام‌برداری خنثی کند. محدودیت‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها در جدول 1 آورده شده است. به‌طور مثال تغییر دوران بالاتنه با توجه به قیود سینماتیکی ربات، دارای محدودیت می‌باشد. به‌منظور تولید تغییر مومنتم بالاتنه موردنیاز در شبیه‌سازی‌ها به‌طور هم‌زمان از دوران بالاتنه و دوران بازوها استفاده شده است که در نمودارهای شبیه‌سازی‌ها قابل‌مشاهده می‌باشد.

عملگرهای ربات سورنا 3 از موتورهای مکسون و هارمونیک درایو می‌باشد که گشتاور اشباع آن 100 Nm می‌باشد بنابراین مطابق شکل 11 مقدار ماکزیمم تغییرات مومنتم دورانی بالاتنه مورد نیاز که همان گشتاور مفصل لگن و یا شانه ربات که حدود 50 Nm است را می تواند به آسانی اعمال کند. همچنین ماکزیمم مقدار نقطه گشتاور صفر 0.08 می باشد با توجه به وزن ربات گشتاور مچ پا 75 Nm خواهد بود که همانند عملگر لگن، عملگر مچ 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 می باشد و الگوریتم مورد نظر می‌تواند به‌صورت بلادرنگ پیاده‌سازی شود. مدت زمان شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در متلب 0.1 s تا 0.2 s می‌باشد که به‌منظور پیاده سازی بلادرنگ به‌صورت کد نویسی به زبان سی این زمان به‌شدت کاهش می‌یابد. سنسورهای مورد نیاز برای پیاده سازی سنسورهای نیرو-گشتاور در هر مچ پا و سنسورهای گشتاور و موقعیت در هر مفصل می‌باشد.

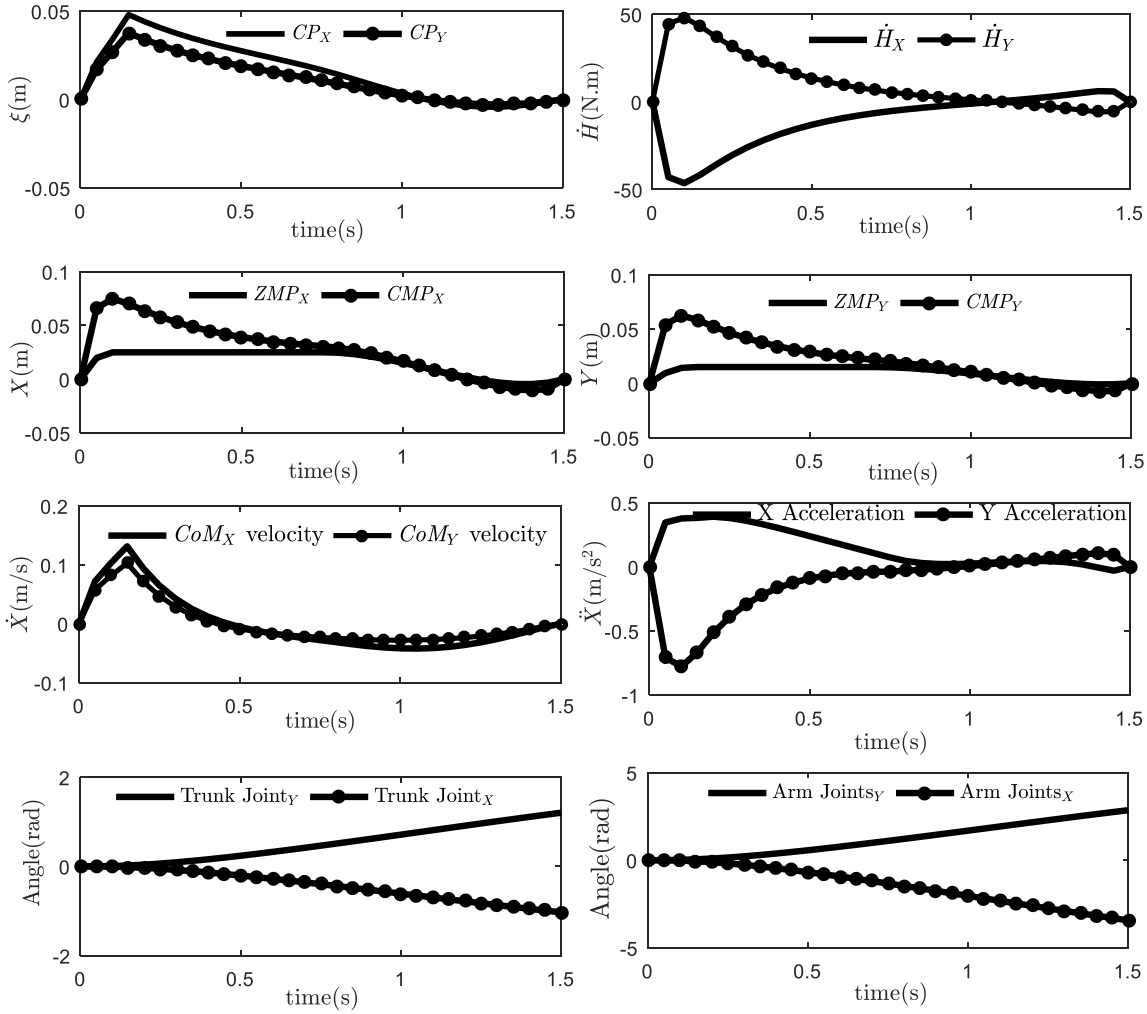


Fig. 11 Results of change of dynamical parameters of simulation Fig. 10. versus time

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

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک کنترلگر واحد بر مبنای کنترل پیش بین به‌منظور بازیابی تعادل ربات در حضور اغتشاش خارجی ارائه‌شده 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 ازجمله در شرایطی که چندضلعی تکیه‌گاهی به یک نوار کاهش‌یافته است و همچنین گام‌برداری ممکن نمی باشد، 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 الهام گرفته از انسان می باشد که به طور همزمان و بهینه از تمامی قابلیت دینامیک ربات برای بازیابی تعادل بهره می برد.

7- فهرست علایم

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

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, 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. Sadedel, 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. Sadedel, 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, *Inteligent Robots and Systems, Proceeding. 2001 IEEE/RSJ International Confrerence*, 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.