



طراحی مسیر ربات دوپای سه بعدی با در نظر گرفتن دوران فعال مفصل پنجه پا

^{1*}حسام خوافی¹, حبیب احمدی²

1-دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شهرود، شهرود

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شهرود، شهرود

*شهرود، صندوق پستی: 316 habibahmadif@shahroodut.ac.ir

چکیده

ربات‌های دوپا یکی از انواع ربات‌های پادار است که یافتن مسیر پادار، یکی از موضوعات محوری برای آنها می‌باشد. به منظور تقلید گام انسان این ربات‌ها اساساً به واسطه تعداد درجات آزادی بالا دارای پیچیدگی زیادی هستند. هدف اصلی این مقاله طراحی مسیر گام پادار برای یک ربات 9 عضوی به کمک معیار پایداری این ربات است. ربات استفاده شده در این مقاله دارای 16 مفصل فعال با دو مفصل پنجه می‌باشد. یکی از ویژگی‌های راه رفتن در انسان برای ایجاد گام‌های بلندتر استفاده از حرکتی است که در آن گفت پا حول مفصل پنجه دوران می‌کند. در این مقاله از گامی استفاده می‌شود که همانند انسان در لحظاتی از حرکت، پای تکیه‌گاه ربات حول این مفصل به صورت فعال دوران می‌کند. برای حصول به معادله اولیه قابل قبولی برای حرکت ربات از قیدی برای حدس اولیه حرکت لگن استفاده می‌شود. سپس به کمک الگوریتم جدیدی، مسیر حرکت مفاصل ربات محاسبه می‌شود. در نهایت با بررسی پایداری نقطه گشتاور صفر ربات و به کمک الگوریتمی مبتنی بر آزمون و خطای مسیرهای مطلوب ربات دوپا به دست می‌آید.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 02 بهمن 1393

پذیرش: 11 اردیبهشت 1394

ارائه در سایت: 10 خرداد 1394

کلید واژگان:

ربات دوپا

سینماتیک و دینامیک ربات

نقطه گشتاور صفر

Trajectory Design for a 3D Biped Robot by Considering Active Toe Rotation

Hessam Khafi, Habib Ahmadi*

Department of Mechanical Engineering, Industrial University of Shahrood, Shahrood, Iran.

*P.O.B. 316 Shahrood, Iran, habibahmadif@shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 22 January 2015

Accepted 01 May 2015

Available Online 31 May 2015

Keywords:

Bipedal Robot

Kinematics and Dynamics of Robot

Zero Moment Point

ABSTRACT

Finding a stable trajectory is amongst the pivotal subjects for bipeds, which are a type of legged-robots. To mimic human gait, biped robots are basically complex because of having numerous Degrees of Freedom. The main goal of this paper is to design a stable trajectory of gaits for a 9 link robot via Zero Moment Point stability criteria. The robot used in this paper is composed of 16 active joints with two toe joint. One of the aspects of human walking to design longer strides is to use a status in which the foot is rotated about its toe joint. Here, a gait type is utilized whereas the entire sole of the support foot firstly touches the ground then rotates about its toe axis as an active joint. To achieve an initial admissible equation for robot motions, a constraint is used for initial guess of pelvis motion. Then, by using a novel algorithm, the trajectory of the joints is calculated. Finally, by considering Zero Moment Point and a trial-error algorithm, the desired trajectory of the biped robot is obtained.

1- مقدمه

جدی به خود گرفت، عدمه این ربات‌ها در کشور ژاپن ساخته شده و اولین گروه فعال در این زمینه، دانشگاه واسادا بود که با شروع فعالیتش، در سال 1973 وابوت-1 را ارائه کرد. تیم رباتیک دانشگاه واسادا در سال 1983 ربات دابلیو-ال-10- آر را با 10 مفصل محرك ارائه کرد. این ربات که توانایی حرکت به جلو، عقب و چرخش را داشت و هر گام را تنها در 4/4 ثانیه می‌پیمود، موفقیت بزرگی به حساب می‌آمد و بالآخره مدل بهبود یافته دابلیو ال-10- آر با نام دابلیو-ال-10- آر- دی در سال 1984 با زمان 1/3 ثانیه برای هر گام، اولین موفقیت در ساخت ربات کاملاً دینامیکی بود. شرکت هوندا ژاپن که یکی از پیشتران طراحی و ساخت ربات‌های انسان‌نمای باشد، در سال 2000 از شاهکار خود، ربات آسیمو رونمایی کرد. این ربات انسان‌نمای با 1/4 متر قد و 26 درجه آزادی در حال حاضر، یکی از پیشرفته‌ترین ربات‌های انسان‌نمای است و مانند انسان توانایی حرکت در تمامی جهات را دارد. ربات فوق، توانایی بالا

از حدود صد سال پیش تلاش‌های زیادی برای ساخت ربات‌های دوپا صورت گرفته است. این دسته از ربات‌ها به دلیل توانایی حرکتی خود، قابلیت‌های خاص و منحصر به فردی مانند بالاگرفتن از پله، حرکت در زمین‌های ناهموار و کارکردن در شرایطی مثل محیط زندگی انسان را نسبت به دیگر ربات‌های متحرک دارا می‌باشد. با توجه به اینکه ربات‌های فوق دارای جای پای مستقل برای حرکت می‌باشند، قابلیت حرکت آن‌ها در محیط ناهموار بیشتر از ربات‌های چرخ‌دار است که برای حرکت، نیاز به محیطی کم و بیش صاف و پیوسته دارند [1]. بسیاری از شرکت‌های بزرگ ربات‌سازی ژاپن از جمله هندا و سونی روی ربات‌های انسان‌نمای مختلف تمرکز کرده‌اند به طوریکه اکثر این ربات‌ها با هدف کار در بیمارستان یا محیط خانه ساخته شده‌اند [2]. تحقیقات در زمینه ربات‌های راه رونده در دهه‌های 1960 و 1970 شکل

Please cite this article using:

H. Khafi, H. Ahmadi, Trajectory Design for a 3D Biped Robot by Considering Active Toe Rotation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 139-148, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مفصل، ربات می تواند گامهای بلندتری برداشته و در نتیجه با سرعت بیشتری تا یک و نیم برابر حالت بدون پنجه، حرکت نماید. کاجیتا و همکاران [13] بر تولید الگوی دویندن تمرکز کرده و به منظور بهبود سرعت دویندن در ربات HRP-2LR، مفصل فنری غیرفعال پنجه را به آن افروزند و رباتی با نام HRP-2LT را معرفی کردند. آنها بر مبنای معیار ZMP روشی برای تولید مسیر مفاصل ربات با مفصل پنجه غیرفعال ارائه نمودند. میورا و همکاران [14] در تحقیقی الگوی تولید حرکت راه رفتن جدیدی را در ربات HRP-4C ارائه دادند، ایشان در این مطالعه تنها بر سه و بیشتر تکیه روی پنجه، کشش زانو و حرکت پای تاب خورنده تمرکز نمودند. یاماماتو و همکاران [15] به طراحی مکانیزم چهارمیله ای برای پنجه پای ربات دو پا پرداختند که همانند انسان می تواند وزن ربات را بروی نوک پا و سینه پنجه تحمل نموده و در نتیجه باعث کاهش بار اعمالی بر مفصل پنجه شود.

تعداد دیگری از محققین در مطالعات خود، مفصل پنجه پا بصورت فعل در نظر گرفته‌اند. در راستای این تحقیقات، کوچکی و صدیق [16] تاثیر مفصل پنجه فعل را در بهبود عملکرد راه رفتن یک ربات صفحه ای 9 عضوی در صفحه پیکانی بررسی نمودند. آنها نشان دادند که وجود مفصل پنجه فعل باعث کاهش مصرف انرژی و توان مصرفی حین راه رفتن می شود. همچنین آنها در تحقیقی دیگر [17]، قیدهای بین زمین و پای ربات با پنجه فعال را بررسی نموده و محدوده‌های لازم برای اندازه گشتوارها، جهت جلوگیری از لغزش پا، دوران حول کف پا و عدم جادشنan پای تکیه گاه از زمین را مورد بررسی قرار دادند. عزتی و همکاران [18] به منظور حل دینامیک مکوس و بهبود مدل دینامیکی ربات دوپای دارای پنجه فعل، روش جدیدی را ارائه نمودند. مدل دینامیکی ایشان در فاز دوتکیه‌گاهی به دو زیر فاز بر اساس عملکرد پنجه تقسیم می شود. در زیر فاز اول، هر دو کف پا کامل بر روی زمین قرار گرفته و در زیرفاز دوم پاشنه پای عقبی از زمین بلند شده و پنجه پای عقبی به اضمام تمام کف پای جلویی روی زمین قرار می‌گیرد؛ در نهایت ایشان با بررسی اراضی قید ZMP، صحت الگوی ارائه شده جهت راه رفتن ربات دو پا را بررسی نمودند. کومار و همکاران [19] مفصل پنجه ترکیبی فعل/غیرفعالی را پیشنهاد نمودند که قسمت غیرفعال آن از فنر و دمپر تشکیل شده است. ایشان طرح فوق را برای یک ربات صفحه ای استفاده کرده و نشان دادند که استفاده از یک فنر و دمپر در بازه ای از مسیر گام، باعث کاهش گشتوار مورد نیاز در عملگر می شود.

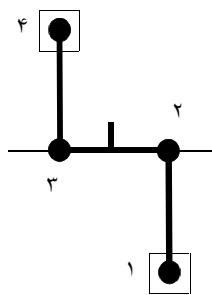
اکثر پژوهش‌های حاضر که پنجه پا را در مطالعات خود لحاظ نموده‌اند، به صورت صفحه‌ای بوده و تعداد محدودی از محققین ربات دوپای سه بعدی را با پنجه فعل مورد بررسی قرار داده‌اند. این در حالیست که بررسی مدل سه بعدی برای ربات دوپا با وجود دوران فعل مفصل پنجه کف پا، باعث معنی‌دار ترشدن گام ربات و افزایش طول گام و باعث نزدیکتر شدن حرکت پای ربات به حرکت پای انسان می‌شود. لذا در این مطالعه با درنظر گرفتن حرکتی برای مسیر مفصل پنجه پا بصورت فعل، طراحی مسیر برای ربات دوپای 16 درجه آزادی انجام شده است. روش مورد استفاده برای حل معادلات سینماتیک مکوس این ربات، استفاده از قیدی برای حدس اولیه حرکت ربات به دست با استفاده از این روش، معادله اولیه قابل قبولی برای حرکت ربات به دست می‌آید و سپس به کمک الگوریتم جدیدی، مسیر حرکت مفاصل ربات محاسبه می‌شود. سپس با بررسی پایداری نقطه گشتوار صفر ربات و به کمک الگوریتم دیگری مبتنی برآزمون و خطأ، حرکت مطلوب ربات و مسیرهای مطلوب حرکت مفاصل به دست می‌آید.

رفتن از پله، لیلی کردن، دویندن و تشخیص چهره را نیز دارد [3]. در سال 1984، میورا و شیمیویاما [4] ربات‌های دوپای خانواده بایپر را ساختند که به طور استاتیکی نایپایدار ولی در حالت دینامیکی پایدار بودند. به عنوان نمونه، ربات بایپر-4، فاقد نیروی محرکه در قوزک پاها بوده و دارای کف پای بزرگی بود، ربات فوق در زانو نیز فاقد مفصل بوده و برای توصیف مسیر آن از آنالیز پاندول معکوس استفاده شده‌است. نقیبی و اکبرزاده [5] با استفاده از منحنی‌های آماری حرکت انسان، به طراحی یک ربات دوپای 13 درجه آزادی با 3 درجه آزادی در هر مفصل لگن، یک درجه در مفصل زانو، دو درجه در هر قوزک پا و یک درجه آزادی در قسمت بالاگهه، پرداخته است. نقیبی و همکاران [6] به طراحی و شبیه‌سازی ربات دوپای چهارده درجه آزادی با توجه به منحنی‌های آماری حرکت انسان پرداخته‌اند؛ بطوریکه این ربات در کف پا بدون مفصل می‌باشد.

به تازگی محققان بروی دستیابی به حرکتی، مشابه حرکت پای انسان در ربات دو پا تمرکز کرده اند؛ به همین دلیل استفاده از مفصل پنجه در ربات انسان نما جهت حاصل شدن گام طبیعی ضروری به نظر می‌رسد؛ لذا بعضی از محققین استفاده از پنجه پا را در تحقیقات خود لحاظ نموده‌اند. تعدادی از محققین فوق دوران حول نوک پنجه پا را به صورت غیر فعل در نظر گرفته اند. در همین راستا هانگ و همکاران [7] روشی برای فرمول بندی حرکت لگن ربات دوپای صفحه ای ارائه نموده و در ادامه با توجه به محدودیت‌های حرکت پا، روشی برای تولید حرکت‌های مختلف پای تاب خورنده ارائه دادند. ربات مورد مطالعه ایشان، بدون مفصل پنجه بود؛ اما با درنظر گرفتن دوران پا حول نوک پنجه‌ی آن، به طراحی الگوی مسیر راه رفتن در نظر گرفته تلاولینی و همکاران [8] برای یک ربات دوپای چهارده درجه آزادی و سه بعدی، در فاز یک تکیه گاهی، دوران پای تکیه گاه حول نوک پنجه پا را در نظر گرفته و با بررسی حرکت ربات به صورت فازهای یک تکیه گاهی متوالی و دوتکیه گاهی لحظه‌ای نشان دادند که دوران حول نوک پنجه در حین حرکت سریع، باعث کاهش مصرف انرژی لازم برای حرکت می‌شود.

تعداد دیگری از محققین در مطالعات خود، مفصل پنجه پا بصورت غیر فعل لحاظ نموده اند. در راستای این تحقیقات، اهن و همکاران [9] یک ربات دوپای چهارده درجه آزادی با مفصل پنجه غیرفعال درجه آزادی و همچنین نشان دادند که وجود مفصل پنجه باعث نزدیکتر شدن گام ربات به گام انسان شده و سرعت زاویه ای بیشینه‌ی مفاصل ران، زانو و قوزک پا بسیار کاهش پیدا کرد که این موضوع منجر به کاهش بار موتورها خواهد شد. ایشان همچنین نشان دادند که گام پایدار ربات دارای پنجه می تواند بیش از دو برابر بزرگ‌تر از گام ربات بدون پنجه باشد. وانگ و همکاران [10] ربات هشت عضوی صفحه ای را در صفحه پیکانی با وجود مفصل پنجه باعث کاهش دامنه مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که در حالتی که در فاز دو تکیه گاهی شده و حرکت زوایای مفاصل پا و افزایش پایداری ربات در فاز دو تکیه گاهی شده و این موضوع موجب کنترل راحت ربات در حرکت می شود. اگورا و همکاران [11] مفصل پنجه غیر فعل را برای ربات وابیان-توآر با زانوهای کشیده به کار برند. ربات فوق شامل سیزده درجه آزادی فعل و دو درجه آزادی غیر فعل به عنوان مفصل پنجه در پایین تنه ربات در تحقیق به کمک بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک بر پایه معیار نقطه گشتوار صفر¹ (ZMP) به تولید الگوی راه رفتن پرداخته است. سلوتی و همکاران [12] با بکار بردن مفصل پنجه غیرفعال برای ربات مدل JRP-2T در نشان دادند که به کمک این

1- Zero Moment Point



شکل 4 پیکربندی ربات مورد مطالعه در صفحه عرضی

راه رفتن یک چرخه تکرار شونده است به طوریکه هر گام راه رفتن دارای دو فاز تماس با زمین است و بسته به نوع تماس، به آنها فاز یک تکیه‌گاهی و دو تکیه‌گاهی می‌گویند. در فاز یک تکیه‌گاهی، یک پا روی زمین ثابت است که پای تکیه‌گاه¹ نماید. در فاز یک تکیه‌گاهی، یک پا در تماس با زمین باشد، فاز دو تکیه‌گاهی می‌گویند [21,20]. در بسیاری از تحقیقات، ربات فقط در حالت یک تکیه‌گاهی بررسی شده و فاز حرکتی دو تکیه‌گاهی به صورت آنی در نظر گرفته شده است [23,22]. در این مقاله نیز فاز دو تکیه‌گاهی به صورت آنی در نظر گرفته شده است، به این معنی که به محض تماس پای در حال حرکت به زمین، پای تکیه‌گاه از زمین بلند شده و زمان قرارگیری هر دو پا بر روی زمین به صورت لحظه‌ای می‌باشد.

ربات مورد مطالعه شامل لگن و دو پای مشابه به هم می‌باشد. هر پای کامل، از عضوهای ران، ساق و کف پا تشکیل شده است. کف پاها هر کدام خود شامل دو عضو پاشنه و پنجه می‌باشند. درجه آزادی ربات نیز برگرفته از درجات آزادی پایین‌تنهی انسان می‌باشد؛ به گونه‌ای که هر مفصل لگن² شامل سه درجه آزادی دورانی، هر زانو دارای یک درجه آزادی و هر مج پای ربات نیز سه درجه آزادی دورانی دارد که با در نظرگیری یک درجه آزادی در هر پنجه³، مجموع درجات آزادی ربات به 16 می‌رسد.

از آنجا که در ربات مورد مطالعه، حرکت تک تکیه‌گاهی حین تکیه‌گاه بودن پای چپ و راست مشابه است و تقاضن در ساختار هندسی و حرکت پای چپ و راست ربات وجود دارد؛ می‌توان گفت راه رفتن یک حرکت تکراری است که در آن فقط نقش پاها عوض می‌شود، در نتیجه به منظور ساده‌تر شدن محاسبات در این مقاله، تنها به مطالعه یک گام پرداخته شده و با فرض اینکه پای راست، پای تکیه‌گاه بوده و پای چپ، حرکت تاب خورنده از عقب به جلو را انجام می‌دهد، حرکت ربات بررسی می‌شود. ربات مورد مطالعه در شکل 5، نشان داده شده است.

3- سینماتیک ربات دوپا

برای تحلیل سینماتیک ربات، بردار مختصات تعیین یافته‌ای مطابق با رابطه (1) در نظر گرفته شده است:

$$q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_{16}]^T \quad (1)$$

به طوری که در رابطه فوق، q_j دوران مفصل شماره j ، حول محور دوران Z_{j-1} در دستگاه مربوطه می‌باشد ($j=1,2,\dots,16$).

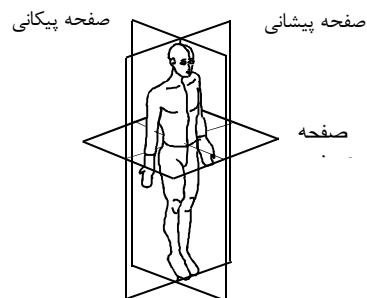
2- ساختار ربات

حرکت ربات دوپا همانطور که در شکل 1، نشان داده شده است، معمولاً در سه صفحه عرضی، پیکانی و پیشانی رخ می‌دهد. مهم‌ترین صفحه در ایجاد حرکت، مطابق شکل 2 صفحه پیکانی می‌باشد، به طوری که بیشترین درجات آزادی در ربات‌های دوپا معمولاً در این صفحه قرار دارد.

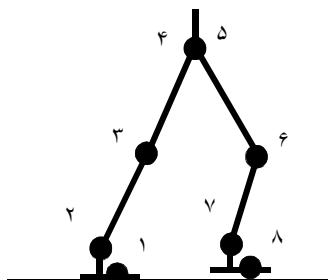
ساختار شکل 2 مدل ربات بررسی در این تحقیق را در صفحه پیکانی نمایش می‌دهد. همانطور که از شکل فوق مشاهده می‌شود، ربات مورد نظر در این صفحه دارای 8 مفصل، شامل دو مفصل در پنجه پا است که با دایره‌های سیاه نشان داده شده‌اند.

بررسی موقعیت‌های زاویه‌ای مفاصل در صفحه پیشانی برای بررسی پایداری ربات حائز اهمیت است. شکل 3 حالتی را نشان می‌دهد که حرکت جانبی ربات از ترکیب حرکت مفصل‌های لگن و مج حاصل می‌شود. ربات مورد مطالعه در صفحه پیشانی چنین ساختاری دارد.

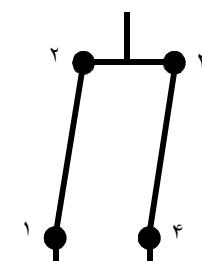
مفاصل ربات در صفحه عرضی، فقط در ربات‌های پیشرفته انسان‌نما وجود دارد، این ربات‌ها در صفحه عرضی معمولاً بین یک تا پنج مفصل دارند. در شکل 4، ربات مورد مطالعه در صفحه عرضی با چهار مفصل نشان داده شده است.



شکل 1 صفحات حرکتی راه رفتن



شکل 2 پیکربندی ربات مورد مطالعه در صفحه پیکانی



شکل 3 پیکربندی ربات مورد مطالعه در صفحه پیشانی

1- Stance foot
2- Hip
3- Metatarsal

جدول 1 طول اعضای ربات

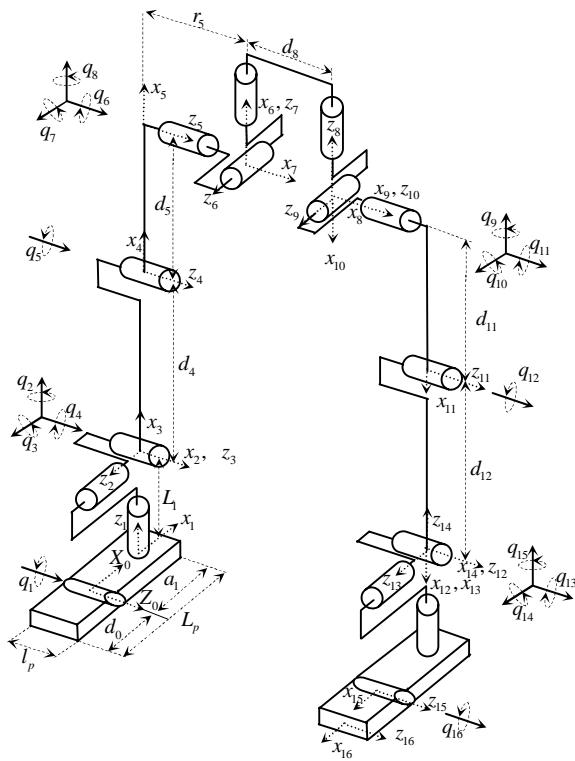
پارامترهای ربات (mm)	اندازه پارامترها
96	d_0
89	a_1
207	L_p
59/25	L_1
392	d_4
392	d_5
30	r_5
190	d_8
110	l_p

4- طراحی مسیر

در فرآیند حرکت ربات دوپا یک از موضوعات مهم، بحث تعادل است. ربات‌های دوپا به طور طبیعی ناپایدار می‌باشند، به همین دلیل برای این نوع ربات‌ها امکان کوچک‌ترین حرکتی بدون بررسی تعادل وجود ندارد. در ربات‌های دارای کف پا که ربات دارای سرعت و شتاب بالا است (گام دینامیکی) و اثرات اینرسی غیرقابل چشم پوشی است، برای حفظ تعادل، باید نقطه‌ای که برآیند گشتاورهای وارد به ربات حول آن صفر می‌شود، یعنی نقطه گشتاور صفر، در چندضلعی پای تکیه‌گاه قرار گیرد. در سال 1970، واکبراتویچ² این معیار پایداری را پیشنهاد داد و آن را در ربات‌ها با این نام معرفی کرد [24]. این معیار مبنای کنترل پایداری اکثر ربات‌های دوپا می‌باشد. به این نوع تعادل، تعادل دینامیکی می‌گویند که از مزایای استفاده از آن می‌توان به دستیابی سرعت بیشتر برای ربات اشاره کرد. لازم به ذکر است که در این مقاله نیز بر مبنای معیار فوق طراحی مسیر حرکت ربات انجام شده است.

جدول 2 جدول پارامترهای دنویت- هارتبرگ

θ_i	a_i	α_i	d_i	عضو
θ_1	a_1	$-\pi/2$	صفر	1
$\theta_2 - \pi/2$	صفر	$\pi/2$	L_1	2
$\theta_3 + \pi/2$	صفر	$\pi/2$	صفر	3
θ_4	d_4	صفر	صفر	4
θ_5	d_5	صفر	صفر	5
θ_6	صفر	$-\pi/2$	r_5	6
$\theta_7 - \pi/2$	صفر	$-\pi/2$	صفر	7
θ_8	d_8	صفر	صفر	8
θ_9	صفر	$\pi/2$	صفر	9
$\theta_{10} - \pi/2$	صفر	$-\pi/2$	صفر	10
θ_{11}	$d_{11} = d_5$	صفر	صفر	11
θ_{12}	$d_{12} = d_4$	صفر	صفر	12
θ_{13}	صفر	$\pi/2$	$r_{11} = r_5$	13
$\theta_{14} + \pi/2$	صفر	$-\pi/2$	صفر	14
$\theta_{15} - \pi/2$	$a_{15} = a_1$	$-\pi/2$	$L_{15} = -L_1$	15
θ_{16}	$d_{16} = d_1$	صفر	صفر	16



شکل 5 ربات مورد مطالعه

دستگاه مختصات $X_0Y_0Z_0$ با مرکز O_0 ، بر روی مفصل پنجه پای سمت راست متصل به عضو صفر قرار دارد. دستگاه‌های مختصات عضوهای دیگر، با توجه به قاعده دنویت- هارتبرگ¹ بر روی اعضای ربات قرار می‌گیرید. از آنجا که در حین یک گام، پنجه پای راست بدون حرکت بر روی زمین قرار دارد، دستگاه مختصات O_0 متصل به آن، دستگاه پایه یا اینرسی ربات نامیده می‌شود. طول اعضای ربات مورد مطالعه تقریباً برابر با طول اعضای انسانی باشد.

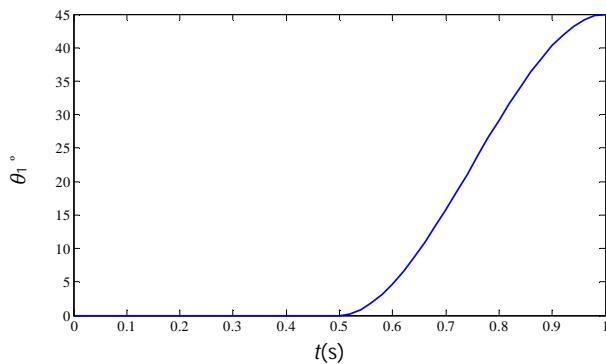
که در این ربات فرض شده تمامی عضوها صلب و همگن می‌باشند. برای تحلیل سینماتیک، به رابطه i دستگاه مختصات $o_i x_i y_i z_i$ متعلق شده است و رابطه ماتریس تبدیل همگن بین دستگاه‌های مختصات به صورت رابطه (2) می‌باشد.

$$T_j^i = A_{i+1} A_{i+2} \cdots A_{j-1} A_j \quad (2)$$

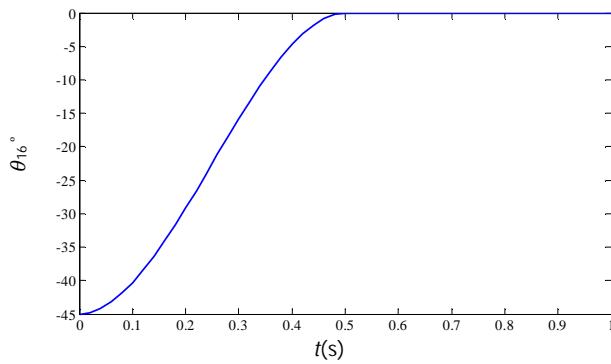
که در رابطه (2) هر ماتریس تبدیل بین دو دستگاه متولی به صورت رابطه (3) نوشته می‌شود:

$$A_i = \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i} C_{\alpha_i} & S_{\theta_i} S_{\alpha_i} & a_i C_{\theta_i} \\ S_{\theta_i} & C_{\theta_i} C_{\alpha_i} & -C_{\theta_i} S_{\alpha_i} & a_i S_{\theta_i} \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

در رابطه (3)، C و S به ترتیب معرف توابع مثلثاتی \cos و \sin است. θ_i ، α_i و d_i پارامترهای دنویت- هارتبرگ بوده که پس از تعریف دستگاه‌های مختصات اعضای ربات، پارامترهای فوق برای ربات مذکور مطابق با جدول 2 بدست می‌آید.



شکل 6 مسیر مطلوب مفصل 1



شکل 7 مسیر مطلوب مفصل 16

قید با نام قید جهت‌گیری کف پا شناخته می‌شود. بهمنظور جهت‌گیری مناسب دستگاه متصل به پنجه پای تاب خورنده و زمین، لازم است تا مؤلفه‌های جهت‌گیری این دو دستگاه مختصات، حول محورهای x_0 و z_0 صفر باشند. اختلاف کوچک بین جهت‌گیری‌های این دو دستگاه مختصات را می‌توان از رابطه (10) بدست آورد [25].

$$\xi = \frac{1}{2} (s \times s^d + n \times n^d + a \times a^d) \quad (10)$$

که در رابطه (10)، n, s و a به ترتیب ستون‌های ماتریس جهت‌گیری دستگاه متصل به پنجه پای تاب خورنده نسبت به دستگاه مختصات اینرسی می‌باشند. ماتریس جهت‌گیری مذکور به صورت رابطه (11) می‌باشد.

$$R_{16}^0 = [s \ n \ a] \quad (11)$$

در رابطه (10)، ξ خود دارای سه مؤلفه است، مؤلفه s آن، حول محور y او دستگاه مختصات پایه ربات بوده و تأثیری بر جهت‌گیری پای تاب خورنده نسبت به زمین ندارد، در نتیجه با برابر صفر قرار دادن مؤلفه‌های x و z آن، دو معادله، به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} \xi_x &= 0 \\ \xi_y &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

با توجه به هندسه ربات و سرعت متوسط راه رفتن عادی یک انسان با قد پایین تنهای برابر با قد ربات مورد مطالعه، زمان یک گام (T_s) برابر با یک ثانیه و طول گام ($2D_s$) برابر با 70 سانتیمتر در نظر گرفته شده است. برای تعیین حرکت مچ پا در هر لحظه به دو مؤلفه $X_{s,a}$ و $Z_{s,a}$ که نشان‌دهنده حرکت قوزک پا هستند، نیاز است. با توجه به اینکه گام حرکتی ربات، برای پای چپ در نظر گرفته شده و پای راست به عنوان تکیه‌گاه است، در مرحله‌ی یک تکیه‌گاهی که در مدت زمان T_s انجام می‌گیرد، حرکت با جدا شدن

ربات‌های پادار دارای ساختار مکانیکی پیچیده بوده و برای ایجاد مسیر پایدار در آن‌ها نیاز به الگوریتم پیشرفت‌های است. برای داشتن گام‌های بلندتر و ایجاد نیروی رانش به سمت جلو برای ربات، منحنی مسیر حرکت مفاصل پنجه پا، با الگوگیری از رفتار پای انسان به صورت دو ضابطه‌ای و با شرایط مرزی مطابق با روابط (4) و (5) تعریف می‌شود. روابط فوق برای مفصل پنجه پای تکیه‌گاه (پنجه‌ی پای راست) ارائه شده‌است.

$$q_1 = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < \frac{T_s}{2} \\ \frac{\pi}{4}, & t = T_s \end{cases} \quad (4)$$

$$\dot{q}_1 = \begin{cases} 0, & t = \frac{T_s}{2} \\ 0, & t = T_s \end{cases} \quad (5)$$

در معادلات (4) و (5)، T_s ، زمان یک گام است. شرایط مرزی (4) و (5) بدین معنی است که در هین حرکت پای تاب خورنده، برای نیمی از زمان حرکت، پنجه و پاشنه‌ی پای تکیه‌گاه تواناً بر روی زمین قرار دارند و در نیمه زمانی دوم حرکت پای تاب خورنده، پاشنه‌ی پای تکیه‌گاه با سرعت صفر شروع به بلند شدن از سطح زمین کرده و با سرعت صفر به مقدار نهایی خود در زاویه‌ی $\pi/4$ می‌رسد. با توجه به شرایط فوق و با استفاده از تقریب چندجمله‌ای درجه 3 معادله حرکت مفصل 1 به صورت معادله (6) بدست می‌آید.

$$q_1(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < \frac{T_s}{2} \\ \frac{-4\pi}{T_s^3} t^3 + \frac{9\pi}{T_s^2} t^2 - \frac{6\pi}{T_s} t + \frac{5\pi}{4}, & \frac{T_s}{2} \leq t \leq T_s \end{cases} \quad (6)$$

با توجه به معادله (6) منحنی مسیر دوران مفصل 1، در شکل 6، ترسیم شده است.

برای مفصل پاشنه‌ی پای تاب خورنده شرایط مرزی بصورت (7) و (8) در نظر گرفته شده است.

$$q_{16}(t) = \begin{cases} \frac{-\pi}{4}, & t = 0 \\ 0, & \frac{T_s}{2} \leq t \leq T_s \end{cases} \quad (7)$$

$$\dot{q}_{16} = \begin{cases} 0, & t = 0 \\ 0, & t = \frac{T_s}{2} \end{cases} \quad (8)$$

شرایط فوق بدین معنی است که مفصل پنجه‌ی پای تاب خورنده، ابتدا با زاویه $\pi/4$ از زمین بلند شده و در انتهای نیمه‌ی اول زمان گام حرکت پا، با سرعت دورانی صفر به زاویه صفر می‌رسد و نیمه دوم زمان گام حرکت پا را با همان زاویه صفر ادامه می‌دهد. با توجه به این فرضیات معادله حرکت مفصل 16 به صورت رابطه (9) بدست می‌آید. با توجه به معادله (9) منحنی مسیر مفصل 16، در شکل 7، ترسیم شده است.

$$q_{16}(t) = \begin{cases} \frac{-4\pi}{T_s^3} t^3 + \frac{3\pi}{T_s^2} t^2 - \frac{\pi}{4}, & 0 \leq t < \frac{T_s}{2} \\ 0, & \frac{T_s}{2} \leq t \leq T_s \end{cases} \quad (9)$$

از آنجاکه ربات بر روی زمین هموار و مسطح حرکت می‌کند؛ لازم است پای تاب خورنده به صورت موازی با سطح زمین فرود آید؛ تا پای تاب خورنده، در هنگام رسیدن به زمین در تماش کامل با زمین قرار گیرد. این

راه رفتن ثابت فرض شده است. در نتیجه با توجه به دو فرض اخیر، سه معادله به صورت (19)، (20) و (21) برقرار خواهد بود.

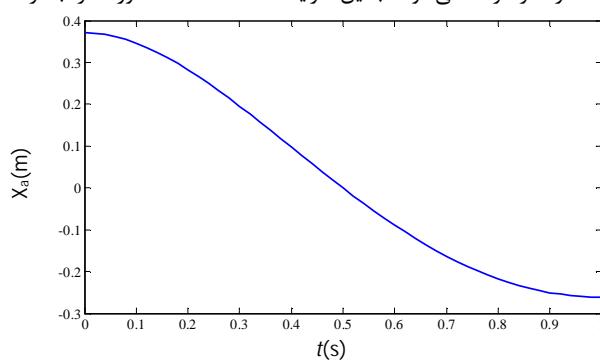
$$z_{s.a} = \text{const.} \quad (19)$$

$$\dot{x}_{\text{hip},z} = 0 \quad (20)$$

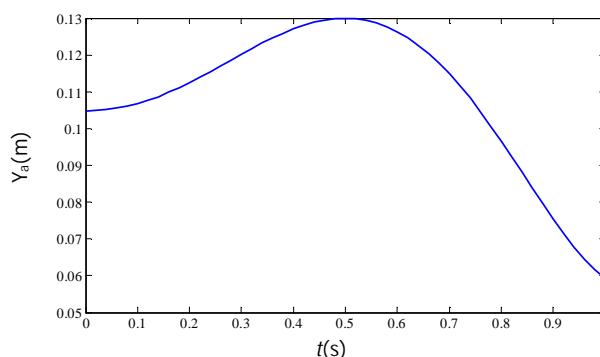
$$\ddot{x}_{\text{hip},x} = 0 \quad (21)$$

با فرض حرکت مستقیم، جهت طراحی مسیر برای ربات مورد مطالعه، دوران مفاصلی که باعث انحراف ربات از خط مستقیم شده و موجب دور زدن و تغییر مسیر حرکت آن می‌شوند، صفر فرض شده‌اند. این مفاصل که عامل حرکت حول محور عمودی یا همان یا و ربات می‌باشند عبارتند از q_8 ، q_9 و q_{15} .

برای بدست آوردن مسیر حرکت مفاصل دیگر، از الگوریتم ارائه شده در مرجع [27] توسط موسویان و همکاران، برای حل مسئله استفاده شده است. این الگوریتم با فرض مشخص بودن مسیر حرکت لگن و پای تاب خورنده‌ی ربات، به کمک سینماتیک معکوس، مسیر حرکت مفاصل را تعیین می‌کند. در این مقاله، هرچند حرکت مج پای ربات مشخص است ولی حرکت لگن ربات در راستای محورهای x_0 ، y_0 و z_0 معلوم نیست. روش مورد استفاده برای حل مسئله سینماتیک ربات با توجه به مشخص نبودن حرکت لگن، یک روش مبتنی بر سعی و خطا است که الگوریتم مناسب برای آن در این مقاله ارائه شده است. اولین فرض برای شروع فرآیند حل مسئله، تعیین حرکت لگن به کمک معادلات قید نقطه گشتاور صفر با فرض چشم پوشی از تاثیر جرم عضوهای دیگر ربات و در نظر گرفتن جرم لگن و بالا تنه به عنوان جرم مرتمکز در معادله مذکور است، لازم به ذکر است که این فرض برای نقطه شروع است و با وارد شدن به الگوریتم، جرم‌ها مطابق با جرم واقعی اعضای ربات در نظر گرفته می‌شوند. با این شرایط معادله گشتاور صفر، با در



شکل 9 مسیر حرکت مج پا در راستای محور x_0



شکل 10 مسیر حرکت مج پا در راستای محور y_0

پنجه‌ی پای چپ از زمین شروع شده و با تماس کامل همان پا به زمین به انتهای می‌رسد. با توجه به هندسه ربات و مسیر مفاصل پنجه پا، مج پا در حین حرکت از نقاطی با موقعیت و سرعت مشخص در شکل 8 عبور می‌کند که با استفاده از آن‌ها و تقریب چندجمله‌ای، حرکت مج پا در صفحه پیکانی به دست می‌آید. این نقاط با روابط (13) تا (16) تعیین شده‌اند.

$$X_{s.a.} = \begin{cases} D_s + a_1 \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - L_1 \sin\left(\frac{\pi}{4}\right), & t=0 \\ 0, & t=T_m \\ -D_s + a_0, & t=T_s \end{cases} \quad (13)$$

$$Y_{s.a.} = \begin{cases} a_0 \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) + L_1 \cos\left(\frac{\pi}{4}\right), & t=0 \\ 0.13, & t=T_m \\ L_1, & t=T_s \end{cases} \quad (14)$$

$$\dot{X}_{s.a.} = \begin{cases} 0, & t=0 \\ 0, & t=T_s \end{cases} \quad (15)$$

$$\dot{Y}_{s.a.} = \begin{cases} 0, & t=0 \\ 0, & t=T_m \\ -0.1, & t=T_s \end{cases} \quad (16)$$

همانطور که در شکل 8 نشان داده شده است، در روابط فوق a_0 طول پاشنه پای ربات، d_0 طول پنجه پای ربات و L_1 ارتفاع قوزک پا می‌باشد؛ پارامتر T_m نشان‌دهنده‌ی زمانی است که مج پای ربات در بالاترین ارتفاع خود از سطح زمین قرار می‌گیرد. در این مطالعه مقدار T_m برابر با 0/5 ثانیه در نظر گرفته شده است.

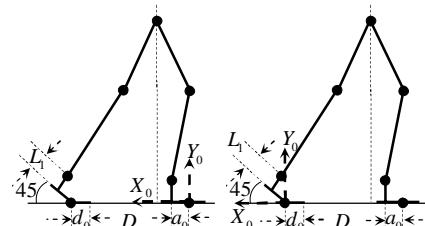
با توجه به شرایط مرزی (13) تا (16)، تقریب چندجمله‌ای‌های درجه 4 و 5 به ترتیب برای $X_{s.a.}$ و $Y_{s.a.}$ ، انجام شده و ضابطه تقریبی برای مسیر حرکت مج پا به صورت معادلات (17) و (18) بر حسب زمان به دست می‌آید.

$$X_{s.a.}(t) = -0.8803t^4 + 3.0247t^3 - 2.7764t^2 + 0.3710 \quad (17)$$

$$Y_{s.a.}(t) = 0.6939t^5 - 1.1673t^4 + 0.2442t^3 + 0.1837t^2 + 0.1048 \quad (18)$$

با توجه به معادلات (17) و (18)، منحنی حرکت مج پای تاب خورنده در حین گام برداشتن ربات در دو راستای محورهای x_0 و y_0 نسبت به زمان در شکل‌های 9 و 10 نشان داده شده است.

با توجه به منحنی‌های آماری حرکت انسان در مرجع [26]، در حین راه رفتن انسان، دوران لگن حول محورهای امتداد راه رفتن و محور واقع در صفحه پیشانی نسبتاً ناچیز است و در ربات مطالعه از دوران لگن حول این محورها صرف‌نظر شده است. همچنین فاصله عمودی دو مج پا حین

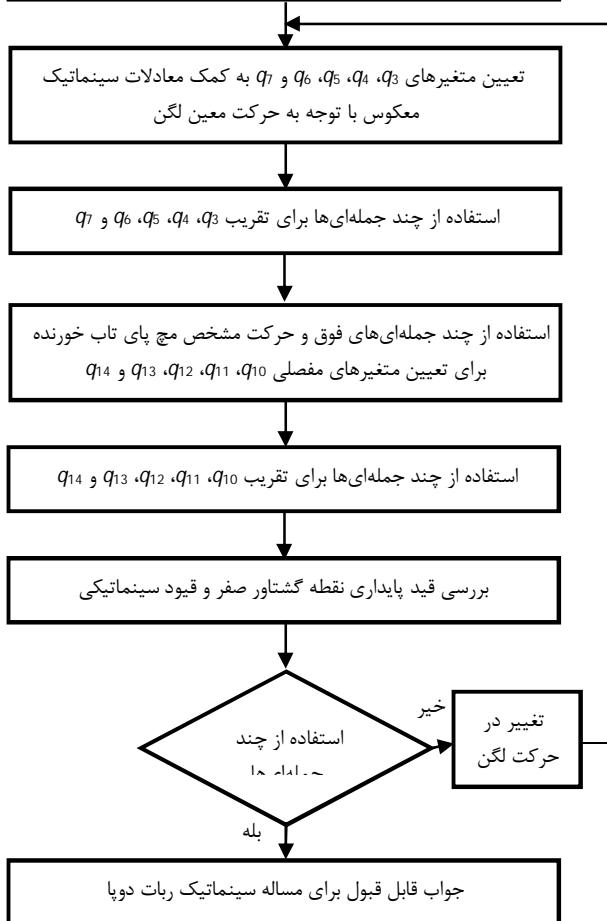


شکل 8 نمای جانبی ربات مطالعه در ابتدا و انتهای گام

با مشخص شدن حرکت لگن در راستای محورهای x_0 ، y_0 و z_0 یک دستگاه 5 معادله و 5 مجهول با معادلات حرکت لگن و حرکت مج در فضا و با مجهولات q_3 ، q_4 ، q_5 ، q_6 و q_7 به دست می آید. از آنجایی که نتیجه هی حل با روش های محاسبات عددی، مجموعه ای از نقاط برای هر کدام از مجهولات در بازه ای از زمان است، جهت ادامه روند حل، برای هر کدام از مجهولات که اکنون توسط مجموعه ای از نقاط مشخص شده اند، یکتابع چندجمله ای تقریبی انتخاب می شود. پس از تعیین مجهولات پای راست که همان 5 متغیر مفصلی q_3 ، q_4 ، q_5 ، q_6 و q_7 می باشند، با استفاده از حرکت معلوم مج پای تاب خورنده، متغیرهای مفصلی پای دیگر مشابه آنچه برای پای راست انجام گرفت، محاسبه شده است. پس از تخمین چندجمله ای مناسب برای هر کدام از متغیرهای مفصلی q_{10} ، q_{11} ، q_{12} ، q_{13} و q_{14} معادلات قید نقطه ی گشتاور صفر مورد بررسی قرار می گیرد. اگر این معادلات توسط متغیرهای فوق ارضاء شوند، مسیرهای مطلوب حرکت ربات به دست آمده اند و در غیر این صورت حرکت لگن و شرایط اولیه معادلات نقطه گشتاور صفر، تغییر کرده و روند فوق تا رسیدن به جواب قابل قبول تکرار می شود. فرآیند حل مسئله در فلوچارت شکل 12، خلاصه شده است.

با توجه به فلوچارت شکل 12، نتایج مربوط به مسیرهای مطلوب مطابق با شکل های 13 تا 22، برای متغیرهای مفصلی به دست آمده است. در این

(22) و
(23) با حدس شرایط اولیه به کمک منحنی های آماری حرکت انسان



شکل 12 فلوچارت روش حل مسئله برای یافتن مسیر حرکت مفصل

نظر گیری حرکت لگن در راستاهای x_0 و z_0 به دو معادله دیفرانسیل با دو مجهول X_{hip} و Z_{hip} مطابق با معادلات (22) و (23) تبدیل می شود.

$$\ddot{X}_{\text{hip}}(t)Y_{\text{hip}}(t) - X_{\text{hip}}(t)\dot{g}_y = X_{\text{zmp}}(t)g_y \quad (22)$$

$$g_y \ddot{Z}_{\text{hip}}(t) - Y_{\text{hip}}\dot{Z}_{\text{hip}}(t) = 0 \quad (23)$$

4-1- مسیر مطلوب نقطه گشتاور صفر

از آنجاکه نقطه گشتاور صفر جهت پایداری ربات باید درون چند ضلعی تکیه گاهی پای ربات مطابق شکل 11، قرار گیرد؛ لازم است تا در طی گام، مؤلفه هی Z_{zmp} نقطه ی گشتاور صفر، در رابطه (24) صدق نماید.

$$-\frac{l_p}{2} < Z_{\text{zmp}} < \frac{l_p}{2} \quad (24)$$

همچنین مؤلفه هی X_{zmp} نقطه ی گشتاور صفر، در نیمه اول زمان گام که تمام کف پا بر روی زمین قرار دارد و در نیمه دوم زمان گام که پای تکیه گاه روی پنجه بلند شده است، باید در محدوده بیان شده با معادلات (25) و (26) قرار گیرد.

$$-d_0 < X_{\text{zmp}} < L_p - d_0, \quad 0 < t < \frac{T_s}{2} \quad (25)$$

$$-d_0 < X_{\text{zmp}} < 0, \quad \frac{T_s}{2} \leq t < T_s \quad (26)$$

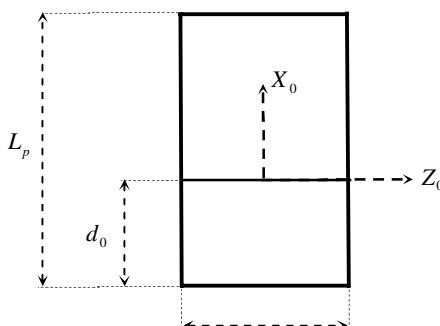
همانطور که از نامساوی های (24)، (25) و (26) مشخص است، انتخاب های متعددی برای نقطه ی گشتاور صفر مطلوب وجود دارد. در این پژوهش، نقطه ی گشتاور صفر با در نظر گیری شرایط مرزی رابطه (27) در راستای محور x_0 انتخاب می شود.

$$X_{\text{zmp}} = \begin{cases} \frac{d_1}{2}, & t=0 \\ 0, & t=\frac{T_s}{2} \\ -\frac{d_0}{2}, & t=T_s \end{cases} \quad (27)$$

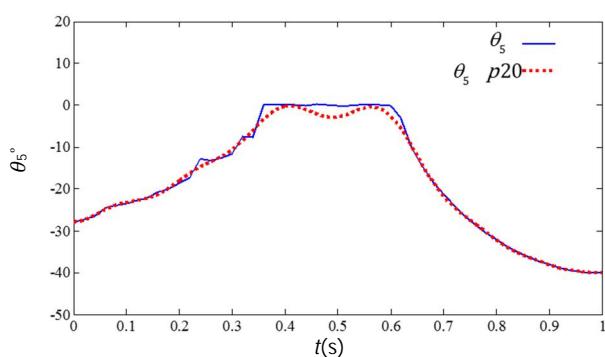
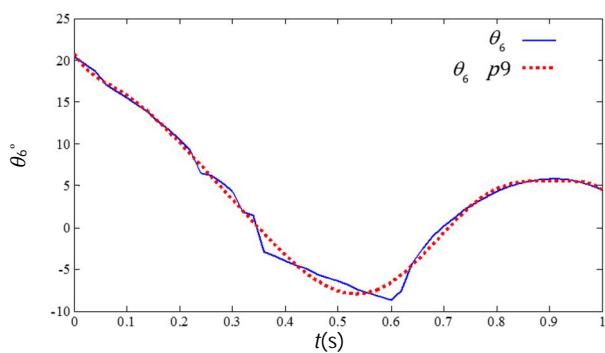
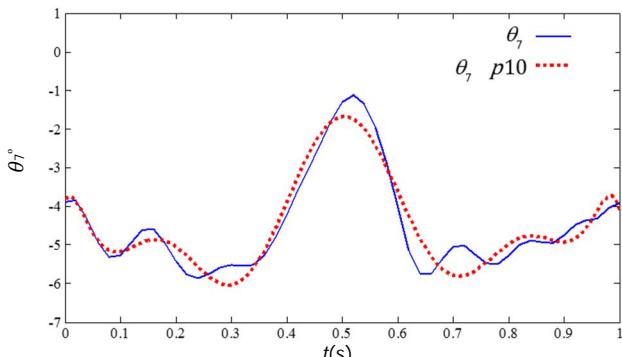
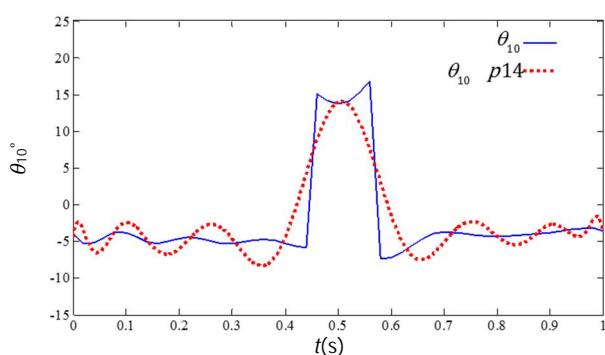
با توجه به شرایط مرزی بیان شده در رابطه (27) و استفاده از چندجمله ای درجه 3، رابطه (28) برای مسیر نقطه ی گشتاور صفر در راستای x_0 به دست می آید:

$$X_{\text{zmp}}(t) = 0.171t^3 - 0.2635t^2 + 0.0445 \quad (28)$$

از آنجاکه $Z_{\text{zmp}} = 0$ در وسط محدوده قابل قبول قرار دارد، می تواند به عنوان گزینه دلخواه در راستای محور z_0 انتخاب شود. پس از حل دو معادله (22) و (23)، حرکت تقریبی لگن در دو راستای x_0 و z_0 به دست می آید. با الگوگیری از انسان، برای حرکت لگن در راستای y_0 ، تابع نیم سینوسی انتخاب شده است.



شکل 11 موقعیت محورهای x_0 و y_0 نسبت به کف پا

شکل 15 منحنی مسیر مطلوب برای زاویه زانوی پای تکیه‌گاه حول محور Z_0 شکل 16 منحنی مسیر مطلوب زاویه بین لگن و ران پای تکیه‌گاه حول محور Z_0 شکل 17 منحنی مسیر مطلوب زاویه بین لگن و ران پای تکیه‌گاه حول محور x_0 شکل 18 منحنی مسیر مطلوب زاویه بین لگن و ران پای تابخورنده حول x_0

شکل‌ها، هر متغیر مفصلی با دو منحنی نشان داده شده است. یکی از منحنی‌ها جواب حاصل از روش عددی بوده که با خط توپر مشخص شده است و دیگری، تقریبی از آن جواب به کمک توابع چندجمله‌ای برای استفاده در محاسبه پایداری است که با منحنی خط چین نمایش داده شده است. درجه چند جمله‌ای شکل در قسمت راهنمای آن با یک عدد نشان داده شده است (به عنوان نمونه: 8 در شکل 13، به معنی چند جمله‌ای درجه 8 می‌باشد).

همچنین از شکل‌های (13) الی (22) مشاهده می‌شود که وضعیت ابتدایی هر مفصل با اندازه منفی وضعیت انتهایی مفصل متناظر در پای دیگر برابر است که این به معنی ارضاعی قید سینماتیکی مسیر مفاصل و توابع حرکت بوده و نشان می‌دهد که پای تابخورنده در انتهای گام به وضعیت پیکربندی پای تکیه‌گاه در ابتدای گام می‌رسد و این موضوع صحت مسیر مفاصل بسته

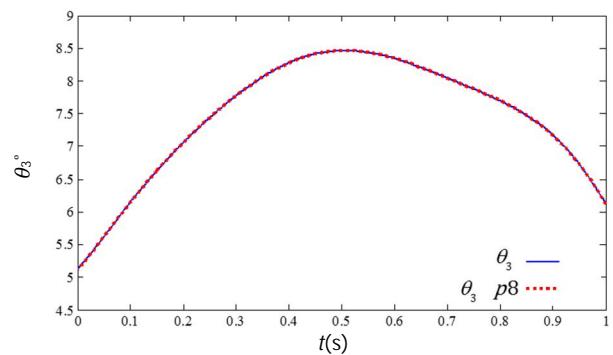
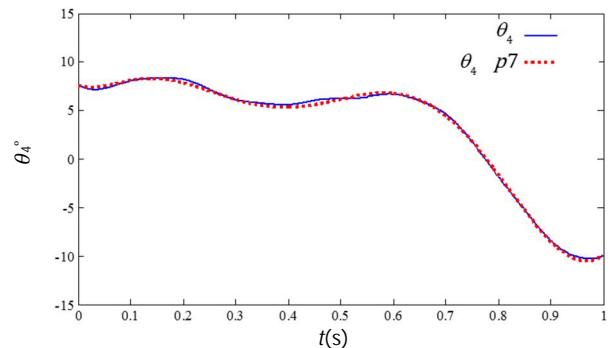
آمده را نشان می‌دهد.

به منظور پایدار بودن ربات در حین گام برداشتن، لازم است تا قید نقطه‌ی گشتوار صفر ارضاعی شود. معادله‌های مذکور در دو راستای x_0 و Z_0 با روابط (29) و (30) بیان می‌شود [28].

$$X_{zmp} = \frac{\sum_i m_i \ddot{x}_i y_i - \sum_i m_i (\ddot{y}_i + g) x_i - \sum_i I_{iz} \ddot{\theta}_{iz}}{\sum_i m_i (\ddot{y}_i + g)} \quad (29)$$

$$Z_{zmp} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{y}_i + g) z_i - \sum_i m_i \ddot{z}_i y_i - \sum_i I_{ix} \ddot{\theta}_{ix}}{\sum_i m_i (\ddot{y}_i + g)} \quad (30)$$

که در معادلات (29) و (30) g بردار گرانش، m_i ، I_{ix} و I_{iz} به ترتیب جرم و ممان اینرسی عضو i ام ربات حول دو راستای x_0 و Z_0 ، همچنین \ddot{x}_i ، \ddot{y}_i ، \ddot{z}_i و $\ddot{\theta}_{ix}$ و $\ddot{\theta}_{iz}$ به ترتیب شتاب‌های خطی اعضاء در راستای محورهای x_0 ، y_0 و z_0 و شتاب‌های زاویه‌ای آن‌ها حول محورهای x_0 و Z_0 می‌باشند.

شکل 13 منحنی مسیر مطلوب برای زاویه مج پای تکیه‌گاه حول محور x_0 شکل 14 منحنی مسیر مطلوب برای زاویه مج پای تکیه‌گاه حول محور x_0

شتاپ‌های خطی و زاویه‌ای اعضای ربات از رابطه (31) به دست می‌آیند.

$$\ddot{X} = J(q)\ddot{q} + \left(\frac{d}{dt}J(q) \right) \dot{q} \quad (31)$$

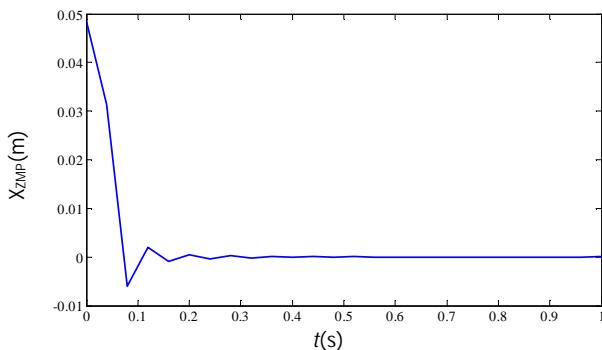
به طوری که در معادله (31) داریم:

$$\ddot{X} = \begin{bmatrix} \ddot{x} & \ddot{y} & \ddot{z} & \ddot{\theta}_x & \ddot{\theta}_y & \ddot{\theta}_z \end{bmatrix}^T \quad (32)$$

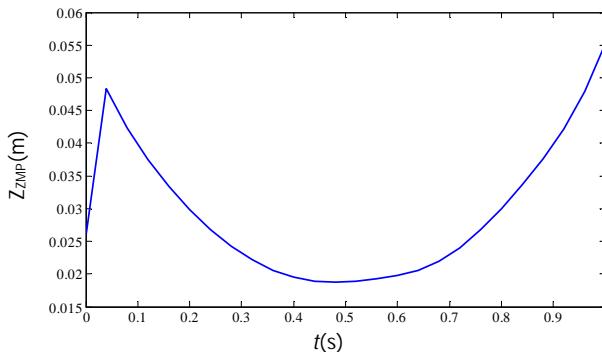
در نهایت با جایگذاری مسیرهای طراحی شده متغیرهای مفصلی، مطابق با شکل‌های 13 تا 22، در معادلات (29) و (30) مربوط به قید نقطه‌ی گشتاور صفر، منحنی شکل‌های 23 و 24، در دو راستای x_0 و z_0 حاصل می‌شود. همان‌طور که از شکل‌های 23 و 24، مشاهده می‌شود، منحنی‌های نقطه‌ی گشتاور صفر با توجه به روابط (24) الی (26) و شکل 11، از محدوده‌ی مجاز چند ضلعی پایی تکیه‌گاهی ربات، تجاوز نکرده و این به معنای پایداری ربات در گام حرکت می‌باشد.

5- نتیجه گیری

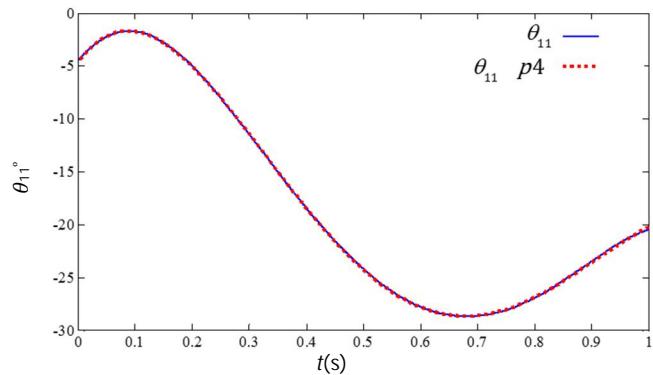
در این مطالعه طراحی مسیر برای راه رفتن یک ربات دو پای 9 عضوی مورد بررسی قرار گرفت و قیدهای حرکتی ربات به منظور پایداری راه رفتن بررسی گردید. هدف یافتن گام پایدار و کنترل راه رفتن ربات دوپای سه بعدی با 16 درجه آزادی بود، که برای سیستم مورد مطالعه مسیرهای پایدار برای ربات دوپا به کمک قید فرضی نقطه گشتاور صفر برای حالت وجود مفصل فعل می‌باشد. منحنی پنجه پا بدست آمد. با توجه به نحوه راه رفتن انسان، حرکت مفصل پنجه به صورت دو ضابطه‌ای تعریف شد، به طوری که در نصف بازه زمانی گام کف پا به طور کامل بر روی زمین قرار دارد و در نیم بازه زمانی دیگر پای تکیه‌گاه تنها بر روی پنجه روی زمین قرار می‌گیرد. نتایج نشان داد که با توجه به الگوریتم پیشنهادی، طراحی مسیر انجام شده، باعث قرار گرفتن نقطه گشتاور صفر در داخل چند ضلعی تکیه گاهی شد و در نتیجه ربات دو پا دارای گام پایدار خواهد بود.



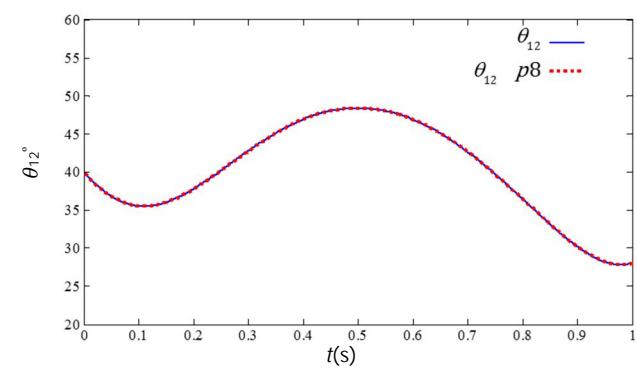
شکل 23 مسیر نقطه گشتاور صفر در راستای محور z_0 در حین گام



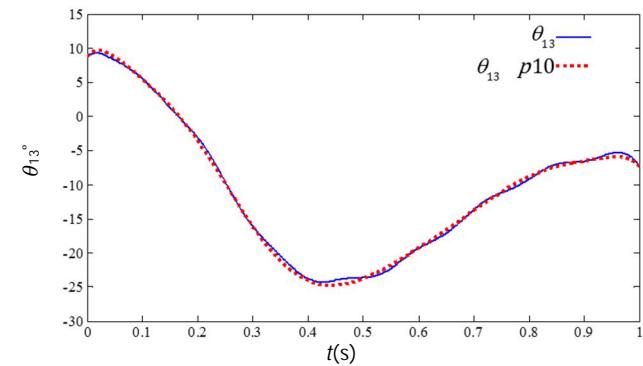
شکل 24 مسیر نقطه گشتاور صفر در راستای محور z_0 در حین گام



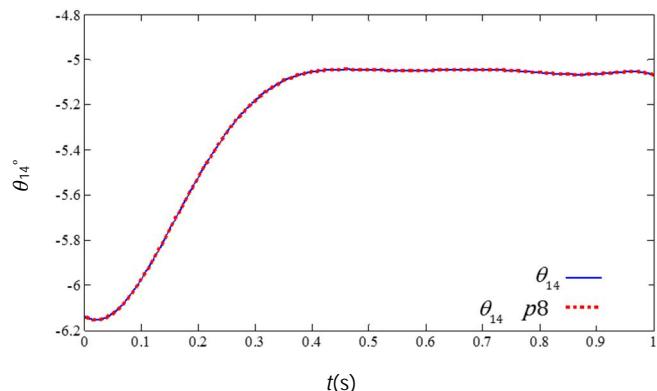
شکل 19 منحنی مسیر مطلوب زاویه بین لگن و ران پای تابخورنده حول محور z_0



شکل 20 منحنی مسیر مطلوب زاویه زانوی پای تابخورنده حول محور z_0



شکل 21 منحنی مسیر مطلوب زاویه مچ پای تابخورنده حول محور z_0



شکل 22 منحنی مسیر مطلوب زاویه بین لگن و ران پای تابخورنده حول x_0

6- مراجع

- [15] K. Yamamoto, T. Sugihara, Y. Nakamura, Toe joint mechanism using parallel four-bar linkage enabling humanlike multiple support at toe pad and toe tip, in *Proceedings of Humanoid Robots, 7th IEEE-RAS International Conference*, Pittsburgh, PA, pp. 410 – 415, 2007.
- [16] E. Kouchaki, M.J. Sadigh, Effect of toe-joint Bending on biped gait performance , in *Proceedings of Robotics and Biomimetics (ROBIO), IEEE International Conference*, Tianjin, pp. 697 – 702, 2010.
- [17] E. Kouchaki, M.J. Sadigh, C.Q. Wu, Effects of Constraints on Standing Balance Control of a Biped with Toe Joints, *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 9, No. 3, pp. 1250016(1-26), 2012.
- [18] M. Ezati, M. Khadiv, S.A.A. Moosavian, Dynamics modeling of a biped robot with active toe joints, in *Proceedings of Robotics and Mechatronics (ICRoM), Second RSI/ISM International Conference*, Tehran, pp. 107-112, 2014.
- [19] R.P. Kumar, N. Handharu, J. Yoon; G.S Kim, Hybrid toe and heel joints for biped/humanoid robots for natural gait, in *Proceedings of Control, Automation and Systems, ICCAS '07 International Conference*, pp. 2687 - 2692, 2007.
- [20] S. Kajita, F. Kanehiro,K. Kaneko, K. Fujiwara, A realtime pattern generator for biped walking, in *Proceeding of Robotics and Automation ICRA '02. IEEE International Conference*, pp. 31-37, 2002.
- [21] J. Denk, G. Schmidt, Synthesis of a walking Primitive Database for a Humanoid Robot using Optimal Control Techniques, in *Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Tokyo, Japan, pp. 319–326, 2001.
- [22] Q. Wu, C.Y.A. Chan, Design of energy efficient joint profiles for a planar five-link biped robot. in *Proceedings 2001 IEEE International Symposium Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pp. 35- 40, 2001.
- [23] M. Cheng, C. Lin, Dynamic biped robot locomotion on less structured surfaces, in *Proceedings of Robotica*, pp. 163-170, 2000.
- [24] M. Vukobratović, B. Borovac, V. Potkonjak, ZMP: A review of some basic misunderstandings, *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 3, No. 2, pp. 153-175, 2006.
- [25] T. Wang, C. Chevallereau, D. Tlalolini, Stable walking control of a 3D biped robot with foot rotation, in *Proceedings of Robotica Cambridge University Press*, Vol. 32, No 4, pp. 551-570, 2013.
- [26] J. Rose, J.G. Gamble, *Human Walking*, Third Edition, Lippincott Williams & Wilkins, 2005.
- [27] S. A. A. Moosavian, M. Alghoneh, A. Tokhmar, Stable Trajectory Design for Biped Robot Locomotion, in *The 15th International Conference of Mechanical Engineering*, Theran, IRAN, 2007. (In Persian)
- [28] M. Y. Shieh, C. S. Chen, C. H. Chuang, Y. R. Liou, J. H. Li, Gait detection based stable locomotion control system for biped robots, *Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 64, No. 5, pp. 1431-1440, 2012.
- [1] J.H. Park, H.C. Cho, An online trajectory modifier for the base link of biped robots to enhance locomotion stability, in *Proceeding of Robotics and Automation, ICRA '00. IEEE International Conference*, San Francisco, Vol. 4, pp. 3353 - 3358, 2000.
- [2] C. Chevallereau, G. Bessonnet, G. Abba, Y. Aoustin, *Bipedal Robots: Modeling, Design and Walking Synthesis*, New York: Wiley, 2008.
- [3] M. R. A. Saavedra, *stable locomotion of humanoid robots based on mass concentrated model*, PhD Thesis, University of Madrid, Madrid, 2008.
- [4] H. Miura, I. Shimoyama, Dynamic walk of a biped, *International Journal of Robotics Research*, Vol. (2)3,pp. 60-74, 1984.
- [5] R. Naghibi, A. Akbarzadeh Tootoonchi, Design and control of 13 degree of freedom of biped robot considering statistical curve of human movement, in *The 11th conference of Mechanical Engineering*, Tabriz University, Iran, 2010.(In Persian)
- [6] R. Naghibi, A. Akbarzadeh Tootoonchi, Design and simulation of 14 degree of freedom of biped robot considering statistical curve of human movement, in *The 12th conference of Mechanical Engineering*, Babol, Iran, 2012.(In Persian)
- [7] Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko , H. Arai, N. Koyachi, K. Tanie, Planning walking patterns for a biped robot, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 3, pp.280-289, 2001.
- [8] D. Tlalolini, C. Chevallereau, Y. Aoustin, Human-Like Walking: Optimal Motion of a Bipedal Robot With Toe-Rotation Motion, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 16 , Issue: 2 , pp. 310-320, 2001.
- [9] C.K. Ahn, M.C. Lee, S.J. Go, Development of a biped robot with toes to improve gait pattern, in *Proceeding of Advanced Intelligent Mechatronics, 2003 IEEE/ASME International Conference*, Vol.2, pp. 729 – 734, 2003.
- [10] L. Wang, Z. Yu, Q. Meng, Z. Zhang, Influence Analysis of Toe-joint on Biped Gaits, In *Proceedings of Mechatronics and Automation, the 2006 IEEE International Conference*, pp. 1631 - 1635 , 2006.
- [11] Yu. Ogura, K. Shimomura, H. Kondo, A. Morishima, T. Okubo, S. Momoki, H. O. Lim, A. Takanishi, Human-like walking with knee stretched, heel-contact and toe-off motion by a humanoid robot, In *Proceedings of Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference*, Beijing, pp. 3976 – 3981, 2006.
- [12] R. Sellaouti, O. Stasse, S. Kajita, K. Yokoi, A. Kheddar, Faster and Smoother Walking of Humanoid HRP-2 with Passive Toe Joints, in *Proceedings of Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference*, Beijing, pp. 4909-4914, 2006.
- [13] S. Kajita, K. Kaneko, M. Morisawa, S. Nakaoka, H. Hirukawa, ZMP-based Biped Running Enhanced by Toe Springs , in *Proceedings of Robotics and Automation, the 2007 IEEE International Conference* , Roma , pp. 3963 – 3969, 2007.
- [14] K. Miura, M. Morisawa, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Kaneko, K. Yokoi, Human-like walking with toe supporting for humanoids, in *Proceedings of Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE/RSJ International Conference, pp. 4428 – 4435, 2011.