



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

حسام خوافی¹، حبیب احمدی^{2*}

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

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

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

چکیده

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

ربات‌های دوپای یکی از انواع ربات‌های پادار است که یافتن مسیر پایدار، 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 پایدار برای یک ربات 9 عضوی به کمک معیار پایداری نقطه گشتاور صفر 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 حالتی است که در آن کف 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 خطا، مسیرهای مطلوب ربات دوپا به دست می‌آید.

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. عمده 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 دابلو-ال-10-آر را با 10 مفصل محرک ارائه کرد. این ربات که توانایی حرکت به جلو، عقب و چرخش را داشت و هرگام را تنها در 4/4 ثانیه می‌پیمود، موفقیت بزرگی به حساب می‌آمد و بالاخره مدل بهبود یافته دبلو ال-10-آر با نام دابلو-ال-10-آر-دی در سال 1984 با زمان 1/3 ثانیه برای هر گام، اولین موفقیت در ساخت ربات کاملاً دینامیکی بود. شرکت هوندای ژاپن که یکی از پیشگامان طراحی و ساخت ربات‌های انسان‌نما می‌باشد، در سال 2000 از شاهکار خود، ربات آسیمو رونمایی کرد. این ربات انسان‌نما با 1/4 متر قد و 26 درجه آزادی در حال حاضر، یکی از پیشرفته‌ترین ربات‌های انسان‌نما 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 دوپای صورت گرفته است. این دسته از ربات‌ها به دلیل توانایی حرکتی خود، قابلیت‌های خاص و منحصر به فردی مانند بالارفتن از پله، حرکت در زمین‌های ناهموار و کارکردن در شرایطی مثل محیط زندگی انسان را نسبت به دیگر ربات‌های متحرک دارا می‌باشند. 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 به‌طوریکه 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

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 دویدن تمرکز کرده و به منظور بهبود سرعت دویدن در ربات HRP-2LR، مفصل فتری غیرفعال پنجه را به آن افزودند و رباتی با نام HRP-2LT را معرفی کردند. آنها بر مبنای معیار ZMP روشی برای تولید مسیر مفصل 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 ویژگی 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 را بصورت فعال در نظر گرفته‌اند. در راستای این تحقیقات، کوچکی و صدیق [16] تاثیر مفصل پنجه فعال را در بهبود عملکرد راه رفتن یک ربات صفحه ای 9 عضوی در صفحه پیکانی بررسی نمودند. آنها نشان دادند که وجود مفصل پنجه فعال 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 گشتاورها، جهت جلوگیری از لغزش پا، دوران حول کف پا و عدم جداسدن پای تکیه گاه از زمین را مورد بررسی قرار دادند. عزتی و همکاران [18] به منظور حل دینامیک معکوس و بهبود مدل دینامیکی ربات دوپای دارای پنجه فعال، روش جدیدی را ارائه نمودند. مدل دینامیکی ایشان در فاز دوتکیه‌گامی به دو زیر فاز بر اساس عملکرد پنجه تقسیم می‌شود. 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 انضمام تمام کف پای جلویی روی زمین قرار می‌گیرد؛ در نهایت ایشان با بررسی ارضای قید ZMP، صحت الگوی ارائه شده جهت راه رفتن ربات دو پا را بررسی نمودند. کومار و همکاران [19] مفصل پنجه ترکیبی فعال/غیرفعال 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 گشتاور مورد نیاز در عملکرد می شود.

اکثر پژوهش‌های حاضر که پنجه پا را در مطالعات خود لحاظ نموده‌اند، به صورت صفحه‌ای بوده و تعداد معدودی از محققین ربات دوپای سه بعدی را با پنجه فعال مورد بررسی قرار داده‌اند. این درحالیست که بررسی مدل سه بعدی برای ربات دوپا با وجود دوران فعال مفصل پنجه کف پا، باعث معنی‌دار تر شدن گام ربات و افزایش طول گام و باعث نزدیک‌تر شدن حرکت پای ربات به حرکت پای انسان می‌شود. لذا در این مطالعه با در نظر گرفتن حرکتی برای مسیر مفصل پنجه پا بصورت فعال، طراحی مسیر برای ربات دوپای 16 درجه آزادی انجام شده است. روش مورد استفاده برای حل معادلات سینماتیک معکوس این ربات، استفاده از قیدی برای حدس اولیه حرکت لگن می باشد. با استفاده از این روش، معادله اولیه قابل قبولی برای حرکت ربات به دست می‌آید و سپس به کمک الگوریتم جدیدی، مسیر حرکت مفصل ربات محاسبه می‌شود. سپس با بررسی پایداری نقطه گشتاور صفر ربات و به کمک الگوریتم دیگری مبتنی بر آزمون و خطا، حرکت مطلوب ربات و مسیرهای مطلوب حرکت مفصل به‌دست می‌آید.

رفتن ازپله، لی‌لی‌کردن، دویدن و تشخیص چهره را نیز دارد [3]. در سال 1984، میورا و شیمویاما [4] ربات‌های دوپای خانواده بایپر را ساختند که به‌طور استاتیکی ناپایدار ولی درحالت 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 بالاتنه، 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 درکف 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 می رسد؛ 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 فعال 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 محدودیت های حرکت پا، روشی برای تولید حرکت های مختلف پای تاب خورنده ارائه دادند. ربات مورد مطالعه ایشان، بدون مفصل پنجه بود؛ اما با در نظر گرفتن دوران پا حول نوک پنجه ای آن، به طراحی الگوی مسیر راه رفتن ربات پرداختند. تلالولینی و همکاران [8] برای یک ربات دوپای چهارده درجه آزادی و سه بعدی، در فاز یک تکیه گامی، دوران پای تکیه گاه حول نوک پنجه پا را در نظر گرفته و با بررسی حرکت ربات به صورت فازهای یک تکیه گامی متوالی و دوتکیه گامی لحظه ای نشان دادند که دوران حول نوک پنجه در حین حرکت سریع، باعث کاهش مصرف انرژی لازم برای حرکت می شود.

تعداد دیگری از محققین در مطالعات خود، مفصل پنجه پا را بصورت غیر فعال لحاظ نموده اند. در راستای این تحقیقات، اهن و همکاران [9] یک ربات دوپای چهارده درجه آزادی با مفصل پنجه غیرفعال را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که وجود مفصل پنجه باعث نزدیک‌تر شدن گام ربات به گام انسان شده و سرعت زاویه ای بیشینه ای مفصل 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 غیرفعال مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که وجود مفصل پنجه باعث کاهش دامنه حرکت زوایای مفصل پا و افزایش پایداری ربات در فاز دو تکیه گامی شده و این موضوع موجب کنترل راحت ربات در حرکت می شود. اگورا و همکاران [11] مفصل پنجه غیر فعال را برای ربات وایبان-تو-آر با زانوهای کشیده به کار بردند. ربات فوق شامل سیزده درجه آزادی فعال و دو درجه آزادی غیر فعال به عنوان مفصل پنجه در پایین تنه ربات می‌باشد. این تحقیق به کمک بهینه سازی الگوریتم ژنتیک بر پایه معیار نقطه گشتاور صفر¹ (ZMP) به تولید الگوی راه رفتن پرداخته است. سلوتی و همکاران [12] با بکار بردن مفصل پنجه غیرفعال برای ربات مدل HRP-2TJ نشان دادند که به کمک این

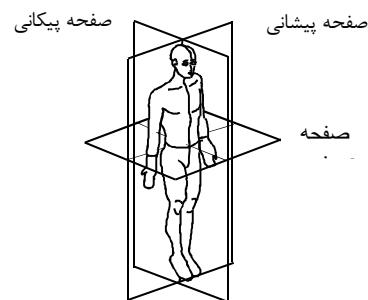
2- ساختار ربات

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.

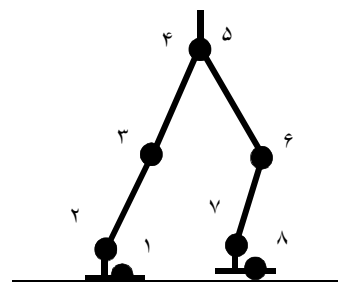
ساختار شکل 2 مدل ربات مورد بررسی در این تحقیق را در صفحه پیکانی نمایش می‌دهد. همانطور که از شکل فوق مشاهده می‌شود، ربات مورد نظر در این صفحه دارای 8 مفصل، شامل دو مفصل در پنجه پا است که با دایره‌های سیاه نشان داده شده‌اند.

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 مچ حاصل می‌شود. ربات مورد مطالعه در صفحه پیشانی چنین ساختاری دارد.

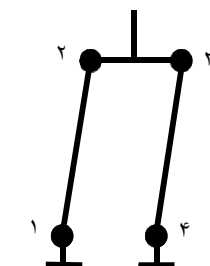
مفاصل ربات در صفحه عرضی، فقط در ربات‌های پیشرفته انسان‌نما وجود دارد، این ربات‌ها در صفحه عرضی معمولاً بین یک تا پنج مفصل دارند. در شکل 4، ربات مورد مطالعه در صفحه عرضی با چهار مفصل نشان داده شده است.



شکل 1 صفحات حرکتی راه رفتن



شکل 2 پیکر بندی ربات مورد مطالعه در صفحه پیکانی



شکل 3 پیکر بندی ربات مورد مطالعه در صفحه پیشانی

شکل 4 پیکر بندی ربات مورد مطالعه در صفحه عرضی

راه رفتن یک چرخه تکرار شونده است به طوری که 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 نامیده می‌شود. به حالتی که دو پا در تماس با زمین باشند، 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 مچ 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 تقارن 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 تعمیم یافته‌ای مطابق با رابطه (1) در نظر گرفته شده است:

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

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

1- Stance foot
2- Hip
3- Metatarsal

جدول 1 طول اعضای ربات

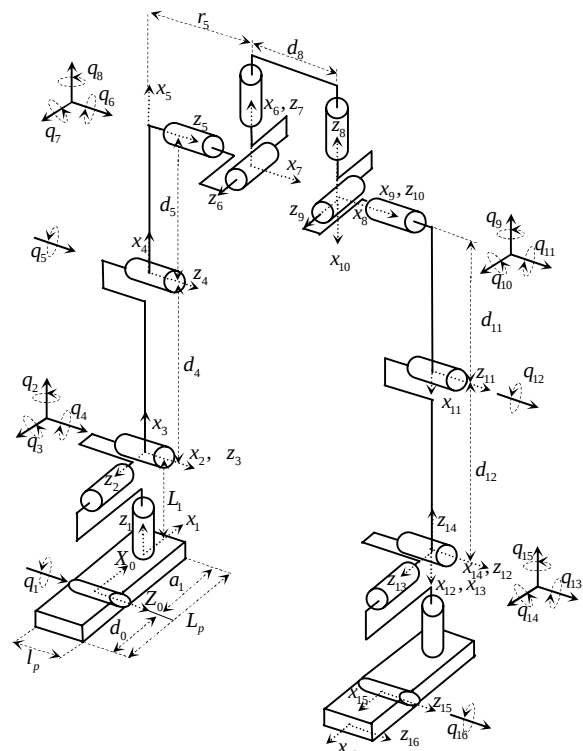
پارامترهای ربات	اندازه پارامترها (mm)
d_0	96
a_1	89
L_p	207
L_1	59/25
d_4	392
d_5	392
r_5	30
d_8	190
l_p	110

4- طراحی مسیر

در فرآیند حرکت ربات دوپا یک از موضوعات مهم، بحث تعادل است. ربات‌های دوپا به‌طور 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 چشم‌پوشی 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، واکوبراتویچ² 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- هارتنبرگ

عضو	d_i	α_i	a_i	θ_i
1	صفر	$-\pi/2$	a_1	θ_1
2	L_1	$\pi/2$	صفر	$\theta_2 - \pi/2$
3	صفر	$\pi/2$	صفر	$\theta_3 + \pi/2$
4	صفر	صفر	d_4	θ_4
5	صفر	صفر	d_5	θ_5
6	r_5	$-\pi/2$	صفر	θ_6
7	صفر	$-\pi/2$	صفر	$\theta_7 - \pi/2$
8	صفر	صفر	d_8	θ_8
9	صفر	$\pi/2$	صفر	θ_9
10	صفر	$-\pi/2$	صفر	$\theta_{10} - \pi/2$
11	صفر	صفر	$d_{11} = d_5$	θ_{11}
12	صفر	صفر	$d_{12} = d_4$	θ_{12}
13	$r_{11} = r_5$	$\pi/2$	صفر	θ_{13}
14	صفر	$-\pi/2$	صفر	$\theta_{14} + \pi/2$
15	$L_{15} = -L_1$	$-\pi/2$	$a_{15} = a_1$	$\theta_{15} - \pi/2$
16	صفر	صفر	$d_{16} = d_1$	θ_{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- هارتنبرگ¹ بر روی اعضای ربات قرار می‌گیرند. 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 با قد 170 سانتی‌متر، مطابق جدول 1 در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در این ربات فرض شده تمامی عضوها صلب و همگن می‌باشند.

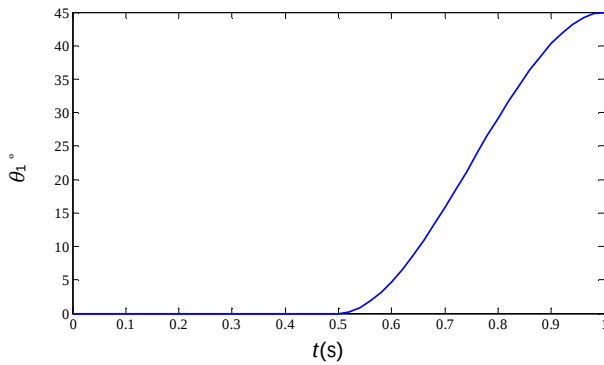
برای تحلیل سینماتیک، به رابط i دستگاه مختصات $O_iX_iY_iZ_i$ متصل شده است و رابطه ماتریس تبدیل همگن بین دستگاه‌های مختصات به صورت رابطه (2) می‌باشد.

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

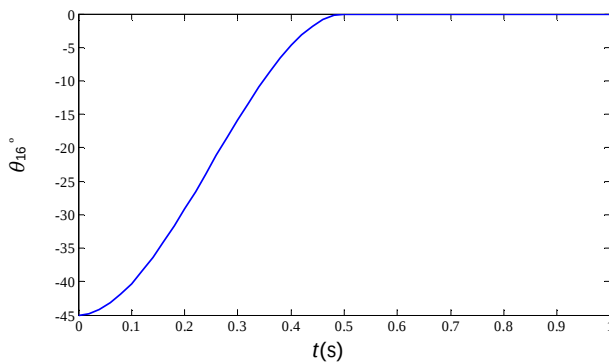
که در رابطه (2) هر ماتریس تبدیل بین دو دستگاه متوالی به صورت رابطه (3) نوشته می‌شود:

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

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



شکل 6 مسیر مطلوب مفصل 1



شکل 7 مسیر مطلوب مفصل 16

قید با نام قید جهت‌گیری کف پا شناخته می‌شود. به منظور 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)، a و $n \cdot s$ 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.

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

در رابطه (10)، ξ خود دارای سه مؤلفه است، مؤلفه y آن، حول محور یاو 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 $Y_{s.a.}$ 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 مفصل پنجه پا، با الگویی 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 (پنجه پای راست) ارائه شده است.

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

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

در معادلات (4) و (5)، T_s ، زمان یک گام است. شرایط مرزی (4) و (5) بدین معنی است که در حین حرکت پای تاب خورنده، برای نیمی از زمان حرکت، پنجه و پاشنه پای تکیه‌گاه تماماً بر روی زمین قرار دارند و در نیمه زمانی دوم حرکت پای تاب خورنده، پاشنه پای تکیه‌گاه با سرعت صفر شروع به بلند شدن از سطح زمین کرده و با سرعت صفر به مقدار نهایی خود در زاویه $\pi/4$ 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 پاشنه پای تاب خورنده شرایط مرزی بصورت (7) و (8) در نظر گرفته شده است.

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

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

شرایط فوق بدین معنی است که مفصل پنجه پای تاب خورنده، ابتدا با زاویه $\pi/4$ از زمین بلند شده و در انتهای نیمی 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 تماس 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.

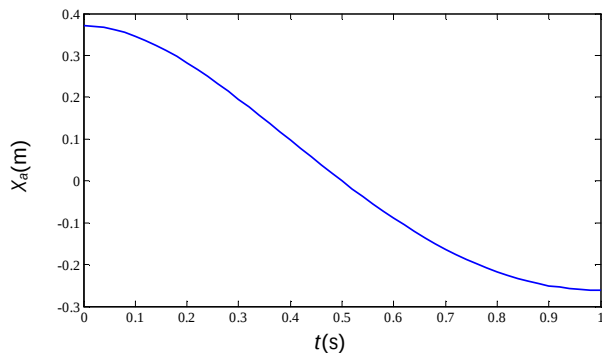
$$Z_{s.a.} = \text{const.} \quad (19)$$

$$\xi_{\text{hip},z} = 0 \quad (20)$$

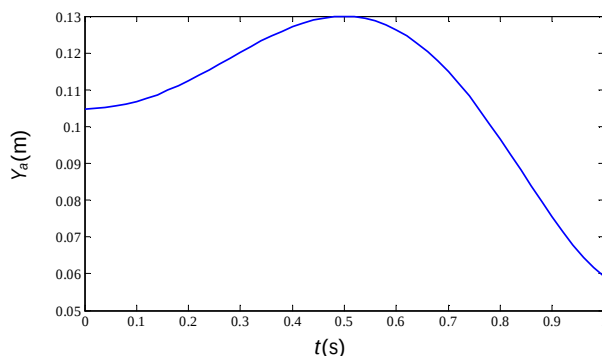
$$\xi_{\text{hip},x} = 0 \quad (21)$$

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 می شوند، صفر فرض شده اند. این مفاصل که عامل حرکت حول محور عمودی یا همان یاء ربات می باشند 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 خورنده ربات، به کمک سینماتیک معکوس، مسیر حرکت مفاصل را تعیین می کند. در این مقاله، هرچند حرکت مچ 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 متمرکز 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 می شوند. با این شرایط معادله نقطه گشتاور صفر، با در



شکل 9 مسیر حرکت مچ پا در راستای محور X_0



شکل 10 مسیر حرکت مچ پا در راستای محور Y_0

پنجه پای چپ از زمین شروع شده و با تماس کامل همان پا به زمین به انتها می رسد. با توجه به هندسه ربات و مسیر مفاصل پنجه پا، مچ پا در حین حرکت از نقاطی با موقعیت و سرعت مشخص در شکل 8، عبور می کند که با استفاده از آن ها و تقریب چندجمله ای، حرکت مچ پا در صفحه پیکانی به دست می آید. این نقاط با روابط (13) تا (16) تعیین شده اند.

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

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

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

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

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 می باشد؛ پارامتر T_m نشان دهنده زمانی است که مچ پای ربات در بالاترین ارتفاع خود از سطح زمین قرار می گیرد. در این مطالعه مقدار T_m برابر با 0/5 ثانیه در نظر گرفته شده است.

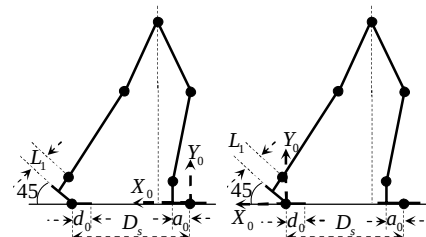
با توجه به شرایط مرزی (13) تا (16)، تقریب چندجمله ای های درجه 4 و 5 به ترتیب برای $X_{s.a.}$ و $Y_{s.a.}$ انجام شده و ضابطه تقریبی برای مسیر حرکت مچ پا به صورت معادلات (17) و (18) بر حسب زمان به دست می آید.

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

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

با توجه به معادلات (17) و (18)، منحنی حرکت مچ پای تاب خورنده در حین گام برداشتن ربات در دو راستای محورهای X_0 و Y_0 نسبت به زمان در شکل های 9 و 10 نشان داده شده است.

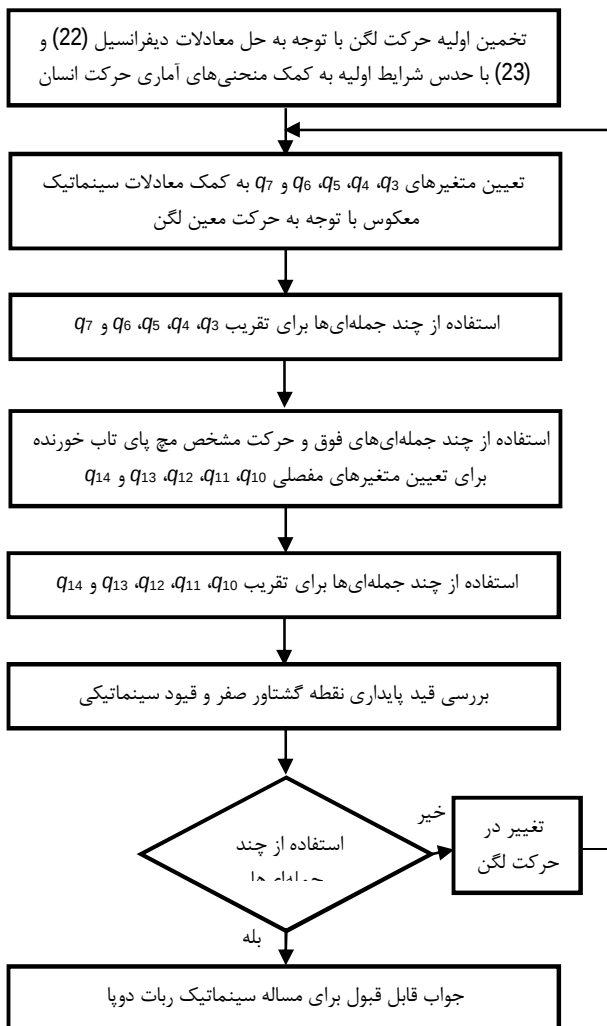
با توجه به منحنی های آماری حرکت انسان در مرجع [26]، در حین راه رفتن انسان، دوران لگن حول محورهای امتداد راه رفتن و محور واقع در صفحه پیشانی نسبتاً ناچیز است و در ربات مورد مطالعه از دوران لگن حول این محورها صرف نظر شده است. همچنین فاصله عمودی دو مچ پا حین



شکل 8 نمای جانبی ربات مورد 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 مچ در فضا و با مجهولات q_3 ، q_4 ، q_5 ، q_6 و q_7 به دست می‌آید. از آنجایی که نتیجه‌ی حل با روش‌های محاسبات عددی، مجموعه‌ای از نقاط برای هرکدام از مجهولات در بازه‌ای از زمان است، جهت ادامه روند حل، برای هرکدام از مجهولات که اکنون توسط مجموعه‌ای از نقاط مشخص شده‌اند، یک تابع چندجمله‌ای تقریبی انتخاب می‌شود. پس از تعیین مجهولات پای راست که همان 5 متغیر مفصلی q_3 ، q_4 ، q_5 ، q_6 و q_7 می‌باشند، با استفاده از حرکت معلوم مچ پای تاب خورنده، متغیرهای مفصلی پای دیگر مشابه آنچه برای پای راست انجام گرفت، محاسبه شده است. پس از تخمین چندجمله‌ای مناسب برای هرکدام از متغیرهای مفصلی q_{10} ، q_{11} ، q_{12} ، q_{13} و q_{14} معادلات قید نقطه‌ی گشتاور صفر مورد بررسی قرار می‌گیرد. اگر این معادلات توسط متغیرهای مفصلی فوق ارضا شوند، مسیرهای مطلوب حرکت ربات به دست آمده‌اند 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 می‌شود. فرآیند حل مسئله در فلوچارت شکل 12، خلاصه شده است.

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



شکل 12 فلوچارت روش حل مسئله برای یافتن مسیر حرکت مفصل

نظرگیری حرکت لگن در راستای X_0 و Z_0 به دو معادله دیفرانسیل با دو مجهول X_{hip} و Z_{hip} مطابق با معادلات (22) و (23) تبدیل می‌شود.

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

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

4-1- مسیر مطلوب نقطه گشتاور صفر

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

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

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

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

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

همان‌طور که از نام‌سای‌های (24)، (25) و (26) مشخص است، انتخاب‌های متعددی برای نقطه‌ی گشتاور صفر مطلوب وجود دارد. در این پژوهش، نقطه‌ی گشتاور صفر با در نظرگیری شرایط مرزی رابطه (27) در راستای محور X_0 انتخاب می‌شود.

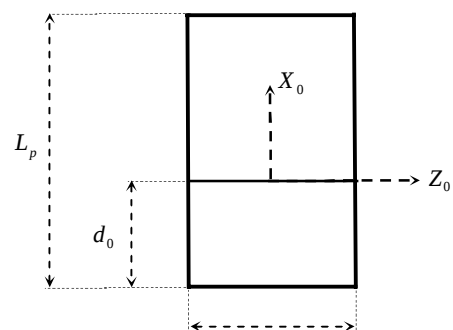
$$X_{zmp} = \begin{cases} \frac{a_1}{2}, & t = 0 \\ 0, & t = \frac{T_s}{2} \\ -\frac{d_0}{2}, & t = T_s \end{cases} \quad (27)$$

با توجه به شرایط مرزی بیان شده در رابطه (27) و استفاده از چندجمله‌ای درجه 3، رابطه (28) برای مسیر نقطه‌ی گشتاور صفر در راستای X_0 به دست می‌آید:

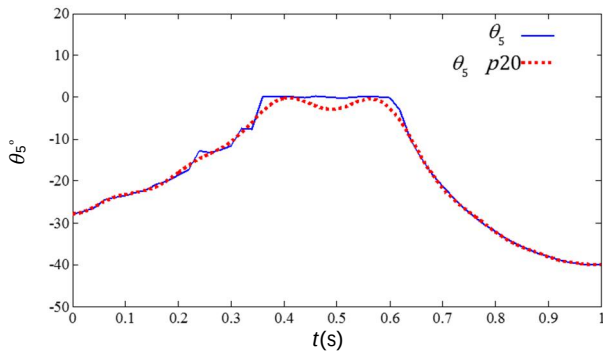
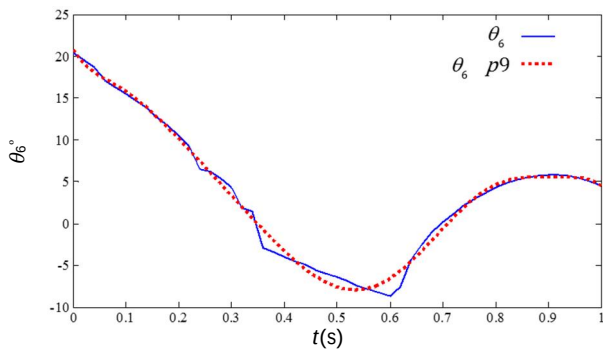
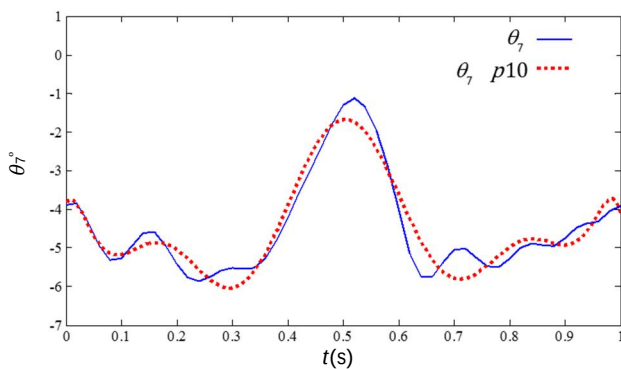
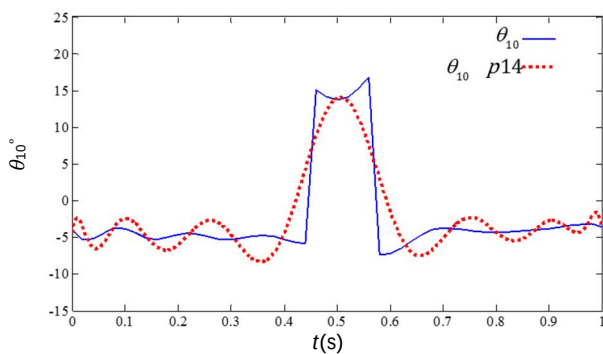
$$X_{zmp}(t) = 0.171t^3 - 0.2635t^2 + 0.0445 \quad (28)$$

از آنجاکه $Z_{zmp} = 0$ در وسط محدوده‌ی قابل قبول قرار دارد، می‌تواند به عنوان گزینه‌ی 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 می‌آید. با الگوگیری از حرکت 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 محور X_0

شکل‌ها، هر متغیر مفصلی با دو منحنی نشان داده شده‌است. 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: $p8$ در شکل 13، به معنی چند جمله‌ای درجه 8 می‌باشد).

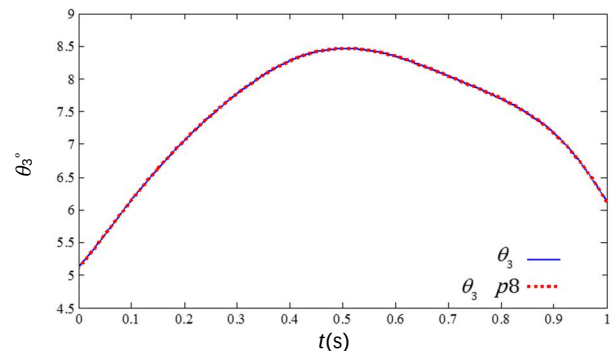
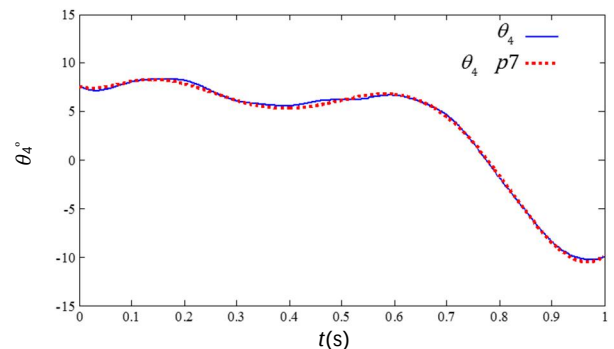
همچنین از شکل‌های (13) الی (22) مشاهده می‌شود که وضعیت ابتدایی هر مفصل با اندازه منفی وضعیت انتهایی مفصل متناظر در پای دیگر برابر است که این به معنی ارضا قید سینماتیکی مسیر مفصل و تناوب حرکت بوده و نشان می‌دهد که پای تاب‌خورنده در انتهای گام به وضعیت پیکربندی پای تکیه‌گاه در ابتدای گام می‌رسد و این موضوع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

به منظور پایداری بودن ربات در حین گام برداشتن، لازم است تا قید نقطه‌ی گشتاور صفر ارضا شود. معادله‌های مذکور در دو راستای X_0 و Z_0 با روابط (29) و (30) بیان می‌شود [28].

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

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

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 مچ پای تکیه‌گاه حول محور X_0 شکل 14 منحنی مسیر مطلوب برای زاویه مچ پای تکیه‌گاه حول محور Z_0

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

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

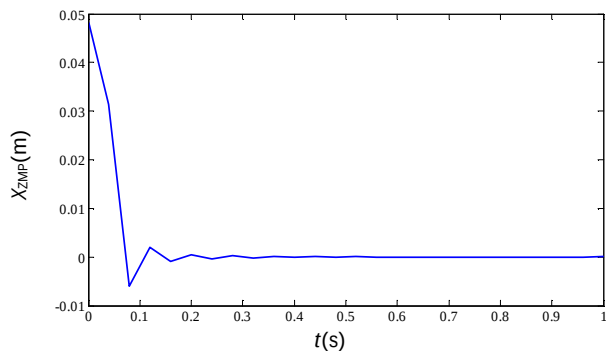
به‌طوری‌که در معادله (31) داریم:

$$\ddot{X} = [\ddot{x} \quad \ddot{y} \quad \ddot{z} \quad \ddot{\theta}_x \quad \ddot{\theta}_y \quad \ddot{\theta}_z]^T \quad (32)$$

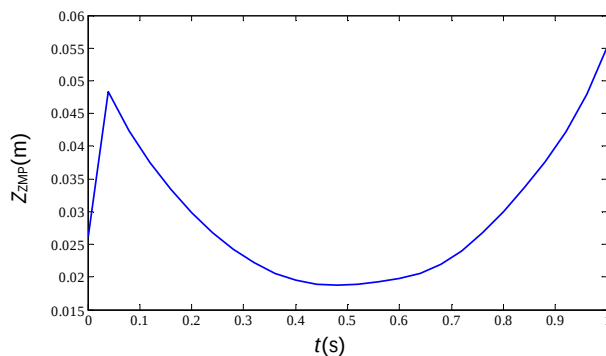
در نهایت با جایگذاری مسیرهای طراحی شده متغیرهای مفصلی، مطابق با شکل‌های 13 تا 22، در معادلات (29) و (30) مربوط به قید نقطه‌ای گشتاور صفر، منحنی شکل‌های 23 و 24، در دو راستای X_0 و Z_0 حاصل می‌شود. همان‌طور که از شکل‌های 23 و 24، مشاهده می‌شود، منحنی‌های نقطه‌ای گشتاور صفر با توجه به روابط (24) الی (26) و شکل 11، از محدوده مجاز چند ضلعی پای تکیه‌گاهی ربات، تجاوز نکرده و این به معنای پایداری ربات در گام حرکت می‌باشد.

5- نتیجه گیری

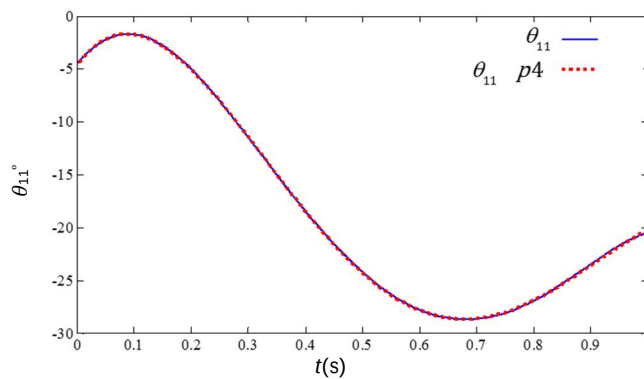
در این مطالعه طراحی مسیر برای راه رفتن یک ربات دو پای 9 عضوی مورد بررسی قرار گرفت و قیده‌های حرکتی ربات به منظور پایداری راه رفتن بررسی گردید. هدف یافتن گام پایدار و کنترل راه رفتن ربات دوپای سه بعدی با 16 درجه آزادی بود؛ که برای سیستم مورد مطالعه مسیرهای پایدار برای ربات دوپا به کمک قید فرضی نقطه گشتاور صفر برای حالت وجود مفصل فعال به عنوان پنجه پا بدست آمد. با توجه به نحوه راه رفتن انسان، حرکت مفصل پنجه به صورت دو ضابطه‌ای تعریف شد، به‌طوری‌که 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.



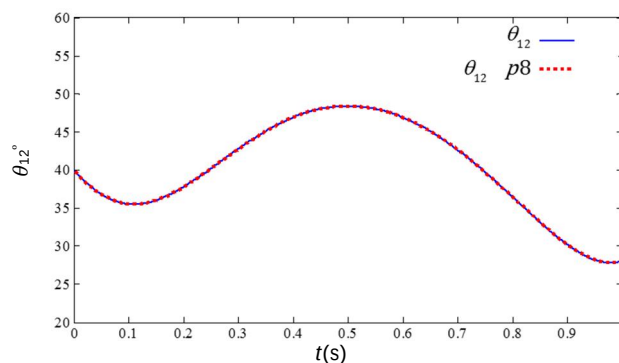
شکل 23 مسیر نقطه گشتاور صفر در راستای محور X_0 در حین گام



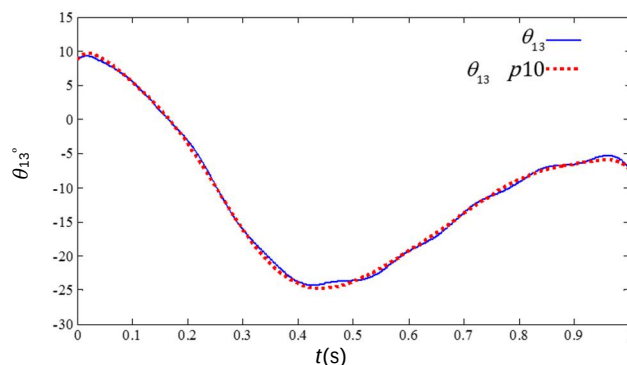
شکل 24 مسیر نقطه گشتاور صفر در راستای محور Z_0 در حین گام



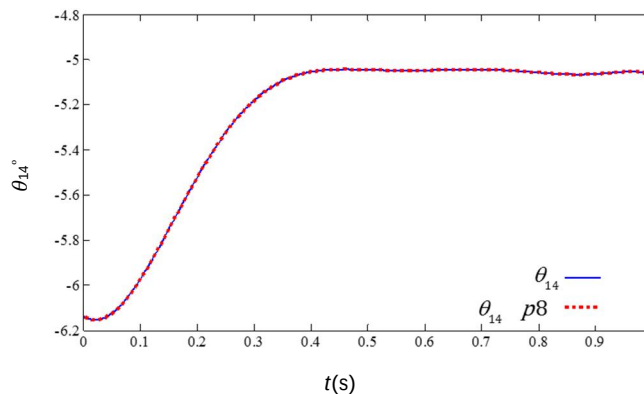
شکل 19 منحنی مسیر مطلوب زاویه بین لگن و ران پای تاب‌خورنده حول محور Z_0



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.