



پیش بینی مسیر گام برداری ربات دوپا همراه با پایداری و بهینه سازی توان مصرفی در فاز تک تکیه گاهی

ویدا شمس اسفندآبادی¹، مصطفی رستمی²، سید محمدعلی رحمتی³، سروش صادق نژاد^{4*}

- 1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی رباتیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
 2- دانشیار، مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
 3- دانشجوی دکتری، مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
 4- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
 * صندوق پستی 158754413، s.sadeghnejad@aut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

برای آنکه ربات قادر باشد بر روی سطوح مختلف حرکت نماید، لازم است که حرکتش را با شرایط مختلف سطح وقف داده و با حرکت مناسب پا و بالا تنه، پایداری خود را تضمین نماید. بسیاری از پارامترهای اساسی حرکت انسان را می توان توسط یک ربات دوپای هفت عضوی صفحه ای بیان نمود. یکی از مسائلی که همیشه در این زمینه مورد توجه محققین می باشد، پیش بینی مسیر حرکتی است که منجر به پایداری و مینیمم شدن انرژی می شود. در این مطالعه با بکارگیری بهینه سازی پارامتری، بدین شرح که زوایای مفصلی بصورت توابع پارامتری تعریف شده و با در نظر گرفتن قیود سینماتیکی که حداکثر و حداقل زوایای مفصلی را تعریف می کنند، مسئله حرکت به شکلی به دست آمده است که پایداری ربات به حداکثر میزان و انرژی آن به حداقل میزان خود برسد و ربات در منطقه ای مجاز پایداری قرار گیرد. به علاوه، سعی بر آن است که از معیار پایداری نقطه ممان صفر برای محاسبه ی پایداری ربات استفاده شود. همچنین آزمایشات تجربی به منظور تحلیل حرکتی راه رفتن فرد سالم در آزمایشگاه صورت گرفته است و نتایج به دست آمده صحت سنجی شده است. در نهایت با توجه به مدل ارائه شده و مسیر پیش بینی شده، ربات می تواند مانند یک فرد خاص حرکت کند. در هر مرحله از مقایسه ی نتایج شبیه سازی مدل ارائه شده با نتایج تجربی متناظر در واقعیت، به منظور اثبات صحت روش های ارائه شده، استفاده گردیده است.

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 13 تیر 1396
 پذیرش: 27 شهریور 1396
 ارائه در سایت: 11 آبان 1396
 کلید واژگان:
 ربات دوپا
 پیش بینی مسیر قدم برداری
 نقطه ممان صفر
 فاز تک تکیه گاهی
 بهینه سازی توان مصرفی

Walking Path Prevision of Biped Robot along with Stability and Optimization of Power Consumption in Single Support Phase

Vida Shams Esfand Abadi¹, Mostafa Rostami², Seyed Mohammad Ali Rahmati², Soroush Sadeghnejad^{3*}

- 1- Faculty of Robotic Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
 2- Department of Biomedical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
 3- Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
 *P.O.B. 158754413, Tehran, Iran, s.sadeghnejad@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 04 July 2017
 Accepted 18 September 2017
 Available Online 02 November 2017

Keywords:
 Biped robot
 Walking path prevision
 ZMP
 Single support phase
 Optimization of Power Consumption

ABSTRACT

The robot has to adapt its movement with the various conditions of surfaces and ensure the stability with the proper motion of its bust and legs in order to be able to move on different surfaces. Several of basic parameters of the gait can be expressed by the planned seven-linked bipedal robot. One of the issues that has always attracted the attention of researchers, in this field, is how to predict the motion path that guarantees the stability and minimizes the energy. In this study, parameter optimization is used which means that, at first, joint angles are defined as a parameter functions and then with respect to kinematics constraints that define maximum and minimum of joint angles, the problem of motion was obtained in the way that stability of robot is maximized and energy is minimized and the robot is put in the permitted stable region. Also, zero moment point scale was used to calculate the stability of robot. Experimental tests for motion analysis for a walking healthy were performed and the results were validated. Finally, due to the presented model and predicted path, the robot can move like a person. Comparison of experimental results and the result of presented model were used in each step to validate the accuracy of the proposed method.

1- مقدمه

آنجا که امروزه ربات های دوپا یکی از نیازهای مبرم در صنعت و دانشگاه به شمار می روند و در حال حاضر تحقیقات زیادی در این زمینه در حال انجام می باشد.

ربات های دوپا به دلیل قابلیت های حرکتی بالا و همچنین شباهت ساختاری به انسان، بیش از سایر ربات های متحرک مورد توجه محققان قرار گرفته اند تا

Please cite this article using:

V. Shams Esfand Abadi, M. Rostami, S. M. A. Rahmati, S. Sadeghnejad, Walking Path Prevision of Biped Robot along with Stability and Optimization of Power Consumption in Single Support Phase, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 1-11, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

می‌کنند و فاقد هرگونه محرک، سنسور و کنترل کننده‌ای می‌باشند. بحث راه روندهای غیرفعال را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد:

1. راه روندهای زانودار

2. راه روندهای بدون زانو

در راه‌روندهای زانودار هر پا متشکل از یک میله صلب به عنوان ران و یک میله صلب دیگر به عنوان ساق و کف پا می‌باشد. محققان با تحلیل این ربات‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که در حین حرکت بایستی زانوی پای تکیه‌گاه قفل و زانوی پای تاب‌خورنده دارای یک مفصل بدون اصطکاک همراه با زانده‌ای برای محدود کردن حرکات ساق باشد. مدل دوپای بدون زانو در واقع ساده‌ترین مدل راه‌رونده‌ها به حساب می‌آید. در این مدل قدم‌زدن دارای دو مرحله است، مرحله‌ی اول تاب خوردن حول یک تکیه‌گاه ثابت و مرحله‌ی دوم، تعویض آنی تکیه‌گاه. مرحله تاب خوردن ربات دقیقاً مشابه یک پاندول دوگانه‌ی صفحه‌ای عمل می‌کند و مرحله انتقال تکیه‌گاه به صورتی آنی از یک پا به پای دیگر انجام می‌شود. با وجود تمام مزایایی که مدل راه‌رونده‌های غیرفعال دارند، دارای نقاط ضعف زیادی نیز می‌باشد. وابستگی شدید مدل به شیب سطح، عدم امکان حرکت در زمین‌های صاف و شیب‌های رو به بالا، عدم امکان تغییر سرعت و طول گام در یک شیب ثابت و... همگی از معایب مدل‌های غیرفعال هستند که به نظر می‌رسد با ایجاد کنترل فعال و تزریق مناسب انرژی به سیستم در نقاط مناسب، می‌توان تا حدود زیادی برخی از این عیوب را برطرف نمود.

در ربات‌های دوپا با مفاصل فعال، ایجاد حرکت توسط محرک‌هایی که در مفاصل ربات وجود دارند، انجام می‌شود. بیشتر تحقیقاتی که هم‌اکنون در مورد ربات‌های دوپا در حال انجام است، مربوط به این دسته از ربات‌ها می‌باشد. کاتو در سال 1973 اولین ربات دوپا به نام واسدا⁶ را در دانشگاه واسدای ژاپن ساخت. رایبرت در سال 1980 اولین ربات تک پا را طراحی نمود. مک‌گیر⁷ در سال 1990 مفهوم ربات‌های دوپای غیرفعال را بیان نمود. شرکت هوندا در سال‌های 1993 تا 1997 اولین ربات‌های انسان‌نما را در سه مدل پی 1، پی 2 و پی 3 ساخت. از جمله مهم‌ترین ربات‌های انسان‌نمایی که امروزه شناخته شده‌اند، می‌توان به آسیمو، ساخت شرکت هوندا، اچ آر پی، ساخت شرکت کاوادا و کیوریو ساخت شرکت سونی اشاره نمود.

فازهای مختلف حرکتی در راه رفتن انسان به دو فاز عمده‌ی تک‌تکیه‌گاهی و دو تکیه‌گاهی تقسیم می‌شود. مدل ربات در فاز تک‌تکیه‌گاهی به یک زنجیره‌ی سینماتیکی باز و در فاز دو تکیه‌گاهی، به یک زنجیره‌ی سینماتیکی بسته تبدیل خواهد شد. بنابراین در فاز دو تکیه‌گاهی، دو قید هولونومیک⁸ نسبت به فاز تک‌تکیه‌گاهی به سیستم اضافه می‌گردد. فاز دو تکیه‌گاهی هنگامی اتفاق می‌افتد که هر دو پا بر روی زمین قرار می‌گیرد و کل بدن به سمت جلو حرکت می‌کند (شکل 1). این فاز یک زنجیره‌ی سینماتیکی بسته ایجاد خواهد کرد. فاز تک‌تکیه‌گاهی هنگامی اتفاق می‌افتد که یک پا بر روی زمین لولا شده و پای دیگر به طرف جلو حرکت می‌کند (شکل 2). این فاز یک زنجیره‌ی سینماتیکی باز ایجاد خواهد کرد. همچنین در انتهای این فاز پدیده‌ی ضربه اتفاق خواهد افتاد. جنبه‌های مختلف مطالعه ربات‌های دوپا عبارتند از:

1. مدل‌سازی دینامیکی و سینماتیکی

2. پایداری

براساس تحریک‌پذیری پایه، ربات‌ها را می‌توان به دو دسته‌ی ربات‌های پایه ثابت و ربات‌های پایه متحرک تقسیم‌بندی نمود. از این میان، ربات‌های پایه متحرک، توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است. این ربات‌ها را نیز می‌توان به دسته‌بندی کلی زیر تقسیم‌بندی نمود:

1- ربات‌های چرخ‌دار¹

2- ربات‌های پادار²

3- ربات‌های تسمه‌ای³

ربات‌های دو پا فواید مهم‌تری را نسبت به ربات‌های چرخ‌دار و ربات‌های تسمه‌ای بر حسب محیط‌های عملی، مصرف انرژی و سازگاری دارا هستند. ساختار ربات‌های دو پا به گونه‌ای است که می‌توانند حرکتی مانند حرکت انسان را تقلید کنند. هر چند ربات‌های چرخ‌دار ساختارهای سبک وزن ساده‌ای هستند، ولی نیازمند اراضی منظم برای حرکت و فاقد توانایی برای بالا رفتن از پله‌ها هستند. ربات‌های تسمه‌ای برای غلبه بر این مشکل کمک می‌کنند، ولی آن‌ها به دلیل میزان بالای اصطکاک بین تسمه و زمین، انرژی زیادی مصرف می‌کنند. در مقابل ربات‌های پادار می‌توانند در چهارچوب‌های منظم و نامنظم با همه تحرک و پویایی خود حرکت کنند. با تغییر پیکربندی، آن‌ها می‌توانند به راحتی خودشان را با محیط نامنظم وفق بدهند. ناحیه‌ی کوچک تماس پاهایشان به این معنی است که ربات‌های پادار می‌توانند به طور موثر عمل کنند. ربات‌های دوپا نوعی از ربات‌های پادار طراحی شده‌اند تا حرکت شبیه به انسان را تقلید کنند و وظایف خاص را اجرا کنند. مثل فعالیت در محیط‌های خطرناک و کمک به سالمندان. استفاده از ربات‌های چرخ‌دار در سطوح هموار و مسافت‌های طولانی به لحاظ سرعت زیاد، پایداری بیشتر و در نتیجه کنترل آسانتر و مناسب‌تر می‌باشند. در حالی که ربات‌های پادار دارای ساختمانی پیچیده و اغلب فوق‌العاده ناپایدار بوده و در نتیجه کنترل آن‌ها مشکل‌تر می‌باشند. با این وجود ربات‌های پادار در کاربردهای زیادی دارای مزایای بیشتری نسبت به ربات‌های چرخ‌دار می‌باشند که استفاده از آن‌ها را در مصارف و ماموریت‌های خاص ناگزیر و غیرقابل جایگزین می‌کند.

کاربردهای مختلف ربات‌های دو پا را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

1) داشتن فهم بهتر از حرکت طبیعی انسان از نقطه‌نظر بیولوژیکی و بیودینامیکی.

2) ساخت اعضای مصنوعی برای افراد مریض و معلول.

3) طراحی ربات‌های انسان‌نما به منظور کار در آزمایشگاه‌های خطرناک که احتمال بروز انفجار و آتش‌سوزی وجود داشته و انجام کارهای طاقت فرسا.

4) داشتن تحرک‌پذیری بیشتر در مسیرهای ناهموار و ناپیوسته، مانند حرکت بر روی پله‌ها و عبور از موانع در مقایسه با ربات‌های چرخ دار.

ربات‌های دوپا می‌توانند به عنوان عملگرهای کمک در وظایف مخصوصی که نیاز به میزان مشخصی پویایی عملگر دارد، استفاده شوند.

ربات‌های دوپا را می‌توان به دو دسته‌ی کلی ربات‌های دوپا با مفاصل غیرفعال⁴ و ربات‌های دوپا با مفاصل فعال⁵ تقسیم بندی نمود. طراحی این گونه از ربات‌ها به گونه‌ای است که بدون هیچ‌گونه تحریک خارجی به جز جاذبه، به آرامی و به طور پایدار از روی یک سطح شیبدار به پایین حرکت

¹ Wheeled Robots

² Legged Robots

³ Tracked Robot

⁴ Passive (Unactuated) Biped Robots

⁵ Powered (Actuated) Biped Robots

⁶ Waseda Robot

⁷ McGeer

⁸ Holonomic Constraint

3. پیش‌بینی مسیر

برای توصیف ریاضی‌وار رفتار سینماتیکی و دینامیکی در حین راه رفتن، بایستی معادلات مربوطه استخراج شوند. سینماتیک مستقیم را زمانی می‌توان نوشت که مختصات مفاصل ربات، مشخص بوده و موقعیت و جهت‌گیری لینک‌های ربات نیز به صورت تابعی از این مختصات مشخص گردند. در مقابل، سینماتیک معکوس برای دستیابی به تاریخچه‌ی زمانی مختصات مفصل به صورت تابعی از موقعیت و جهت‌گیری لینک‌های ربات در فضای دکارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین سینماتیک معکوس در تعیین حرکت محرک، که ضرورتاً در کل چرخه‌ی حرکتی ربات‌های دوپا مورد نیاز می‌باشد، بسیار مفید است. خروجی محاسبات سینماتیک معکوس، حرکت مرجع محرک‌ها برای اهداف کنترل را به دست می‌دهد.

به منظور به دست آوردن معادلات دیفرانسیلی سیستم دو روش متداول مورد استفاده قرار می‌گیرد: معادله‌ی لاگرانژ و معادله‌ی نیوتن-اولیور. معادلات دینامیکی می‌توانند پاسخ‌های دینامیکی سیستم ربات نسبت به گشتاورهای مفصل ورودی ایجاد شده توسط محرک‌ها و سایر نیروهای فعال را کنترل نمایند. در دینامیک مستقیم، معادله‌ی دیفرانسیلی حرکت برای حرکت سیستم با بردار نیرو/گشتاور فعال به عنوان ورودی حل می‌شود. در مساله‌ی کنترل، قانون کنترل مناسب برای ایجاد کنترل‌های ورودی (گشتاورها/نیروها) که مسیر مرجع مورد نظر مکانیزم ربات را دنبال می‌کنند، انتخاب می‌شود. تود و رایبرت [1] در سال‌های 1985 و 1986 تحقیقات وسیعی را در زمینه بالانس دینامیکی ربات‌های پادار انجام دادند. شیخ و همکارانش [2] در سال 1992 به بررسی دینامیک و کنترل ربات‌های دوپا در فاز دو تکیه‌گاهی پرداختند. سیلوا و ماچادو [3] در سال 2000 تحقیقی در مورد مدل تماسی برخورد بین کف پا و سطح زمین انجام دادند. آن‌ها از فنرها و دمپرها در دو راستای عمودی و افقی برای مدل تماسی خود استفاده کردند. مو و وو [4] در سال 2006 اثر ضربه ایجاد شده در انتهای فاز تک‌تکیه‌گاهی را بر روی دینامیک ربات مورد بررسی قرار دادند. پیش‌بینی مسیر نقش بسیار مهمی را در پایداری ربات‌های دوپا بازی می‌کند. هدف از پیش‌بینی مسیر، تعیین تاریخچه‌ی زمانی متغیرهای مفاصل به گونه‌ای است که ربات حرکت مورد نظر را دنبال نماید.

زاروق [5] در سال 1979 با نمونه‌برداری از حرکت طبیعی انسان در لحظه‌ها و شرایط مختلف، الگویی تقریبی برای حرکت مفاصل ربات ارائه داد. تاکانیش و همکارانش [6] در سال 1988 ابتدا مسیری را به طور پیش‌فرض برای نقطه‌ی ممان صفر به منظور تضمین پایداری دینامیکی ربات طراحی کرده، سپس یک جرم جبران‌ساز به عنوان بالاتنه ربات را به گونه‌ای حرکت دادند که مسیر طراحی شده برای نقطه‌ی ممان صفر توسط ربات دنبال شود. هیوانگ و همکارانش [7] در سال 2001 از روش میان‌یابی توابع درجه سه بین چندین نقطه از سیکل حرکتی، برای طراحی مسیر مفصل ران و مچ پا استفاده کرده‌اند. سپس با استفاده از سینماتیک معکوس متغیرهای مفاصل را تعیین کردند. ناگاساکی و همکارانش [8] در سال 2004 از یک روش بی‌درنگ¹ برای پیش‌بینی مسیر ربات در حالت‌های دویدن و پریدن استفاده کردند. رستمی و بسونت [9] در سال 1998 روشی برای طراحی بهینه گام‌برداری در صفحه طولی در فاز تک‌تکیه‌گاهی که ربات بیشترین ناپایداری را داراست، توسعه دادند. روش آن‌ها برپایه کمینه‌بودن مجموع گشتاورهای مفاصل بوده است. پنگ و همکارانش در سال 2004 روشی را برای تولید مسیر به صورت

برخط² براساس پارامترهای کلیدی مسیر برون خط³ یک ربات دوپا بیان کردند. در سال 2006 به گسترش این روش و اعمال آن به یک ربات انسان‌نما 32 درجه آزادی پرداختند [10]. پارک و چوی [11] در سال 2004 روشی را برای تولید مسیر بهینه ربات‌های دوپا با استفاده الگوریتم ژنتیک بیان کردند. در این روش موقعیت مناسب مراکز جرم عضوها به گونه‌ای یافت می‌شود که ربات کمترین انرژی را در طول حرکت مصرف کند. تحقیقات و تلاش‌های بسیار زیادی صورت گرفته است تا مسیر حرکت ربات براساس حداکثر پایداری، که با کمک معیار نقطه ممان صفر مورد بررسی قرار می‌گیرد، به دست آید. یکی از مشکلات این روش آن است که مسیر حرکت بدست آمده، معمولاً انرژی زیادی مصرف می‌کند. از دیگر مسایلی که هنوز محققان را به خود مشغول کرده است، بحث پایداری دینامیکی ربات‌های دوپا می‌باشد. تحقیقات زیادی برای تامین پایداری ربات در طول قدم‌زدن انجام شده است. در بسیاری از آن‌ها مسیر مطلوب نقطه ممان صفر از پیش تعیین می‌گردد و سپس از روی آن تاریخچه زمانی مفاصل به دست خواهد آمد. در این روش‌ها امکان ایجاد مسیری هموار با صرف کمترین انرژی وجود نخواهد داشت. برای رفع این مشکل برخی دیگر از محققان ابتدا مسیرهای مفاصل ران و مچ پا را طراحی می‌کنند و سپس با در نظر گرفتن دو پارامتر مجهول در طراحی مسیر مفصل ران، این دو پارامتر را به گونه‌ای محاسبه کرده‌اند که بیشترین حاشیه‌ی پایداری برای ربات به دست آید.

از طرفی، یکی از مهمترین مسایلی که در مورد ربات‌های دوپا مطرح می‌باشد، حفظ تعادل ربات در هنگام راه رفتن است. تعادل ربات‌های دوپا را می‌توان به دو قسمت تعادل استاتیکی و تعادل دینامیکی تقسیم‌بندی نمود. بر همین اساس معیارهای مختلفی برای تضمین پایداری ربات‌های دوپا به وجود آمده است. معیار مرکز جرم معیاری برای تعادل استاتیکی ربات می‌باشد. در واقع تعادل استاتیکی تنها در حالتی که سرعت ربات بسیار کم باشد، می‌تواند تعادل ربات را تضمین نماید. از مهمترین معیارهای پایداری دینامیکی می‌توان به معیار نقطه‌ی ممان صفر اشاره نمود. این مفهوم اولین بار توسط واکوراتویچ و همکارانش [12] در سال 1972 بیان گردید. واکوراتویچ و برواک [13] در سال 2004 به تکمیل و روشن‌تر کردن این مفهوم پرداختند. سارداین و بسونت در سال 2004 با طراحی و ساخت یک کفش مکانیکی مجهز به حسگرهای نیرو به بیان ارتباط میان نقطه ممان صفر و مرکز فشار پرداختند [14].

در واقع نقطه ممان صفر نقطه‌ای است بر روی زمین که ممان‌های واژگون‌کننده⁴ اعمال شده به ربات که در اثر نیروهای اینرسی و گرانشی

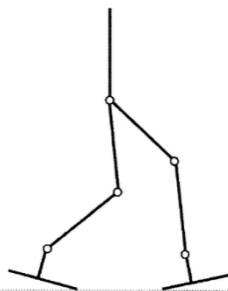


Fig. 1 Robot model in double support phase (close kinematic chain)
شکل 1 مدل ربات در فاز دو تکیه‌گاهی (زنجیره سینماتیکی بسته)

² On-line

³ Off-line

⁴ Tipping Moment

¹ Real-Time

مصرفی به‌دست آید. به دلیل غیرخطی بودن مسئله‌ی بهینه‌سازی، از بهینه‌سازی پارامتری برای حل مسئله استفاده خواهد شد. از طرفی زوایای مفصلی به‌صورت توابع پارامتری تعریف گردیده و از بهینه‌سازی پارامتری، ضرایب به نحوی تعیین خواهد شد که تابع هدف، مینیمم گردد. پس از مروری بر کارهای انجام شده و تعریف مسئله در این بخش، مدل ربات دو پا تحت بررسی در بخش بعدی تعریف می‌گردد و سپس با استفاده از تحلیل دینامیکی ربات‌های دوپا، معادلات حرکت استخراج می‌گردد. در بخش پنجم پیش‌بینی مسیر حرکت ربات‌های دوپا بیان می‌گردد و سپس در بخش ششم و هفتم تابع هدف مورد استفاده و قیود مربوطه بیان می‌گردد در بخش هشتم پیاده‌سازی مسئله و تحلیل نتایج آن بیان می‌گردد و در بخش نهم نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

3- معرفی مدل ربات دوپا و استخراج معادلات حرکت

مدل دینامیک ربات دوپای تحت بررسی، همان‌طور که در "شکل 4" نشان داده شده است، دارای هفت عضو و نه درجه آزادی می‌باشد که در آن عضو 4 به‌عنوان بالاتنه¹، عضو 3 و 5 به‌عنوان دو عضو مربوط به ران²، عضو 6 و 2 به‌عنوان ساق پا³، عضو 1 و 7 به‌عنوان کف پای ربات⁴ در نظر گرفته شده است که این اعضا با شش مفصل یعنی مفصل 3 و 4 مربوط به ران⁵، مفصل 5 و 2 به‌عنوان زانو⁶، مفصل 1 و 6 به‌عنوان دو مفصل مچ⁷ به یکدیگر متصل شده‌اند. در هر مفصل یک عملگر قرار گرفته است و فرض بر این است که تمامی مفصل بدون اصطکاک بوده و تنها در صفحه اصلی طولی⁸ دارای حرکت دورانی می‌باشند. از آنجایی که مسئله در فاز تک‌تکیه‌گاهی بررسی می‌گردد و در این فاز موقعیت افقی و عمودی پنجه‌ی پای راست مقدار ثابتی در نظر گرفته شده است، لذا دو درجه از آن محدود می‌گردد. بنابراین مدل ربات دوپای نه درجه آزادی تبدیل به هفت درجه آزادی می‌شود. برای هر عضو پارامترهای هندسی و اینرسی به گونه‌ای تعریف شده است که m_i جرم هر عضو (براساس جرم ابعاد آنترپومتریک کتاب وینتر [17])، I_i ممان اینرسی هر عضو حول محور عبوری از مرکز جرم و عمود بر صفحه‌ی طولی، l_i طول هر عضو، d_i فاصله‌ی بین مرکز جرم هر عضو و مفصل بعدی (بالایی) و براساس درصدی از طول اعضا، q_i زاویه مطلق هر عضو تا خط عمود در جهت پادساعت‌گرد، x_{c_i} موقعیت مرکز جرم هر عضو می‌باشد.

4- استخراج معادلات حرکت

ارتباط بین پارامترهای سینماتیکی و پارامترهای نیرویی در یک سیستم

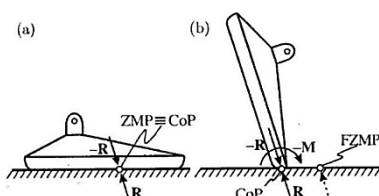


Fig. 3 Definition of Zero Moment Point display: first step (a) and second step (b) [16]

شکل 3 نمایش تعیین نقطه ممان صفر: مرحله اول (a) و مرحله دوم (b) [16]

¹ Trunk
² Thigh
³ Shin
⁴ Foot
⁵ Hip Joint
⁶ Knee Joint
⁷ Ankle Joint
⁸ Sagittal Plane



Fig. 2 Robot model in single support phase (open kinematic chain)

شکل 2 مدل ربات در فاز تک‌تکیه‌گاهی (زنجیره سینماتیکی باز)

ایجاد می‌گردد، صفر باشد. براساس این تعریف هرگاه این نقطه درون چندضلعی حاصل از سطح تماس ربات با سطح زمین باشد، ربات پایدار بوده و هرگاه این نقطه خارج از این ناحیه باشد، ربات تمایل به واژگون شدن دارد [15]. البته لازم به ذکر است که این معیار تنها برای مرحله تک‌تکیه‌گاهی معرفی شده است. روش تعیین نقطه ممان صفر شامل دو مرحله است:

مرحله اول:

نقطه P به عنوان موقعیت نقطه ممان صفر ربات محاسبه شده می‌گردد. توجه شود که در این مرحله ما واقعاً نمی‌دانیم که آیا این نقطه درون چندضلعی تکیه‌گاهی ربات است یا بیرون آن (شکل 3-الف) [16].

مرحله دوم:

موقعیت نقطه‌ی ممان صفر محاسبه شده، تنها یک کاندید برای نقطه‌ی ممان صفر ربات می‌باشد. این موقعیت باید با اندازه‌ی چندضلعی تکیه‌گاهی ربات مقایسه شود. اگر این نقطه داخل چندضلعی تکیه‌گاهی باشد، این نقطه، همان نقطه‌ی ممان صفر ربات است، اما اگر این نقطه خارج از چندضلعی تکیه‌گاهی باشد، به این معناست که در واقع نقطه‌ی به دست آمده موقعیت نقطه‌ی ممان صفر فرضی ربات است و نیروی عکس‌العمل زمین واقعاً بر روی لبه چند تکیه‌گاهی اثر خواهد کرد و مکانیزم حول این لبه توسط گشتاور بالانس نشده دوران می‌کند. اندازه‌ی این گشتاور به میزان فاصله‌ی بین لبه‌ی چندضلعی تکیه‌گاهی و موقعیت نقطه‌ی ممان صفر اندازه‌گیری شده (موقعیت نقطه ممان صفر فرضی)، یعنی r بستگی دارد. (شکل 3-ب) [16].

2- شرح مسئله

در این مقاله، از روش نیوتون-اولر در فاز تک‌تکیه‌گاهی برای بررسی معادلات دینامیکی ربات استفاده خواهد شد. نقطه‌ی ممان صفر به عنوان معیاری برای پایداری ربات در نظر گرفته خواهد شد و با به‌کارگیری مساله‌ی بهینه‌سازی، مسیر حرکت به شکلی پیش‌بینی خواهد شد که ربات در منطقه‌ی مجاز پایداری قرار گیرد. در این مقاله به‌کار بردن سینماتیک معکوس به‌منظور استفاده از معیار پایداری، امری مهم و ضروری می‌باشد. در ابتدا سعی می‌شود با کمک ماتریس ژاکوبی موقعیت‌های مفصلی، به زوایای مفصلی تبدیل گردد، سپس زوایای مفصلی، سرعت‌های زاویه‌ای و شتاب‌های زاویه‌ای محاسبه خواهد شد و به‌عنوان ورودی در معیار نقطه ممان صفر قرار خواهد گرفت. همچنین از دینامیک مسئله برای محاسبه‌ی انرژی جنبشی و پتانسیل استفاده خواهد شد و در نهایت گشتاورهای مفصلی مورد محاسبه می‌گردد. در این تحقیق، در کنار حداکثر پایداری تلاش خواهد شد که با محاسبه‌ی انرژی به کمک گشتاورهای مفصلی، مسیر حرکت بهبود یابد و همچنین از ترکیب معیار نقطه ممان صفر و انرژی، حداکثر پایداری و حداقل انرژی

شده است. روند بهینه‌سازی بدین شرح است که ابتدا زوایای مفصلی به کمک سری فوریه‌ی مرتبه‌ی سوم تقریب‌زده می‌شوند، سپس با کمک الگوریتم‌های بهینه‌سازی و با در نظر گرفتن قیود سینماتیکی، این ضرایب به نحوی تغییر می‌کنند که تابع هدف مینیمم گردد و همچنین نقطه‌ی ممان صفر در طول فاز تک‌تکیه‌گاهی درون چندضلعی تکیه‌گاهی با کمترین فاصله از مرکز آن، باقی بماند. در این تحقیق از روش بهینه‌سازی نقطه درونی² برای پیش‌بینی مسیر حرکت ربات‌های دوپا استفاده شده است.

5-1- روش بهینه‌سازی نقطه درونی

یکی از روش‌هایی که برای بهینه‌سازی مسائل مقید با قیود نامساوی مطرح، گردیده است، بهینه‌سازی به روش نقطه‌ی درونی است. در این روش، روند حل با حرکت در درون ناحیه‌ی شدنی پیش می‌رود. در روش نقطه درونی، ساختار کلی مسئله‌ی بهینه‌سازی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

در این ساختار، بجای در نظر گرفتن قیود نامساوی، مجموعه‌هایی از قیود تساوی و محدودیت متغیرها در نظر گرفته می‌شود. محدودیت متغیرها در این ساختار به گونه‌ای است که تمامی متغیرهای بهینه‌سازی را به صورت مقادیر نامنفی تعریف می‌نماید. به منظور تبدیل یک قید نامساوی به یک قید تساوی و یک محدودیت متغیر می‌توان به صورت زیر عمل نمود:

$$h(x) \leq 0 \rightarrow h(x) + s = 0 \quad s \geq 0 \quad (2)$$

به متغیر s متغیر کمکی گفته می‌شود. در روش نقطه درونی، برای اعمال محدودیت متغیرها، یک عبارت لگاریتمی به تابع هدف افزوده می‌شود.

$$\min F(x) - \mu \sum_{i=1}^n \ln x_i \quad c(x) = 0 \quad (3)$$

عبارت لگاریتمی در تابع هدف بیان شده، سبب می‌شود تا فرآیند حل به صورت ذاتی از نزدیک شدن مقدار متغیرها به صفر جلوگیری کند تا مقدار تابع هدف کمینه گردد.

در تابع هدف فوق، به پارامتر اسکالر μ ، پارامتر مانع گفته می‌شود. اگر این مقدار به سمت صفر میل کند، پاسخ مسئله‌ی فوق به پاسخ مسئله‌ی اصلی نقطه‌ی درونی همگرا می‌شود. برای آغاز فرآیند حل در این روش، معمولاً یک مقدار اولیه‌ی برای μ در نظر گرفته می‌شود و به تدریج مقدار آن در مراحل مختلف کاهش می‌یابد تا به میزان قابل قبول برسد.

6- تابع هدف

به منظور پیش‌بینی مسیر حرکت در محدوده مجاز پایداری همراه با کم شدن انرژی مصرفی، تابع هدف به صورت ترکیبی از انرژی و پایداری، به صورت زیر تعریف شده است:

$$\begin{aligned} \text{taw} = & 1000 \times \left[\sum \left(\frac{(X_{zmp} - X_{MS})^2}{X_{MS}} \right) \right] \\ & + \sum \left(\frac{(R_{zrm} + R_{zrh}) - R_{zre}}{\max |R_{zre}|} \right)^2 + \sum \left(\frac{(R_{xr}) - R_{xre}}{\max |R_{xre}|} \right)^2 \\ & + \sum \left(\frac{q_1 - q_{1e}}{\max |q_{1e}|} \right)^2 + \dots + \sum \left(\frac{q_7 - q_{7e}}{\max |q_{7e}|} \right)^2 + 1000 \times \dots \\ & \times \left(\sum \left(\frac{(tawy_1)}{\max(tawy_{1e})} \right)^2 + \sum \left(\frac{(tawy_2)}{\max(tawy_{2e})} \right)^2 + \dots \right. \\ & \left. + \sum \left(\frac{(tawy_6)}{\max(tawy_{6e})} \right)^2 + \sum \left(\frac{(tawy_7)}{\max(tawy_{7e})} \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$X_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n \{m_i(\ddot{Z}_i - g_z)x_i - m_i(\ddot{x}_i - g_x)Z_i + I_{yi}\alpha_{yi}\}}{\sum_{i=1}^n m_i(\ddot{Z}_i - g_z)} \quad (5)$$

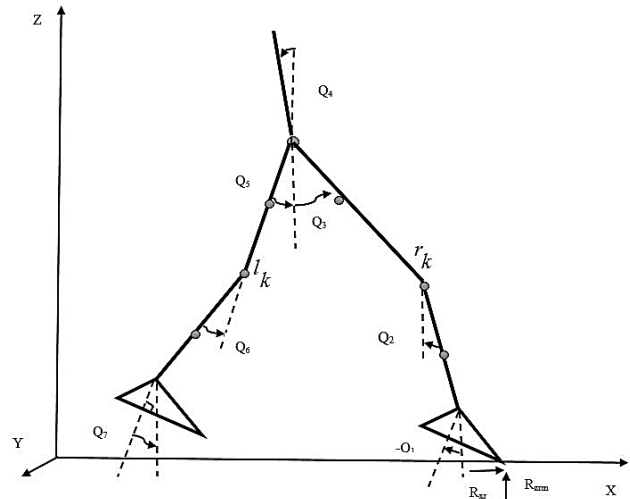


Fig. 4 Adoptive biped robot model

شکل 4 مدل ربات دوپا انتخابی

دینامیکی به وسیله‌ی معادلات حرکت آن سیستم بیان می‌شود. در هر سیستم دینامیکی، تعداد معادلات مستقل حرکت سیستم برابر با تعداد درجات آزادی آن می‌باشد.

در این قسمت روابط سینماتیک و دینامیک مربوط به هر عضو نوشته می‌شود. روش‌های مختلفی برای استخراج معادلات دینامیکی وجود دارد. از مهمترین این روش‌ها می‌توان به روش نیوتون-اولر، روش لاگرانژ و روش کین اشاره نمود. در این تحقیق، معادلات دینامیکی ربات دوپا مورد مطالعه طبق رابطه‌ی (1) با استفاده از روش نیوتون-اولر بازگشتی در فاز تک‌تکیه‌گاهی استخراج شده است. بدین شرح که با نوشتن روابط سینماتیک و دینامیک برای پای راست شروع و به صورت بازگشتی روابط به دست آمده است. سپس مراحل فوق برای پای چپ نیز تکرار شده و در نهایت از طریق تنه ربات، روابط مربوط به دو پا به یکدیگر مرتبط گردیده است.

$$m(y)\ddot{y} + c(y)\dot{y} + g(y) - \tau^{GRF} = \tau^M \quad (1)$$

روابط سینماتیک، نیروها و گشتاورهای مربوط به هر عضو در پیوست ضمیمه گردیده است.

5- پیش‌بینی مسیر حرکت ربات‌های دوپا

یکی از مسایل مهم در زمینه‌ی راه رفتن ربات‌های دوپا، پیش‌بینی مسیر حرکتی است که منجر به پایداری و می‌نیم شدن انرژی گردد. تحقیقات و تلاش‌های بسیار زیادی صورت گرفته است تا مسیر حرکت ربات براساس حداکثر پایداری که با کمک نقطه‌ی ممان صفر مورد بررسی قرار می‌گیرد، بدست آید. یکی از مشکلات این روش آن است که مسیر حرکت بدست آمده معمولاً انرژی زیادی مصرف می‌کند. در این تحقیق هدف این است که با کمک مینیمم‌سازی انرژی توام با قرار گرفتن پایداری در محدوده مجاز، مسیر حرکت بدست آید. برای این منظور از روش‌های بهینه‌سازی استفاده می‌گردد. بهینه‌سازی¹ هنر یافتن بهترین جواب در بین وضعیت‌های موجود است. الگوریتم‌های بهینه‌سازی معمولاً شامل فرآیندهای تکراری می‌باشند که از یک نقطه‌ی اولیه شروع شده و به نقطه‌ی نهایی (نقطه بهینه) ختم می‌شوند. فرآیندی که آن‌ها را از مرحله کنونی به مرحله بعد انتقال می‌دهد، این الگوریتم‌ها را از هم متمایز می‌کند. از آنجایی که راه رفتن یک حرکت دوره‌ای است، لذا در این تحقیق از سری فوریه برای تقریب زوایای مفصلی استفاده

² Interior Point (IP)

¹ Optimization

نرم‌افزار متلب^۱ به منظور حل عددی آن‌ها استفاده شده است و نتایج آن با نتایج تجربی حاصل از آزمایشات طراحی شده به منظور تحلیل بیومکانیکی راه رفتن فرد سالم، صحنه‌گذاری شده است. فرآیند بهینه‌سازی در دو مرحله با روش بهینه‌سازی نقطه درونی مطابق با شکل 5-الف و 5-ب انجام گردید. برای این منظور بردار X که شامل ضرایب سری فوریه حاصل از تقریب زوایای مفصلی می‌باشد تعریف گردید. تعداد 56 متغیر در مسئله بهینه‌سازی استفاده گردید.

981 داده برای سیکل راه رفتن در نظر گرفته شد که 376 داده به فاز تک‌تکیه‌گاهی اختصاص داده شد و داده‌ها با فاصله زمانی 0.001 ثانیه استخراج و ضبط گردید. برای مقدار اولیه در مرحله اول بهینه‌سازی، مقادیر حاصل از نتایج تجربی به کار گرفته شده است. از خروجی هر مرحله به عنوان ورودی مرحله بعدی استفاده شده است. پس از حل مسئله بهینه‌سازی و اتمام این فرآیند، همان‌طور که در "شکل 6 و 7" نشان داده شده، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه گردیده است. از آنجایی که هدف طراحی ربات دوپایی است که تا جای ممکن شبیه انسان راه برود، نتایج شبیه‌سازی

در رابطه فوق X -ZMP موقعیت نقطه‌ی ممان صفر ربات می‌باشد که از رابطه-ی (5) به‌دست آمده است. به منظور حفظ پایداری در هر لحظه، مربع اختلاف موقعیت نقطه‌ی ممان صفر با مرکز چندضلعی تکیه‌گاهی که بیشترین پایداری را دارد، مینیمم شده است. همچنین مربع نرمال اختلاف زوایای مفصلی و نیروهای عکس‌العمل زمین با مقادیر متناظر تجربی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور مینیمم نمودن انرژی مصرفی، گشتاورهای مفصل مطابق با رابطه (4) در تابع معیار در نظر گرفته شده است و هر یک از گشتاورها به بیشینه‌ی مقدار تجربی خود تقسیم شده است. از آنجایی که به دنبال کمینه نمودن انحراف از حداکثر پایداری و گشتاور هستیم، در حالی که نباید از نیروهای عکس‌العمل زمین و زوایای مفصلی ناشی از نتایج تجربی، تخطی زیادی داشت، لذا برای موقعیت نقطه‌ی ممان صفر ربات و گشتاورهای مفصل ضریب 1000 در نظر گرفته شده است.

7- قیود

مسئله‌ی بهینه‌سازی تحت بررسی در این پژوهش، یک مسئله‌ی بهینه‌سازی مقید است. پس از این که زوایای مفصلی به صورت توابع پارامتری تعریف گردیدند، با در نظر گرفتن قیود سینماتیکی که حداکثر و حداقل این زوایا را تعریف می‌کنند، مسئله‌ی حرکت به شکلی به‌دست می‌آید که علاوه بر منطق بودن مدل دینامیکی تحت بررسی با مدل واقعی، پایداری ربات به حداکثر و انرژی مصرفی در طول حرکت در این فاز، به حداقل میزان خود برسد. همان‌طور که در جدول 1 نشان داده شده است، در فاز تک‌تکیه‌گاهی قیودی به منظور مشخص بودن موقعیت اولیه و نهایی زوایای مفصل در نظر گرفته شده است. از آنجایی که گام‌برداری و قدم زدن یک حرکت رو به جلو است، لذا باید قیودی به موقعیت‌های افقی پنجه پای چپ^۲، ران پا راست^۳، مچ و زانوی دوپا به منظور تأمین حرکت رو به جلو اعمال گردد. همچنین قیودی برای تضمین پایداری ربات و قرارگرفتن موقعیت نقطه‌ی ممان صفر در درون چند ضلعی تکیه‌گاهی و در کمترین فاصله نسبت به مرکز این چندضلعی که بیشترین پایداری را دارد، اعمال شده است. به منظور اعمال صحیح نیروی عمودی تماس پا با سطح زمین قیودی بر روی نیروی عمودی عکس‌العمل زمین در نظر گرفته شده است و برای گام‌برداری مناسب و عدم لغزش در طول فاز تک‌تکیه‌گاهی از قانون اصطکاک کلمب استفاده شده است.

8- پیاده‌سازی و نتایج آن

این بخش به بررسی آزمایش‌های لازم جهت تحلیل حرکتی راه رفتن فرد سالم می‌پردازد. در این مطالعه یک فرد مذکر سالم با سن 29 سال برای انجام آزمایش تحلیل راه رفتن انتخاب گردید. آزمایش‌های مورد نظر در آزمایشگاه آنالیز راه رفتن مرکز تحقیقات فناوری‌های توانبخشی عصبی هوشمند جواد موفقیان وابسته به دانشگاه صنعتی شریف انجام شد. اطلاعات تجربی، شامل سینماتیک حرکت و نیروهای عکس‌العمل زمین به‌وسیله قرارگیری 28 مارکر متصل به موضع‌های آناتومیکی و دو صفحه نیرو برای مسافتی بیش از یک سیکل راه‌رفتن با سرعت حرکت میانگین 1.23 ± 0.1 m/s به‌دست آورده شد. پنج آزمایش یکسان آنالیز راه‌رفتن برای فرد موردنظر صورت گرفت، سپس از میانگین اطلاعات سینماتیکی اندام تحتانی به‌عنوان مسیر مطلوب مدل ربات دوپا استفاده شد. پس از استخراج معادلات دینامیکی ربات دوپا انتخابی، از نرم‌افزار ممتیکا^۳ به منظور حل پارامتری معادلات حرکت و از

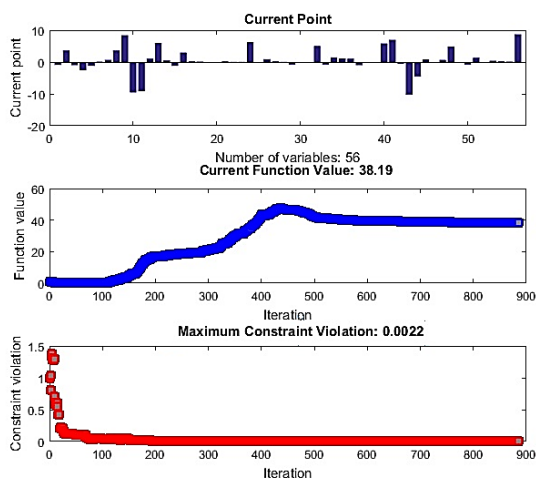


Fig. 5-a First step of optimization process using of Interior Point

شکل 5-الف مرحله اول فرآیند بهینه‌سازی به روش نقطه درونی

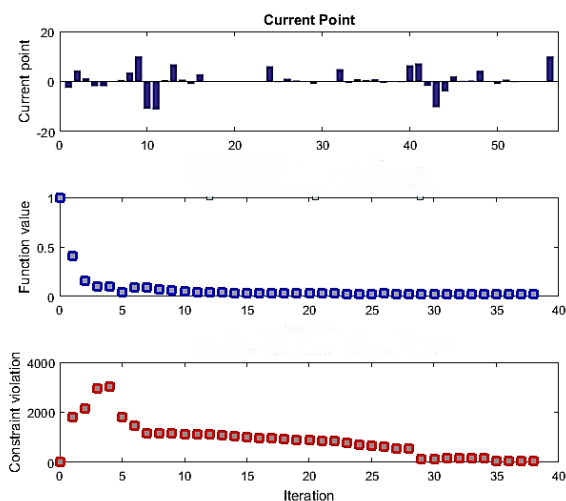


Fig. 5-b Second step of optimization process using of Interior Point

شکل 5-ب مرحله دوم فرآیند بهینه‌سازی به روش نقطه درونی

¹ Xlmet

² Xrhip

³ Mathematica

⁴ Matlab

جدول 1 قیود سینماتیک و دینامیکی اعمال شده به مدل ربات دوبا انتخابی

Table 1 Dynamic and kinematic constraints applied to the adoptive biped robot model

قیود

موقعیت‌های اولیه و نهایی زوایای مفصلی

حرکت رو به جلو

پا چپ

پا راست

موقعیت افقی پنجه

موقعیت افقی ران

$$c_{25} = x_{lmet}(t) - x_{lmet}(t + 1)$$

$$c_{28} = x_{rhip}(t) - x_{rhip}(t + 1)$$

موقعیت افقی مچ

موقعیت افقی مچ

$$c_{26} = x_{la}(t) - x_{la}(t + 1)$$

$$c_{29} = x_{ra}(t) - x_{ra}(t + 1)$$

موقعیت افقی زانو

موقعیت افقی زانو

$$c_{27} = x_{lk}(t) - x_{lk}(t + 1)$$

$$c_{30} = x_{rk}(t) - x_{rk}(t + 1)$$

موقعیت نقطه ممان صفر

$$XMS = 1.316$$

$$HF = 0.154/2$$

$$devZ = 0.04$$

$$c_{40} = (|x_{zmp}(t) - x_{ms}| - HF - devZ)$$

نیروی عمودی تماس پا با سطح زمین

نیروی عمودی عکس‌العمل پاشنه پا راست

$$R_{zrheel} > 0$$

نیروی عمودی عکس‌العمل پنجه پا راست

$$R_{zrm} > 0$$

گام برداری مناسب و عدم لغزش در طول حرکت

$$c_{41} = (R_{xr}(t) - 0.6(R_{zrh}(t) + R_{zem}(t)))$$

- خطای ناشی از مارکر گذاری
- خطای ناشی از فرض دو بعدی بودن حرکت
- خطای ناشی از فرض صلب بودن اعضا
برای در نظر گرفتن اثر این دو فرض بر روی سینماتیک راه رفتن مراحل زیر طی می‌شود:

- (a) زوایای مفصلی به کمک سینماتیک معکوس از مدل اصلی (اعضا صلب نیستند و حرکت در فضای سه‌بعدی است) و با استفاده از موقعیت‌های مفصلی ارائه شده توسط مارکرها، استخراج می‌گردد.
(b) طول اعضا ثابت در نظر گرفته شده (میانگین طول عضو در حرکت) و حرکت تنها در صفحه ساژیتال (صفحه X-Z) فرض می‌شود، موقعیت‌های اعضا در راستای محور Y کاملاً ثابت فرض می‌شوند.
(c) با استفاده از زوایای به‌دست آمده از مرحله 1 و به‌کارگیری سینماتیک مستقیم براساس طول ثابت اعضا و حرکت در صفحه ساژیتال، موقعیت‌های افقی و عمودی مفاصل محاسبه می‌گردد.
(d) از طریق مقایسه موقعیت‌های افقی و عمودی مفاصل در قبل و بعد از اعمال فرضیات، انحراف از مسیر واقعی و تجربی سنجیده می‌شود.

جدول 2 میزان خطای زوایای مفصلی از مقادیر متناظر تجربی خود در پیش‌بینی مسیر

Table 2 Error of joint angles from their experimental amounts

میزان خطا	زوایای مفصلی
11.3	q_1
0.4	q_2
4.8	q_3
32.6	q_5
3.1	q_6
1.5	q_7

شده با مسیر حرکت انسان مقایسه می‌شود. فاز تک‌تکیه‌گاهی (نوسان)¹ 40% انتهایی سیکل راه رفتن را تشکیل می‌دهد. فاز تک‌تکیه‌گاهی در حرکت انسان به طور کلی به سه زیر فاز تقسیم می‌شود، شامل: شروع نوسان² که در فاصله بین 60 تا 73 درصد گام (یک سوم مرحله نوسان را تشکیل می‌دهد) بطول می‌انجامد. این مرحله از جدا شدن انگشتان پا از زمین تا زمانی که پا به مرحله میانی نوسان می‌رسد و پای مقابل در وضعیت ایستا است، طول می‌کشد. از دیدگاهی دیگر این مرحله را فاز شتاب‌گیری³ نیز می‌نامند. در این مرحله شتاب پا افزایش می‌یابد و پا در هوا تحت تاثیر نیروی مرحله پایانی فاز دو تکیه‌گاهی پرتاب می‌شود.

مرحله دوم، مرحله نوسان میانی⁴ پا در هوا می‌باشد و زمانی پایان می‌یابد که درشت‌نی پای در حال نوسان به‌طور عمود بر زمین در هوا قرار گیرد و از 73 تا 87 درصد گام به‌طول می‌انجامد، و در پایان فاز نوسان نهایی⁵ است که از 87 تا 100 درصد گام به‌طول می‌انجامد و لحظه‌ای که پاشنه پای در حال نوسان با زمین تماس پیدا می‌کند، خاتمه می‌یابد. در این مرحله شتاب پا بتدریج کاهش می‌یابد تا پا به آرامی با زمین تماس یابد به همین دلیل این مرحله را مرحله کاهش شتاب⁶ نیز می‌نامند. تمام زوایای مفصلی بهینه‌الگوی مسیر تجربی را به خوبی دنبال می‌کنند. طبق جدول 2 خطاهای حاصله برای تمام زوایای مفصلی کمتر از 5% است بجز زوایای مفصلی مچ پای راست (q_1) و ران پای چپ (q_5). زاویه مچ پای راست در دو فاز شتاب‌گیری و نوسان میانی بیشترین خطا (حدود 10%) را نشان می‌دهد.

زاویه ران پای چپ، اگرچه الگوی حرکت تجربی را دنبال می‌کند ولیکن در هر سه فاز شروع نوسان، نوسان میانی و نوسان نهایی دارای خطای تقریبی 30% است. وجود چنین خطاهایی را می‌توان به سه علت عمده نسبت داد:

¹ Swing² Initial swing³ Acceleration⁴ Midswing⁵ Terminal Swing⁶ Deceleration

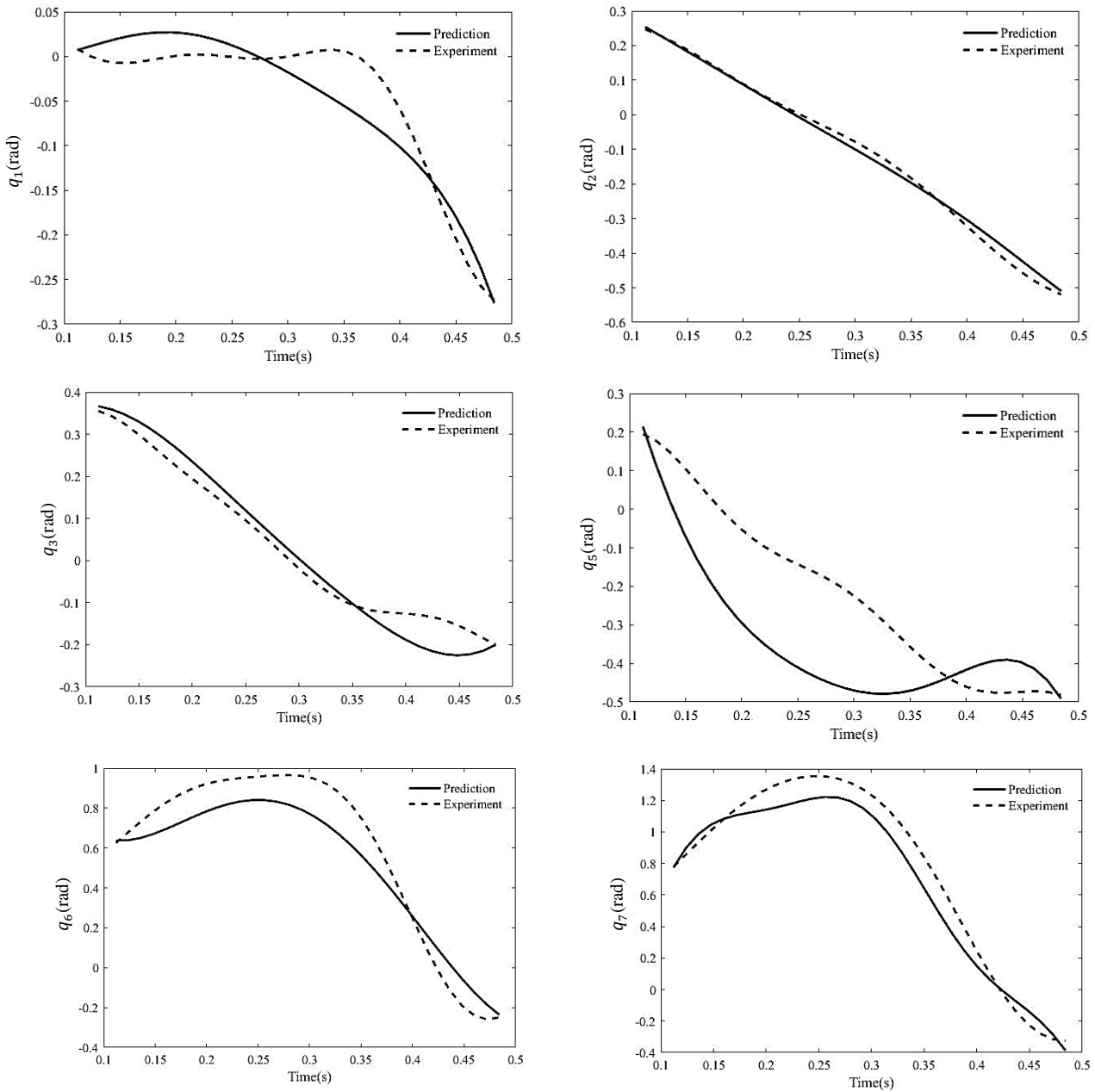


Fig. 6 Path prediction chart for joint angles

شکل 6 نمودار پیش‌بینی مسیر مربوط به زوایای مفصلی

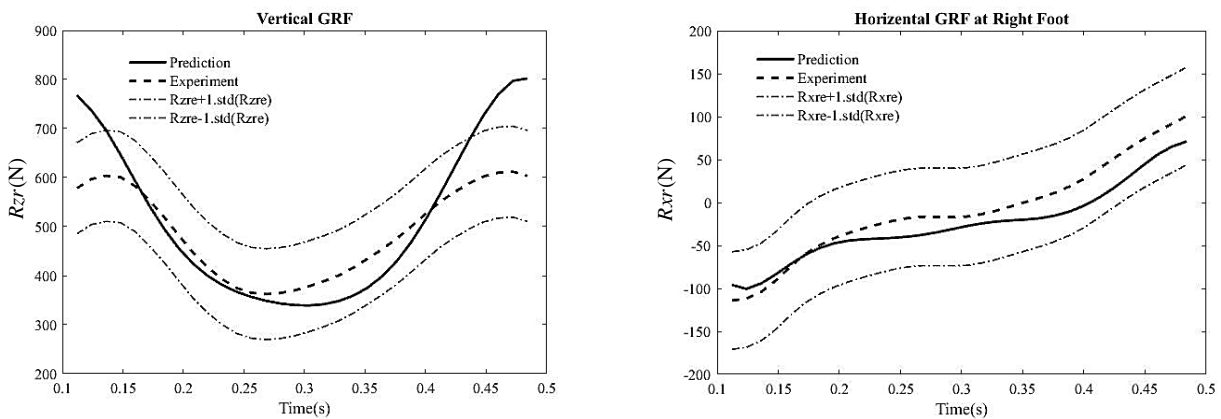


Fig. 7 Path prediction chart for Ground Reaction Forces

شکل 7 نمودار پیش‌بینی مسیر مربوط به نیروهای عکس‌العمل زمین

و به کارگیری ابعاد آنترپومتریک بدن هر فرد دیگری، الگوی صحیح و بهینه راه رفتن متناسب برای آن فرد را ایجاد کند.

10- فهرست علائم

فاصله بین مرکز جرم هر عضو و مفصل بالایی	d_i
ممان اینرسی هر عضو	I_i
طول هر عضو	l_i
جرم هر عضو (kg)	m_i
موقعیت نقطه ممان صفر ربات	p
زاویه مطلق هر عضو	q_i
زاویه مفصلی عضو یک	q_1
موقعیت نقطه ممان صفر ربات	x_{zmp}
بردار ضرایب سری فوریه تقریب زوایای مفصلی	X
موقعیت مرکز جرم هر عضو	x_{c_i}

علائم یونانی

μ پارامتر مانع

11- پیوست

روابط سینماتیک، نیروها و گشتاورهای مربوط به هر عضو به صورت زیر به دست آورده شده است.

11-1- مع پای راست

$$X_{C_1} = X_{ra} + d_1 \times \sin(\theta_{12}) \quad (1)$$

$$Z_{C_1} = Z_{ra} - d_1 \times \cos(\theta_{12}) \quad (2)$$

$$F_{x_1} = m_1 \times \ddot{x}_{c_1} - R_{xr} \quad (3)$$

$$F_{z_1} = m_1 \times \ddot{z}_{c_1} + m_1 \times g - R_{zrh} - R_{zrm} \quad (4)$$

$$\tau_1 = I_1 \times \ddot{q}_1 + F_{x_1} \times (Z_{ra} - Z_{c_1}) + F_{z_1} \times (X_{c_1} - X_{ra}) + R_{zrh} \times (X_{c_1} - X_{rheel}) - R_{xr} \times (Z_{c_1} - Z_{rheel}) - R_{zrm} \times (X_{rmet} - X_{c_1}) \quad (5)$$

در روابط ذکر شده x_{rmet}, z_{rmet} به ترتیب موقعیت افقی و عمودی پنجه-ی پای راست می‌باشد. x_{rheel}, z_{rheel} نیز به ترتیب موقعیت افقی و عمودی پاشنه پای راست هستند. در این قسمت به دلیل این که در ابتدای فاز تک تکیه‌گاهی تنها پنجه‌ی پای چپ از سطح زمین جدا شده، بنابراین در رابطه‌ی مربوط به برآیند نیروهای عمودی (رابطه 4)، نیروی عکس‌العمل عمودی پاشنه پای راست (R_{zrh})، وجود خواهد داشت. پاشنه پا راست در نیمه‌ی فاز تک تکیه‌گاهی زمانی که پای چپ (پا در حال نوسان) در مقابل پای راست

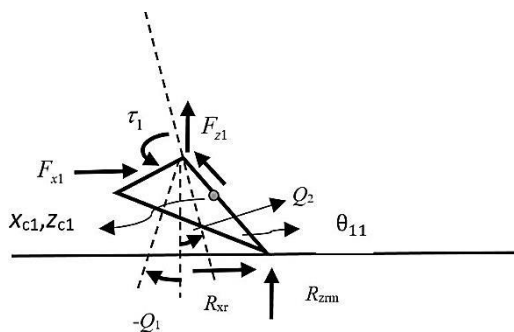


Fig. 9 Robot right ankle

یکی از مهمترین نتایج حاصله مربوط به پیش‌بینی نیروی عکس‌العمل زمین می‌باشد، همان‌طور که در "شکل 7" ملاحظه می‌کنید الگوی حرکت راه رفتن انسان به گونه‌ای است که نیروی عکس‌العمل عمودی زمین در فاز نوسان میانی به حداقل می‌رسد، این مسئله به خوبی توسط نتایج شبیه‌سازی شده نیز نشان داده شده است.

الگوی نیروی عکس‌العمل افقی در فاز نوسان بدین صورت است که ابتدا از یک مقدار منفی که لازمه شتاب‌گیری است آغاز شده و سپس در طول فاز نوسان میانی مقدارش به صفر می‌رسد و در نهایت در طول فاز نوسان نهایی با مثبت شدن، شتاب پای نوسان‌کننده کاهش می‌دهد. این الگو نیز به خوبی توسط نیروی عکس‌العمل افقی شبیه‌سازی شده دنبال شده است. موقعیت نقطه‌ی ممان صفر در طول فاز تک تکیه‌گاهی در درون چندضلعی تکیه‌گاهی که تضمین‌کننده پایداری ربات می‌باشد، قرار گرفته و پایداری ربات را در طی این فرآیند به خوبی نشان می‌دهد. محدوده‌ی مجاز برای نقطه‌ی ممان صفر به منظور شبیه بودن مسئله به راه رفتن انسان، کمی بیشتر از این بازه (با در نظر گرفتن پوشش و یا عدم پوشش کفش برای پا انسان در هنگام راه رفتن) در نظر گرفته شده است که خطوط خط چین قرمز در "شکل 8" بیانگر همین موضوع می‌باشد.

9- نتیجه گیری

از آنجایی که هدف از این تحقیق پیش‌بینی مسیر حرکت ربات دوبا با حداکثر پایداری و حداقل انرژی مصرفی در طول حرکت به نحوی که ربات قادر باشد حرکت اندام تحتانی بدن فرد را شبیه‌سازی کند و مانند راه رفتن یک فرد سالم راه برود و الگوی صحیح راه رفتن را برای فردی که قادر نباشد به درستی راه برود ایجاد کند، لذا در این مقاله به منظور هرچه شبیه‌تر بودن مدل ارائه شده به انسان، گشتاور تنه‌ی مستقل در نظر گرفته نشد. همچنین صحت‌سنجی مسئله توسط اطلاعات تجربی گرفته شده از یک انسان مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل دینامیکی ربات با استفاده از روش نیوتون-اولر در فاز تک‌تکیه‌گاهی انجام گرفت و در نهایت مسیر راه رفتن ربات به نحوی پیش‌بینی گشت که انرژی در طول فاز تک‌تکیه‌گاهی مینیمم گردد و پایداری در طول این فاز به بیشترین مقدار خود برسد و الگوی صحیح راه رفتن فرد مورد بررسی ایجاد گشت. طبق پژوهش‌های انجام گرفته در این تحقیق و با توجه به مدل ارائه شده می‌توان ادعا کرد ربات موردنظر شبیه راه رفتن صحیح فرد خاص حرکت کند و قادر است با دریافت اطلاعات آناتومیکی

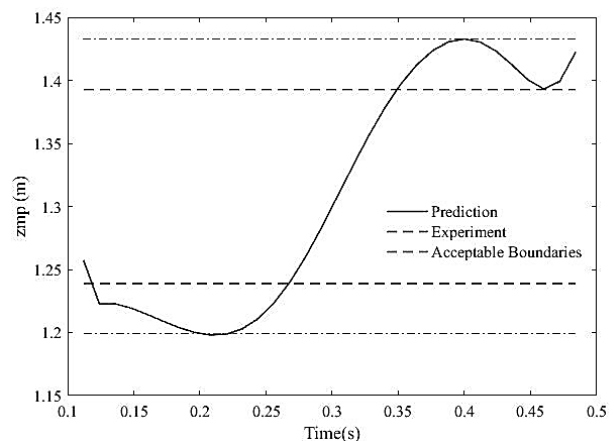


Fig. 8 Zero moment point position in single support phase

شکل 8 موقعیت نقطه ممان صفر در طول فاز تک تکیه‌گاهی

شکل 11 ران پا راست

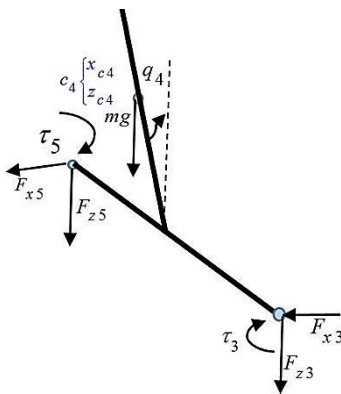


Fig. 12 Robot trunk

شکل 12 تنه ربات

11-3- ران پا راست

$$X_{C_3} = X_{\text{rhip}} + d_3 \times \sin(q_3) \quad (11)$$

$$Z_{C_3} = Z_{\text{rhip}} - d_3 \times \cos(q_3) \quad (12)$$

$$F_{x_3} = m_3 \times \ddot{x}_{c_3} + F_{x_2} \quad (13)$$

$$F_{z_3} = m_3 \times \ddot{z}_{c_3} + m_3 \times g + F_{z_2} \quad (14)$$

$$\tau_3 = I_3 \times \ddot{q}_3 + F_{x_3} \times (Z_{\text{rhip}} - Z_{c_3}) + F_{z_3} \times (X_{c_3} - X_{\text{rhip}}) + F_{z_2} \times (X_{\text{rk}} - X_{c_3}) + \tau_2 \quad (15)$$

در روابط فوق $x_{\text{rhip}}, z_{\text{rhip}}$ موقعیت افقی و عمودی مفصل استخوان خاصره و ران پا راست و $x_{\text{rk}}, z_{\text{rk}}$ نیز موقعیت افقی و عمودی زانو پا راست می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، رابطه‌ی (13) به‌دست آمده برای ران پای راست (f_{x_3})، این نیرو تابعی از نیروی عکس‌العمل افقی زمین (R_{xr}) می‌باشد و همچنین (f_{z_3}) هم تابعی از مجموع نیروی عمودی عکس‌العمل پاشنه و پنجه پا راست ($R_{zrh} + R_{zrm}$) می‌باشد. به‌منظور به‌دست آوردن روابط سینماتیکی و دینامیکی مربوط به پا چپ ربات، مراحل فوق برای آن تکرار می‌گردد.

11-4- نیروها و گشتاورها در تنه

$$X_{C_4} = X_{\text{rhip}} + d_4 \times \sin(q_4) \quad (16)$$

$$Z_{C_4} = Z_{\text{rhip}} - d_4 \times \cos(q_4) \quad (17)$$

$$-F_{x_3} - F_{x_5} = m_4 \times \ddot{x}_{c_4} \quad (18)$$

$$-F_{z_3} - F_{z_5} - m_4 \times g = m_4 \times \ddot{z}_{c_4} \quad (19)$$

$$\tau_5 + I_4 \times \ddot{q}_4 + F_{x_3} \times (Z_{c_4} - Z_{\text{rhip}}) + F_{z_3} \times (X_{\text{rhip}} - X_{c_4}) + F_{x_5} \times (Z_{c_4} - Z_{\text{rhip}}) + F_{z_5} \times (X_{\text{hip}} - X_{c_4}) + \tau_3 = 0 \quad (20)$$

از آن‌جایی که در مدل دینامیکی ربات دوبا انتخاب شده، عضو تنه به عنوان یک عضو مستقل از دو ران پا نمی‌باشد لذا برآیند گشتاورهای مربوط به تنه و دو ران پا برابر صفر می‌گردد.

12- مراجع

- [1] D. J. Todd, *Walking Machines: An Introduction to Legged Robots*, Kogan Page, London, pp. 190, 1985.
- [2] C. L. Shih, W. A. Gruver, Control of a biped robot in the double-support phase, *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern.*, Vol. 22, No. 4, pp. 729-735, 1992.
- [3] H. T. Odum, Energy analysis, *Science*, Vol. 196, No. May, p. 261, 1977.
- [4] X. Mu, Q. Wu, On impact dynamics and contact events for biped robots via impact effects, *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics. Part B Cybern.*, Vol. 36, No. 6, pp. 1364-1372, 2006.
- [5] M. Y. Zarrugh, C. W. Radcliffe, Computer generation of human gait

شکل 9 مچ پا راست ربات

کمی جلوتر از آن قرار بگیرد، به طور کامل از سطح زمین جدا می‌گردد. بنابراین نیروی عکس‌العمل عمودی پاشنه پای راست (R_{zrh})، در ابتدا فاز تک‌تکیه‌گاهی در بیشترین مقدار خود قرار داشته و با شروع فاز تک‌تکیه‌گاهی روند نزولی خود را تا رسیدن به میانه‌ی فاز طی می‌کند و از میانه‌ی فاز تا انتهای آن مقدار صفر خواهد داشت که این مقدار به معنی جدا شدن کامل پاشنه پا راست از سطح زمین می‌باشد.

11-2- ساق پا راست

$$X_{C_2} = X_{\text{rk}} + d_2 \times \sin(q_2) \quad (6)$$

$$Z_{C_2} = Z_{\text{rk}} - d_2 \times \cos(q_2) \quad (7)$$

$$F_{x_2} = m_2 \times \ddot{x}_{c_2} + F_{x_1} \quad (8)$$

$$F_{z_2} = m_2 \times \ddot{z}_{c_2} + m_1 \times g + F_{z_1} \quad (9)$$

$$\tau_2 = I_2 \times \ddot{q}_2 + F_{x_2} \times (Z_{\text{rk}} - Z_{c_2}) + F_{z_2} \times (X_{c_2} - X_{\text{rk}}) + F_{x_1} \times (Z_{c_2} - Z_{\text{ra}}) + F_{z_1} \times (X_{\text{ra}} - X_{c_2}) + \tau_1 \quad (10)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، روابط سینماتیکی و دینامیک برای مرکز ثقل هر عضو به صورت جداگانه به‌دست می‌آید. موقعیت افقی و عمودی مرکز جرم عضو دوم x_{c_2}, z_{c_2} نیز براساس موقعیت افقی و عمودی قوزک پای راست $x_{\text{ra}}, z_{\text{ra}}$ به‌دست می‌آید.

با ادامه این روند در نهایت موقعیت مرکز جرم همه‌ی اعضا براساس موقعیت قوزک پای سمت راست که در مسئله معلوم است به‌دست خواهد آمد. در روابط فوق $x_{\text{rk}}, z_{\text{rk}}$ به ترتیب موقعیت افقی و عمودی زانو پا راست می‌باشد.

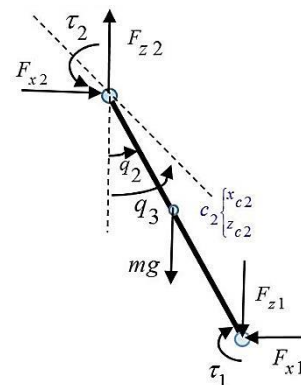


Fig. 10 Robot right leg

شکل 10 ساق پا راست ربات

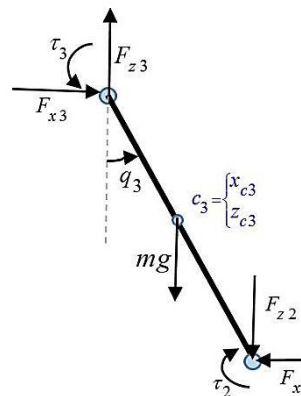


Fig. 11 Right foot thighs

- 721, 2004.
- [12] M. Vukobratović, J. Stepanenko, On the stability of anthropomorphic systems, *Mathematical Biosciences*, Vol. 15, No. 1-2, pp. 1-37, 1972.
- [13] H. F. N. Al-Shuka, B. Corves, W. H. Zhu, B. Vanderborght, Multi-level control of zero-moment point-based humanoid biped robots: a review, *Robotica*, No. February, pp. 1-27, 2015.
- [14] P. Sardain, G. Bessonnet, Forces acting on a biped robot. Center of pressure-zero moment point, *IEEE IEEE Transaction.on Systems, Man, and Cybernetics. Part A: Systems and Humans*, Vol. 34, No. 5, pp. 630-637, 2004.
- [15] M. S. 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.
- [16] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla, D. Stokic, *Biped locomotion: Dynamics, Stability, Control and Application*, Vol. 7, Springer Science & Business Media, pp. 777-780, 2012.
- [17] D. A. Winter, *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, John Wiley & Sons, pp. 1-26, 2009.
- kinematics, *J. Biomech.*, Vol. 12, No. 2, pp. 99-111, 1979.
- [6] A. Takanishi, M. Tochizawa, T. Takeya, H. Karaki, and I. Kato, "Realization of dynamic biped walking stabilized with trunk motion under known external force, *Advanced Robotics: 1989*, Springer, pp. 299-310, 1989.
- [7] Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, H. Arai, N. Koyachi, K. Tanie, Planning walking patterns for a biped robot, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 3, pp. 280-289, 2001.
- [8] K. Nagasaka, Y. Kuroki, S. Suzuki, Y. Itoh, J. Yamaguchi, Integrated motion control for walking, jumping and running on a small bipedal entertainment robot, *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference*, New Orleans, LA, USA, 2004, Vol. 4, pp. 3189-3194.
- [9] M. Rostami, G. Bessonnet, Impactless sagittal gait of a biped robot during the single support phase, *Robotics and Automation, 1998 Proceedings. 1998 IEEE International Conference, Belgium*, Vol. 2, pp. 1385-1391, 1998.
- [10] Z. Peng, Y. Fu, Z. Tang, Q. Huang, Online walking pattern generation and system software of humanoid BHR-2, *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Paris, France, pp. 5471-5476, 2006.
- [11] J. H. Park, M. Choi, Generation of an optimal gait trajectory for biped robots using a genetic algorithm, *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machines Elements and Manufacturing*, Vol. 47, No. 2, pp. 715-