



بهینه‌سازی حرکات دورانی پاشنه و پنجه برای ربات دو بعدی انسان‌نما مجهز به مفصل پنجه فعال

مجید ساده دل¹، عقیل یوسفی کما^{2*}، فائزه ایرانمنش³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک طراحی کاربردی، دانشگاه تهران، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک طراحی کاربردی، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی 17469-37181، aykoma@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 آذر 1394

پذیرش: 15 بهمن 1394

ارائه در سایت: 08 اسفند 1394

کلید واژگان:

ربات انسان‌نما

مفصل فعال پنجه

حرکات دورانی پاشنه و پنجه

بهینه‌سازی طراحی مسیر

چکیده

در پژوهش حاضر، اثرات افزودن پنجه فعال به یک ربات انسان‌نمای دو بعدی که دارای حرکات دورانی پاشنه و پنجه می‌باشد بررسی می‌گردد. در این راستا، ابتدا مسیر حرکت مفاصل مختلف ربات طراحی می‌شود. پس از طراحی مسیر، مدل دینامیکی ربات با استفاده از دو روش کین و لاگرانژ در فازهای مختلف حرکت استخراج می‌شود. همچنین صحت مدل دینامیکی استخراج شده، با استفاده از دو روش مختلف تایید می‌گردد. مدل ارائه شده، براساس ویژگی‌های ربات سورنا 3 بوده که این ربات در مرکز سیستم‌ها و فناوری‌های پیشرفته دانشگاه تهران طراحی و ساخته شده است. پس از آن، فرایند بهینه‌سازی با اتخاذ دو تابع هدف مختلف انجام می‌شود. توابع هدف برگزیده شده در این مقاله، مربوط به مصرف انرژی و پایداری ربات می‌باشند. هدف از بهینه‌سازی، کمینه کردن میزان مصرف انرژی و بیشینه کردن پایداری ربات است. در نهایت نتایج حاصل از بهینه‌سازی و آنالیز پارامتری ربات ارائه می‌شود. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که در هر سرعت یک مقدار بهینه برای زوایای دورانی پاشنه و پنجه وجود دارد که به ازای این مقادیر بهینه، میزان مصرف انرژی ربات کمینه خواهد شد. همچنین این نتایج نشان می‌دهند که زاویه دورانی پاشنه تأثیری بر روی پایداری ربات ندارد و تنها زاویه دوران پنجه است که در پایداری ربات تأثیرگذار است. در نهایت به بررسی اثرات جرم و طول پنجه بر روی توابع هدف پرداخته می‌شود و نشان داده می‌شود که افزایش جرم پنجه موجب افزایش مصرف انرژی و پایداری ربات خواهد شد، در حالی که افزایش نسبت طولی پنجه تأثیری بر روی توابع هدف ندارد.

Heel-off and toe-off motions optimization for a2D humanoid robot equipped with active toe joints

Majid Sadedel, Aghil Yousefi-koma*, Faezeh Iranmanesh

Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 17469-37181, Tehran, Iran, aykoma@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 30 November 2015

Accepted 04 February 2016

Available Online 27 February 2016

Keywords:

Humanoid robot

Active toe joint

Heel-off and toe-off motions

Path planning optimization

ABSTRACT

In this paper, the effects of the addition of an active toe joint on a 2D humanoid robot with heel-off and toe-off motions are studied. To this end, the trajectories of joints and links are designed first. After gait planning, the dynamic model of the humanoid robot in different phases of motion is derived using Kane and Lagrange methods. Then, the veracity of the derived dynamic model is demonstrated by two different methods. The under-study model is in accordance with the features of SURENA III, which is a humanoid robot designed and fabricated at the Center of Advanced Systems and Technologies (CAST) located in University of Tehran. Afterward, the optimization procedure is done by selection of two different goal functions; one of them minimizes the energy consumption and the other maximizes the stability of the robot. At last, the obtained results are presented. According to the results, there is an optimum value for heel-off and toe-off angles in each velocity which minimizes the consumption of energy. The results also show that, the heel-off angle does not have any significant effects on the stability of the robot while increasing the toe-off angle improves the stability of motion. Finally, the effects of mass and length of the toe joint is inspected. These inspections suggest that heavier toe joints cause an increase in both energy consumption and stability of the robot while increasing the length of the toe joint does not have any effects on both goal functions.

1- مقدمه

انسان‌نما را تشکیل می‌دهند، به طوری که این حرکات، نقش مهمی در ایجاد الگوی حرکتی شبیه به انسان را ایفا می‌کنند. از این رو، در دهه‌های اخیر،

حرکات دورانی پا حول پاشنه¹ و پنجه²، دو فاز مهم از حرکت ربات‌های

² Toe-off motion (TO)

¹ Heel-off motion (HO)

Please cite this article using:

M. Sadedel, A. Yousefi-koma, F. Iranmanesh, Heel-off and toe-off motions optimization for a2D humanoid robot equipped with active toe joints, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 87-97, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Sadedel, A. Yousefi-koma, F. Iranmanesh, Heel-off and toe-off motions optimization for a2D humanoid robot equipped with active toe joints, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 87-97, 2016 (in Persian)

توضیح رفتار دینامیکی ربات از یک مدل دینامیکی ساده شده استفاده می‌شود. مدل پاندول معکوس [20]، کارت تیبیل [21]، مدل های دو جرمی [22] و سه جرمی [23]، از جمله این مدل‌ها هستند. در روش آفلاین، کلیه محاسبات مربوط به طراحی مسیر، از پیش انجام و ذخیره شده و بر روی ربات پیاده سازی می‌شود. در این روش می‌توان از مدل‌های کامل‌تری برای توضیح رفتار دینامیکی ربات استفاده نمود [24]. در این پژوهش، به منظور بهینه‌سازی دقیق‌تر، روش طراحی مسیر آفلاین انتخاب شده است.

پس از طراحی مسیر، مدل دینامیکی ربات انسان‌نمای دو بعدی ارائه شده است. در مطالعات مختلف، روش‌های مختلفی برای ارائه مدل دینامیکی به کار رفته است. در تعدادی از پژوهش‌های انجام شده، از روش لاگرانژ برای استخراج مدل دینامیکی استفاده شده [27-25,5,1] در حالی که در پژوهش‌های دیگر، روش نیوتن-اولیو بکار گرفته شده است [29,28]. در مقاله حاضر، مدل دینامیکی ارائه شده بر اساس دو روش کین و لاگرانژ می‌باشد و صحت مدل‌های ارائه شده با استفاده از دو رویکرد مختلف سنجیده شده است. در نهایت بهینه‌سازی حرکت، بر مبنای الگوریتم ژنتیک و براساس دو تابع هدف مختلف انجام گرفته است.

بر خلاف سایر مطالعات انجام شده که اغلب تنها بر روی حرکت مفصل لگن متمرکز می‌شوند، در این مقاله، تمرکز اصلی بر روی چرخش پا و پارامترهای طراحی مسیر مفصل پنجه می‌باشد. برای این منظور، چندین آنالیز پارامتری، برای تعیین تاثیر زوایای دوران پاشنه و پنجه و پارامترهای طراحی پنجه مانند جرم و طول پنجه انجام گرفته است. این آنالیز پارامتری براساس دو تابع هدف مختلف شامل مصرف انرژی و پایداری صورت پذیرفته است.

2- طراحی مسیر ربات انسان نما

در بخش حاضر ابتدا ویژگی‌ها و مشخصات ربات مورد بررسی، معرفی می‌گردد، سپس به روند طراحی مسیر ربات مذکور پرداخته می‌شود.

2-1- مشخصات ربات

مدل استفاده شده در این مقاله، براساس مدل دو بعدی ربات انسان‌نمای سورنا سه می‌باشد. این ربات در مرکز سیستم‌ها و فناوری‌های پیشرفته دانشگاه تهران⁸ ساخته شده است.

هر پای ربات دارای 4 درجه آزادی بوده، به طوری که هر یک از مفاصل مچ پا، زانو، لگن و پنجه دارای یک درجه آزادی فعال هستند. در مجموع مدل به کار رفته دارای 8 درجه آزادی فعال می‌باشد. تصویر شماتیکی این مدل در شکل 1 نشان داده شده است.

پارامترهایی که مشخصات و ویژگی‌های ربات را نشان می‌دهند در جدول 1، جدول 2 و جدول 3، معرفی شده‌اند. لازم به ذکر است مقادیر ممان اینرسی حول محور عمود بر صفحه واقع در مرکز جرم هر بند بیان شده است.

2-2- پارامترهای طراحی مسیر

پارامترهای بکار رفته در طراحی مسیر ربات در جدول 4 معرفی شده‌اند. حرکت ربات شامل دو فاز تک تکیه‌گاهی و دو تکیه‌گاهی می‌باشد. پارامترهای معرفی شده در جدول 4 به همراه فازهای مختلف حرکت در شکل 2 نمایش داده شده‌اند. روند طراحی مسیر به این صورت است که ابتدا مسیر حرکت مچ پا و مفصل لگن با توجه به قیود مورد نیاز برای حرکت ربات و

بخش مهمی از تحقیقات انجام گرفته توسط محققان حوزه ربات انسان‌نما، به بررسی این نوع حرکت اختصاص یافته است. در این میان، چوالریو و همکاران [2,1] الگوهای مختلف حرکت را برای مدل‌های دو بعدی و سه بعدی ربات، بهینه‌سازی و مقایسه نموده‌اند. این الگوهای حرکتی با وجود حرکات مختلف دورانی پاشنه و پنجه تقسیم‌بندی شده‌اند. همچنین گریزل [3] پایداری حرکت ربات با وجود چرخش کف پا را با استفاده از نقشه بازگشتی پوینکاره¹ مطالعه نموده است. خوافی نیز به طراحی مسیر حرکت ربات دوپای سه بعدی با مفصل پنجه فعال پرداخته است. مدل او دارای 9 بند و 16 درجه آزادی فعال است که نسبت به مدل‌های متداول در مفصل مچ و پنجه دو درجه آزادی بیشتر دارد [4].

از جمله فواید استفاده از پنجه فعال، ایجاد حرکتی طبیعی‌تر در حین دوران مفصل پنجه ربات می‌باشد؛ به طور مثال در ربات‌های اچ-سون² [5]، لولا³ [6]، توبوتا⁴ [7] و اچ-آر-پی فرسی⁵ [8] از مفصل پنجه فعال و در ربات وایبان⁶ [9]، از مفصل پنجه غیرفعال استفاده شده است. حرکت سریع‌تر [5]، افزایش ارتفاع گام [5]، بهبود پایداری [11,10]، صرفه جویی در مصرف انرژی [12]، کاهش بیشینه سرعت مفاصل [10] و شبیه‌تر نمودن حرکت ربات به حرکت انسان [10,8] از جمله فواید استفاده از مفصل پنجه فعال می‌باشد. هندورا [13] با استفاده از مفصل پنجه و پاشنه فعال، الگوهای حرکتی با قابلیت انعطاف‌پذیری زانو را ایجاد نمود. کاجیتا [14] با قرار دادن فنرهایی در مفصل پنجه یک الگوی دویدن برای ربات اچ-آر-پی-تو⁷ ارائه داد. همچنین، کومار [15] نوعی از مفصل پنجه هیبرید را معرفی نمود که در آن به منظور کاهش ماکزیمم گشتاور مورد نیاز برای این مفصل، از یک مکانیزم فنر-دمپر استفاده شده است.

براساس مطالعات مذکور، هدف از بهینه‌سازی، طراحی کارآمد مفصل پنجه و حرکات دورانی پاشنه و پنجه موثر می‌باشد. توابع هدفی که عمدتاً در مراجع به کار رفته است شامل تابع هدف مربوط به کمینه مصرف انرژی [17,16] و کمینه گشتاور مورد نیاز مفاصل [19,18] می‌باشند. همچنین، پارامترهای حرکتی مفصل لگن عمدتاً به‌عنوان پارامتر بهینه‌سازی به کار می‌روند، هرچند انتخاب پارامترهای مربوط به حرکت پاشنه و پنجه به عنوان پارامتر طراحی بسیار تعیین کننده به نظر می‌رسد.

در این مقاله، هدف اصلی، بهینه‌سازی 4 پارامتر مربوط به حرکت کف پا می‌باشد. این 4 پارامتر شامل زوایای دوران پاشنه و پنجه و همچنین جرم و طول مفصل پنجه می‌باشند. دو تابع هدف مختلف در طول فرایند بهینه‌سازی به کار رفته است، که این دو تابع هدف شامل کمینه مصرف انرژی و بیشینه پایداری می‌باشند. در این مقاله پس از بیان مشخصات و ویژگی‌های کلی ربات انسان‌نمای به کار رفته، طراحی مسیر ربات و دست‌یابی به الگوی حرکتی راه رفتن آن، توضیح داده شده است. روش‌های به کار رفته برای طراحی مسیر به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: 1) روش آنالیز (2) روش آفلاین.

در روش آنالیز، مسیر حرکت تک تک مفاصل، در حین حرکت ربات محاسبه می‌گردد. از آنجایی که طراحی مسیر در روش آنالیز به صورت بلادرنگ می‌باشد و امکان محاسبات زیاد در این حالت وجود ندارد، برای

¹ Poincare return map

² H7

³ Lola

⁴ Toyota

⁵ HRP-4C

⁶ Wabian

⁷ HRP-2

⁸ Center of advanced systems and technologies(CAST)

3-2- طراحی مسیر مفصل مچ

به منظور طراحی مسیر مفصل مچ، قیودی برای حرکت ربات در نظر گرفته می‌شود که این قیود بر روی زاویه کف پا و مولفه‌های افقی و عمودی حرکت مچ پای ربات در نظر گرفته می‌شوند. هدف از طراحی مسیر مفصل مچ، بدست آوردن چند جمله‌ای‌هایی برای زاویه کف پا نسبت به زمین و همچنین مولفه‌های افقی و عمودی مفصل مچ در طول حرکت است. قیودی که برای زاویه کف پا در نظر گرفته می‌شوند در رابطه 1 مشخص شده‌اند. این قیود برای پای راست ربات در نظر گرفته می‌شوند. برای پای چپ نیز قیود مشابهی وجود دارند با این تفاوت که مدت زمان یک گام به قیود زمانی اضافه می‌شوند.

$$q_f = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq T_{dm2} \\ q_{f-b} & t = T_d \\ q_{f-m} & t = T_d + T_{sm} \\ q_{f-f} & t = T_c \\ 0 & T_c + T_{dm1} \leq t \leq 2T_c \end{cases} \quad (1)$$

به همین ترتیب قیودی هم برای مختصه افقی و عمودی مفصل مچ پای راست در نظر گرفته می‌شود که به ترتیب در رابطه 2 و رابطه 3 مشخص شده‌اند.

$$x_{ar} = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq T_{dm2} \\ L_{af}(1 - \cos(Q_{fr})) + L_{an} \sin(Q_{fr}) & t = T_d \\ x_{am} & t = T_d + T_{sm} \\ 2D_c + L_{ab}(\cos(Q_{fr}) - 1) + L_{ab} \sin(Q_{fr}) & t = T_c \\ 2D_c & T_c + T_{dm1} \leq t \leq 2T_c \end{cases} \quad (2)$$

$$z_{ar} = \begin{cases} L_{an} & 0 \leq t \leq T_{dm2} \\ L_{af} \sin(Q_{fr}) + L_{an}(1 - \cos(Q_{fr})) & t = T_d \\ L_{an} + z_{am} & t = T_d + T_{sm} \\ -L_{ab} \sin(Q_{fr}) + L_{an} \cos(Q_{fr}) & t = T_c \\ L_{an} & T_c + T_{dm1} \leq t \leq 2T_c \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه 2، x_{am} برابر با نصف طول گام و در رابطه 3، z_{am} برابر با 0.1 در نظر گرفته شده است. تمامی این قیود با در نظر گرفتن حرکت ربات با وجود دوران پنجه و پاشنه ایجاد شده‌اند. با توجه به این قیود حرکتی و با در نظر گرفتن پیوستگی سرعت و شتاب، چند جمله‌ای‌هایی از مرتبه مناسب برای توصیف حرکت مفصل مچ تعیین می‌شوند.

4-2- طراحی مسیر مفصل لگن

مشابه آنچه در روند طراحی مسیر مفصل مچ صورت گرفت، به منظور طراحی مسیر مفصل لگن نیز قیودی برای حرکت این مفصل در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که زاویه بالاتنه ربات همواره ثابت بوده و در حالت عمودی فرض می‌شود، بنابراین تنها برای حرکت در راستای افقی و عمودی، قیودی مطابق با رابطه 4 و رابطه 5 در نظر گرفته می‌شود.

$$x_h = \begin{cases} x_{ed} & t = 0 \\ D_c - x_{sd} & t = T_d \\ D_c + x_{ed} & t = T_c \\ 2D_c - x_{sd} & t = T_c + T_d \\ 2D_c + x_{ed} & t = 2T_c \end{cases} \quad (4)$$

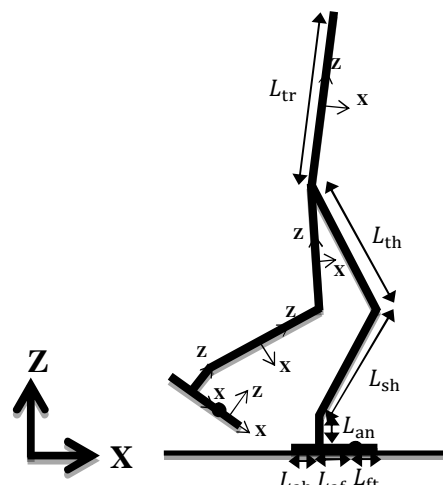


Fig. 1 The schematic picture of the 2D model of the under-study robot

شکل 1 تصویر شماتیکی مدل دو بعدی ربات مورد بررسی

جدول 1 طول بندها

| نام پارامتر | توضیحات | طول (میلی‌متر) |
|-------------|----------------------|----------------|
| L_{tr} | طول بالاتنه | 568 |
| L_{th} | طول ران | 360 |
| L_{sh} | طول ساق | 360 |
| L_{an} | فاصله مچ تا کف پا | 128 |
| L_{ab} | فاصله کف پا تا پاشنه | 101.5 |
| L_{af} | فاصله کف پا تا پنجه | 166.5 |
| L_{ft} | طول پنجه | 30 |

جدول 2 جرم بندها

| نام پارامتر | توضیحات | جرم (کیلوگرم) |
|-------------|-------------|---------------|
| M_{tr} | جرم بالاتنه | 39.396 |
| M_{th} | جرم ران | 6.327 |
| M_{sh} | جرم ساق | 4.561 |
| M_f | جرم کف پا | 2.236 |
| M_t | جرم پنجه | 0.512 |

جدول 3 ممان اینرسی بندها

| نام پارامتر | توضیحات | ممان اینرسی (کیلوگرم متر مربع) |
|-------------|---------------------|--------------------------------|
| J_{tr} | ممان اینرسی بالاتنه | 2.94449 |
| J_{th} | ممان اینرسی ران | 0.06165 |
| J_{sh} | ممان اینرسی ساق | 0.07384 |
| J_f | ممان اینرسی کف پا | 0.02260 |
| J_t | ممان اینرسی پنجه | 0.00015 |

همچنین پیوستگی سرعت و شتاب، طراحی می‌شود. سپس با استفاده از سینماتیک معکوس مسیر حرکت مفصل زانو و زوایای سایر مفاصل بدست می‌آیند.

$$\begin{cases} (x_k - x_h)^2 + (z_k - z_h)^2 = L_{th}^2 \\ (x_k - x_a)^2 + (z_k - z_a)^2 = L_{sh}^2 \end{cases} \quad (6)$$

در رابطه 6، x_k و z_k بیانگر مختصات مفصل زانو می‌باشند. شکل 3 تعبیر هندسی این رابطه را نشان می‌دهد.

زوایای مفصل نیز با استفاده از رابطه 7 بدست می‌آیند:

$$\begin{cases} Q_{tr} + q_h = \tan^{-1}\left(\frac{x_k - x_h}{z_k - z_h}\right) \\ Q_{tr} + q_h + q_k = \tan^{-1}\left(\frac{x_a - x_h}{z_a - z_h}\right) \\ Q_{tr} + q_h + q_k + q_a = Q_f \\ Q_{tr} + q_h + q_k + q_a + q_t = Q_{ft} \end{cases} \quad (7)$$

در رابطه فوق q_h, q_k, q_a, q_t به ترتیب زوایای مفصل لگن، زانو، مچ و پنجه هستند. در ضمن Q_{tr}, Q_f, Q_{ft} به ترتیب بیانگر زوایه لینک‌های بالاتنه،

$$z_h = \begin{cases} Z_{h-min} & t = \frac{T_d}{2} \\ Z_{h-max} & t = T_d + \frac{T_s}{2} \\ Z_{h-min} & t = T_c + \frac{T_d}{2} \\ Z_{h-max} & t = T_c + T_d + \frac{T_s}{2} \end{cases} \quad (5)$$

5-2- سینماتیک معکوس

پس از طراحی مسیر مفصل مچ و لگن با توجه به قیود حرکتی، لازم است تا مسیر مفصل زانو و مفصل پنجه و همچنین زوایای مفصل با استفاده از سینماتیک معکوس بدست آید. با استفاده از رابطه 6 مختصات افقی و عمودی مفصل زانو بدست می‌آید.

جدول 4 پارامترهای طراحی مسیر

Table 4 The parameters of path planning

| نام پارامتر | مقدار پارامتر | واحد | توضیحات |
|-------------|----------------------------------|-----------------|--|
| V | 0.5 | کیلومتر بر ساعت | سرعت حرکت ربات |
| T_d | $0.4T_c$ | ثانیه | دوره زمانی فاز دوتکیه‌گامی ¹ |
| T_s | $T_c - T_d$ | ثانیه | دوره زمانی فاز تک‌تکیه‌گامی ² |
| T_{sm} | $0.4T_s$ | ثانیه | زمان میانی فاز تک‌تکیه‌گامی |
| T_{dm1} | $0.3T_d$ | ثانیه | زمان میانی اول در فاز دوتکیه‌گامی |
| T_{dm2} | $0.7T_d$ | ثانیه | زمان میانی دوم در فاز دوتکیه‌گامی |
| T_c | D_c/V | ثانیه | مدت زمان یک گام |
| q_{f-f} | -10 | درجه | زاویه دوران پاشنه در ابتدای فاز دو تکیه‌گامی |
| q_{f-m} | 0 | درجه | زاویه پای معلق نسبت به زمین در زمان میانی فاز تک‌تکیه‌گامی |
| q_{f-b} | 10 | درجه | زاویه دوران پنجه در انتهای فاز دو تکیه‌گامی |
| x_{ed} | $0.15D_c$ | متر | فاصله بین مفصل لگن و مفصل مچ در پایان فاز تک‌تکیه‌گامی |
| x_{sd} | $0.1D_c$ | متر | فاصله بین مفصل لگن و مفصل مچ در ابتدای فاز تک‌تکیه‌گامی |
| Z_{h-min} | $0.87(L_{an} + L_{sh} + L_{th})$ | متر | کمترین ارتفاع مفصل لگن |
| Z_{h-max} | $0.9(L_{an} + L_{sh} + L_{th})$ | متر | بیشترین ارتفاع مفصل لگن |
| D_c | 0.4 | متر | طول گام |

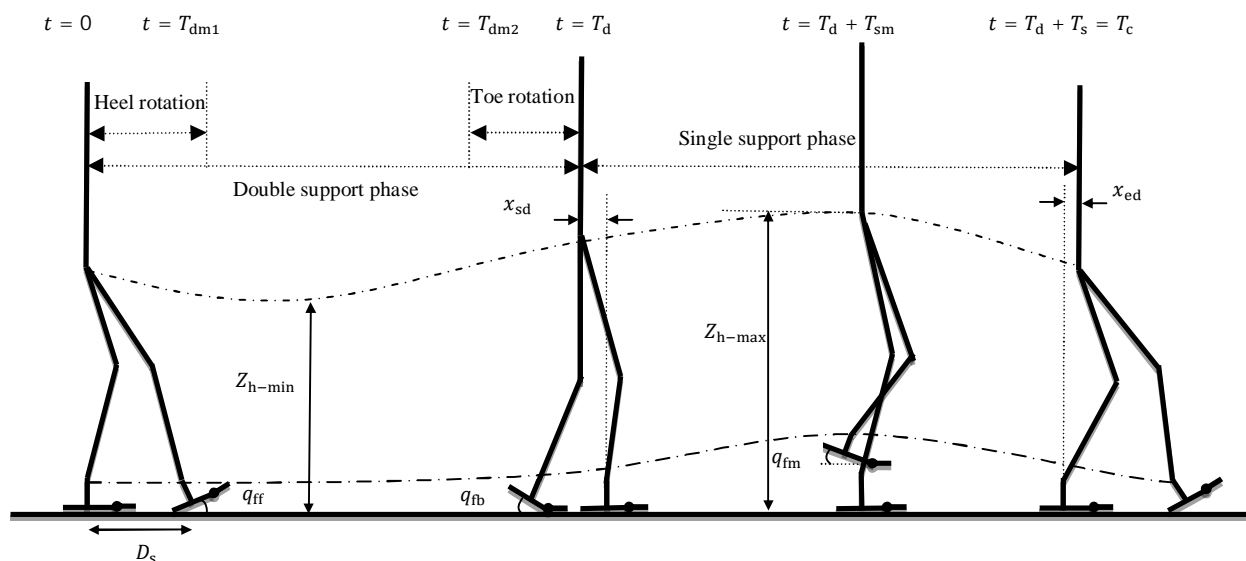


Fig. 2 The graphical view of the path planning parameters and different phases of motion

شکل 2 نمایش تصویری پارامترهای طراحی مسیر و فازهای مختلف حرکت

¹ Double support phase (DSP)

² Single support phase (SSP)

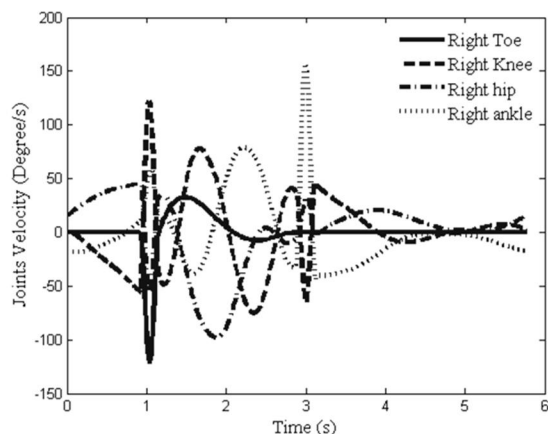


Fig. 5 Angular velocity of joints

شکل 5 سرعت‌های زاویه‌ای مفاصل

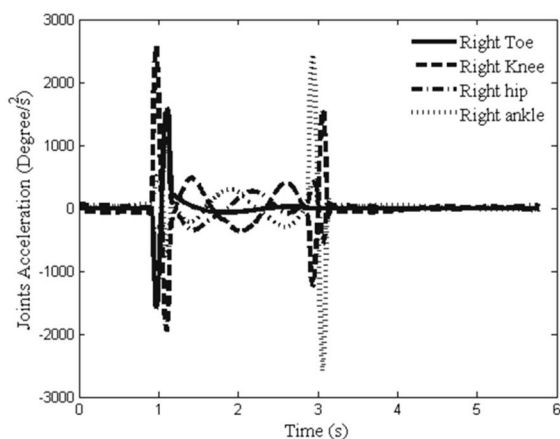


Fig. 6 Angular acceleration of joints

شکل 6 شتاب‌های زاویه‌ای مفاصل

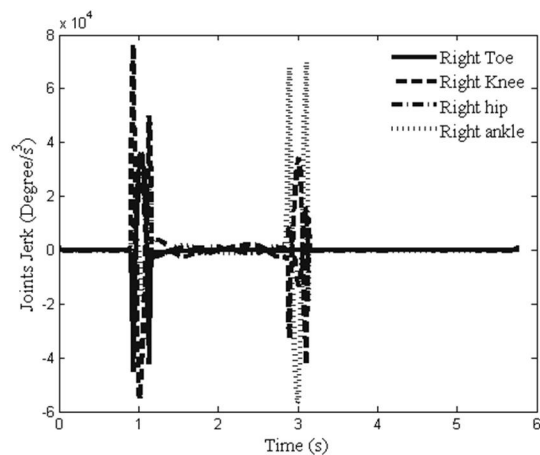


Fig. 7 Angular jerk of joints

شکل 7 حرکت زاویه‌ای مفاصل

می‌شود: (1) روش لاگرانژ (2) روش کین.

3-1- استخراج مدل دینامیکی

برای توضیح حرکت ربات از بردار مختصات تعمیم یافته که بوسیله رابطه 9 تعریف می‌شود، استفاده شده است.

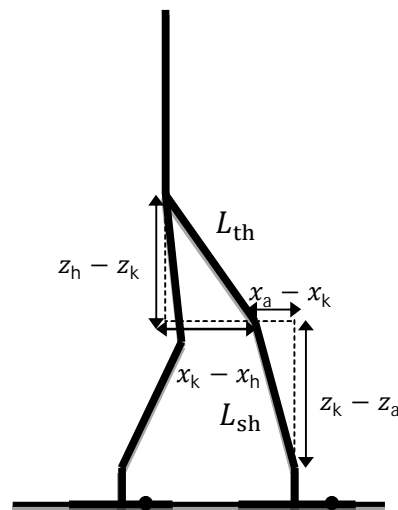


Fig. 3 The geometrical explanation of the equation 6

شکل 3 تعبیر هندسی رابطه 6

کف پا و پنجه پا می‌باشند، لازم به ذکر است برای ساده‌سازی Q_{ft} و Q_{tr} صفر در نظر گرفته شده است. با حل چهار معادله-چهار مجهول رابطه 7 زوایای مفاصل q_t, q_a, q_k, q_h بدست می‌آید.

برای بدست آوردن مسیر مفصل پنجه نیز از رهیافت مشابهی استفاده می‌شود. رابطه 8 مختصات افقی و عمودی مفصل پنجه را با استفاده از مختصات مفصل مچ و موقعیت زاویه‌ای کف پا بدست می‌آورد.

$$\begin{aligned} x_t &= x_a - L_{an} \sin(q_f) + L_{af} \cos(q_f) \\ z_t &= z_a - L_{an} \cos(q_f) - L_{af} \sin(q_f) \end{aligned} \quad (8)$$

در رابطه 8، x_t و z_t نشان دهنده مختصه افقی و عمودی مفصل پنجه می‌باشند.

نمودارهای حاصل از طراحی مسیر مفاصل برای پای راست در شکل 4 تا شکل 9 نمایش داده شده است. در شکل‌های 4، 5، 6 و 7 به ترتیب نمودارهای مربوط به زاویه، سرعت، شتاب و حرکت زاویه‌ای مفاصل نمایش داده شده است و در شکل‌های 8 و 9 به ترتیب موقعیت مفاصل در راستاهای x و z نمایش داده شده است.

3- مدل دینامیکی

به منظور استخراج مدل دینامیکی ربات انسان‌نما از دو روش مختلف استفاده

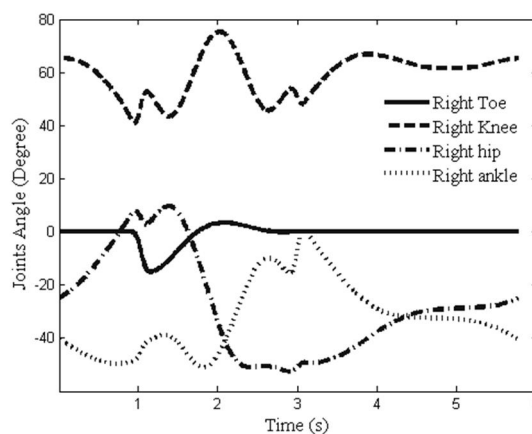


Fig. 4 Angular trajectory of joints

شکل 4 مسیرهای زاویه‌ای مفاصل

در رابطه 12، اولین عبارت در سمت چپ نشان‌دهنده اثرات اینرسی، دومین عبارت نشان‌دهنده اثرات کوریولیس و گریز از مرکز و سومین عبارت نشانگر اثرات گرانش می‌باشد. ابعاد هرکدام از این ماتریس‌ها براساس درجات آزادی ربات و همچنین قیود ایجاد شده در فازهای مختلف حرکت تعیین می‌شود. عبارت سمت راست رابطه 12 نیز بردار نیروی تعمیم یافته نامیده می‌شود که خود در بردارنده نیروها و گشتاورهای خارجی وارد بر ربات می‌باشد.

با توجه به این که تفاوت فازهای حرکتی در ربات دوپا وابسته به نحوه قرارگیری پاها و تماس آن‌ها با زمین بوده، برای اینکه بتوان معادلات حرکت را به صورت عمومی در تمامی فازهای حرکت استخراج کرد، در ابتدا ربات به صورت یک جسم آزاد در فضا، بدون هیچ‌گونه تماسی با محیط اطراف در نظر گرفته می‌شود. در این حالت تنها گشتاورهای مفاصل به عنوان نیروهای خارجی به ربات اعمال می‌شوند. به این ترتیب، بردار نیروی تعمیم یافته به صورت رابطه 13 تعریف می‌شود:

$$Q = B_{11 \times 8} \tau_{8 \times 1}, B_{11 \times 8} = \begin{bmatrix} I_{8 \times 8} \\ 0_{3 \times 8} \end{bmatrix}, \tau_{8 \times 1} = \begin{bmatrix} \tau_{4 \times 1}^r \\ \tau_{4 \times 1}^l \end{bmatrix} \quad (13)$$

با توجه به این که قیودی که بین کف پای ربات و زمین وجود دارد از نوع هولونومیک است [30]، هرکدام از این قیود را می‌توان با نیروها و یا گشتاورهای مناسب جایگزین کرد. برای این کار از روش رهاسازی قیود استفاده می‌شود [30]. بر مبنای این روش، نقطه اثر نیروها و گشتاورهای جایگزین شده، بین نقاط مختلف کف پا تغییر می‌کند که این تغییر مکان وابسته به مکان نقطه ممان صفر [31] و فاز فعلی حرکت می‌باشد. از این رو، عبارت‌های متناظر با این نیروها در بردار نیروی تعمیم یافته وابسته به فاز حرکت بوده، به طوری که همراه با تغییر فاز، دستخوش تغییر می‌شوند. بردار نیروی تعمیم یافته به همراه عبارت‌های تشکیل دهنده آن برای فازهای مختلف حرکت در جدول 5 نشان داده شده‌اند.

براساس جدول 5، اگر نقطه ممان صفر در محدوده کف پای ایستاده باشد، نقطه اثر نیروهای عکس‌العمل زمین نقطه "s" خواهد بود. در این حالت هیچ نیروی عکس‌العملی به نقطه "t" اعمال نمی‌شود و وزن لینک پنجه توسط مفصل پنجه تحمل می‌شود. چنانچه نقطه ممان صفر در محدوده پای ایستاده باشد، نقطه اثر نیروهای عکس‌العمل زمین، نقطه "t" واقع در وسط لینک پنجه خواهد بود. در صورتی که تنها یک نقطه از پا با زمین در تماس باشد، مانند حالتی که تنها پاشنه پای ربات روی زمین است، همین نقطه تماس به عنوان نقطه اثر نیروهای عکس‌العمل زمین در نظر گرفته می‌شود.

توجه به این نکته حائز اهمیت می‌باشد که نقاط "s" و "t" همواره ثابت بوده و در هیچ جهتی دستخوش جابجایی یا دوران نمی‌شوند. در حالتی که پای ربات بر روی زمین قرار دارد، قیودی که برای حرکت ربات وجود دارد شامل دو قید برای حرکت در جهت افقی و عمودی و یک قید برای دوران حول محور عمود بر صفحه می‌باشد که در مجموع سه قید برای هر پای ایستاده وجود دارد. با استفاده از روش رهاسازی قیود می‌توان این سه قید را با دو نیرو و یک گشتاور جایگزین کرد. به این ترتیب قیود، حذف شده و نیروهای عکس‌العمل زمین در قالب دو نیرو و یک گشتاور جایگزین می‌شوند. این نیروهای عکس‌العمل در حقیقت بخشی از بردار نیروی تعمیم یافته می‌باشند که به صورت $J_{(20 \times 6)}^T F_{(6 \times 1)}$ ظاهر می‌گردند. در این عبارت J ، ماتریس ژاکوبین نقطه اثر نیروهای عکس‌العمل در سیستم مختصات عمومی می‌باشد.

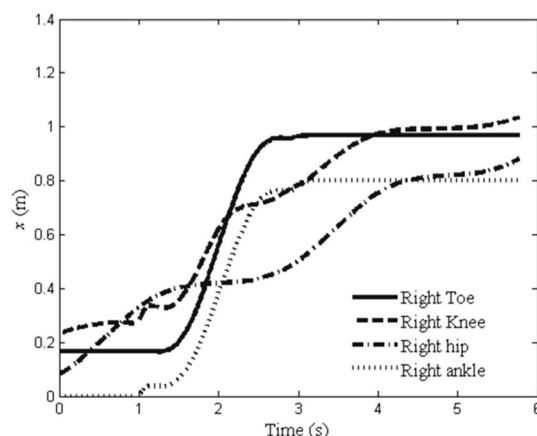


Fig. 8 Position of joints in x direction

شکل 8 موقعیت مفاصل در راستای x

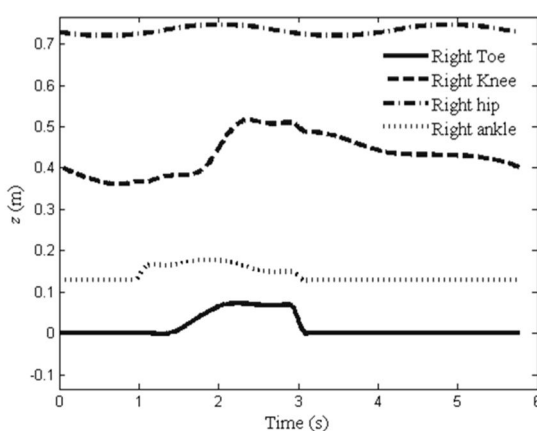


Fig. 9 Position of joints in z direction

شکل 9 موقعیت مفاصل در راستای z

$$q = [q_{hr} \ q_{kr} \ q_{ar} \ q_{tr} \ q_{hl} \ q_{kl} \ q_{al} \ q_{tl} \ x_h \ z_h \ Q_{tr}]^T \quad (9)$$

در رابطه 9، مختصاتی که با اندیس r مشخص شده‌اند مربوط به پای راست و آن‌هایی که با اندیس l مشخص شده‌اند مربوط به پای چپ می‌باشند. معادلات حاکم بر روش لاگرانژ به فرم رابطه 10 می‌باشد:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial U}{\partial q} = Q$$

$$T = \sum_{i=0}^6 \frac{1}{2} m_i (\dot{x}^2 + \dot{z}^2) + \sum_{i=0}^6 \frac{1}{2} J_i \dot{q}_i^2$$

$$U = \sum_{i=0}^6 m_i g z_i \quad (10)$$

همچنین معادلات حاکم بر روش کین به صورت رابطه 11 می‌باشند:

$$\sum_{i=0}^6 (m_i [\ddot{x}_i \ \ddot{z}_i + g] \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial \dot{q}} \\ \frac{\partial \dot{z}_i}{\partial \dot{q}} \end{bmatrix}) + \sum_{i=0}^6 (J_i \ddot{q}_i \frac{\partial \dot{q}_i}{\partial \dot{q}}) = Q \quad (11)$$

در روابط فوق J شمارنده درایه‌های بردار مختصات تعمیم یافته است که از 1 تا 11 تغییر می‌کند. پس از ساده‌سازی هر یک از دو رابطه 10 یا 11، رابطه 12 حاصل می‌شود.

به این ترتیب فرم ساده شده معادلات مربوط به مدل دینامیکی با استفاده از هر دو روش لاگرانژ و کین به صورت رابطه 12 می‌باشد.

$$M_{11 \times 11}(q) \times \ddot{q} + C_{11 \times 11}(q, \dot{q}) + G_{11 \times 11}(q) = Q \quad (12)$$

جدول 5 معادلات دینامیکی ربات برای فازهای مختلف حرکت

Table 5 Dynamic equations for different phases of the robot motion

| فاز حرکت | تصویر شماتیک | نیروهای عکس‌العمل زمین و بردار نیروی تعمیم یافته |
|---|--------------|--|
| کف پای راست روی زمین در فاز تک تکیه‌گاهی | | a) $F_{sr} = [F_{x_r}, F_{z_r}, M_{y_r}]^T$ $Q = [B \ J_{sr}^T]_{11 \times 11} \begin{bmatrix} \tau \\ F_{sr} \end{bmatrix}_{11 \times 1}$ |
| پنجه پای راست روی زمین در فاز تک تکیه‌گاهی | | b) $F_{tr} = [F_{x_r}, F_{z_r}, M_{y_r}]^T$ $Q = [B \ J_{tr}^T]_{11 \times 11} \begin{bmatrix} \tau \\ F_{tr} \end{bmatrix}_{11 \times 1}$ |
| کف هر دو پا روی زمین در فاز دو تکیه‌گاهی | | a) $F_{sr} = [F_{x_r}, F_{z_r}, M_{y_r}]^T$ $F_{sl} = [F_{x_l}, F_{z_l}, M_{y_l}]^T$ $Q = [B \ J_{sr}^T \ J_{sl}^T]_{11 \times 14} \begin{bmatrix} \tau \\ F_{sr} \\ F_{sl} \end{bmatrix}_{14 \times 1}$ |
| کف پای راست و پاشنه پای چپ روی زمین در فاز دو تکیه‌گاهی | | b) $F_{tr} = [F_{x_r}, F_{z_r}, M_{y_r}]^T$ $F_{tl} = [F_{x_l}, F_{z_l}, M_{y_l}]^T$ $Q = [B \ J_{tr}^T \ J_{tl}^T]_{11 \times 14} \begin{bmatrix} \tau \\ F_{tr} \\ F_{tl} \end{bmatrix}_{14 \times 1}$ |
| پنجه پای راست و کف پای چپ روی زمین در فاز دو تکیه‌گاهی | | $F_{sr} = [F_{x_r}, F_{z_r}, M_{y_r}]^T$ $F_{hl} = [F_{x_l}, F_{z_l}]^T$ $Q = [B \ J_{sr}^T \ J_{hl}^T]_{11 \times 13} \begin{bmatrix} \tau \\ F_{sr} \\ F_{hl} \end{bmatrix}_{13 \times 1}$ |
| پنجه پای راست و پاشنه پای چپ روی زمین در فاز دو تکیه‌گاهی | | a) $F_{tr} = [F_{x_r}, F_{z_r}, M_{y_r}]^T$ $F_{sl} = [F_{x_l}, F_{z_l}, M_{y_l}]^T$ $Q = [B \ J_{tr}^T \ J_{sl}^T]_{11 \times 14} \begin{bmatrix} \tau \\ F_{tr} \\ F_{sl} \end{bmatrix}_{14 \times 1}$ |
| | | b) $F_{tr} = [F_{x_r}, F_{z_r}, M_{y_r}]^T$ $F_{tl} = [F_{x_l}, F_{z_l}, M_{y_l}]^T$ $Q = [B \ J_{tr}^T \ J_{tl}^T]_{11 \times 14} \begin{bmatrix} \tau \\ F_{tr} \\ F_{tl} \end{bmatrix}_{14 \times 1}$ |
| | | $F_{tr} = [F_{x_r}, F_{z_r}, M_{y_r}]^T$ $F_{hl} = [F_{x_l}, F_{z_l}]^T$ $Q = [B \ J_{tr}^T \ J_{hl}^T]_{11 \times 13} \begin{bmatrix} \tau \\ F_{tr} \\ F_{hl} \end{bmatrix}_{13 \times 1}$ |

سپس مقادیر تصادفی بردار مختصات تعمیم یافته و مشتقات اول و دوم آن در دو رابطه جایگذاری شده و خروجی‌ها که گشتاور مفاصل و نیروهای کف پا می‌باشند مقایسه شده است. از تساوی خروجی‌ها می‌توان به صحت مدل دینامیکی استخراج شده، پی برد.

در رهیافت دوم، نقطه ممان صفر با استفاده از دو روش مختلف محاسبه می‌شود. در روش اول، محاسبه نقطه ممان صفر بر مبنای سینماتیک ربات انجام می‌گیرد [32]. محاسبه نقطه ممان صفر بر مبنای سینماتیک ربات با استفاده از رابطه 14 انجام می‌گیرد.

$$X_{ZPM} = \frac{\sum_{i=1}^n x_{G_i} \times m_i (\ddot{z}_{G_i} + g) - \sum_{i=1}^n z_{G_i} \times m_i \ddot{x}_{G_i} - \sum_{i=1}^n \bar{y}_i \ddot{q}_y}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_{G_i} + g)} \quad (14)$$

زمانی که تنها پاشنه ربات با زمین در تماس است، دوران حول محور عمود بر صفحه، امکان‌پذیر بوده، بنابراین قیود حرکتی تنها برای حرکت ربات در جهات افقی و عمودی ممانعت ایجاد می‌کنند، در نتیجه عکس‌العمل‌های جایگزین شده نیز شامل دو نیرو در راستاهای مورد نظر می‌باشند. در این حالت، دیگر گشتاور جایگزینی وجود نخواهد داشت و بنابراین یکی از مولفه‌های $J_{(20 \times 6)}^T F_{(6 \times 1)}$ نیز حذف می‌شود.

2-3- صحت سنجی مدل دینامیکی

به منظور سنجش اعتبار مدل دینامیکی بدست آمده، دو رهیافت مختلف اتخاذ شده است. در رهیافت اول، فرم کلی مدل دینامیکی که با استفاده از رابطه 12 بیان شد، از طریق دو روش کین و لاگرانژ بدست آورده می‌شود.

جدول 6 پارامترهای بهینه‌سازی

Table 6 Optimization parameters

| ردیف | پارامترهای بهینه‌سازی |
|------|-----------------------|
| 1 | D_c |
| 2 | T_d |
| 3 | T_{sm} |
| 4 | T_{dm1} |
| 5 | T_{dm2} |
| 6 | Z_{am} |
| 7 | q_{f-m} |
| 8 | q_{f-b} |
| 9 | q_{f-f} |
| 10 | x_{ed} |
| 11 | x_{sd} |
| 12 | Z_{h-min} |
| 13 | Z_{h-max} |
| 14 | Q_{tr} |

4-2- تعیین تابع هدف مناسب

در جریان بهینه‌سازی، به منظور استخراج پارامترهای مناسب و مورد نظر، تعدادی تابع هدف، براساس معیارهای بهینه‌سازی تعریف می‌شود. انتخاب تابع هدف مناسب، یکی از مهم‌ترین بخش‌های بهینه‌سازی است. تابع هدف باید به گونه‌ای تعیین شود، تا با مینیمم شدن آن، هدف بهینه‌سازی برآورده شود. در این جا دو تابع هدف اصلی تعریف می‌شود. اولین تابع هدف، مصرف انرژی را به ازای هر متر حرکت نشان می‌دهد و به وسیله رابطه 16 تعریف می‌شود:

$$J = \frac{-1}{2} \int_0^{2T_c} (\dot{q}_a \tau_a + \dot{q}_k \tau_k + \dot{q}_h \tau_h + \dot{q}_t \tau_t) dt \quad (16)$$

در این تابع، τ_a, τ_k, τ_h و τ_t به ترتیب گشتاور مفاصل لگن، زانو، مچ و پنجه را نشان می‌دهد. همچنین $\dot{q}_a, \dot{q}_k, \dot{q}_h$ و \dot{q}_t سرعت این مفاصل را در سیستم مختصات تعمیم یافته که قبلاً تعریف شد بیان می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار تابع هدف براساس این رابطه همواره منفی است. ضمن اینکه هرچه مقدار مصرف انرژی کمتر باشد این تابع عدد منفی کوچکتری را تولید می‌کند. به این ترتیب تابع هدف به گونه‌ای تعریف شده است که به ازای کمترین مقدار مصرف انرژی، مینیمم شود. دومین تابع هدف، نشان دهنده‌ی پایداری است. این تابع، کمترین فاصله میان نقطه ممان صفر و مرزهای چند ضلعی تکیه‌گاهی¹ را بر حسب میلیمتر محاسبه می‌کند.

$$J_{SM} = -1000 \times \min(x_{zmp} - SP) \quad (17)$$

همان‌طور که تابع معرفی شده در رابطه 17 نشان می‌دهد، چنانچه حرکت پایدار باشد، یعنی نقطه ممان صفر داخل چند ضلعی تکیه‌گاهی قرار گیرد، مقدار عددی این تابع، منفی می‌شود. بدیهی است که هرچه مقدار تابع، عدد منفی بزرگ‌تری باشد، پایداری بیشتر است. این توابع هدف ممکن است منجر به بعضی حالت‌های نامطلوب شوند. توابع هدف به تنهایی قادر نیستند که این حالت‌های نامطلوب را تشخیص دهند. برای رفع این مشکل قیودی تعریف می‌شود که معرف این حالت‌های نامطلوب بوده و در صورت بروز هر یک از این حالات نامطلوب، توابع پناستی مقدار توابع هدف را به سمت مقادیر مثبت بزرگی تغییر می‌دهند. در نتیجه این نقاط از میان جواب‌های مطلوب خارج می‌شوند. حالت‌های نامطلوب شامل موارد زیر می‌باشند.

(1) نقطه تکیه² نقطه تکیه به این معناست که زاویه مفصل زانو نزدیک

در روش دوم، محاسبه نقطه ممان صفر بر مبنای دینامیک ربات انجام می‌شود. همان‌طور که در رابطه 15 نشان داده شده است محاسبه نقطه ممان صفر بر مبنای این روش با استفاده از نیروها و گشتاورهای عکس‌العمل زمین انجام می‌گیرد.

$$x_{zmp} = \frac{F_{zR} X_{soleR} + F_{zL} X_{soleL} - M_{yR} - M_{yL}}{F_{zR} + F_{zL}} \quad (15)$$

نقطه ممان صفر محاسبه شده با استفاده از این دو روش در شکل 10 نشان داده شده است. بر اساس این شکل، نقطه ممان صفر محاسبه شده با استفاده از هر دو روش، انطباق خوبی با یکدیگر دارند که نشان دهنده صحت مدل دینامیکی می‌باشد.

4- بهینه‌سازی

هدف اصلی در این مقاله بهینه‌سازی پارامترهای مربوط به دوران پاشنه و پنجه پای ربات با استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌باشد. برای این منظور لازم است تا پارامترهای حرکت ربات را به گونه‌ای تغییر دهیم تا حرکت ربات بهبود یابد. منظور از بهبود حرکت، افزایش پایداری و کاهش مصرف انرژی ربات است. در این بخش، ابتدا تعدادی از پارامترهای حرکت ربات به‌عنوان پارامتر بهینه‌سازی انتخاب می‌شوند. در ادامه براساس معیارهای بهینه‌سازی مد نظر که همان پایداری بیشینه و مصرف انرژی کمینه ربات هستند، توابع هدفی تعریف می‌شود که با کمینه‌سازی این توابع هدف، حرکت بهینه محاسبه گردد.

4-1- انتخاب پارامترهای بهینه‌سازی

مرحله‌ی نخست، انتخاب پارامترهای بهینه‌سازی مناسب است که قرار است مقدار دقیق آن‌ها برای دستیابی به مقدار بهینه‌ی تابع هدف تعیین شود. بهینه‌سازی با فرض وجود پنجه فعال و وجود حرکات دورانی پاشنه و پنجه انجام شده است. پارامترهایی که برای بهینه‌سازی انتخاب شده‌اند در جدول 6 معرفی شده است. همچنین توضیح این پارامترها در جدول 4 وجود دارد. این پارامترها طراحی مسیر در فضای کاری را ایجاد می‌کنند. با بهینه کردن آن‌ها در فرآیند الگوریتم ژنتیک در حقیقت بهینه‌ترین طراحی مسیر برای ربات به دست می‌آید. از بهینه کردن پارامترهای ساختاری مثل جرم و طول بندها، جز بند پنجه، صرف نظر شده است.

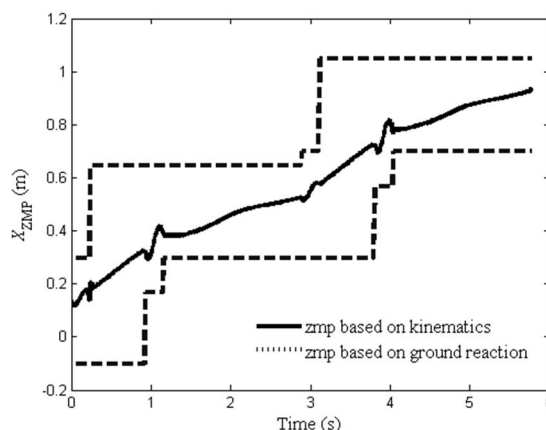


Fig. 10 calculation of zero moment point on the basis of kinematics and reaction forces

شکل 10 نقطه ممان صفر مبتنی بر سینماتیک و عکس‌العمل زمین

¹ Support polygon
² Singularity

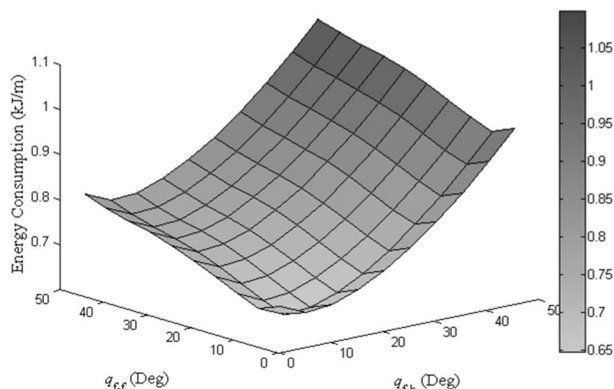


Fig. 11 the effects of heel-off and toe-off motions on the objective function of energy consumption

شکل 11 اثرات زوایای دوران پاشنه و پنجه بر روی تابع هدف مصرف انرژی

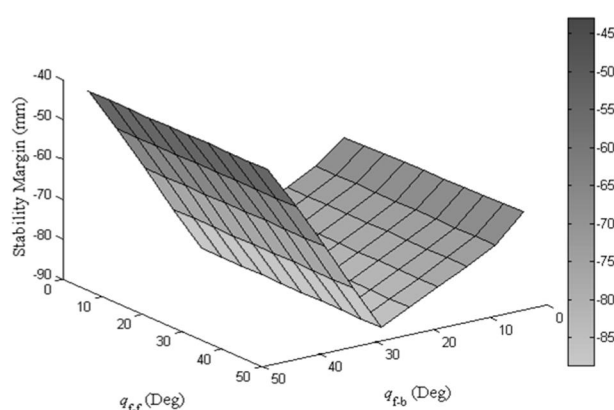


Fig. 12 the effects of heel-off and toe-off motions on the objective function of stability

شکل 12 اثرات زوایای دوران پاشنه و پنجه بر روی تابع هدف پایداری

کمینه خواهد شد. همچنین، براساس نتایج بدست آمده می‌توان مشاهده نمود که با افزایش زاویه دوران پنجه، تا یک مقدار مشخص، پایداری ربات افزایش و سپس با افزایش بیشتر این زاویه، پایداری ربات کاهش می‌یابد. این در حالی است که تغییرات زاویه دوران پاشنه تاثیر چندانی بر روی پایداری ندارد. علت این مسئله این است که ربات مورد بررسی با پارامترهای فیزیکی اشاره شده در جدول 1، جدول 2 و جدول 3 اغلب به سمت عقب واژگون می‌شود و نه به سمت جلو. به عبارت دیگر، ناپایداری ربات بیشتر به سمت عقب می‌باشد. بنابراین، تنها زاویه دوران پنجه در پایداری ربات تاثیرگذار است.

نوعی دیگر از آنالیز پارامتری به بررسی تاثیرات جرم پنجه و طول آن بر روی توابع هدف مختلف می‌پردازد. در این راستا، با تغییر جرم پنجه از صفر تا $0.4M_{foot}$ و همچنین تغییر طول پنجه از صفر تا $0.5L_{foot}$ ، بهینه‌سازی‌های مختلفی انجام گرفته است. نتایج این بهینه‌سازی‌های انجام گرفته برای سرعت 0.5 کیلومتر بر ساعت در شکل 13 و شکل 14 نشان داده شده است.

براساس نتایج نشان داده شده در شکل 13 و شکل 14، با افزایش جرم پنجه، میزان پایداری و همچنین مصرف انرژی ربات افزایش می‌یابد. افزایش جرم پنجه موجب می‌شود که ربات سنگین‌تر شده، در نتیجه میزان مصرف انرژی ربات بیشتر شود. در ضمن با سنگین‌تر شدن پنجه پای ربات احتمال واژگونی و عدم تعادل ربات کاهش می‌یابد.

از طرفی، افزایش طول پنجه، تاثیری بر پایداری و مصرف انرژی ربات نخواهد داشت. همان‌طور که مشاهده گردید طول پنجه تاثیری در طراحی

به صفر شود. به دلیل بروز شرایط تکینگی، این حالت نامطلوب است چراکه در این حالت سرعت دوران مفصل بسیار زیاد خواهد بود. در واقع همواره باید یک حداقل زاویه خم‌شدگی در زانوی ربات وجود داشته باشد. این قید در قالب رابطه 18 تعریف می‌شود:

$$\theta_{knee} < \theta_{threshold} \Rightarrow J \gg 0 \quad (18)$$

(2) برخورد پا با زمین¹: برخورد پا با زمین، به این معناست که مختصات کف پا کمتر از مختصات سطح زمین شود و این به معنای فرو رفتن پا داخل زمین است. برای جلوگیری از بروز چنین حالتی، یک قید در قالب رابطه 19 تعریف می‌شود:

$$Z_{foot} < 0 \Rightarrow J \gg 0 \quad (19)$$

(3) محدوده گشتاور و سرعت مفصل: چنانچه حداکثر گشتاور و سرعت مفصل بیشتر از حد مجاز عملگرها باشد، مجدداً یک حالت نامطلوب رخ داده است. در این مورد بر اساس رابطه 20 خواهیم داشت:

$$\left. \begin{aligned} \max_{i=1:8} \dot{\theta}_i > \max \dot{\theta}_{actuator} \\ \max_{i=1:8} \dot{\tau}_i > \max \dot{\tau}_{actuator} \end{aligned} \right\} \Rightarrow J \gg 0 \quad (20)$$

(4) محدودیت دوران مفصل²: براساس محدودیت‌های مربوط به طراحی و ساخت ربات، محدودیت‌هایی بر روی میزان دوران مفصل بویژه مفصل لگن وجود دارد. قید مربوط به این حالت نامطلوب در رابطه 21 تعریف می‌شود:

$$\left. \begin{aligned} \theta_i < \theta_i^{min} \\ \theta_i > \theta_i^{max} \end{aligned} \right\} \Rightarrow J \gg 0 ; i = 1:8 \quad (21)$$

(5) قیود پایداری: با توجه به این قید، چنانچه نقطه ممان صفر به مرزهای چند ضلعی تکیه‌گاهی برسد، حرکت ربات ناپایدار شده و بنابراین جزو حرکات نامطلوب محسوب می‌شود. مطابق با رابطه 22 خواهیم داشت:

$$\left. \begin{aligned} SM_x > 0 \\ SM_y > 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow J \gg 0 \quad (22)$$

5- بحث و بررسی نتایج

در این بخش، نتایج بدست آمده از فرایند بهینه‌سازی ارائه شده است. یکی از مهم‌ترین بخش‌های بهینه‌سازی اطمینان از صحت نتایج است. برای این منظور یک بهینه‌سازی برای چندین بار متوالی انجام شده است و پارامترهای جمعیت ژن‌های اولیه، نرخ هم‌گذری³، نرخ جهش⁴ و... به گونه‌ای تعیین گردید که نتایج یکسانی حاصل شود. به این روش از نتایج بهینه‌سازی‌های مختلف اطمینان حاصل شده است.

به منظور بررسی اثرات مربوط به حرکات دورانی پاشنه و پنجه، یک آنالیز پارامتری انجام گرفته است که از طریق آن، اثرات زوایای دوران پاشنه و پنجه بر روی توابع پایداری و مصرف انرژی در سرعت‌های مختلف قابل بررسی است. در این جا، نتایج حاصل از آنالیز پارامتری، برای سرعت 0.5 کیلومتر بر ساعت در شکل 11 و شکل 12 نشان داده شده است.

نتایج بهینه بدست آمده برای توابع هدف مصرف انرژی و پایداری در سرعت 0.5 کیلومتر بر ساعت به قرار زیر است:

$$q_{f-f} = 7^\circ, q_{f-b} = 2^\circ \Leftarrow \text{مصرف انرژی کمینه}$$

$$q_{f-f} = -, q_{f-b} = 27^\circ \Leftarrow \text{پایداری بیشینه}$$

این مشاهدات نشان می‌دهد که برای هر سرعت یک مقدار بهینه برای زوایای دوران پاشنه و پنجه وجود دارد که به ازای آن، میزان مصرف انرژی

¹ Foot impact

² Joint range of motion (RoM) constraint

³ Cross over

⁴ mutation

7- مراجع

- [1] D. Tlalolini, C. Chevallereau, Y. Aoustin, Comparison of different gaits with rotation of the feet for a planar biped, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 57, No. 4, pp. 371-383, 2009.
- [2] D. Tlalolini, C. Chevallereau, Y. Aoustin, Human-like walking: Optimal motion of a bipedal robot with toe-rotation motion, *Transactions on Mechatronics, IEEE/ASME* Vol. 16, No. 2, pp. 310-320, 2011.
- [3] J. Choi, J. Grizzle, Planar bipedal walking with foot rotation, *Proceeding of the American Control Conference*, Portland: IEEE, pp. 4909-4916, 2005.
- [4] H. Khafi, H. Ahmadi, Trajectory design for 3D biped robot by considering active toe rotation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 139-148, 2015. (in Persian)
- [5] K. Nishiwaki, S. Kagami, Y. Kuniyoshi, M. Inaba, H. Inoue, Toe joints that enhance bipedal and fullbody motion of humanoid robots, *Proceeding of International Conference on Robotics and Automation*, WashingtonDC: IEEE, pp. 3105-3110, 2002.
- [6] T. Buschmann, S. Lohmeier, H. Ulbrich, Humanoid robot Lola: Design and walking control, *Journal of Physiology-Paris*, Vol. 103, No. 3, pp. 141-148, 2009.
- [7] R. Tajima, D. Honda, K. Suga, Fast running experiments involving a humanoid robot, *Proceeding of International Conference on Robotics and Automation*, Kobe: IEEE, pp. 1571-1576, 2009.
- [8] K. Miura, M. Morisawa, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Kaneko, K. Yokoi, Human-like walking with toe supporting for humanoids, *Proceeding of International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, San Francisco, CA: IEEE/RJS, pp. 4428-4435, 2011.
- [9] Y. Ogura, K. Shimomura, A. Kondo, A. Morishima, T. Okubo, S. Momoki, H. Lim, A. Takanishi, Human-like walking with knee stretched, heel-contact and toe-off motion by a humanoid robot, *Proceeding of International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing: IEEE, pp. 3976-3981, 2006.
- [10] A. Ki, L. Cheol, G. Jo, Development of a biped robot with toes to improve gait pattern, *Proceeding of International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Kobe: IEEE/ASME, pp. 729-734, 2003.
- [11] L. Wang, Z. Yu, Q. Meng, Z. Zhang, Influence analysis of toe-joint on biped gaits, *Proceeding of International Conference on Mechatronics and Automation*, Luoyang: IEEE, pp. 1631-1635, 2006.
- [12] E. Kouchaki, M. J. Sadigh, Effect of toe-joint Bending on biped gait performance, *Proceeding of International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Tianjin: IEEE, pp. 697-702, 2010.
- [13] N. Handharu, J. Yoon, G. Kim, Gait pattern generation with knee stretch motion for biped robot using toe and heel joints, *Proceeding of International Conference on Humanoid Robots*, Daejeon: IEEE, pp. 265-270, 2008.
- [14] S. Kajita, K. Kaneko, M. Morisawa, S. Nakaoka, H. Hirukawa, ZMP-based biped running enhanced by toe springs, *Proceeding of International Conference on Robotics and Automation*, Roma: IEEE, pp. 3963-3969, 2007.
- [15] R. Kumar, N. Handharu, Y. Jungwon, K. Gap-soon, Hybrid toe and heel joints for biped/humanoid robots for natural gait, *Proceeding of International Conference on Control, Automation and Systems*, Seoul: ICCAS, pp. 2687-2692, 2007.
- [16] P. Channon, S. Hopkins, D. Pham, Derivation of optimal walking motions for a bipedal walking robot, *Robotica*, Vol. 10, No. 02, pp. 165-172, 1992.
- [17] J. Park, M. Choi, Generation of an optimal gait trajectory for biped robots using a genetic algorithm, *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, Vol. 47, No. 2, pp. 715-721, 2004.
- [18] C. Chevallereau, Y. Aoustin, Optimal reference trajectories for walking and running of a biped robot, *Robotica*, Vol. 19, No. 05, pp. 557-569, 2001.
- [19] G. Bessonnet, P. Seguin, P. Sardain, A parametric optimization approach to walking pattern synthesis, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 24, No. 7, pp. 523-536, 2005.
- [20] S. Kajita, K. Tani, Study of dynamic biped locomotion on rugged terrain-derivation and application of the linear inverted pendulum mode, *Proceeding of International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento: IEEE, pp. 1405-1411, 1991.
- [21] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, H. Hirukawa, Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point, *Proceeding of International Conference on Robotics and Automation*, Taipei: IEEE, pp. 1620-1626, 2003.
- [22] J. Park, K. Kim, Biped robot walking using gravity-compensated inverted pendulum mode and computed torque control, *Proceeding of International Conference on Robotics and Automation*, Leuven: IEEE, pp. 3528-3533, 1998.
- [23] T. Sato, S. Sakaino, K. Ohnishi, Real-time walking trajectory generation method with three-mass models at constant body height for three-dimensional biped robots, *Transactions on Industrial Electronics, IEEE*, Vol. 58, No. 2, pp. 376-383, 2011.
- [24] Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, H. Arai, N. Koyachi, K. Tanie, Planning walking patterns for a biped robot, *Transactions on Robotics and Automation, IEEE* Vol. 17, No. 3, pp. 280-289, 2001.
- [25] O. Kwon, J. Park, Asymmetric trajectory generation and impedance control for running of biped robots, *Autonomous Robots*, Vol. 26, No. 1, pp. 47-78, 2009.

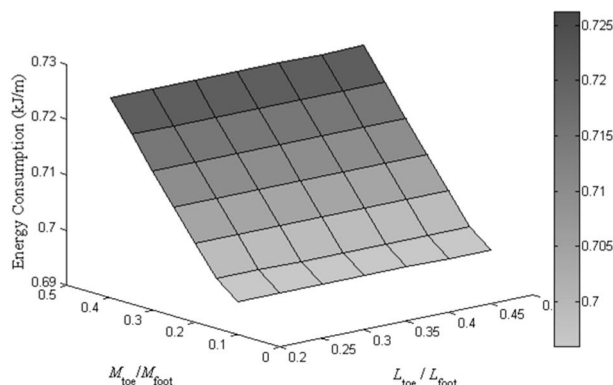


Fig. 13 the effects of mass and length of toe on the objective function of energy consumption

شکل 13 اثرات جرم و طول پنجه بر روی تابع هدف مصرف انرژی

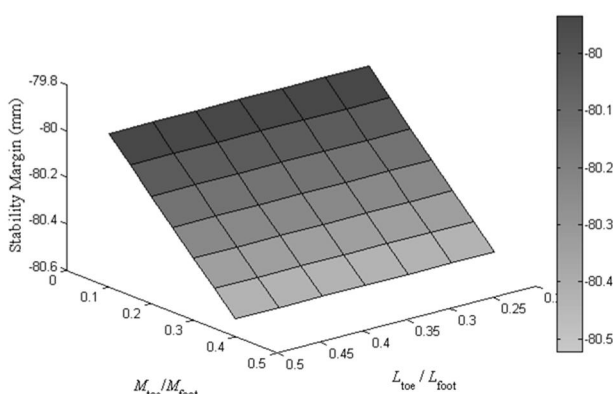


Fig. 14 the effects of mass and length of toe on the objective function of stability

شکل 14 اثرات جرم و طول پنجه بر روی تابع هدف پایداری

مسیر حرکت ربات ندارد بنابراین بدیهی است که در مصرف انرژی نیز تغییری صورت نگیرد. البته انتظار می‌رود که با افزایش طول پنجه و بالتبع افزایش مساحت چند ضلعی تکیه گاهی، پایداری ربات افزایش پیدا کند. اما به این دلیل که ربات اغلب به سمت عقب واژگون می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش طول پنجه تأثیری بر پایداری ندارد.

6- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی اهمیت افزودن پنجه فعال به مدل دو بعدی یک ربات انسان نما پرداخته شد. پس از طی مراحل طراحی مسیر و استخراج مدل دینامیکی، بهینه‌سازی حرکت انجام شد و در ادامه نتایج حاصل از آنالیز پارامتری ارائه گردید. بر طبق نتایج ارائه شده، در هر سرعت یک مقدار بهینه برای زوایای دوران پاشنه و پنجه وجود دارد که میزان مصرف انرژی را در آن سرعت کمینه می‌کند. همچنین با افزایش زاویه دوران پنجه، تا یک مقدار مشخص، پایداری ربات افزایش و سپس با افزایش بیشتر این زاویه، پایداری ربات کاهش می‌یابد. این در حالی است که تغییر زاویه دوران پاشنه تأثیر چندانی بر پایداری ربات ندارد. همچنین به بررسی اثرات جرمی و طولی پنجه بر دو تابع هدف مذکور پرداخته شد. بر اساس نتایج حاصله با افزایش جرم پنجه میزان مصرف انرژی ربات افزایش می‌یابد. در ضمن با سنگین تر شدن پنجه پای ربات احتمال واژگونی و عدم تعادل ربات کاهش می‌یابد. این در حالی است که افزایش طول پنجه تأثیری بر دو تابع هدف ندارد.

- module, *Robotica*, Vol. 22, No. 01, pp. 41-50, 2004.
- [29] Y. Aoustin, A. Formalskii, 3D walking biped: optimal swing of the arms, *Multibody System Dynamics*, Vol. 32, No. 1, pp. 55-66, 2014.
- [30] H. Baruh, *Analytical dynamics*, pp. 262-464, Boston: WCB/McGraw-Hill 1999.
- [31] M. Vukobratović, B. Borovac, Zero-moment point-thirty five years of its life, *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 1, No. 01, pp. 157-173, 2004.
- [32] Q. Huang, Y. Nakamura, Sensory reflex control for humanoid walking, *Transactions on Robotics, IEEE* Vol. 21, No. 5, pp. 977-984, 2005.
- [26] M. Khadiv, S. A. Moosavian, M. Sadedel, Dynamics modeling of fully-actuated humanoids with general robot-environment interaction, *Proceeding of International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, Tehran: IEEE, pp. 233-238, 2014.
- [27] M. Sadedel, A. Yousefi-Koma, M. Khadiv, Offline path planning, dynamic modeling and gait optimization of a 2D humanoid robot, *Proceeding of International Conference on Robotics and Mechatronics*, Tehran: IEEE, pp. 131-136, 2014.
- [28] G. Carbone, Y. Ogura, H. Lim, A. Takanishi, M. Ceccarelli, Dynamic simulation and experiments for the design of a new 7-dofs biped walking leg