



سرویس های
ویژه



سرویس ترجمه
تخصصی



کارگاه های
آموزشی



بلاگ
مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری
STES



فیلم های
آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



کارگاه آنلاین
بررسی مقابله ای متون (مقدماتی)



کارگاه آنلاین
پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی



کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی
بین المللی و
ترافد های جستجو



کنترل تطبیقی غیرخطی ربات راهرونده دوپای 6 درجه آزادی

احسان خواجه‌وندی راد¹، میثم وهابی^{2*}

1- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، نجف آباد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، نجف آباد

* نجف آباد، کد پستی 8514143131، pmc.iaun.ac.ir، m.vahabi

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 02 آذر 1396

پذیرش: 11 بهمن 1396

ارائه در سایت: 19 اسفند 1396

کلید واژگان:

ربات راه‌رونده دوبا

سینماتیک

دینامیک

کنترل تطبیقی گشتاور محاسبه شده

چکیده

در این مقاله کنترل تطبیقی غیرخطی ربات راه‌رونده دوپای 6 درجه آزادی با 7 رابط مورد بررسی قرار می‌گیرد. ربات مورد مطالعه به سه قسمت پای ثابت، پای متحرک و پاندول بالاتنه تقسیم شده و کلیه مفصل‌ها دورانی در نظر گرفته می‌شوند. عموماً جهت محاسبات، ربات‌ها بصورت کامل در نظر گرفته می‌شوند که محاسبات آنها پیچیدگی زیادی دارند. همچنین در محاسبات تعادل، نقطه گشتاور صفر یا در کف پای تکیه‌گاه ثابت در نظر گرفته می‌شود یا در محدوده کف پا، متحرک است. در ربات مورد مطالعه، با توجه به تقدم حرکت اعضاء، ابتدا محاسبات بر روی پای متحرک انجام می‌شود و سپس تاثیر آن بر روی پای ثابت بررسی شده و جهت تعادل ربات از پاندول بالاتنه استفاده می‌شود. در بررسی تعادل، نقطه گشتاور صفر در شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب به صورت ثابت در نظر گرفته شده درحالی‌که در شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار آدامز، نقطه گشتاور صفر در طول کف پای تکیه‌گاه حرکت می‌کند. کلیه نمودارها در نرم‌افزارهای آدامز و متلب بر یکدیگر منطبق شدند. در تحقیق حاضر، سینماتیک معکوس بروش مثلثاتی و دینامیک معکوس به روش الگوریتم تکراری نیوتن اولییر محاسبه گردیده است. کلیه محاسبات در نرم‌افزارهای متلب و آدامز شبیه‌سازی و صحت‌گذاری شده و با نوشتن روابط تعادل، زاویه پاندول بالاتنه در هر لحظه بدست می‌آید. بدلیل امکان وجود عوامل ناشناخته طی فرایند ساخت ربات و عدم قطعیت در پارامترهایی نظیر طول، جرم و غیره، کنترل تطبیقی گشتاور محاسبه شده بر روی اجزای ربات اجرا شده و حداکثر گشتاور مورد نیاز برای کنترل کلیه مفصل‌ها بدست می‌آید.

Nonlinear adaptive control of a 6 DOF biped Robot

Ehsan Khajevandi Rad, Meisam Vahabi*

Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

* P.O.B. 8514143131, Najafabad, Iran, m.vahabi@pmc.iaun.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 23 November 2017

Accepted 06 February 2018

Available Online 10 March 2018

Keywords:

Biped robot

Kinematics

Dynamics

Adaptive computed torque control

ABSTRACT

This paper discussed nonlinear adaptive control of a 6 DOF biped robot. The studied robot was divided to three part, fix leg, moving leg and a torso and all the joints were considered rotational. Generally, for calculations, robots are considered as a whole which makes the related calculations complex. For balance calculations, the zero moment point (ZMP) was either considered as a fix point on the ground or a moving point on the foot plate. In the presented robot in this study with priority of movements, first, the calculations were carried out on the moving foot, then the effect of the motion on the foot was inspected and a pendulum was used to balance the robot. To check the balance, ZMP in the simulation in MATLAB software was considered as a fix point While in Adams software simulation, ZMP was considered moving along the bottom of the sole. All the charts active with both software met each other. In the presented study the inverse kinematics was calculated by trigonometric method and inverse dynamics of each leg was investigated by Newton-Euler iterative method. All calculations were carried out in MATLAB software and were verified by ADAMS software. By writing the equilibrium equations, the angle of torso at each time was achieved. In the next step, because of uncertainties in manufacturing and some parameters like mass, length, etc. adaptive computed torque control was used on each leg to achieve the maximum torque that each joint needs for stable walking.

1- مقدمه

طرح‌ریزی شد و سیکل راه رفتن که به کمک روش درونیایی منحنی درجه سه توصیف می‌شد، بررسی شد. در این تحقیق حرکت نرم لگن با بیشترین دامنه پایداری بررسی گردید. در این تحقیق از ربات واقعی جهت تصدیق محاسبات استفاده شده است [1]. طراحی و ساخت یک ربات دوپای 7 درجه آزادی که پاهایش دارای طول متغیر بود و تعادل خود را به کمک جابجایی وزنه تعادل در بدنه حفظ می‌کرد و قادر بود از پله‌ها بالا و پایین برود، بررسی شد. تصدیق معادلات به کمک ربات واقعی بررسی شد [2]. بررسی توانایی راه

برای دهه‌ها رویای انسان، ساخت ماشینی بود که بتواند حرکات پیچیده انسان را تکرار کند. از اوایل دهه نود میلادی بود که سطح مهندسی در زمینه‌های محاسباتی، مکانیک، کنترل و مواد به اندازه کافی رشد کرد تا بتواند ماشین راه‌رونده‌ای بسازد که بتوان به آن ربات انسان‌نما گفت. رباتهای انسان‌نما کاربردهای فراوانی در زمینه‌های نظامی، خدماتی و تولیدی دارند. الگوهای راه رفتن یک ربات دوپای 6 درجه آزادی که دارای 7 رابط بود،

امتحان کند. در این تحقیق اثر پای متحرک در محاسبات دیده نشده که سبب انحراف از مسیر می‌شود [14]. سه کنترلر آنلاین شامل کنترلر میرایی، کنترلر جهت بلند شدن و کنترلر موقعیت بلند شدن برای حفظ پایداری دینامیکی ربات انسان‌نما با استفاده از حسگر نیرو-گشتاور بررسی شدند. کنترلرهای پیشنهاد شده بر روی ربات کایست بکار برده شد. در این تحقیق در هنگام صحنه‌گذاری روابط به کمک ربات واقعی، راه‌حل‌های دقیق برای الگوهای راه رفتن اجرا نشدند زیرا بجای اینکه الگوهای نقاط گشتاور صفر در کف پا طراحی شوند و یا اینکه مسیر مفصل لگن بدرستی طراحی شود، تمرکز اصلی مطالعات بر استفاده از کنترلرهای آنلاین بود [15]. طراحی مسیر برای ربات راه‌رونده دوپای پاشنه و پنجه دار 6 درجه آزادی اجرا شد. برای پیدا کردن موقعیت رابطها و مرکز جرم ربات هنگام راه رفتن از رابطه دناویت - هارتبرگ استفاده شد. ثابت شد که روش طراحی مسیر می‌تواند راه رفتن دینامیکی پایدار را برای ربات به دست بیاورد [16]. راه رفتن دینامیکی در یک ربات راه‌رونده دوپای 7 لینکی، بدون اینکه زاویه مفاصل از قبل تعیین شود، بررسی شد. رویکرد کنترل غیرسینماتیک روی ربات دوپای راه‌رونده ارایه شد و نشان داده شد که راه رفتن ربات با تکنیک ارائه شده، بسیار طبیعی‌تر است. در این مقاله صحنه‌گذاری به کمک ربات واقعی انجام شد و محاسبات مصرف انرژی نشان داد که این ربات در زمان راه رفتن انرژی زیادی در مقایسه با سایر ربات‌های مشابه مصرف می‌کند [17].

مطالعات بسیار زیادی بر روی روشهای محاسبه سینماتیک مستقیم، سینماتیک معکوس، دینامیک و کنترل رباتهای دوپا انجام شده است و همانگونه که مشاهده می‌شود در آنها عموماً ربات به صورت یک مجموعه کامل در نظر گرفته شده است و به همین دلیل محاسبات ربات‌ها بسیار پیچیده و زمان‌بر است و صحنه‌گذاری عموماً به کمک ربات واقعی انجام شده است. در این مقاله، ربات به قسمتهای مجزای پای ثابت، پای متحرک و پاندول بالانته تقسیم می‌شود و پس از محاسبات سینماتیک که بر روی هر پای ربات بصورت مجزا انجام می‌شود، با توجه به تقدم حرکت اجزاء، محاسبات دینامیکی ابتدا بر روی پای متحرک انجام می‌شود و سپس تاثیر نیروها و گشتاورهای ناشی از حرکت پای متحرک بر روی پای ثابت اعمال می‌شود که حاصل آن نیرو و گشتاوری است که به کف پای تکیه‌گاه اعمال می‌شود و در نهایت برای جلوگیری از سقوط ربات در نتیجه نیروهای عکس‌العمل کف پای تکیه‌گاه، پاندول بالانته ربات به شکلی تعریف می‌شود که با حرکت خود مانع از سقوط ربات در زمان حرکت می‌شود. تجزیه ربات به سه قسمت مجزا، انجام محاسبات بصورت مستقل و اعمال اثر نیرو و گشتاور حاصل از حرکت هر جزء بر سایر اجزاء در محاسبات دینامیکی ربات و مدل کردن ربات در نرم‌افزار آدامز یک بار بصورت کامل و یک بار بصورت جزء جزء سبب شده که از نوشتن روابط طولانی پرهیز شود و محاسبات دینامیک ربات خیلی طولانی نباشند. تکنیک کنترل غیرخطی تطبیقی گشتاور محاسبه شده نیز برای کنترل زاویه مفاصل ربات مورد استفاده قرار گرفته است.

فرضیه‌های تحقیق به شرح زیر در نظر گرفته می‌شوند.

- رابطهای ربات همگی صلب و اصطکاک بین مفاصل ربات صفر در نظر گرفته شده است.
- مسیر مفصل کمر ربات یک خط صاف و مسیر کف پای متحرک ربات بصورت یک رابطه سینوسی تعریف شده است.
- کف پای متحرک در طول مسیر حرکت، به صورت موازی با سطح زمین در نظر گرفته شده است.
- کلیه مفصل‌های ربات، دورانی با یک درجه آزادی در نظر گرفته

رفتن ربات دوپا با معیار نقطه گشتاور صفر و یک روش کنترلی جدید بر روی رباتی که بالانته آن 3 درجه آزادی داشت، انجام شد [3]. راه رفتن ربات دوپایی که 8 رابط داشت با معیار نقطه گشتاور صفر بررسی شد و دو تکنیک کنترل محاسباتی هوشمند با هم مقایسه شدند [5]. کنترل تعادل به کمک تنظیم موقعیت مرکز جرم و زاویه بالانته ربات به وسیله یک روش کنترلی جدید که هنگام بروز اغتشاشات، میزان نیرو و گشتاور مورد نیاز را محاسبه می‌کرد، بررسی شد [6]. کنترل تطبیقی برای بررسی قابلیت توزیع آشفستگی و اغتشاشات مختلف هنگام راه رفتن بر روی ربات صفحه‌ای 7 درجه آزادی تحت تحریک، بررسی شد. در این تحقیق از یک سری نقاط تماسی محدود در مسیر کف پا استفاده شده است و نیروهای تماسی بصورت گسترده مورد بررسی قرار نگرفته‌اند [7]. مفهوم مرکز فشار و نقطه گشتاور صفر در زمان حرکت یک ربات دوپا بررسی شد. مرکز فشار با توجه به نیروهای تماسی پاها با زمین و نقطه گشتاور صفر با توجه به گرانش بعلاوه نیروهای لختی تحلیل شد. مرکز فشار- نقطه گشتاور صفر به کمک یک کنترل مجازی که تعریف شد، در هنگام حرکت ربات کنترل شدند [8]. بررسی تعادل دینامیکی یک ربات دوپا که 7 رابط داشت، در حرکت روی سطح شیب‌دار با کمک روش نیوتن اویلر انجام شد. در نظر گرفتن کل ربات بصورت یک سیستم کامل در محاسبات، سبب شد که محاسبات بسیار پیچیده و سخت باشد. در عین حال مواردی که در این تحقیق می‌تواند مورد توجه قرار بگیرد، شامل آماده‌سازی روابط برای استفاده در ربات واقعی، مدل کردن برخورد کف پاها با زمین، حرکت ربات در جهت عرضی و اعمال کنترل حلقه بسته برای کنترل سیستم می‌باشد [9]. یک ربات دوپای انسان نمای 7 لینکی در فضای سه‌بعدی، با استفاده از روش نیوتن اویلر، بررسی شد. در نتیجه یک رویکرد حاصل شد که می‌توانست بعنوان پایدار کننده مدل دینامیک، برای شبیه‌سازی و یا برای هر نوع قانون کنترلی بکار رود. پیچیدگی محاسبات بدلیل در نظر گرفتن ربات بصورت یک سیستم کامل، در این مقاله به چشم می‌خورد [10]. سینماتیک معکوس هر پای ربات بصورت جداگانه و با کمک قوانین جبری بررسی شد. هر پای مورد بررسی 6 درجه آزادی داشت [11]. یک ترکیب از الگوریتمهای بهینه‌سازی برای رسیدن به طرح‌ریزی دینامیک، کنترل و تخمین موقعیت یک ربات دوپا پیشنهاد شد. به منظور ایجاد قابلیت اطمینان بالا و تکرارپذیری در راه رفتن ربات اطلس، چندین فعالیت از طول گام و جایگذاری پا هنگام راه رفتن تا کنترل کل بدن در طرح حرکتی ربات، تعریف شد. همچنین یک فرمول تخمین موقعیت ارایه شد که اجازه می‌داد ربات روی سطوح نامسطح و غیرهموار بصورت خیلی دقیق عمل کند. در این تحقیق پایداری دینامیکی ربات در مواجهه با موانع و عوامل اغتشاش بیرونی بررسی نشده و همچنین، سرعتی که برای حرکت ربات در نظر گرفته شده بسیار کم است بگونه‌ای که حرکت ربات به نظر بیشتر استاتیکی است [12]. یک ربات راه‌رونده دوپای 7 درجه آزادی بررسی شد که حین عبور از یک شیار دارای تعادل دینامیکی بود. شبکه عصبی تحلیلی بر پایه منطق فازی بسط داده شد. برای توسعه شبکه عصبی و منطق فازی که برای راه رفتن ربات استفاده می‌شدند، از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. هر دو الگوریتم شبکه عصبی و منطق فازی قادر بودند که یک راه رفتن بهینه پدید آورند [13]. کنترل پایداری دینامیکی یک ربات انسان‌نمای دوپا بررسی شد. یک الگوریتم ایجاد نقطه مبنا بر اساس مدل پاندول معکوس خطی و نقطه گشتاور صفر متحرک در زیر پای تکیه‌گاه پیشنهاد داده شد. یک کنترلر فضای مفاصل که بر مبنای یک روش ساده محاسبه سینماتیک معکوس بود، استفاده شد تا چگونگی ایجاد و توسعه مسیر مبنا را در طول شبیه‌سازی سه‌بعدی کاملاً دینامیکی،

شده‌اند.

جدول 2 مشخصات مربوط به ربات

Table2 Robot characteristics

نام ربات	طول ربات (m)	وزن ربات (kg)
مچ پای ثابت	0.08	1
ساق پای ثابت	0.2	1.5
لگن پای ثابت	0.2	1.5
لگن پای متحرک	0.2	1.5
ساق پای متحرک	0.2	1.5
مچ پای متحرک	0.08	1
بالا تنه	0.6	5

جدول 3 مشخصات پای ثابت

Table3 Fix leg characteristics

نام لینک	زاویه اولیه نسبت به محور Y	طول (mm)
مچ پا	0	80
ساق پا	45°	200
لگن پا	30°	200

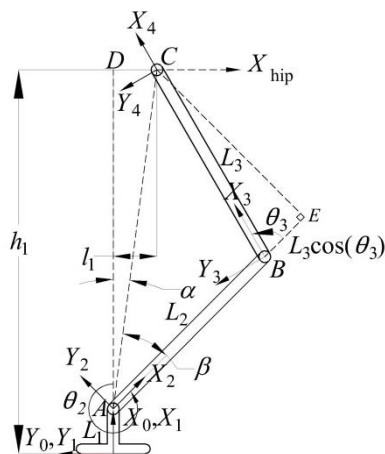


Fig. 2 Geometrical characteristics of fix leg

شکل 2 مشخصات هندسی پای ثابت ربات

با توجه به اینکه مچ پای ثابت بدون حرکت در نظر گرفته شده است، زوایای مفاصل پای ثابت با کمک روابط مثلثاتی 1 و 2 قابل محاسبه می‌باشند.

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{(h_1 - L_1)^2 + L_1^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3} \right) \quad (1)$$

زاویه θ_2 را می‌توان بصورت زیر محاسبه کرد.

$$\theta_2 = 2\pi - \left[\cos^{-1} \left(\frac{L_2 + L_3 \cos \theta_3}{\sqrt{(h_1 - L_1)^2 + L_1^2}} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{h_1 - L_1}{\sqrt{(h_1 - L_1)^2 + L_1^2}} \right) \right] \quad (2)$$

بعد از اینکه با کمک روشهای مثلثاتی، فرمول‌های مناسب برای تعیین زوایای هر مفصل در پای ثابت بدست آمد، این فرمول‌ها به صورت برنامه‌ای در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی گردید. جهت صحت‌گذاری محاسبات انجام شده در متلب، پای ثابت در آدامز مدلسازی شده و کف پای ثابت روی زمین، بصورت ثابت در نظر گرفته شد. همچنین به انتهای لینک لگن قید حرکت در راستای محور X_{hip} و با سرعت ثابت 15 میلی‌متر بر ثانیه نسبت داده شد. شکل‌های 3 و 4 نتایج حاصل از دو نرم‌افزار متلب و آدامز را به ترتیب برای زوایای θ_2 و θ_3 نشان می‌دهند.

انطباق نمودارها بر یکدیگر نشان‌دهنده درستی معادلات بدست آمده برای سینماتیک معکوس پای ثابت می‌باشد.

جهت محاسبه سینماتیک معکوس پای متحرک، برای مفصل ران پای

2- سینماتیک ربات راه‌رونده دوپای

ربات مورد مطالعه، از هفت ربات تشکیل شده است (شکل (1)).

جهت انجام محاسبات، ربات به سه قسمت پای ثابت، پای متحرک و پاندول بالاتنه تقسیم شده است. کف پای ثابت بر روی زمین به صورت ثابت در نظر گرفته شده و چارچوبها مطابق شکل به انتهای هر ربات اختصاص داده می‌شود. پارامترهای دناویت - هارتنبرگ برای اعضای ربات مطابق جدول 1 بدست می‌آید. در این تحقیق، در مواردی که لازم شده است، جهت جلوگیری از طولانی شدن روابط، از $c\theta_i$ بعنوان مخفف $\cos(\theta_i)$ و از $s\theta_i$ بعنوان مخفف $\sin(\theta_i)$ استفاده شده است [18].

در شبیه‌سازی حرکت پای ثابت، محور X در راستای لینکها و محور Y بر اساس قاعده دست راست عمود بر آن در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای مربوط به رابطهای ربات مطابق جدول 2 در نظر گرفته می‌شوند.

جهت محاسبه سینماتیک معکوس، ابتدا فرض شد که هنگام شروع حرکت ربات، پاهای ربات در حالت خمیده می‌باشند و ارتفاع مفصل لگن در تمام طول مسیر حرکت ثابت باقی می‌ماند. مفصل لگن با سرعت ثابت 15 میلی‌متر بر ثانیه در جهت محور X_{hip} و در یک خط صاف حرکت می‌کند. ارتفاع اولیه مفصل لگن پای ثابت $h_1 = 394.6246$ mm و فاصله اولیه مفصل لگن از مبدأ مختصات $l_1 = 41.4213$ mm مطابق شکل 2 و مشخصات لینکها مطابق با شرایط ذکر شده در جدول 3 در نظر گرفته شده است.

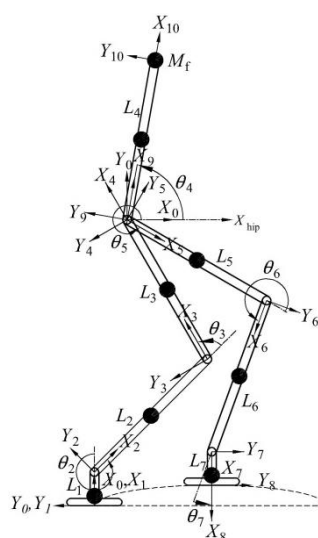


Fig. 1 Six DOF biped robot with 7 links

شکل 1 ربات شش درجه آزادی با هفت ربات

جدول 1 پارامترهای دناویت هارتنبرگ رابطهای ربات

Table1 Denavit hartenberg parameters for bipeds links

I	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	0	L_1	0	θ_2
3	0	L_2	0	θ_3
4	0	L_3	0	θ_4
5	0	0	0	θ_5
6	0	L_5	0	θ_6
7	0	L_6	0	θ_7
8	0	L_7	0	θ_8
9	0	0	0	θ_9
10	0	L_4	0	θ_{10}

جدول 4 مشخصات پای متحرک

Table 4 Moving leg characteristics				
نام لینک	مشخصه	طول (mm)	زاویه اولیه نسبت به محور Y	زاویه مربوط
مچ پا	L_7	80	0	θ_7
ساق پا	L_6	200	45°	θ_6
لگن پا	L_5	200	30°	θ_5

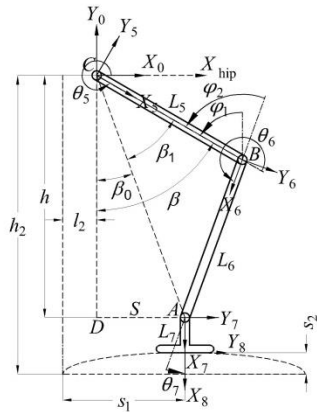


Fig. 5 Geometrical characteristics of moving leg

شکل 5 مشخصات هندسی پای متحرک ربات

$$\beta_0 = \text{atan2}(S, h) \quad (6)$$

$$\beta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{L_5^2 - L_6^2 + \sqrt{(S^2 + h^2)^2}}{2L_5\sqrt{S^2 + h^2}} \right) \quad (7)$$

$$\theta_5 = 3\frac{\pi}{2} + [-\text{atan2}(S, h) + \cos^{-1} \left(\frac{L_5^2 - L_6^2 + \sqrt{(S^2 + h^2)^2}}{2L_5\sqrt{S^2 + h^2}} \right)] \quad (8)$$

$$\theta_6 = 2\pi - \cos^{-1} \left(\frac{h^2 + S^2 - L_6^2 - L_5^2}{2L_5L_6} \right) \quad (9)$$

$$\theta_7 = \varphi_2 - \beta \quad (10)$$

در ادامه، پس از پیاده‌سازی روابط بالا در نرم‌افزار متلب با زاویه‌های $\theta_5, \theta_6, \theta_7$ و مسیر طی شده توسط کف پا محاسبه می‌شود. (شکل 6).

نتایج حاصل از شبیه‌سازی حرکت پای متحرک در نرم‌افزارهای متلب و آدامز در شکل‌های 7، 8 و 9 نشان داده شده است.

همانگونه که در شکل‌ها مشخص است، زوایا کاملاً بر هم منطبق شده‌اند که این نشان‌دهنده درستی معادلات سینماتیک معکوس بدست آمده برای پای متحرک می‌باشد.

3- دینامیک

در این تحقیق، با توجه به مشخص بودن مسیر حرکت و زاویه‌های مفصل‌ها،

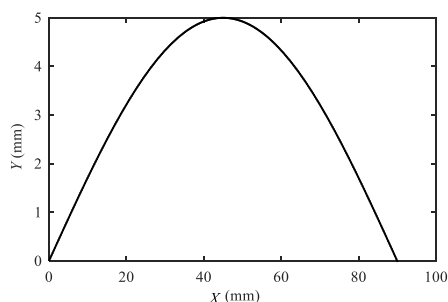
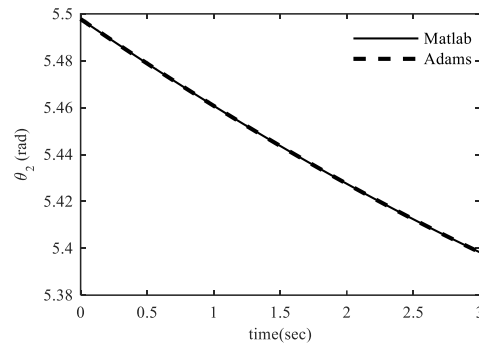
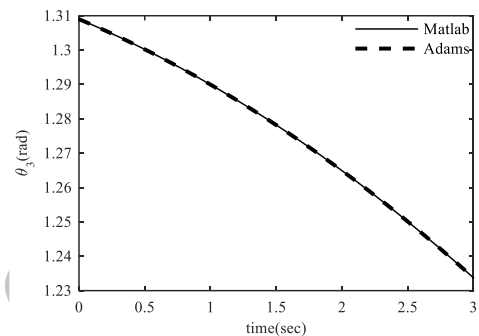


Fig. 6 Length of path that moving leg traverse

شکل 6 مسیر طی شده توسط کف پای متحرک در جهت X و Y

Fig. 3 Comparison of angle of θ_2 in Adams software & MATLAB softwareشکل 3 مقایسه زاویه θ_2 بدست آمده از نرم‌افزار آدامز با داده‌های نرم‌افزار متلبFig. 4 Comparison of angle of θ_3 in Adams software & MATLAB softwareشکل 4 مقایسه زاویه θ_3 بدست آمده از نرم‌افزار آدامز با داده‌های نرم‌افزار متلب

متحرک یک مسیر حرکت در جهت محور X_{hip} در دستگاه مختصات و در یک خط صاف با سرعت ثابت 15 میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است و برای کف پا مسیری در نظر گرفته شده که بیانگر طول گام و ارتفاع گام در هر مرحله از قدم برداشتن ربات باشد. این مسیر به صورت منحنی بوده تا بتواند شباهت خود را با راه رفتن انسان در واقعیت حفظ کند و در عین حال باید یک حرکت نرم و آرام را دنبال کند زیرا در صورتی که منحنی حرکت پای متحرک، هموار نباشد و یا مسیر در نظر گرفته شده، در نقاط شروع و پایان مسیر، مشتق پذیر نباشد، در لحظه شروع و پایان حرکت بدلیل شتاب زیادی که در دوران مفصل‌ها وجود خواهد داشت، نیروهای گشتاور زیادی به سایر مفصل‌ها وارد می‌کند. بنابراین برای مسیر کف پای متحرک، یک تابع بر حسب $\sin(t)$ در نظر گرفته شده که t بیانگر زمان کل انجام حرکت گام برداری است. (شکل 5).

مسیر مورد نظر برای کف پای متحرک به وسیله روابط 3 و 4 تعیین می‌گردد.

$$x_{\text{foot}} = 30t \quad (3)$$

$$y_{\text{foot}} = 5 \sin \frac{\pi}{3} t \quad (4)$$

کل زمان حرکت 3 ثانیه در نظر گرفته شده است، ارتفاع اولیه مفصل لگن $h_2 = 394.6264 \text{ mm}$ و فاصله اولیه مفصل لگن از مبدأ مختصات $l_2 = 41.4213 \text{ mm}$ بوده و سایر مشخصات مربوط به پای متحرک مطابق با شرایط ذکر شده در جدول 4 در نظر گرفته می‌شود.

با کمک روابط مثلثاتی، زوایای پای متحرک به صورت زیر بدست می‌آیند.

$$\varphi_2 = \cos^{-1} \left(\frac{h^2 + S^2 - L_6^2 - L_5^2}{2L_5L_6} \right) \quad (5)$$

در رابطه 11، ماتریس H ، ماتریس لختی، بردار V ، بردار سرعت و بردار G ، بردار گرانی مربوط به پای متحرک است که پارامترهای H در زیر نشان داده شده و پارامترهای V و G بدلیل طولانی بودن در پیوست ارائه شده‌اند.

$$H_{11} = c_5 I_{33} + c_6 I_{33} + c_7 I_{33} + L_5 m_6 \left(L_5 + \frac{L_6}{2} \right) + m_7 (L_5 + L_6 + 0.571 L_7) + \frac{L_6 m_6 (L_5 + \frac{L_6}{2})}{2} + L_6 m_7 (L_5 + L_6 + 0.571 L_7) + 0.571 L_7 m_7 (L_5 + L_6 + 0.571 L_7) + \frac{L_5^2 m_5}{4} \quad (12)$$

$$H_{12} = c_6 I_{33} + c_7 I_{33} + L_5 m_7 (L_6 + 0.571 L_7) + \frac{L_6 m_6}{2} + L_6 m_7 (L_6 + 0.571 L_7) + 0.571 m_7 (L_6 + 0.571 L_7) + \frac{L_6^2 m_6}{4} \quad (13)$$

$$H_{13} = c_7 I_{33} + 0.326 L_7^2 m_7 + 0.571 L_5 L_7 m_7 + 0.571 L_6 L_7 m_7 \quad (14)$$

$$H_{22} = c_6 I_{33} + c_7 I_{33} + (L_6 m_7 + 0.571 L_7 m_7) (L_6 + 0.571 L_7) + 0.571 L_7 m_7 + \frac{L_6^2 m_6}{4} \quad (15)$$

$$H_{23} = c_7 I_{33} + 0.326 L_7^2 m_7 + 0.571 L_6 L_7 m_7 \quad (16)$$

$$H_{33} = c_7 I_{33} + 0.326 L_7^2 m_7 \quad (17)$$

در شبیه‌سازی دینامیکی پای متحرک، نیرو و گشتاور وارد بر انتهای پا، برابر صفر در نظر گرفته شده است. همچنین دینامیک پای متحرک در نرم‌افزار آدامز مدل‌سازی شده و فرض می‌شود که مفصل کمر در یک مسیر مستقیم با ارتفاع ثابت و سرعت 15 میلی‌متر بر ثانیه حرکت می‌کند. پارامتر جرم رابط‌ها مطابق جدول 5 به هر رابط اختصاص داده شده است.

زاویه مفصل و محل اعمال گشتاورها در شکل 10 نشان داده شده است و در شکل‌های 11، 12 و 13، نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار آدامز شامل اندازه گشتاورها در مفصل با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب مقایسه شده‌اند.

انطباق نمودارها بر یکدیگر صحت معادلات دینامیک بدست آمده برای

جدول 5 مشخصات رابط‌های پای متحرک

Table 5 Moving leg parameters

رابط	وزن (kg)	طول (m)	I_{xx} (kg/m ²)	I_{yy} (kg/m ²)	I_{zz} (kg/m ²)	iP_{ci}
L_7	1	0.08	1998×10^{-6}	1278×10^{-6}	798×10^{-6}	$0.57 L_7$
L_6	1.5	0.2	6618×10^{-6}	6480×10^{-6}	233×10^{-6}	$L_6/2$
L_5	1.5	0.2	6618×10^{-6}	6480×10^{-6}	233×10^{-6}	$L_5/2$

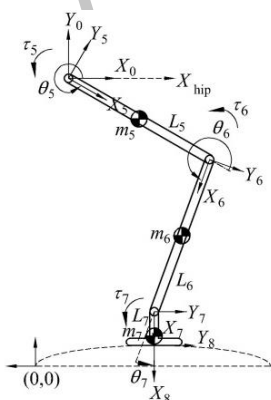


Fig. 10 Dynamics parameters on moving leg

شکل 10 مولفه‌های دینامیکی در پای متحرک ربات

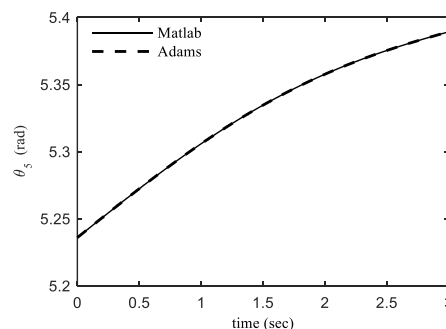


Fig. 7 Comparison of angle of θ_5 in Adams software & MATLAB software

شکل 7 مقایسه زاویه θ_5 بدست آمده در نرم‌افزارهای آدامز و متلب

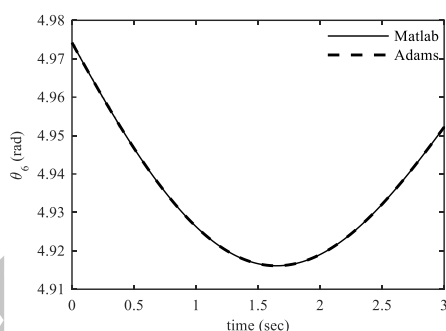


Fig. 8 Comparison of angle of θ_6 in Adams software & MATLAB software

شکل 8 مقایسه زاویه θ_6 بدست آمده در نرم‌افزارهای آدامز و متلب

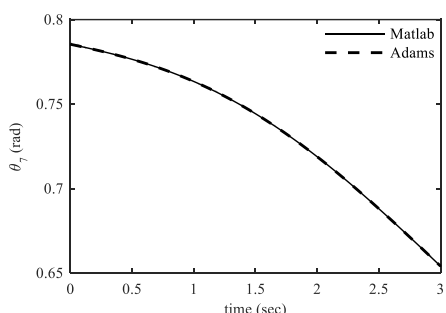


Fig. 9 Comparison of angle of θ_7 in Adams software & MATLAB software

شکل 9 مقایسه زاویه θ_7 بدست آمده در نرم‌افزارهای آدامز و متلب

دینامیک معکوس با روش نیوتن-اولر محاسبه می‌شود و گشتاورها و نیروها در مفصل‌ها استخراج می‌شوند. به جهت انجام ساده‌تر محاسبات و به دلیل اینکه معادلات دینامیکی ربات کامل، بسیار پیچیده و طولانی است، با در نظر گرفتن محاسبات مربوط به سینماتیک معکوس، جهت تحلیل دینامیکی ربات، ابتدا ربات به سه قسمت شامل پای ثابت، پای متحرک و پاندول بالانته تقسیم‌بندی می‌گردد. سپس دینامیک معکوس پای متحرک ربات بصورت مستقل بررسی می‌شود که نتیجه آن، تعیین نیرو و گشتاور ناشی از حرکت پای متحرک در مسیر مشخص و با سرعت معین در مفصل کمر ربات است. روابط دینامیکی پای متحرک بصورتی که در رابطه 11 نمایش داده شده بدست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} \tau_5 \\ \tau_6 \\ \tau_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_5 \\ \ddot{\theta}_6 \\ \ddot{\theta}_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{21} \\ V_{31} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{11} \\ G_{21} \\ G_{31} \end{bmatrix} \quad (11)$$

فرض می‌شود. پارامترهای روابط دینامیکی پای ثابت به شکل زیر است:

$$H_{11} = c_2 I_{33} + c_3 I_{33} + L_2 m_3 \left(L_2 + \frac{L_3}{2} \right) + \frac{L_3 m_3 \left(L_2 + \frac{L_3}{2} \right)}{2} + \frac{L_2^2 m_2}{4} \quad (19)$$

$$H_{12} = c_3 I_{33} + \frac{L_3 m_3 \left(L_2 + \frac{L_3}{2} \right)}{2} \quad (20)$$

$$H_{22} = c_3 I_{33} + \frac{L_3 m_3 \frac{L_3}{2}}{2} \quad (21)$$

پارامترهای G به شکل زیر معرفی می‌شوند.

$$G_{11} = \frac{GL_3 m_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)}{2} + \frac{GL_2 m_2 \cos(\theta_2)}{2} + GL_2 m_3 \cos(\theta_2) \quad (22)$$

$$G_{21} = \frac{GL_3 m_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)}{2} \quad (23)$$

پارامترهای V به شکل زیر نشان داده می‌شوند.

$$V_{11} = -\frac{L_2 L_3 m_3 \dot{\theta}_3^2 \sin(\theta_3)}{2} - L_2 L_3 m_3 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \sin(\theta_3) \quad (24)$$

$$V_{21} = -L_3 f_y \cos(\theta_2 + \theta_3) + \frac{L_2 L_3 m_3 \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_3)}{2} \quad (25)$$

مقادیر گشتاور وارد بر مفصل‌های پای ثابت در نرم‌افزارهای آدامز و متلب مقایسه شده که در شکل‌های 15 و 16 نشان داده شده است.

انطباق نمودارها بر یکدیگر، صحت معادلات دینامیک بدست آمده برای پای ثابت را نشان می‌دهد.

4- روابط تعادل

برای اینکه ربات در هنگام ایستادن و حرکت، تعادل داشته باشد، یک رابط بعنوان بالاتنه ربات بر روی مفصل کمر ربات (چارچوب انتهایی رابط L_3) متصل می‌شود. وزن و زاویه حرکت رابط بالاتنه در هر موقعیتی باید به گونه‌ای باشد که تعادل ربات حفظ شود و ربات هرگز به روی زمین سقوط نکند. مشخصات پاندول بالاتنه مطابق جدول 2 در نظر گرفته می‌شود و توزیع

جدول 6 جدول مشخصات رابط‌های پای ثابت

Table 6 Fix leg parameters

رابط	وزن (kg)	طول (m)	I_{xx} (kg/m ²)	I_{yy} (kg/m ²)	I_{zz} (kg/m ²)	i_{P_i}
L_1	1	0.08	1996×10^{-6}	1278×10^{-6}	798×10^{-6}	$0.42 L_1$
L_2	1.5	0.2	6618×10^{-6}	6480×10^{-6}	233×10^{-6}	$L_2/2$
L_3	1.5	0.2	6618×10^{-6}	6480×10^{-6}	233×10^{-6}	$L_3/2$

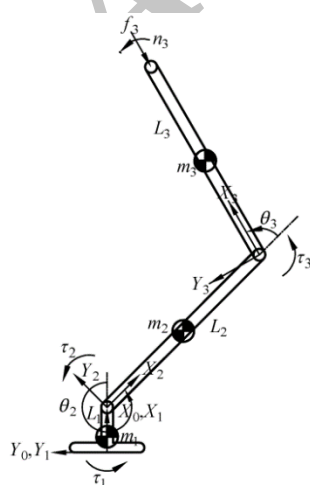


Fig. 14 Dynamics parameters on fix leg

شکل 14 مولفه‌های دینامیکی در پای ثابت ربات

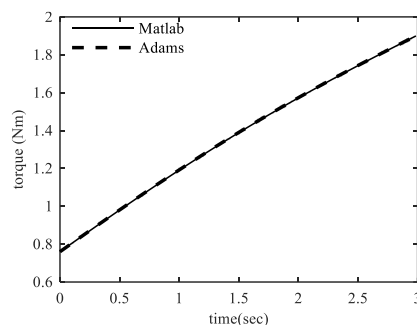


Fig. 11 Comparison of torque on hip joint of moving leg in Adams software & MATLAB software

شکل 11 مقایسه گشتاور در مفصل لگن پای متحرک در دو نرم‌افزار آدامز و متلب

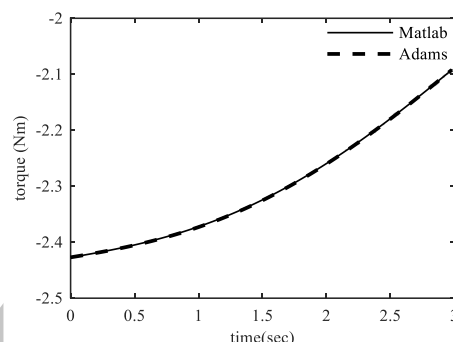


Fig. 12 Comparison of torque on knee joint of moving leg in Adams software & MATLAB software

شکل 12 مقایسه گشتاور در مفصل زانوی پای متحرک در دو نرم‌افزار آدامز و متلب

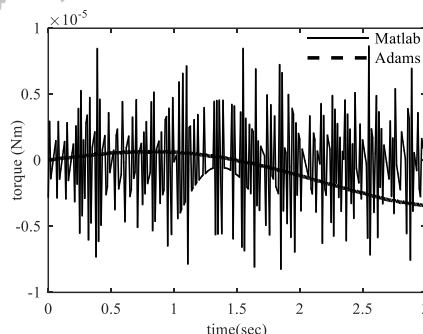


Fig. 13 Comparison of torque on ankle joint of moving leg in Adams software & MATLAB software

شکل 13 مقایسه گشتاور در مفصل مچ پای متحرک در دو نرم‌افزار آدامز و متلب

پای متحرک را نشان می‌دهد.

برای انجام محاسبات دینامیک پای ثابت ربات، به جای اینکه ربات بصورت کامل بررسی شود، اثر سایر اجزاء، یعنی نیرو و گشتاوری که در اثر حرکت پای متحرک بر مفصل کمر وارد می‌شود، بر مفصل کمر پای ثابت اعمال می‌گردد. این مولفه‌ها همانطور که در شکل 14 نمایش داده شده است با (f_3, n_3) نشان داده شده‌اند. جهت انجام محاسبات، الگوریتم دینامیکی تکراری نیوتن - اوپلر در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده و روابط دینامیکی پای ثابت، بصورتی که در زیر نمایش داده شده بدست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{21} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{11} \\ G_{21} \end{bmatrix} \quad (18)$$

در الگوریتم دینامیکی تکراری نیوتن - اوپلر، زاویه دوران هر یک از مفصل‌ها با توجه به محاسبات انجام شده در قسمت سینماتیک معکوس به هر مفصل اعمال می‌شود. سایر مشخصات رابط‌ها مطابق جدول 6 برای هر رابط

زاویه θ_4 به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\theta_4 = \sin^{-1}((-\tau - (m_1 + m_2)GL_1)/((m_1G(\frac{L_4}{2}) + (m_2GL_4))) \quad (26)$$

در رابطه بالا، t گشتاور اعمال شده بر روی نقطه کف پای ثابت، m_1 جرم رابط بالاتنه، m_2 جرم متمرکز در انتهای رابط بالاتنه، G ثابت جهانی گرانش و L_4 طول رابط پاندول بالاتنه است. با محاسبه زاویه θ_4 ، می‌توان گشتاور حاصل از دوران پاندول بالاتنه حول مفصل کمر را بصورت زیر محاسبه نمود.

$$\tau_1 = m_1G(\frac{L_4}{2})\sin(\theta_4) + (m_2GL_4)\sin(\theta_4) \quad (27)$$

شکل‌های 18 و 19 به ترتیب زاویه θ_4 که توسط رابطه 26 در نرم‌افزار متلب محاسبه شده و گشتاور حاصل از دوران پاندول بالاتنه روی مفصل کمر را نشان می‌دهند.

گشتاور و نیروی ناشی از دوران پاندول حول مفصل کمر، تحت زاویه θ_4 ، بر روی مفصل کمر پای ثابت اعمال می‌شود. در اثر اعمال نیرو و گشتاور مذکور به مفصل کمر پای ثابت، گشتاوری که به کف پای ثابت وارد می‌شود باید به حدی باشد که منجر به سقوط ربات نشود. روابط تعادل برای ربات کامل در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است.

برای صحت‌گذاری روابط تعادل و اطمینان از محاسبه درست زاویه θ_4 ، ربات راه‌رونده دوپای 6 درجه آزادی در نرم‌افزار آدامز بصورت کامل مدلسازی شده است. زوایای دوران کلیه مفصل‌ها به آنها تخصیص داده شده و ربات بصورت شناور در نظر گرفته می‌شود، به شکلی که هیچ نقطه‌ای از ربات به جایی از زمین اتصال ثابت نداشته باشد. سطح زیر پای ربات نیز کاملاً صلب در نظر گرفته شده به شکلی که ربات قادر باشد بر روی یک سطح حرکت کند. پس از انجام شبیه‌سازی، کلیه رابط‌های ربات مسیر از پیش تعیین شده را طی می‌کنند و مشاهده می‌شود که ربات هنگام گام برداشتن تعادل خود را حفظ می‌کند و سقوط نمی‌کند. شکل 20 مدل ایجاد شده در نرم‌افزار آدامز را

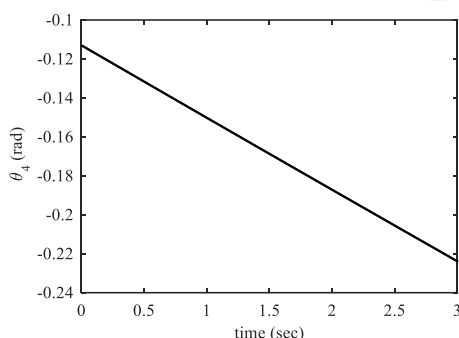


Fig. 18 Angle of θ_4 shows the amount of pendulum rotation

شکل 18 زاویه θ_4 ، نشان دهنده اندازه دوران پاندول بالاتنه

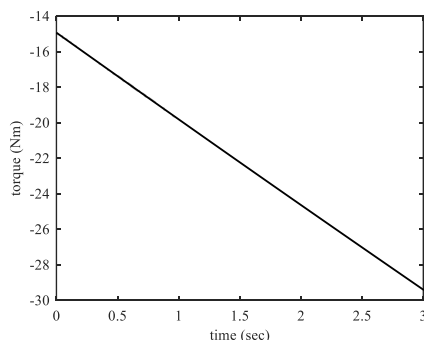


Fig. 19 Torque on hip joint due to rotation of torso

شکل 19 گشتاور حاصل از دوران پاندول بالاتنه تحت زاویه θ_4 در مفصل کمر

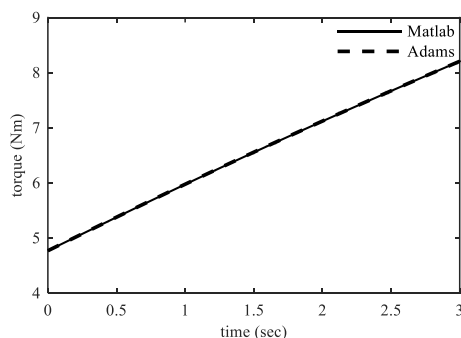


Fig. 15 Comparison of torque on ankle joint of fix leg in Adams software & MATLAB software

شکل 15 مقایسه گشتاور در مفصل مچ پای ثابت در دو نرم‌افزار آدامز و متلب

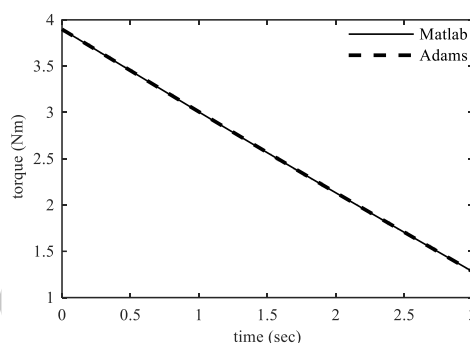


Fig. 16 Comparison of torque on knee joint of fix leg in Adams software & MATLAB software

شکل 16 مقایسه گشتاور در مفصل زانوی پای ثابت در دو نرم‌افزار آدامز و متلب

وزن نیز بگونه‌ای در نظر گرفته شده که پاندول جهت حفظ تعادل، میزان حرکت کمی را داشته باشد، به همین منظور، جرم کلی رابط بالاتنه 25 کیلوگرم در نظر گرفته شده که 5 کیلوگرم جرم خود رابط و 20 کیلوگرم بصورت جرم متمرکز در انتهای رابط بالاتنه در نظر گرفته می‌شود. زاویه دوران پاندول بالاتنه حول مفصل کمر، θ_4 در نظر گرفته می‌شود. زاویه θ_4 به شکلی محاسبه می‌شود که با دوران پاندول بالاتنه، تعادل ربات حفظ شود (شکل 17).

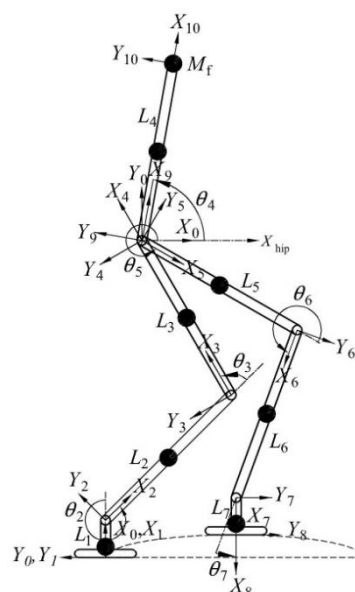


Fig. 17 Angle of θ_4 shows the amount of pendulum rotation

شکل 17 زاویه θ_4 ، نشان دهنده اندازه دوران پاندول بالاتنه

اساس کنترل تطبیقی بر ناشناخته بودن پارامترها و تخمین آنها بوسیله کنترلر است. در کنترل تطبیقی گشتاور محاسبه شده که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته، پارامترهای طول، جرم و لنگرهای لختی رابط‌ها بعنوان پارامترهای نامعین وارد کنترلر می‌شوند و برای تعقیب مسیرهای مطلوب با سرعت و دقت مناسب و همچنین کاهش آثار اغتشاشات وارده از محیط اطراف، از بازخورد حسگرها استفاده می‌شود.

قانون کنترل تطبیقی گشتاور محاسبه شده به شکل زیر است [19].

$$\tau = \hat{H}(\theta)u + \hat{V}(\theta, \dot{\theta}) + \hat{G}(\theta), u = \ddot{\theta}_d + k_v \dot{\tilde{\theta}} + k_p \tilde{\theta} \quad (28)$$

که $\hat{H}$ ماتریس لختی تخمینی که همواره متقارن و معین مثبت است و بنابراین همواره وارون‌پذیر است، $\hat{V}$ بردار سرعت تخمینی است و شامل جمله‌هایی می‌شود که به سرعت مفصل‌ها بستگی دارند و $\hat{G}$ بردار گرانی تخمینی است که همگی توسط کنترلر تخمین زده می‌شوند.

در این تحقیق فرض شده که اصطکاک مفصل‌ها صفر است و بنابراین هیچ گونه مدلی از اصطکاک به این رابطه اضافه نشده است. برای اغلب سیستم‌های مکانیکی، الکتریکی و شیمیایی، گشتاور اینرسی را بصورت خطی زیر می‌توان نوشت.

$$\tilde{T} = k(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})\tilde{P} \quad (29)$$

قانون تطبیق به شکل زیر نوشته می‌شود [19].

$$\dot{\tilde{P}} = \Gamma^T k^T \tilde{H}^{-1} Y \quad (30)$$

که در این رابطه $\Gamma = [\gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_r]$ و $\gamma_i > 0$ انتخاب می‌شود. ماتریس تخمینی و متقارن شامل ضرایب $\tilde{\theta}$ است و ماتریس k بصورت زیر نوشته می‌شود.

$$k = \begin{bmatrix} k_{11} & \dots & k_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{l1} & \dots & k_{ln} \end{bmatrix} \quad (31)$$

که k_i جمله‌هایی هستند که شامل متغیرهای θ ، $\dot{\theta}$ و $\ddot{\theta}$ هستند. شکل 22 نمای کلی کنترل تطبیقی گشتاور محاسبه شده برای پای متحرک را نشان می‌دهد.

به منظور بررسی عملکرد کنترلر تطبیقی گشتاور محاسبه شده (ACTC)، نتایج شبیه‌سازی آن با کنترلر گشتاور محاسبه شده (CTC) مقایسه می‌شود. قانون کنترل گشتاور محاسبه شده به شکل زیر است.

$$u = H^{-1}(\tau - V(\theta, \dot{\theta}) - G(\theta)) \quad (32)$$

هدف سیستم کنترلی این است که زوایای خروجی از بلوک سیستم با کمترین میزان خطا بر زوایای مطلوب منطبق شوند. زوایای مطلوب بعنوان ورودی θ به سیستم ارائه می‌شوند و زوایای خروجی سیستم باید در یک فاصله زمانی مناسب و با یک گشتاور منطقی در مفاصل با کمترین میزان

نمایش می‌دهد.

نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل کامل ربات در نرم‌افزار آدامز، مقایسه شده است. گشتاور محاسبه شده توسط دو نرم‌افزار متلب و آدامز توسط شکل 21 نشان داده شده است. با بررسی شکل مذکور مشخص می‌شود که مقدار گشتاور اعمال شده به کف پا ناچیز است و می‌توان از آن صرف‌نظر نمود. بنابراین با توجه به اینکه در شبیه‌سازی حرکت مدل کامل ربات در نرم‌افزار آدامز، ربات سقوط نکرد، نتایج قابل قبول است.

5- کنترل

تحلیل‌ها و تکنیک‌های طراحی بسیاری برای سیستم‌های غیرخطی وجود دارد. موضوع اصلی کنترل غیرخطی آن است که به چه ترتیب می‌توان تکنیک‌های کنترل خطی را در مورد سیستم‌های غیرخطی به کار برد.

5-1- کنترل ربات با روش کنترل تطبیقی گشتاور محاسبه شده

با توجه به وجود خطاهای ساخت، خطاهای اندازه‌گیری و همچنین بدلیل وجود لقی‌های مفاصل و تیرانسه‌های وزن و طول رابط‌ها، از کنترل غیر خطی تطبیقی گشتاور محاسبه شده برای کنترل پای‌های ربات استفاده می‌شود.

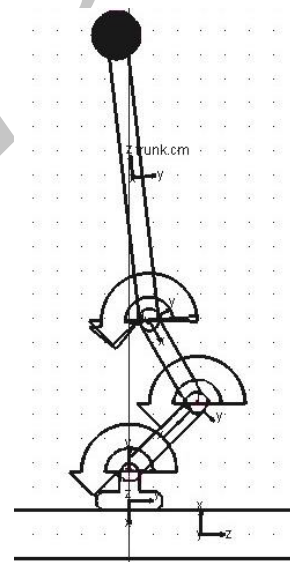


Fig. 20 Complete model of biped robot in Adams software

شکل 20 مدل کامل ربات در نرم‌افزار آدامز

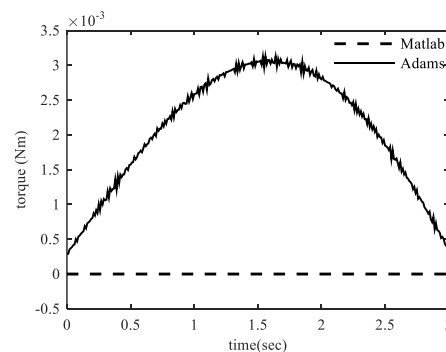


Fig. 21 Comparison of torque on sole of foot of bipeds fix leg in Adams software & MATLAB software

شکل 21 مقایسه گشتاور اعمال شده بر کف پای ثابت ربات کامل، در دو نرم‌افزار متلب و آدامز

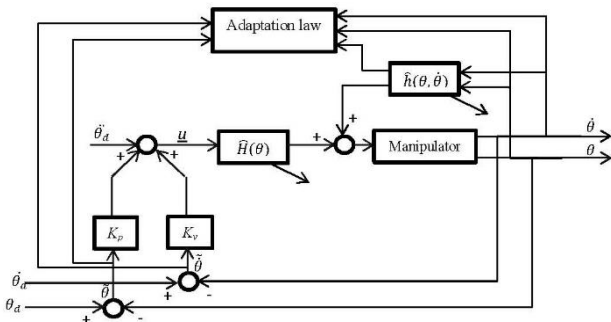


Fig. 22 Adaptive computed torque control diagram [19]

شکل 22 دیاگرام بلوک کنترل تطبیقی گشتاور محاسبه شده [19]

اندازه خود در حدود 130 نیوتن متر و برای مفصل زانوی پای متحرک در بیشترین اندازه خود حدود 30 نیوتن متر و برای مفصل مچ پای متحرک در بیشترین اندازه در حدود 10 نیوتن متر است.

نمای کلی کنترل تطبیقی گشتاور محاسبه شده برای پای ثابت مانند پای متحرک است. در تمام کنترل‌رلهایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند، مقادیر اولیه زوایا با 10 درصد اختلاف نسبت به مقادیر مطلوب تعیین شدند تا کارایی کنترلر به خوبی نمایان شود.

همچنین به منظور بررسی عملکرد کنترلر تطبیقی گشتاور محاسبه شده، نتایج شبیه‌سازی آن با کنترلر گشتاور محاسبه شده نیز مقایسه می‌شود. عملکرد کنترلر تطبیقی رضایت‌بخش است و زوایای θ_2 و θ_3 بخوبی تخمین زده می‌شوند. شکل‌های 27 و 28 چگونگی تطبیق زوایا و خطای تطبیق زوایه‌های θ_2 و θ_3 را نشان می‌دهند.

انطباق زوایا بر یکدیگر نشان می‌دهد که کنترلر تطبیقی در تخمین زوایای پای ثابت موفق عمل کرده است. نمودارهای شکل 29 مقدار گشتاور مورد نیاز برای هر مفصل را نشان می‌دهند و همانطور که از شکل‌ها مشخص است، مقدار گشتاور لازم برای مفصل مچ پای ثابت در لحظه شروع حرکت در حدود 114 نیوتن متر و برای مفصل زانوی پای ثابت در حدود 35 نیوتن متر است.

6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کنترل غیرخطی ربات راه‌رونده دوپای 6 درجه آزادی مورد بررسی قرار گرفت. ربات مذکور از دو پا و یک پاندول بالاتنه تشکیل شده که هر پای آن از 3 رابط و پاندول بالاتنه از یک رابط تشکیل شده است. یک پای

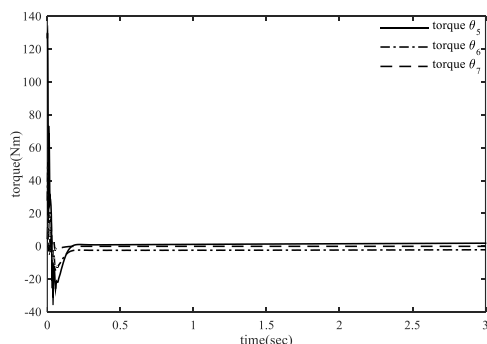


Fig. 26 Torque that needs to rotate the hip, knee and ankle joint on moving leg

شکل 26 مقدار گشتاور مورد نیاز برای مفصل کمر، زانو و مچ پای متحرک

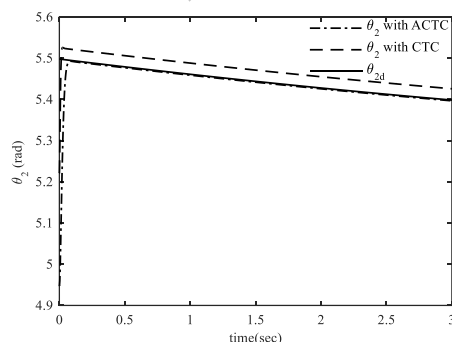


Fig. 27 Comparison of control of angle of θ_2 by adaptive computed torque control & computed torque control method

شکل 27 مقایسه کنترل زاویه θ_2 به روش کنترل تطبیقی گشتاور محاسبه شده و کنترل گشتاور محاسبه شده

خطا بر آنها منطبق شوند. همانگونه که در شکل‌های 23، 24 و 25 دیده می‌شود، کنترل گشتاور محاسبه شده نتوانسته بزویی زوایا را تعقیب نماید اما کنترل تطبیقی گشتاور محاسبه شده بزویی از عهده تعقیب زوایای مطلوب برآمده است و می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد کنترل تطبیقی گشتاور محاسبه شده مطلوب بوده و زوایای θ_5 ، θ_6 و θ_7 بزویی تخمین زده شده‌اند.

انطباق زوایا بر یکدیگر نشان می‌دهد که کنترلر تطبیقی در تخمین زوایای پای متحرک موفق عمل کرده است. شکل 26 مقادیر گشتاورهای مورد نیاز برای هر مفصل را نشان می‌دهد. همانطور که از نمودارها مشخص است، مقدار گشتاور مورد نیاز برای مفصل کمر پای متحرک در بیشترین

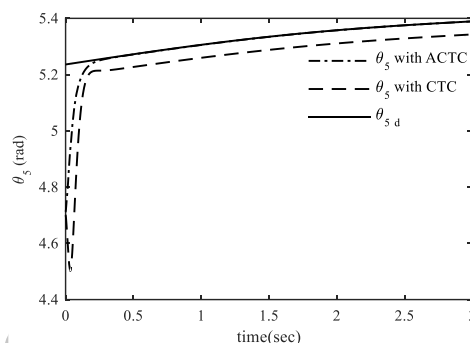


Fig. 23 Comparison of control of angle of θ_5 by adaptive computed torque control & computed torque control method

شکل 23 مقایسه کنترل زاویه θ_5 به روش کنترل تطبیقی گشتاور محاسبه شده و کنترل گشتاور محاسبه شده

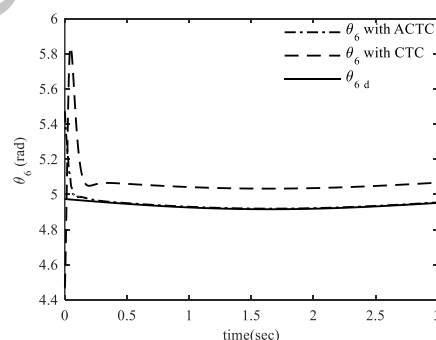


Fig. 24 Comparison of control of angle of θ_6 by adaptive computed torque control & computed torque control method

شکل 24 مقایسه کنترل زاویه θ_6 به روش کنترل تطبیقی گشتاور محاسبه شده و کنترل گشتاور محاسبه شده

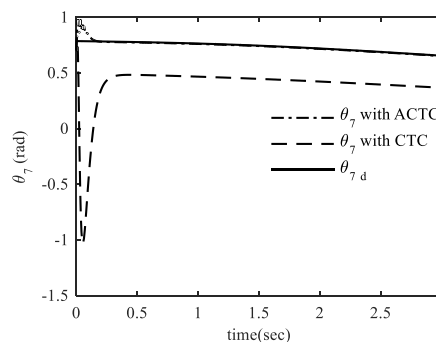


Fig. 25 Comparison of control of angle of θ_7 by adaptive computed torque control & computed torque control method

شکل 25 مقایسه کنترل زاویه θ_7 به روش کنترل تطبیقی گشتاور محاسبه شده و کنترل گشتاور محاسبه شده

حرکت پاندول خواهد شد. به همین دلیل برای پاندول بالاتنه، طول و جرم بیشتری نسبت به پاهای ربات در نظر گرفته شد. کلیه مراحل بالا در نرم‌افزار آدامز نیز شبیه‌سازی شدند و نرم‌افزار آدامز کلیه روابط بدست آمده برای ربات را صحت‌گذاری کرد.

با توجه به وجود عوامل ناخواسته مانند خطای ساخت، تolerانسهای طول و جرم رابط‌ها، شکل هندسی رابط‌ها و غیره، کنترل تطبیقی گشتاور محاسبه شده بر روی ربات پیاده‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که کنترل تطبیقی به خوبی، پارامترهای نامعین را تخمین می‌زند و سرعت و دقت این کنترلر بسیار خوب بوده است.

7- فهرست علائم

θ_i	زاویه بین رابط $i-1$ و رابط i
L_i	طول رابط i
τ_i	اندازه گشتاور در مفصل i

8- پیوست

پارامترهای V و G روابط دینامیکی پای متحرک در زیر ارائه شده‌اند.

$$\begin{aligned}
 V_{11} = & L_5(\cos(\theta_6)) (m_7 \cos(\theta_7) (\sin(\theta_7) \\
 & (L_6(\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_6)^2 + L_5\dot{\theta}_5^2 \cos(\theta_6)) + L_5\dot{\theta}_5^2 \\
 & \cos(\theta_7) \sin(\theta_6)) - m_7 \sin(\theta_7) (\cos(\theta_7) \\
 & (L_6(\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_6)^2 + L_5\dot{\theta}_5^2 \cos(\theta_6)) + \\
 & (0.5713L_7(\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_6 + \dot{\theta}_7)^2) - L_5\dot{\theta}_5^2 \sin(\theta_6) \\
 & \sin(\theta_7)) + L_5m_6\dot{\theta}_5^2 \sin(\theta_6) - \sin(\theta_6) \\
 & (m_6(\frac{L_6(\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_6)^2}{2} + L_5\dot{\theta}_5^2 \cos(\theta_6)) + m_7 \cos(\theta_7) \\
 & (\cos(\theta_7) (L_6(\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_6)^2 + L_5\dot{\theta}_5^2 \cos(\theta_6) + \\
 & (0.5713L_7(\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_6 + \dot{\theta}_7)^2) - L_5\dot{\theta}_5^2 \sin(\theta_6) \\
 & \sin(\theta_7)) + m_7 \sin(\theta_7) (\sin(\theta_7) \\
 & (L_6(\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_6)^2 + L_5\dot{\theta}_5^2 \cos(\theta_6)) + \\
 & + L_5\dot{\theta}_5^2 \cos(\theta_7) \sin(\theta_6))) - L_6(m_7 \sin(\theta_7) \\
 & (\cos(\theta_7) (L_6(\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_6)^2 + L_5\dot{\theta}_5^2 \cos(\theta_6)) + \\
 & (0.5713L_7(\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_6 + \dot{\theta}_7)^2) - L_5\dot{\theta}_5^2 \sin(\theta_6) \\
 & \sin(\theta_7)) - m_7 \cos(\theta_7) (\sin(\theta_7) (L_6(\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_6)^2 + \\
 & L_5\dot{\theta}_5^2 \cos(\theta_6)) + L_5\dot{\theta}_5^2 \cos(\theta_7) \sin(\theta_6))) + \\
 & (0.5713L_7m_7(\sin(\theta_7) (L_6(\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_6)^2 + \\
 & L_5\dot{\theta}_5^2 \cos(\theta_6)) + L_5\dot{\theta}_5^2 \cos(\theta_7) \sin(\theta_6))) + \\
 & \frac{L_5L_6m_6\dot{\theta}_5^2 \sin(\theta_6)}{2} \\
 V_{21} = & (0.5713 L_7 m_7 (\sin(\theta_7) (L_6 (\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_6)^2 + \\
 & L_5 \dot{\theta}_5^2 \cos(\theta_6)) + L_5 \dot{\theta}_5^2 \cos(\theta_7) \sin(\theta_6))) - \\
 & L_6 (m_7 \sin(\theta_7) (\cos(\theta_7) (L_6 (\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_6)^2 + \\
 & + L_5 \dot{\theta}_5^2 \cos(\theta_6)) + (0.5713 L_7 \\
 & (\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_6 + \dot{\theta}_7)^2) - L_5 \dot{\theta}_5^2 \sin(\theta_6) \sin(\theta_7)) \\
 & - m_7 \cos(\theta_7) (\sin(\theta_7) (L_6 (\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_6)^2 \\
 & + L_5 \dot{\theta}_5^2 \cos(\theta_6)) + L_5 \dot{\theta}_5^2 \cos(\theta_7) \sin(\theta_6) \\
 & \sin(\theta_6))) + \frac{L_5 L_6 m_6 \dot{\theta}_5^2 \sin(\theta_6)}{2} \\
 V_{31} = & (0.5713 L_7 m_7 (\sin(\theta_7) (L_6 (\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_6)^2 + \\
 & L_5 \dot{\theta}_5^2 \cos(\theta_6)) + L_5 \dot{\theta}_5^2 \cos(\theta_7) \sin(\theta_6))) \\
 G_{21} = & L_6 (m_7 \cos(\theta_7) (\cos(\theta_7) (G \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \\
 & - G \sin(\theta_5) \sin(\theta_6)) - \sin(\theta_7) (G \cos(\theta_5) \\
 & \sin(\theta_6) + G \cos(\theta_6) \sin(\theta_5))) + m_7 \sin(\theta_7)
 \end{aligned}$$

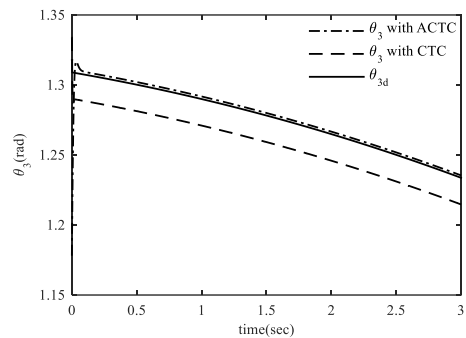


Fig. 28 Comparison of control of angle of θ_3 by adaptive computed torque control & computed torque control method

شکل 28 مقایسه کنترل زاویه θ_3 بر روش کنترل تطبیقی گشتاور محاسبه شده و کنترل گشتاور محاسبه شده

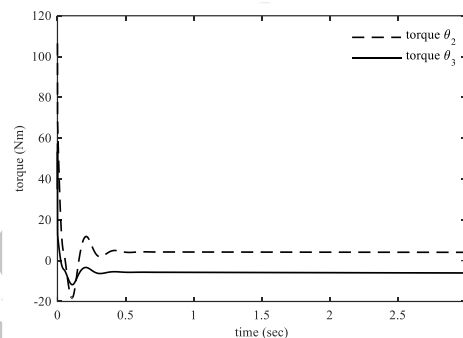


Fig. 29 Torque that needs to rotate the ankle & knee joints on fix leg

شکل 29 مقدار گشتاور مورد نیاز برای مفاصل مچ و زانوی پای ثابت

ربات ثابت و پای دیگر آن متحرک در نظر گرفته شد.

بدلیل پیچیدگی محاسبات در ربات کامل، ربات مورد مطالعه به سه قسمت مجزای پای ثابت، پای متحرک و پاندول بالاتنه تقسیم شد و اجزای مذکور بصورت جداگانه با اعمال اثر نیرو و گشتاور حاصل از حرکت هر جزء بر سایر اجزاء مورد بررسی قرار گرفتند. جهت حفظ یکپارچگی محاسبات، نیروها و گشتاورهای ناشی از حرکت پای متحرک بر روی مفصل کمر پای ثابت اعمال شد و در عین حال، انجام محاسبات به روش تفکیک ربات به قسمتهای مجزا، بسیار ساده‌تر بوده و نتایج نشان دادند که این روش از دقت بسیار خوبی نیز برخوردار است.

در بررسی سینماتیک معکوس از روش مثلثاتی استفاده شد. مسیر گام پای متحرک به صورت یک تابع بر حسب $\sin(\theta)$ معرفی شد، زیرا این مسیر باید یک مسیر نرم بوده تا از اعمال گشتاورهای ناگهانی در شروع حرکت و یا طول مسیر به مفصل‌های ربات جلوگیری شود. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که روش مثلثاتی می‌تواند در محاسبات سینماتیک معکوس بسیار دقیق و کارآمد عمل نماید.

دینامیک معکوس ربات به روش الگوریتم تکراری نیوتن اوایلر محاسبه و بررسی شد نتایج نشان دادند که این روش با دقت خوبی قادر است گشتاورهای اعمال شده به مفاصل را محاسبه کند.

توانایی ربات در حفظ تعادل با کمک پاندول بالاتنه بررسی شد. هرچه پاندول بالاتنه طول و وزن بیشتری داشته باشد، دامنه حرکتش جهت برقراری تعادل کمتر می‌شود. بدلیل اینکه در مواقعی که اغتشاشات خارجی وجود دارند، پاندول بالاتنه مجبور است با سرعت بیشتری حرکت کند تا تعادل را حفظ کند و این امر منجر به اعمال ضربات ناگهانی به ربات در انتهای کورس

- the 1993 IEEE/RSJ international Conference on Intelligent Robots and Systems, Yokohama, Japan, pp. 561- 566, July 26-30, 1993.
- [4] F. M. Silva, J. A. T. Machado, Energy analysis during biped walking, *Proceeding of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Detroit, Michigan, pp. 59- 64, May 1999.
- [5] J. P. Ferreira, M. M. Crisostomo, A. P. Coimbra, SVR Versus neural-fuzzy network controllers for the sagittal balance of a biped robot, *IEEE Transaction on Neural Networks*, Vol. 20, No. 12, pp. 1885- 1897, December 2009.
- [6] C. Ott, M. A. Roa, G. Hirzinger, Posture and balance control for biped robots based on contact force optimization, *2011 11th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Bled, Slovenia, pp. 26-33, October 26-28, 2011.
- [7] F. Plestan, J. W. Grizzle, E. R. Westervelt, G. Abba, Stable walking of a 7-DOF biped robot, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 4, pp. 653-668, August 2003.
- [8] P. Sardain, G. Bessonnet, Forces Acting on a biped robot. Center of pressure_ zero moment point, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics- part A: systems and Humans*, Vol. 34, No. 5, pp. 630-637, September 2004.
- [9] P. R. Vundavilli, D. K. Pratihari, Soft computing-based gait planners for a dynamically balanced biped robot negotiating sloping surfaces, *Elsevier, Science Direct, Applied Soft Computing*, Vol. 9, Issue. 1, pp. 191-208, January 2009.
- [10] A. Aloulou, O. Boubaker, A relevant reduction method for dynamic modeling of a seven-linked humanoid robot in the three-dimensional space, *International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors 2012, Procedia Engineering*, Vol. 41, pp. 1277-1284, 2012.
- [11] L. C. Macias, O. C. Espinosa, A. Loukianov and E.B. Corrochano, Inverse kinematics for a 6-DOF walking humanoid robot leg, *Springer International Publishing, Advances in Applied Clifford Algebras*, Vol. 27, Issue. 1, pp. 581- 597, March 2017.
- [12] S. Kuindersma, R. Deits, M. Fallon, A. Valenzuela, H. Dal, F. Permenter, T. Koolen, P. Marlon, R. Tedrake, Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot, *Springer Science- Autonomous Robots*, Vol. 40, Issue 3, pp. 429- 455, March 2016.
- [13] P. R. Vundavilli, D. K. Pratihari, Dynamically balanced optimal gaits of a ditch-crossing biped robot, *Elsevier, Science Direct, Robotics and Autonomous Systems* 58, Vol. 58, Issue 4, pp. 349- 361, April 2010.
- [14] K. Erbaturo, O. Kurt, Natural ZMP trajectories for biped robot reference generation, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 3, pp. 835- 845, March 2009.
- [15] J. H. Kim, J. H. Oh, Walking control of the humanoid platform KHR-1 based on torque feedback control, *Proceedings of the 2004 IEEE, International Conference on Robotics & Automation*, New Orleans, pp. 623- 628, April 2004.
- [16] Q. Zhang, D. Chen, H. Li, A gait planning method for biped heel- and- toe robot, *2012 International Conference On Future Energy. Environment and Materials*, Elsevier, Science Direct, Energy Procedia, Vol. 16, Part C, pp. 1799- 1805, 2012.
- [17] D. J. Braun, J. E. Mitchell, M. Goldfarb, Actuated dynamic walking in a seven-link biped robot, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 17, No. 1, pp. 147- 156, February 2012.
- [18] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 3rd edition, pp. 125- 397, (Translated by A. Meghdari, F. Mirfakhraei, M.R. Akrami, E. Shojaei Barjoei), Sharif University of Technology press, 2005, (in Persian فارسی).
- [19] J. Slotine, W. Li, *Applied Nonlinear Control*, pp. 408- 417, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall: 1991.

$$\begin{aligned}
 & (\cos(\theta_7) (G \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) + G \cos(\theta_6) \\
 & \sin(\theta_5)) + \sin(\theta_7) (\cos(\theta_5) \cos(\theta_6) - \\
 & G \sin(\theta_5) \sin(\theta_6))) \\
 & + \frac{L_6 m_6 (G \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) - G \sin(\theta_5) \sin(\theta_6))}{2} + \\
 & (0.5731 L_7 m_7 (\cos(\theta_7) (G \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) - \\
 & G \sin(\theta_5) \sin(\theta_6)) - \sin(\theta_7) (G \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
 & + G \cos(\theta_6) \sin(\theta_5))) + \frac{G L_5 m_5 \cos(\theta_5)}{2} \\
 & G_{11} = L_5 (\cos(\theta_6) (m_6 (G \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) - \\
 & G \sin(\theta_5) \sin(\theta_6)) + m_7 \cos(\theta_7) (\cos(\theta_7) \\
 & (G \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) - G \sin(\theta_5) \sin(\theta_6)) - \\
 & \sin(\theta_7) (G \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) + G \cos(\theta_6) \\
 & \sin(\theta_5))) + m_7 \sin(\theta_7) (\cos(\theta_7) (G \cos(\theta_5) \\
 & \sin(\theta_6) + G \cos(\theta_6) \sin(\theta_5)) + \sin(\theta_7) \\
 & (G \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) - G \sin(\theta_5) \sin(\theta_6))) \\
 & + \sin(\theta_6) (m_6 (G \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) + G \cos(\theta_6) \\
 & \sin(\theta_5)) + m_7 \cos(\theta_7) (\cos(\theta_7) (G \cos(\theta_5) \\
 & \sin(\theta_6) + G \cos(\theta_6) \sin(\theta_5)) + \sin(\theta_7) \\
 & (G \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) - G \sin(\theta_5) \sin(\theta_6))) - \\
 & m_7 \sin(\theta_7) (\cos(\theta_7) (G \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) - \\
 & G \sin(\theta_5) \sin(\theta_6)) - \sin(\theta_7) (G \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
 & + G \cos(\theta_6) \sin(\theta_5))) + L_6 (m_7 \cos(\theta_7) \\
 & (\cos(\theta_7) (G \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) - G \sin(\theta_5) \\
 & \sin(\theta_6)) - \sin(\theta_7) G \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
 & + G \cos(\theta_6) \sin(\theta_5))) \\
 & + m_7 \sin(\theta_7) (\cos(\theta_7) (G \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) + \\
 & G \cos(\theta_6) \sin(\theta_5)) + \sin(\theta_7) (G \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) \\
 & - G \sin(\theta_5) \sin(\theta_6))) + \\
 & \frac{L_6 m_6 (G \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) - G \sin(\theta_5) \sin(\theta_6))}{2} + \\
 & (0.5731 L_7 m_7 (\cos(\theta_7) (G \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) - \\
 & G \sin(\theta_5) \sin(\theta_6)) - \sin(\theta_7) (G \cos(\theta_5) \sin(\theta_6) \\
 & + G \cos(\theta_6) \sin(\theta_5))) + \frac{G L_5 m_5 \cos(\theta_5)}{2}
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 G_{31} = & (0.5731 L_7 m_7 (\cos(\theta_7) (G \cos(\theta_5) \cos(\theta_6) - \\
 & G \sin(\theta_5) \sin(\theta_6)) - \sin(\theta_7) (G \cos(\theta_5) \\
 & \sin(\theta_6) + G \cos(\theta_6) \sin(\theta_5)))
 \end{aligned} \tag{6}$$

9- مراجع

- [1] Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, H. Arai, N. Koyachi, K. Tanie, Planning walking patterns for a biped robot, *IEEE Transaction on robotic and Automation*, Vol. 17, No.3, pp. 280- 289, June 2001.
- [2] C. L. Shih, Ascending and descending stairs for a biped robot, *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics- part A: Systems and Humans*, Vol. 29, No. 3, pp. 255- 268, May 1999.
- [3] J. I. Yamaguchi, A. Takanishi, I. Kato, Development of a biped walking robot compensating for three-axes moment by trunk notion, *Proceeding of*



سرویس های
ویژه



سرویس ترجمه
تخصصی



کارگاه های
آموزشی



بلاگ
مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری
STES



فیلم های
آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



کارگاه آنلاین
بررسی مقابله ای متون (مقدماتی)



کارگاه آنلاین
پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی



کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی
بین المللی و
ترفند های جستجو