مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1396، دوره 17، شماره 7، ص‌ص 386-396

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تقلید حرکات انسان توسط ربات انسان نمای نائو با استفاده از یک روش تحلیلی و در نظر گرفتن تعادل ربات

پوریا شاهوردی[1]، مهدی طالع ماسوله[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین

2- استادیار، هوش ماشین و رباتیک، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی 515-14395، m.t.masouleh@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 فروردین 1396

پذیرش: 30 خرداد 1396

ارائه در سایت: 13 مرداد 1396

کلید واژگان:

تقلید حرکات

سامانه دریافت حرکات

سینماتیک

ربات انسان نمای نائو

کنترل تعادل

چکیده

در این مقاله یکی از پژوهش‌های موسوم به تعامل انسان و ربات با موضوع تقلید حرکات انسان توسط ربات انسان‌نمای نائو مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق، ابتدا حرکات انسان به واسطه دوربین دید سه بعدی کینکت که توسط بسته نرم افزاری سیستم عامل ربات (راس) راه‌اندازی شده است، دریافت می‌گردد. با توجه به اختلاف ابعادی میان انسان و ربات، حرکات دریافتی به ابعاد ربات نگاشت می‌شود. بعد از اعمال نگاشت، حل سینماتیک مستقیم و معکوس ربات ارائه می‌گردد. بدین منظور، فرم دیستال در حل سینماتیک مستقیم مورد استفاده قرار گرفته و برمبنای آن راه حل تحلیلی برای حل سینماتیک معکوس ارائه شده است. راه حل تحلیلی ارائه شده به‌عنوان یکی از نوآوری‌های اصلی مقاله، دلیل اصلی حرکات روان ربات در تقلید حرکات انسان می‌باشد. به منظور حفظ تعادل ربات در زمان تقلید، استراتژی قوزک پا برمبنای مدل پاندول معکوس خطی و معیار تصویر زمینی مرکز جرم ارائه شده است. پاندول معکوس مدل شده در دو فاز جفت تکیه گاهی و تک تکیه گاهی توسط کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی کنترل می‌شود. نتایج پیاده سازی عملی و شبیه سازی روش ارائه شده در مقاله با در نظر گرفتن محدودیت‌های ناشی از سامانه دریافت حرکات انسان، نمایان‌گر تقلید حرکات تمام-بدن انسان با دقت، نرمی و سرعت بالا در ربات می‌باشد.

Imitation of Human Motion by a NAO Humanoid Robot Using an Analytical Method and Considering Balance of the Robot

Pourya Shahverdi[1], Mehdi Tale Masouleh[2*]

1- Department of Mechatronics Engineering, Qazvin Branch Islamic Azad University, Qazvin, Iran

2- Department of Machine Intelligence and Robotics, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 14395-515, Tehran, Iran, m.t.masouleh@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 19 April 2017
Accepted 20 June 2017
Available Online 04 August 2017

Keywords:
Motion Imitation
Motion Capture System
Kinematics
NAO Humanoid Robot
Balance Control

ABSTRACT

This paper investigated the imitation of human motions by a NAO humanoid robot which can be regarded as a human-robot interaction research. In this research, first, human motion is captured by a Kinect 3-dimensional camera through a Robot Operating System (ROS) package. Captured motion is then mapped into the robot's dimensions due to the differences between human and humanoid robot dimensions. After performing the mapping procedure, the solution of both forward and inverse kinematic problem of the robot is solved. To this end, a "Distal" form of forward kinematics solution of the NAO humanoid robot is computed and based on the latter form an analytical inverse kinematics solution for the whole-body imitation purpose is used. The foregoing issue, as one of the contributions of this paper, can be regarded as one of the main reasons for obtaining a smooth imitation. In order to keep the robot's stability during the imitation, an ankle strategy based on a Linear Inverted Pendulum Model (LIPM) and the Ground projection of the Center of Mass (GCoM) criteria is introduced. Moreover, the latter LIPM is controlled by a Proportional-Integral-Derivative (PID) controller for two cases, namely, double and single support phases. Considering the limitation on the motion capture device, from experimental and simulation results obtained by implementing the proposed method on a NAO-H25 Version4 it can be inferred that the robot exhibits an accurate, smooth and fast whole-body motion imitation.

1- مقدمه

استفاده از یک ربات انسان‌نما زمانی می‌تواند در جامعه رواج پیدا کند که اغلب مردم بتوانند به سادگی با آن تعامل داشته باشند و از آن استفاده نمایند. در واقع بایستی عموم مردم جامعه بتوانند این دسته از ربات‌ها را برنامه‌ریزی کنند. امروزه پیشرفت‌های بسیاری را می‌توان در برنامه‌ریزی رفتاری این ربات‌ها مشاهده نمود، اما در برنامه‌ریزی حرکتی همچنان جای کار بیشتری وجود دارد. ساختار یک ربات انسان‌نما پیچیده می‌باشد و این پیچیدگی بر روی برنامه‌ریزی حرکتی این ربات تأثیر می‌گذارد. بنابراین روشی

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

P. Shahverdi, M. Tale Masouleh, Imitation of Human Motion by a NAO Humanoid Robot Using an Analytical Method and Considering Balance of the Robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 386-396, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.30.2]

که بتوان به واسطه‌ی آن حرکات پیچیده‌ی این ربات‌ها را به سادگی برنامه‌ریزی نمود، می‌تواند بسیار کارآمد باشد. تقلید[1] حرکات انسان توسط ربات انسان‌نما یکی از راه‌کارهای ایجاد بهتر این تعامل می‌باشد.

پروژه‌های تقلید حرکت ربات‌ها از انسان‌ها یا سایر ربات‌ها تقریباً از سال 1994 میلادی آغاز گردید. در اولین پروژه‌های انجام شده حرکات بسیار ساده‌ی دست انسان یا ربات‌های دیگر توسط دوربین دریافت می‌شد و توسط بازوهای صنعتی یا ربات‌های پایه متحرک تکرار می‌گردید [1]. در [2-4] اولین پروژه‌های انجام گرفته بر روی تقلید حرکات انسان توسط رباتی موسوم به مغز پویا[2] منتشر گردیده است. در این پروژه ها از یک سیستم علامت گذاری تصویری استفاده شده که در بالاتنه‌ی کاربر متصل شده است.

در کار انجام گرفته در مراجع [5-8] در سال‌های 2008 و 2009 تقلید حرکات انسان توسط ربات انسان‌نمای آسیمو[3] که یکی از پیشرفته‌ترین ربات‌های انسان‌نمای تاریخ می‌باشد انجام گرفته است. در [8] تنها تقلید حرکات بالاتنه[4] در نظر گرفته شده است و پایین تنه‌ی ربات ثابت می‌باشد. در این تحقیق از روش نوری و بدون نشانه‌گر دریافت حرکات انسان موسوم به زمان پرواز[5] استفاده شده است. اما در مراجع [7,6] تقلید حرکات تمام-بدن[6] مد نظر قرارگرفته است. همچنین در این مراجع جلوگیری از برخورد اجزای ربات با یکدیگر نیز در نظر گرفته شده است. در [9] حرکات انسان توسط وسیله دریافت حرکتی ام وی ان[7] شامل سنسورهای لختی[8] که به اجزای مشخصی از بدن انسان متصل می‌گردند، دریافت می‌گردند. در این تحقیقات از حل کننده عددی حداقل مربعات میرا شده[9] به منظور حل سینماتیک معکوس استفاده شده است. همچنین روش ارائه شده برای اولین بار تقلید حرکات در فاز تک تکیه گاهی با در نظر گرفتن تعادل را توسط ربات نائو امکان پذیر می‌نمود.

اخیراً در یکی دیگر از تحقیقات انجام گرفته [11,10] از دوربین دید سه بعدی مایکروسافت کینکت[10] به منظور دریافت حرکات انسان استفاده شده و همچنین روشی کارآمد به منظور نگاشت[11] حرکات انسان به ربات ارائه گردیده است. در این تحقیق، به منظور حل سینماتیک معکوس از روش‌های عددی استفاده گردیده و همچنین اولویت‌بندی وظایف ربات حین تقلید حرکات انسان انجام شده است. در [12] به منظور برقراری تعادل از قید مرکز جرم استفاده شده است. در این روش مسئله‌ی سینماتیک معکوس را به یک مسئله‌ی بهینه‌سازی تبدیل نموده‌اند و با استفاده از الگوریتم لونبرگ مارکواردت[12] این مسئله را به صورت عددی حل نموده‌اند. این روش ترکیبی از دو الگوریتم گرادیان نزولی[13] و گاوس نیوتن[14] می‌باشد. در پروژه‌ی مذکور حفظ تعادل ربات حین تقلید حرکات انسان نیز برمبنای مدل مرکز جرم لحاظ گردیده است، اما در نظر داشتن همزمان حفظ تعادل و تشابه حرکات به صورت دو عامل متضاد هم بیان گردیده که با بالا بردن نسبت تعادل حین تقلید، از تشابه حرکات بین کاربر و ربات کاسته خواهد شد. معضل بعدی در تحقیقات فوق‌الذکر سرعت پایین جابجایی بین فازهای تک‌تکیه‌گاهی[15] و جفت‌تکیه‌گاهی[16] می‌باشد.

به عنوان نمونه کارهای داخلی می‌توان به [14,13] اشاره نمود. مقاله‌ی [13] با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی حرکات تکراری و موزون کاربر توسط ربات تقلید می‌گردد که تنها منحصر به حرکات بالاتنه می‌باشد. در مقاله‌ی [14] نیز حرکات دست‌های انسان با استفاده از راه‌حلی تحلیلی-هندسی تقلید می‌گردد که در آن پایین تنه ربات در نظر گرفته نشده است.

در مقاله‌ی پیش رو ایجاد تعامل بهتر با یک ربات انسان نمای نائو به واسطه‌ی دریافت حرکات تمام-بدن انسان به وسیله‌ی یک دوربین دید سه بعدی کینکت و اعمال آن به ربات مورد مطالعه قرار گرفته است. نوآوری‌های این تحقیق شامل راه حل سینماتیک و رویکرد حفظ تعادل حین تقلید می‌باشد. همان‌طور که گفته شد در اکثر تحقیقات گذشته از راه حل‌های عددی و بهینه‌سازی به‌منظور حل مسأله سینماتیک معکوس استفاده شده است. در این پژوهش، به‌منظور حل مسأله سینماتیک معکوس از راه حل تحلیلی با محوریت در اختیار داشتن اطلاعات موقعیت مفاصل آرنج در شاخه دست‌ها و زانو در شاخه پاها از داده‌های سامانه‌ی دریافت حرکات (کینکت) استفاده شده است که از لحاظ کیفی نتایج دقیق، پیوسته و سریعی را در بر داشته است. همچنین به منظور حفظ تعادل ربات حین تقلید حرکات انسان در هر دو فاز جفت تکیه‌گاهی و تک تکیه‌گاهی از روش قوزک پا[17] با مدل پاندول معکوس خطی[18] استفاده شده است که مفاصل قوزک پای ربات نقش محرکه‌های این پاندول را بازی می‌کنند. در این رویکرد از یک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی[19] به منظور حفظ معیار تعادل (تصویر مرکز جرم ربات بر روی زمین) در درون چند ضلعی تکیه‌گاهی استفاده شده است که مرکز هندسی این چند ضلعی، مرجع این کنترل کننده می‌باشد. "شکل 1" نشان دهنده فرآیند فوق می‌باشد.

ادامه‌ی مقاله‌ی پیش رو بدین صورت است: در فصل دوم سخت افزارهای این تحقیق که شامل ربات انسان‌نمای نائو و سامانه‌ی دریافت حرکات انسان می‌باشد تشریح شده‌اند. با توجه به اختلاف ابعادی انسان و ربات انسان‌نما، بایستی حرکات دریافت شده از انسان به ابعاد ربات نگاشت گردند، لذا در فصل سوم ابتدا نگاشت حرکات انسان به ربات انسان‌نمای نائو توضیح داده شده و بعد از آن حل سینماتیک مستقیم از رهیافت دیستال و سپس حل تحلیلی سینماتیک معکوس ربات نائو با محوریت تقلید حرکات انسان ارائه شده است. در فصل چهارم، کنترل تعادل ربات حین عملیات تقلید توضیح داده شده و در فصل پنجم نتایج پیاده‌سازی عملی این تحقیق ارائه شده است. در فصل ششم نیز با جمع‌بندی مطالب و ارائه‌ی راه‌کارهای ادامه تحقیق این مقاله پایان یافته است.

2- سخت افزارهای تحقیق

در این فصل سخت افزارهای مورد استفاده در تحقیق پیش رو تشریح

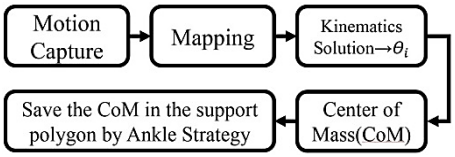

Fig. 1 Proposed imitation procedure

شکل 1 فرآیند تقلیدی ارائه شده در مقاله

[1] Imitation
[2] Dynamic brain
[3] ASIMO
[4] Upper body
[5] Time of flight
[6] Whole-body
[7] MVN
[8] Inertia sensors
[9] Damped least-squares inverse kinematics solver
[10] Microsoft Kinect
[11] Mapping
[12] Levenberg-Marquardt
[13] Gradient descent
[14] Gauss newton
[15] Single support phase
[16] Double support phase
[17] Ankle strategy
[18] Linear inverted pendulum model
[19] Proportional-Integral-Derivative (PID)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.30.2]

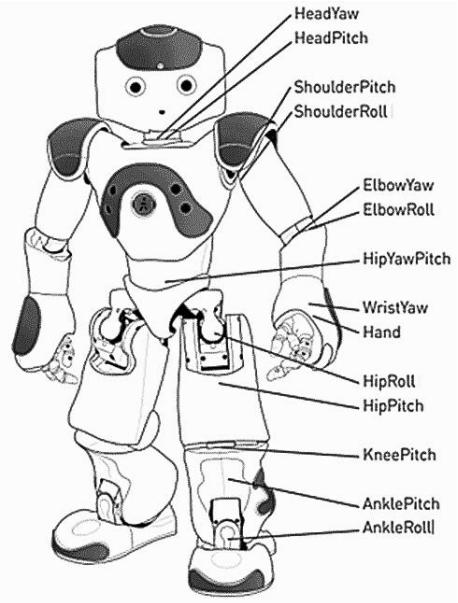

Fig. 2 NAO Humanoid Robot and its degrees-of-freedom[15]

شکل 2 ربات انسان‌نمای نائو و درجات آزادی آن[15]

Fig. 3 Microsoft Kinect for XBOX 360[16]

شکل 3 دوربین کینکت مایکروسافت برای XBOX 360 [16]

می‌گردند. ابتدا ربات انسان‌نمای نائو معرفی گشته و بعد از آن سامانه‌ی دریافت حرکات انسان توضیح داده می‌شود.

2-1- ربات انسان‌نمای نائو-اچ25 نسخه 4

ربات نائو دارای 25 درجه آزادی است که محل هر یک از درجات آزادی در "شکل 2" نشان داده شده است. این ربات دارای قد 573 میلی‌متر و جرم 5.182 کیلوگرم می‌باشد.

2-2- سامانه دریافت حرکات انسان

سامانه‌ی دریافت حرکات انسان یکی از دستگاه‌های ورودی بسیار کارآمد برای ادراک حرکات انسان می‌باشد که این حرکات می‌تواند به عامل هوشمندی همچون یک ربات پایه متحرک، انسان‌نما، بازوی رباتیکی و یا حتی به تصاویر ویدئویی در یک کامپیوتر منتقل گردد. این سامانه‌ها به دو دسته نوری و غیر نوری تقسیم‌بندی می‌گردند. در سامانه‌های نوری، یک یا چند دوربین حرکات انسان را دریافت می‌نمایند.

سامانه‌های نوری دریافت حرکات انسان خود به دو زیرشاخه‌ی بر مبنای نشانه‌گر و بدون نشانه‌گر تقسیم‌بندی می‌گردند. در روش با نشانه‌گر با استفاده از پردازش تصویر و مکان‌یابی نشانه‌گرهایی که در نقاط حائز اهمیت بدن نصب شده‌اند، می‌توان به حرکات پی برد و از اطلاعات جابجایی این نشانه‌گرها استفاده نمود. اما در روش بدون نشانه‌گر، از دوربین‌های دید سه بعدی که با پیشرفت فناوری روز به روز توسعه یافته اند، استفاده می‌گردد.

سامانه‌های غیرنوری به واسطه حسگرهای موقعیت‌یاب مانند واحد اندازه‌گیری اینرسی[1] و یا حسگرهای مغناطیسی عمل می‌کنند. برخی سامانه‌ها نیز از ترکیب سامانه‌های نوری و غیر نوری تشکیل شده‌اند.

راه‌اندازی سامانه‌ی دریافت حرکات انسان اولین مرحله از مراحل عملیات تقلید حرکات انسان توسط ربات انسان‌نما می‌باشد. هدف این سامانه ادراک حرکات مفاصل و لینک‌های مهم بدن انسان می‌باشد که این حرکات معین کننده‌ی ورودی‌های سامانه‌ی تقلید حرکات انسان توسط ربات انسان نما خواهد بود. در این پروژه از دستگاه کینکت ایکس باکس360[2] محصول شرکت مایکروسافت که در "شکل 3" نشان داده شده، به‌منظور دریافت حرکات انسان استفاده می‌شود. این دوربین دارای دو میکروفن استریو در جوانب، دو دوربین عمق‌سنج که یکی از آن‌ها تابش‌گر نور مادون قرمز بوده و دیگری دوربین عمق از نوع سی‌موس[3] می‌باشد. دوربین سوم آن دوبین رنگی سی‌موس می‌باشد. همچنین پردازنده‌ای 12 مگاهرتزی و یک حافظه‌ی فلش به منظور برنامه‌های راه‌اندازی بر روی این دوربین تعبیه گشته است. رابط خروجی این دوربین از نوع درگاه USB[4] می‌باشد. برد این دوربین از 50 سانتی‌متر تا 5 متر می‌باشد که دقت آن در 50 سانتی‌متری 1.5 میلی‌متر و در 5 متری 5 سانتی‌متر می‌باشد.

این دوربین در سیستم عامل لینوکس راه‌اندازی شده و بدین منظور از راه‌انداز و کیت توسعه‌ی نرم‌افزار Open-NI [5] تحت چارچوب کاری سیستم عامل ربات[6] استفاده شده است. همچنین "شکل 4" نشان‌دهنده تصویر اسکلت از بدن انسان می‌باشد که توسط سیستم عامل ربات استخراج گشته است.

3- نگاشت حرکات و حل سینماتیک

بعد از استخراج حرکات و موقعیت‌های مکانی نقاط مهم از بدن انسان توسط سامانه‌ی دریافت حرکات انسان، به دلیل اختلاف ابعادی و سینماتیکی انسان و ربات، بایستی ابتدا این حرکات به ابعاد ربات انسان‌نما نگاشت گردند تا بتوان حرکات را در ابعاد ربات مطالعه نمود. لذا ابتدا این حرکات به ابعاد ربات نگاشت می‌گردد و پس از آن با مطالعه سینماتیک ربات نائو، راه حلی تحلیلی برای حل سینماتیک معکوس با هدف استخراج زوایای موتورهای ربات با محوریت تقلید از حرکات انسان ارائه خواهد شد.

3-1- نگاشت حرکات

همان‌طور که گفته شد، بایستی ابعاد حرکات دریافتی از انسان به ابعاد ربات انسان‌نمای نائو نگاشت گردد. لذا روش‌هایی بدین منظور در مراجع استفاده شده که تقریباً پایه‌ی تمامی آن‌ها یکسان می‌باشد: از تساوی بردارهای یکه‌ی لینک‌های انسان با ربات انسان‌نما و با فرض معلوم بودن موقعیت‌ها و حرکات لینک‌های انسان از سامانه‌ی دریافت حرکات، بردار حرکات مطلوب لینک‌های ربات انسان‌نما استخراج می‌گردد. این فرآیند در "شکل 5" و رابطه‌ی ذیل نمایان می‌باشد:

$$\frac{\vec{V}\mathrm{human}_i}{\left|\vec{V}\mathrm{human}_i\right|}=\frac{\vec{V}\mathrm{robot}_i}{\left|\vec{V}\mathrm{robot}_i\right|} \qquad \text{(1- الف)}$$

$$\vec{V}\mathrm{robot}_i=\frac{\left|\vec{V}\mathrm{robot}_i\right|}{\left|\vec{V}\mathrm{human}_i\right|}\vec{V}\mathrm{human}_i \qquad \text{(1- ب)}$$

[1] Inertia Measurement Unit (IMU)
[2] Microsoft Kinect for XBOX 360
[3] CMOS
[4] Universal Serial Bus (USB)
[5] Software Development Kit (SDK)
[6] Robot Operating System (ROS) frame work

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.30.2]

Fig. 4 Skeleton output from Microsof Kinect camera

شکل 4 خروجی اسکلت از دوربین کینکت مایکروسافت

در رابطه فوق بردار $\vec{V}\mathrm{robot}_i$ بردار حرکت لینک‌های ربات می‌باشد که به عنوان ورودی حل سینماتیک معکوس در نظر گرفته می‌شود تا زوایای مطلوب موتورها به منظور تقلید حرکات انسان حاصل شود. مطابق رابطه‌ی (1- ب) این بردار که منطبق بر ابعاد ربات است، از حرکات انسان بدست می‌آید.

3-2- مطالعه سینماتیک ربات نائو و ارائه راه حل تحلیلی با محوریت تقلید

در ادامه حل سینماتیک ربات نائو ارائه می‌گردد. سینماتیک ربات شامل حل سینماتیک مستقیم و معکوس می‌باشد. در حل سینماتیک مستقیم با فرض معلوم بودن زوایای مفصلی، موقعیت مجری نهایی محاسبه می‌گردد و در حل سینماتیک معکوس با فرض معلوم بودن موقعیت مجری نهایی، زوایای مفصلی محاسبه می‌گردد. به طور کلی در حل سینماتیک معکوس دو راه حل تحلیلی و عددی وجود دارد. راه‌حل تحلیلی برمبنای هندسه‌ی ربات ارائه می‌گردد و راه‌حل عددی برمبنای کمینه کردن تفاضل عددی مقدار مطلوب و مقدار فعلی با استفاده از راه‌حل‌های عددی به‌دست می‌آید. لازم به ذکر است که هر دو حل عددی و یا تحلیلی مستلزم حل سینماتیک مستقیم می‌باشد. لذا ابتدا حل سینماتیک مستقیم ربات نائو با رویکرد دیستال ارائه گشته و بعد از آن حل سینماتیک معکوس به شیوه تحلیلی با محوریت تقلید حرکات ربات از انسان ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است که دینامیک ربات نائو با استفاده از یک مدل هفت لینکی ساده شده از ربات نائو در [17] ارائه شده است که قابلیت استفاده و پیاده‌سازی در این مقاله را ندارد.

3-2-1- حل سینماتیک مستقیم ربات نائو

به منظور حل سینماتیک مستقیم، ربات در شاخه‌های مختلف آن که شامل سر، دست چپ، دست راست، پای چپ و پای راست می‌باشند، بررسی می‌گردد. در این تحلیل که نتیجه‌ی آن به دست آوردن روابط بین لینک‌های متوالی ربات می‌باشد، از قرارداد دناویت-هارتنبرگ[1] استفاده می‌شود.

این قرارداد با توجه به نوع شماره‌گذاری لینک‌ها و فریم‌ها به دو نوع دیستال[2] و پروکسیمال[3] تقسیم‌بندی شده است. روشی که در این‌جا استفاده

[1] Denavit-Hartenberg
[2] Distal

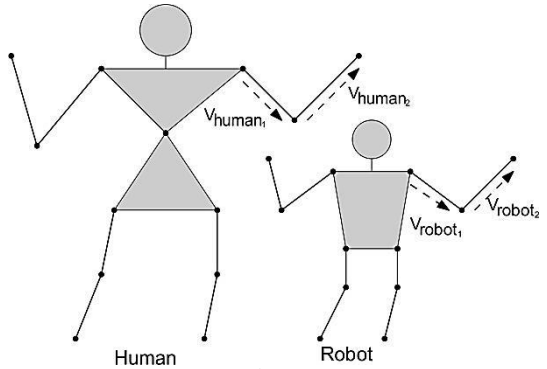

Fig. 5 Schematic representation of the motion mapping concept

شکل 5 شیوه‌ی تصویری نگاشت حرکات انسان به ربات

شده از نوع دیستال می‌باشد. این روش در مرجع [18] توضیح داده شده است. در اولین قدم از حل سینماتیک لازم است تا هر یک از لینک‌های زنجیره‌ها شماره‌گذاری و چارچوب‌گذاری گردند. سپس بایستی پارامترهای دناویت-هارتنبرگ از شمای قرار گرفتن چارچوب‌ها استخراج گردند. لازم به ذکر است که حل سینماتیک ربات نائو با استفاده از رهیافت پروکسیمال در مرجع [19] ارائه شده است، اما راه‌حل ارائه شده در این مقاله با استفاده از رهیافت دیستال بوده که درک این رهیافت در موضوع تقلید حرکات انسان توسط ربات انسان‌نما ساده‌تر بوده و تحلیل و محاسبه سینماتیک معکوس را سبک‌تر می‌نماید. در ادامه به چارچوب‌گذاری و استخراج پارامترهای دناویت-هارتنبرگ ربات نائو پرداخته و سینماتیک دست‌ها و پاهای ربات به ترتیب مطالعه می‌گردند.

سر ربات نائو دارای دو درجه آزادی می‌باشد. با توجه به این‌که حرکات سر توسط سامانه دریافت حرکات انسان کینکت قابل تشخیص نمی‌باشد، مطالعه این شاخه از بدن در این مقاله ارائه نشده است. دست ربات نائو دارای شش درجه آزادی می‌باشد که یک درجه از آن مربوط به باز و بسته شدن پنجه می‌باشد. چارچوب گذاری بر روی مفاصل دست ربات در "شکل‌های 6 و 7" نمایش داده شده است. همچنین پارامترهای استخراجی از شکل‌های مذکور در جداول 1 و 2 آورده شده است. پاهای ربات نائو دارای 11 درجه آزادی می‌باشد که یک درجه از آن در ران پاها مشترک است. چارچوب‌گذاری بر روی مفاصل پاهای ربات در "شکل‌های 8 و 9" نمایش داده شده است. همچنین پارامترهای استخراجی از شکل‌های مذکور در جداول 3 و 4 آورده شده است. در چارچوب‌گذاری‌های انجام گرفته در "شکل‌های 6 تا 9"، زاویه

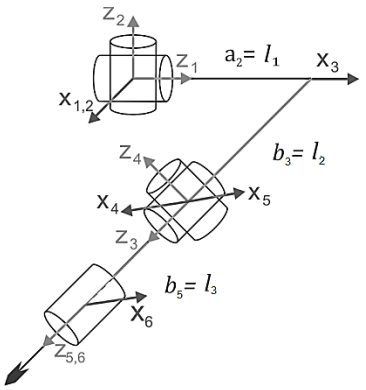

Fig. 6 Denavit-Hartenberg coordination for the left arm joints of NAO

شکل 6 چارچوب گذاری دناویت-هارتنبرگ بر روی مفاصل دست چپ ربات نائو

[3] Proximal

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.30.2]

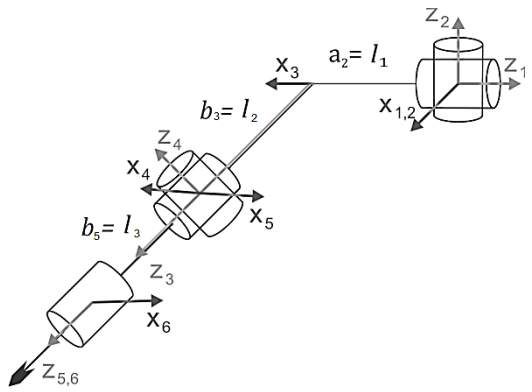

Fig. 7 Denavit-Hartenberg coordination for the right arm joints of NAO

شکل 7 چارچوب گذاری دناویت-هارتنبرگ بر روی مفاصل دست راست ربات نائو

θ_i، زاویه بین x_i و x_{i+1} بوده که در جهت مثبت بردار z_i محاسبه می‌شود.

از درجات آزادی پای ربات نائو، سه درجه اول تشکیل یک مفصل کروی[1] در ران می‌دهند و دو درجه انتهایی تشکیل یک مفصل یونیورسال[2] می‌دهند. با نظر به مقادیر به‌دست آمده در جداول دناویت-هارتنبرگ می‌توان سینماتیک مستقیم ربات را به‌صورت پی در پی حل نمود.

بدین منظور باید ماتریس دوران و بردار جابجایی لینک به لینک با توجه به داده‌های جدول دناویت-هارتنبرگ تشکیل شوند. در روابط زیر ماتریس دوران و بردار جابجایی چارچوب متصل به لینک $i+1$ نسبت به i نشان داده شده است:

$$Q_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i\sin\theta_i & \sin\alpha_i\sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i\cos\theta_i & -\sin\alpha_i\cos\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i \end{bmatrix} \quad \text{(2- الف)}$$

$$a_i = \begin{bmatrix} a_i\cos\theta_i \\ a_i\sin\theta_i \\ b_i \end{bmatrix} \quad \text{(2- ب)}$$

در رابطه‌ی (2- الف)، Q_i نشان‌دهنده‌ی ماتریس دوران و در (2- ب)، a_i بردار جابجایی چارچوب $i+1$ نسبت به i می‌باشد. در مجموع در حل

جدول 1 جدول دناویت-هارتنبرگ برای دست چپ ربات نائو

Table 1 Denavit-Hartenberg table for the left arm joints of NAO

θ_i	α_i	b_i	a_i	i
θ_1	$\frac{\pi}{2}$	0	0	1
$\theta_2+\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	0	$l_1 = 0.015\text{m}$	2
$\theta_3+\pi$	$\frac{\pi}{2}$	$l_2 = 0.105\text{m}$	0	3
$\theta_4+\pi$	$\frac{\pi}{2}$	0	0	4
θ_5	0	$l_3 = 0.055\text{m}$	0	5

جدول 2 جدول دناویت-هارتنبرگ برای مفاصل دست راست ربات نائو

Table 2 Denavit-Hartenberg table for the right arm joints of NAO

θ_i	α_i	b_i	a_i	i
θ_1	$\frac{\pi}{2}$	0	0	1
$\theta_2+\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	0	$l_1 = 0.015\text{m}$	2
$\theta_3+\pi$	$\frac{\pi}{2}$	$l_2 = 0.105\text{m}$	0	3
$\theta_4+\pi$	$\frac{\pi}{2}$	0	0	4
θ_5	0	$l_3 = 0.055\text{m}$	0	5

[1] Spherical
[2] Universal

سینماتیک مستقیم به دنبال توصیف موقعیت چارچوب آخر در چارچوب پایه می‌باشند، لذا بایستی هر یک از چارچوب‌های محلی شماره گذاری شده در ماتریس‌های دوران آن چارچوب نسبت به چارچوب پایه ضرب شود تا آن موقعیت در چارچوب پایه توصیف گردد.

ماتریس دوران چارچوب i ام نسبت به چارچوب پایه و همچنین بردار موقعیت چارچوب $i+1$ نسبت به i در روابط زیر نشان داده شده اند:

$${}^{1}_{i}Q = Q_1Q_2\ldots Q_{i-1} \quad \text{(3- الف)}$$

$$\left[{}^{1}_{i+1}P\right]_1 = Q_1Q_2\ldots Q_{i-1}a_i \quad \text{(3- ب)}$$

در رابطه‌ی (3- ب) باید توجه نمود که a_i نشان‌دهنده‌ی بردار موقعیت چارچوب $i+1$ نسبت به i است که در i توصیف گشته، اما بعد از ضرب شدن در رابطه‌ی (3- الف) که همان ماتریس دوران از چارچوب i نسبت به چارچوب پایه است، این بردار نیز در چارچوب پایه به دست می‌آید.

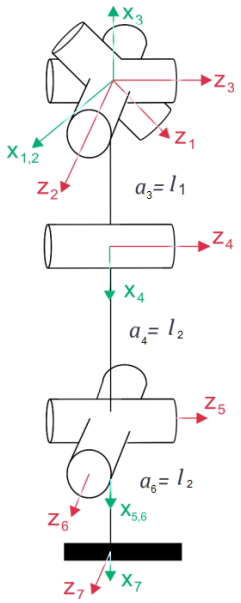

Fig. 8 Denavit-Hartenberg coordination for the left leg joints of NAO

شکل 8 چارچوب گذاری دناویت-هارتنبرگ بر روی مفاصل پای چپ ربات نائو

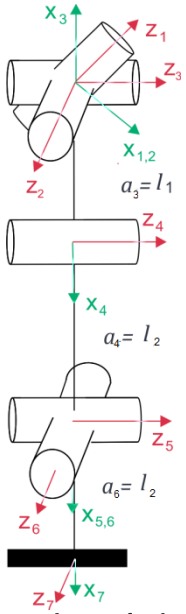

Fig. 9 Denavit-Hartenberg coordination for the right leg joints of NAO

شکل 9 چارچوب گذاری دناویت-هارتنبرگ بر روی مفاصل پای راست ربات نائو

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.30.2]

3-2-2- حل سینماتیک معکوس

با استفاده از حل سینماتیک معکوس، زوایای اعمالی به ربات استخراج می‌گردند. لازم به ذکر است که با اعمال مستقیم زوایای بدست آمده از این مرحله، هیچ تضمینی برای پایدار بودن ربات نخواهد داشت، زیرا دینامیک ربات در نظر گرفته نشده است. . البته اعمال زوایا بر مفاصل بالاتنه تأثیری در پایداری ربات ندارد، لذا می‌توان زوایای خروجی برای بالاتنه را به ربات اعمال نمود. در ارائه‌ی این روش، حل روابط سینماتیک معکوس برای دست و پای چپ به عنوان نمونه تحلیل گردیده که با دنبال نمودن راهی مشابه، روابط برای دست و پای راست نیز استخراج می‌گردند.

همان‌طور که گفته شد، دست ربات نائو بدون در نظر گرفتن باز و بسته شدن انگشتان دست، دارای پنج درجه آزادی می‌باشد. دو درجه در شانه، دو درجه در آرنج و یک درجه در مچ. لذا در این روابط زوایای مطلوب هر یک از موتورهای نام برده شده استخراج می‌گردد. بدین منظور از روش تحلیلی بر مبنای هندسه‌ی زنجیره‌ی دست استفاده می‌شود.

نقاطی که از داده‌های سیستم دریافت حرکات سه بعدی انسان (کینکت) در حل سینماتیک معکوس استفاده می‌شوند، شامل نقاط شانه، آرنج و مچ دست می‌باشد. ابتدا با استفاده از روابط سینماتیک مستقیم، نقاط آرنج و مچ که مکان آن‌ها از داده‌های کینکت معلوم می‌باشند به صورت پارامتری استخراج می‌گردند:

$$[{}^1_6P]_1 = a_1 + Q_1a_2 + Q_1Q_2a_3 + Q_1Q_2Q_3a_4 + Q_1Q_2Q_3Q_4a_5 \quad \text{(الف-4)}$$

$$[{}^1_5P]_1 = a_1 + Q_1a_2 + Q_1Q_2a_3 + Q_1Q_2Q_3a_4 \quad \text{(ب-4)}$$

در روابط (4-الف) و (4-ب)، $[{}^1_6P]_1$ معرف موقعیت مچ نسبت به شانه و $[{}^1_5P]_1$ معرف موقعیت آرنج نسبت به شانه هستند که در چارچوب شانه تعریف گشته‌اند. خاطرنشان می‌گردد که شانه‌ها به عنوان پایه در زنجیره‌ی سینماتیک دست‌ها انتخاب شده‌اند. بنابراین لازم است تا در حل سینماتیک به عنوان مرجع قرار گیرند.

از داده‌های کینکت بردارهای $\vec{V}robot_1$ و $\vec{V}robot_2$ موجود می‌باشند که به ترتیب معرف موقعیت آرنج نسبت به شانه و مچ نسبت به آرنج می‌باشند. این بردارها در روابط سینماتیک معادل بردارهای $[{}^1_5P]_1$ و $[{}^5_6P]_1$ می‌باشند:

جدول 3 جدول دناویت-هارتنبرگ برای پای چپ ربات نائو

Table 3 Denavit-Hartenberg table for the left leg of NAO

θ_i	α_i	b_i	a_i	i
θ_1	$\frac{\pi}{2}$	0	0	1
$\theta_2 - \frac{3\pi}{4}$	$\frac{\pi}{2}$	0	0	2
$\theta_3 + \pi$	0	0	$l_1 = 0.100\text{m}$	3
θ_4	0	0	$l_2 = 0.1029\text{m}$	4
θ_5	$\frac{\pi}{2}$	0	0	5
θ_6	0	0	$l_3 = 0.04519\text{m}$	6

جدول 4 جدول دناویت-هارتنبرگ برای پای راست ربات نائو

Table 4 Denavit-Hartenberg table for the right leg of NAO

θ_i	α_i	b_i	a_i	i
θ_1	$\frac{\pi}{2}$	0	0	1
$\theta_2 + \frac{3\pi}{4}$	$\frac{\pi}{2}$	0	0	2
$\theta_3 + \pi$	0	0	$l_1 = 0.100\text{m}$	3
θ_4	0	0	$l_2 = 0.1029\text{m}$	4
θ_5	$\frac{\pi}{2}$	0	0	5
θ_6	0	0	$l_3 = 0.04519\text{m}$	6

$$\vec{V}robot_1 = [{}^1_5P]_1 = a_1 + Q_1a_2 + Q_1Q_2a_3 + Q_1Q_2Q_3a_4 \quad \text{(الف-5)}$$

$$\vec{V}robot_2 = [{}^5_6P]_1 = Q_1Q_2Q_3Q_4a_5 \quad \text{(ب-5)}$$

$$\vec{V}robot_1 + \vec{V}robot_2 = [{}^1_5P]_1 + [{}^5_6P]_1 = [{}^1_6P]_1 \quad \text{(ج-5)}$$

مقدار پارامتری محاسبه شده برای بردار $[{}^1_5P]_1$ به صورت ذیل می‌باشد:

$$[{}^1_5P]_1 = \begin{bmatrix} [{}^1_5P_x]_1 \\ [{}^1_5P_y]_1 \\ [{}^1_5P_z]_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_2\cos\theta_1\cos\theta_2 - l_1\cos\theta_1\sin\theta_2 \\ l_2\sin\theta_1\cos\theta_2 - l_1\sin\theta_1\sin\theta_2 \\ l_1\cos\theta_2 + l_2\sin\theta_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

از تناظر موجود در رابطه‌ی (6) می‌توان با عملیات مثلثاتی مقادیر θ_1 و θ_2 را محاسبه نمود. ابتدا مقدار θ_2 محاسبه می‌گردد و سپس مقدار θ_1 به صورت تابعی از θ_2 ظاهر می‌گردد. این روابط به صورت ذیل می‌باشند:

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{[{}^1_5P_z]_1}{\sqrt{{l_1}^2 + {l_2}^2}}\right) + \arctan\left(-\frac{l_1}{l_2}\right) \quad \text{(الف-7)}$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{[{}^1_5P_x]_1}{l_2\cos\theta_2 - l_1\sin\theta_2}, \frac{[{}^1_5P_y]_1}{l_2\cos\theta_2 - l_1\sin\theta_2}\right) \quad \text{(ب-7)}$$

حال محاسبه‌ی مقادیر زوایای θ_3 و θ_4 مطلوب می‌باشند. معادله‌ی (5-ب) موقعیت مچ نسبت به آرنج را نشان می‌دهد که در چارچوب شانه تعریف گشته است. از طرفی این بردار نیز از داده‌های کینکت در دسترس می‌باشد.

طرف راست این تساوی برای محاسبه‌ی زوایای θ_3 و θ_4 پیچیده می‌باشد. اما از آنجا که مقادیر زوایای θ_1 و θ_2 در مرحله‌ی قبلی استخراج شده‌است، بنابراین در معادله‌ی (5-ب) نیز این ماتریس‌ها معلوم می‌باشند. مقدار ماتریس‌های Q_1 و Q_2 به صورت روابط زیر نوشته می‌شوند:

$$Q_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{(الف-8)}$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} -\sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \\ \cos\theta_2 & 0 & \sin\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{(ب-8)}$$

با ضرب طرف راست رابطه‌ی (5-ب) در ${Q_1}^T$ و ${Q_2}^T$ موقعیت چارچوب 6 در 5 به دست خواهد آمد که در چارچوب 3 تعریف گشته است. خروجی محاسباتی این روابط ساده تر می‌باشد که در ادامه به دست خواهند آمد:

$$[{}^5_6P]_3 = {Q_2}^T{Q_1}^T[{}^5_6P]_1 = {Q_2}^T{Q_1}^TQ_1Q_2Q_3Q_4a_5 = Q_3Q_4a_5 \quad (9)$$

در نهایت مقدار پارامتری روابط بالا به فرم رابطه‌ی زیر در خواهد آمد که رابطه‌ی بسیار ساده شده‌ای می‌باشد:

$$[{}^5_6P]_3 = \begin{bmatrix} [{}^5_6P_x]_3 \\ [{}^5_6P_y]_3 \\ [{}^5_6P_z]_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_3\cos\theta_3\sin\theta_4 \\ l_3\sin\theta_3\sin\theta_4 \\ l_3\cos\theta_4 \end{bmatrix} \quad (10)$$

در نهایت مقدار پارامتری روابط بالا به فرم رابطه‌ی زیر در خواهد آمد که رابطه‌ی بسیار ساده شده‌ای می‌باشد:

از رابطه‌ی (10) ابتدا مقدار θ_4 و سپس مقدار θ_3 به دست خواهد آمد. این مقادیر به ترتیب در روابط ذیل ارائه شده‌اند:

$$\theta_4 = \arccos\left(\frac{[{}^5_6P_z]_3}{l_3}\right) \quad \text{(الف-11)}$$

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{[{}^5_6P_x]_3}{l_3\sin\theta_4}, \frac{[{}^5_6P_y]_3}{l_3\sin\theta_4}\right) \quad \text{(ب-11)}$$

نتیجه‌ی نهایی حل سینماتیک معکوس برای دست راست نیز با دنبال

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.30.2]

نمودن روش فوق به صورت ذیل به دست خواهد آمد:

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{[{}^1_5\mathrm{P_z}]_1}{\sqrt{{l_1}^2 + {l_2}^2}}\right) + \arctan\left(\frac{l_1}{l_2}\right) \quad \text{(12-الف)}$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{[{}^1_5\mathrm{P_x}]_1}{l_1\sin\theta_2 + l_2\cos\theta_2}, \frac{[{}^1_5\mathrm{P_y}]_1}{l_1\sin\theta_2 + l_2\cos\theta_2}\right) \quad \text{(12-ب)}$$

$$\theta_4 = \arccos\left(\frac{[{}^5_6\mathrm{P_z}]_3}{l_3}\right) \quad \text{(12-ج)}$$

$$\theta_3 = \arctan\left(-\frac{[{}^5_6\mathrm{P_x}]_3}{l_3\sin\theta_4}, -\frac{[{}^5_6\mathrm{P_y}]_3}{l_3\sin\theta_4}\right) \quad \text{(12-د)}$$

حل سینماتیک معکوس برای پاها نیز همانند روش ارائه شده برای دست‌ها می‌باشد. در حل سینماتیک پاها، موقعیت نقاطی که توسط کینکت در اختیار می‌باشند شامل ران، زانو و قوزک می‌باشد. با فرض معلوم بودن این نقاط، حل سینماتیک معکوس با روش تحلیلی بسیار ساده می‌گردد. پاهای ربات نائو مجموعاً دارای 11 درجه آزادی است که یک درجه بین دو پا مشترک می‌باشد. درجه‌ی مشترک در مفصل ران، زوایای هیپ-یا-پیچ[1] را می‌سازد. پای ربات نائو دارای سه درجه آزادی در ران، یک درجه آزادی در زانو و دو درجه آزادی در قوزک می‌باشد. در این تحلیل، سه درجه آزادی موجود در ران و یک درجه آزادی زانو محاسبه می‌گردد. درجات آزادی موجود در قوزک به منظور حفظ تعادل استفاده می‌شوند که در آینده تحلیل می‌گردند.

"شکل 8" نشان دهنده‌ی مختصات گذاری پای چپ می‌باشد. در این بخش با فرض معلوم بودن مختصات زانو و مچ پا نسبت به ران از داده‌های دریافتی از کینکت، زوایای مفاصل شماره‌ی 1 الی 4 محاسبه می‌شوند. یادآور می‌گردد دو درجه آزادی موجود در مچ پا نیز به منظور حفظ تعادل استفاده می‌گردند. با توجه به حل تحلیلی برای سینماتیک مستقیم که در نرم‌افزار متمتیکا[2] انجام گرفته است، مختصات زانو (چارچوب شماره‌ی 4) نسبت به ران (چارچوب شماره‌ی 2) بردار $[{}^2_4\mathrm{P}]_2$ می‌باشد که در مختصات ران (چارچوب شماره‌ی 2) تعریف شده است. رابطه‌ی زیر مقدار تحلیلی به دست آمده برای این بردار را نشان می‌دهد:

$$[{}^2_4\mathrm{P}]_2 = \begin{bmatrix} [{}^2_4\mathrm{P_x}]_2 \\ [{}^2_4\mathrm{P_y}]_2 \\ [{}^2_4\mathrm{P_z}]_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1\cos(\theta_2 + \frac{\pi}{4})\cos\theta_3 \\ l_1\sin(\theta_2 + \frac{\pi}{4})\cos\theta_3 \\ -l_1\sin\theta_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

ابتدا از روابط تحیلی (13) مقدار زاویه‌ی θ_3 برای پای چپ مطابق رابطه ذیل به دست خواهد آمد:

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{\sqrt{[{}^2_4\mathrm{P_x}]_2{}^2 + [{}^2_4\mathrm{P_y}]_2{}^2}}{l_1}, -\frac{[{}^2_4\mathrm{P_z}]_2}{l_1}\right) \quad (14)$$

در رابطه‌ی زیر با فرض معلوم بودن θ_3، مقدار θ_4 محاسبه می‌گردد. در این مرحله با توجه به وجود روابط ربع کمان به منظور ساده سازی از تغییر متغیر استفاده می‌شود:

$$\theta'_2 = \theta_2 + \frac{\pi}{4} \quad , \quad \sqrt{[{}^2_4\mathrm{P_x}]_2{}^2 + [{}^2_4\mathrm{P_y}]_2{}^2} = r;$$
$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{[{}^2_4\mathrm{P_x}]_2}{r}, \frac{[{}^2_4\mathrm{P_y}]_2}{r}\right) - \frac{\pi}{4} \quad (15)$$

[1] Hip-YawPitch
[2] Mathematica: www.wolfram.com

حال با داشتن دو زاویه‌ی θ_2 و θ_3 و محاسبه‌ی موقعیت زانو (چارچوب شماره 4) در چارچوب شماره 1 از مفصل ران، زاویه‌ی θ_1 محاسبه می‌گردد:

$$[{}^1_4\mathrm{P}]_1 = \begin{bmatrix} [{}^1_4\mathrm{P_x}]_1 \\ [{}^1_4\mathrm{P_y}]_1 \\ [{}^1_4\mathrm{P_z}]_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1\cos\theta_1\cos(\theta_2 + \frac{\pi}{4})\cos\theta_3 - l_1\sin\theta_1\sin\theta_3 \\ l_1\sin\theta_1\cos\left(\theta_2 + \frac{\pi}{4}\right)\cos\theta_3 + l_1\cos\theta_1\sin\theta_3 \\ l_1\cos\theta_3\sin(\theta_2 + \frac{\pi}{4}) \end{bmatrix} \quad (16)$$

از دو مولفه‌ی $[{}^1_4\mathrm{P_x}]_1$ و $[{}^1_4\mathrm{P_y}]_1$ می‌توان مقدار زاویه‌ی θ_1 را محاسبه نمود. بدین منظور دستگاه معادلات دو معادله دو مجهولی با مجهولات $\cos\theta_1$ و $\sin\theta_1$ حل می‌شود که نتیجه به صورت ذیل خواهد بود:

$$\cos\theta_1 = \frac{l_1\cos\left(\theta_2 + \frac{\pi}{4}\right)\cos\theta_3\,[{}^1_4\mathrm{P_x}]_1 - l_1\sin\theta_3\,[{}^1_4\mathrm{P_y}]_1}{{l_1}^2\sin^2\theta_3 + {l_1}^2\cos^2\left(\theta_2 + \frac{\pi}{4}\right)\cos^2\theta_3}$$
$$\sin\theta_1 = \frac{l_1\cos\left(\theta_2 + \frac{\pi}{4}\right)\cos\theta_3\,[{}^1_4\mathrm{P_y}]_1 + l_1\sin\theta_3\,[{}^1_4\mathrm{P_x}]_1}{{l_1}^2\sin^2\theta_3 + {l_1}^2\cos^2\left(\theta_2 + \frac{\pi}{4}\right)\cos^2\theta_3}$$
$$\theta_1 = \arctan(\cos\theta_1, \sin\theta_1) \quad (17)$$

به منظور محاسبه‌ی زاویه‌ی θ_4 بایستی موقعیت قوزک نسبت به زانو در نظر گرفته شود. بدین منظور مطابق رابطه‌ی ذیل از تفاضل موقعیت قوزک نسبت به ران و زانو نسبت به ران که در چارچوب ران تعریف گشته استفاده می‌گردد:

$$[{}^2_5\mathrm{P}]_2 = [{}^2_4\mathrm{P}]_2 + [{}^4_5\mathrm{P}]_2$$
$$[{}^2_5\mathrm{P}]_2 - [{}^2_4\mathrm{P}]_2 = [{}^4_5\mathrm{P}]_2 \quad (18)$$

حل تحلیلی این رابطه بار محاسباتی سنگینی دارد. اما با تعریف موقعیت قوزک نسبت به زانو که در چارچوب زانو تعریف شده است می‌توان روابط ساده‌تری را به دست آورد. بدین منظور نیاز است تا ماتریس‌های دوران که به منظور تبدیل چارچوب استفاده شده‌اند به کار گرفته شوند و با ضرب وارون آن‌ها در روابط نسبی قبلی، رابطه‌ی متناظر ساده شده را مطابق با رابطه‌ی زیر به دست آورد:

$$[{}^2_5\mathrm{P}]_2 - [{}^2_4\mathrm{P}]_2 = \mathrm{Q_2Q_3}[{}^4_5\mathrm{P}]_4$$
$$\mathrm{Q_3}^{\mathrm{T}}\mathrm{Q_2}^{\mathrm{T}}([{}^2_5\mathrm{P}]_2 - [{}^2_4\mathrm{P}]_2) = [{}^4_5\mathrm{P}]_4 \quad (19)$$

از تناظر موجود در حل تحلیلی می‌توان به سادگی مقدار θ_4 را مطابق با رابطه‌ی زیر به دست آورد:

$$[{}^4_5\mathrm{P}]_4 = \begin{bmatrix} [{}^4_5\mathrm{P_x}]_4 \\ [{}^4_5\mathrm{P_y}]_4 \\ [{}^4_5\mathrm{P_z}]_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_2\cos\theta_4 \\ l_2\sin\theta_4 \\ 0 \end{bmatrix}$$
$$\theta_4 = \arctan\left(\frac{[{}^4_5\mathrm{P_x}]_4}{l_2}, \frac{[{}^4_5\mathrm{P_y}]_4}{l_2}\right) \quad (20)$$

4- کنترل تعادل

حفظ تعادل و پایداری یکی از معیارهای بسیار مهم در هنگام انجام عملیات تقلید توسط ربات می‌باشد. اعمال مستقیم زوایای دریافتی از تحلیل سینماتیکی هیچ تضمینی مبنی بر پایداری ربات نخواهد داشت، بنابراین در ادامه روشی به منظور پایدار نگاه‌داشتن تعادل ربات نائو حین انجام عملیات تقلید حرکات انسان ارائه خواهد شد.

به منظور ارزیابی پایداری ربات انسان‌نما معیارهای زیادی ارائه شده است از قبیل: تصویر نقطه مرکز جرم بر روی زمین[3]، نقطه گشتاور صفر[4]، نقطه

[3] Ground Center of Mass (GCoM)
[4] Zero Moment Point (ZMP)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.30.2]

مرکز فشار[1]، نشانگر چرخش پا[2]، نقطه نرخ تغییرات تکانه زاویه‌ای صفر[3] و نقطه جذب[4] [20]. در این مقاله از معیار تصویر نقطه مرکز جرم بر روی زمین استفاده شده است. معیار تصویر نقطه مرکز جرم بر روی زمین یکی از معیارهای پر استفاده و مطلوب می‌باشد. این معیار ساده شده‌ی معیار نقطه گشتاور صفر بوده مختص حرکات شبه ایستایی می‌باشد.

به منظور مطالعه و بررسی این معیار لازم است تا ابتدا مدل مرکز جرم ربات نائو استخراج گردد. بدین منظور جرم و موقعیت هر لینک از ربات از مستندات ساخت ربات استخراج گشته و با استفاده از رابطه مرکز جرم و روابط سینماتیک استخراجی، مرکز جرم کل ربات محاسبه می‌گردد. لازم است تا ابتدا مختصات مرکز جرم لینک که در چارچوب مستندات ارائه گشته به چارچوب استخراجی در چارچوب گذاری دناویت هارتنبرگ (چارچوب 2 در شکل 8) تبدیل شود و بعد از آن، موقعیت این جرم با استفاده از روابط سینماتیک مستقیم در رابطه مرکز جرم محاسبه گردد. رابطه مرکز جرم به صورت زیر نوشته می‌شود. در این رابطه مبدا محاسبه مرکز جرم، چارچوب تاب گشت[5] در نظر گرفته شده است:

$$\mathrm{r}_{\mathrm{CoM}} = \begin{bmatrix} x_{\mathrm{CoM}} \\ y_{\mathrm{CoM}} \\ z_{\mathrm{CoM}} \end{bmatrix} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i r_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i} \tag{21}$$

برای تعریف مختصات مرکز جرم بر روی زمین دو مولفه‌ی x و y از رابطه (21) استفاده می‌گردد. با تکمیل محاسبات و شبیه‌سازی مدل مرکز جرم ربات در نرم‌افزار متمتیکا تصویری همانند "شکل 10" به دست می‌آید. در این تصویر مرکز جرم شاخه‌های سر، دست‌ها، پاها با گوی‌های کوچک و مرکز جرم معادل با گوی بزرگتر نشان داده شده است و همچنین تصویر مرکز جرم بر روی زمین نیز نشان داده شده است. به منظور صحه‌گذاری بر مدل به دست آمده، به ازای زوایای ورودی دلخواه گزارش مرکز جرم ربات نائو را از واسط برنامه‌نویسی ربات[6] استخراج نموده و با اعمال همان زوایا به مدل نوشته شده، دو خروجی با هم مقایسه می‌گردند. نمودار مقایسه دو خروجی در "شکل 11" ارائه شده است که نشان دهنده تطبیق کامل مدل سینماتیک و مرکز جرم محاسبه شده در هر سه محور XYZ با مشخصات ربات دارد.

لازم به ذکر است مرکز جرمی که توسط واسط برنامه‌نویسی ربات در اختیار کاربر قرار می‌گیرد به عنوان معیار پایداری کاربرد ندارد، زیرا واسط برنامه‌نویسی ربات ، مرکز جرم را پس از اعمال زوایا در اختیار قرار می‌دهد.

در تقلید حرکات انسان توسط ربات انسان نمای نائو از دو درجه آزادی موجود در قوزک پاها استفاده نمی‌گردد. لذا از این دو درجه می‌توان به منظور کنترل مرکز جرم استفاده نمود. به طور کلی تعادل ربات در حالت جفت تکیه گاهی (استقرار بر روی دو پا) یا تک تکیه گاهی (استقرار بر روی یک پا) بررسی می‌گردد. یکی دیگر از چالش‌های پیش رو تشخیص پای تکیه گاه می‌باشد که در ادامه مورد مطالعه قرار گرفته است. در هر یک از حالات پای تکیه گاه ربات به صورت مدلی از پاندول معکوس خطی شده تحلیل می‌گردد.

در واقع زمانی تعادل ربات از بین می‌رود که تصویر مرکز جرم بر روی سطح زمین از چند ضلعی تکیه‌گاه[7] خارج گردد. از دیدگاه ریاضی این چند ضلعی شامل کوچکترین مجموعه محدب دربرگیرنده تمام نقاط کف پاها بر روی سطح زمین می‌گردد [21]. چند ضلعی تکیه‌گاه در مدل به دست آمده در این تحقیق در" شکل 10" نشان داده شده است.

روش‌های مورد استفاده در پایداری و بازیابی تعادل با رویکردهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. به طور مثال استفاده از مفاصل قوزک پا، استفاده از مفاصل ران، ترکیب ران و قوزک و در نهایت گام برداشتن که مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است [22]. یا مثلاً در مسأله راه رفتن ربات‌های دو پا، چالش تعادل با رویکرد جابجایی دینامیکی اشیاء چند لینکی مورد مطالعه قرار گرفته است [23]. در این تحقیق به منظور برقراری تعادل حین تقلید، از روش قوزک پا که توسط کنترل کننده تناسبی-مشتقی-انتگرالی کنترل شده است، استفاده می‌گردد. از مدل سینماتیک و مرکز جرم

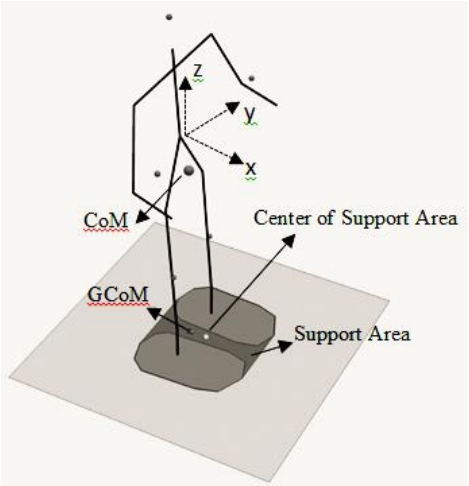

Fig. 10 NAO's kinematics and Center of Mass (CoM) model

شکل 10 مدل سینماتیک و مرکز جرم ربات نائو

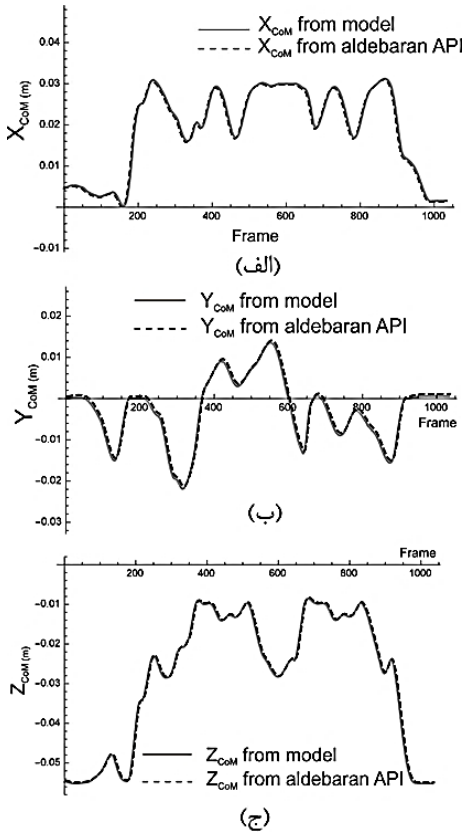

Fig. 11 Comparision of the computed CoM model with the API CoM model

شکل 11 نمودار مقایسه مرکز جرم مدل محاسباتی و مدل استخراجی از واسط برنامه‌نویسی ربات: (الف) محور X (ب) محور Y (ج) محور Z

[1] Center of Pressure (CoP)
[2] Foot-Rotation Indicator (FRI)
[3] Zero Rate of Change of Angular Momentum (ZRAM)
[4] Capture Point
[5] Torso
[6] Application Programming Interface (API)
[7] Support Polygon

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.30.2]

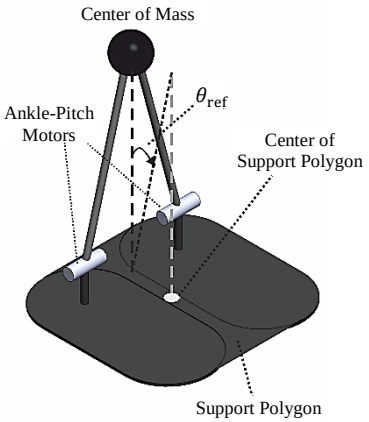

Fig. 12 Inverted pendulum model for the double support phase

شکل 12 مدل پاندول معکوس صفحه‌ای برای حالت جفت تکیه‌گاهی

به دست آمده در این تحقیق، تصویر آنی مرکز جرم بر روی زمین و همچنین زاویه‌ای که به ازای آن تصویر مرکز جرم بر روی مرکز چندضلعی تکیه‌گاهی قرار می‌گیرد در هر لحظه مشخص می‌باشد.

فاصله‌ی این دو زاویه از یکدیگر در هر لحظه به عنوان خطای کنترل وارد کنترل کننده شده و زاویه‌ی مطلوب موتورهای قوزک پا در هر لحظه تولید می‌شود. لازم به ذکر است که ربات نائو دارای قابلیت دریافت پسخور گشتاور و همچنین اعمال گشتاور نمی‌باشد، لذا بایستی در فرآیند کنترل از معیارهای بر مبنای موقعیت استفاده گردد.

4-1- تشخیص پای تکیه‌گاه

به منظور تشخیص پای تکیه‌گاه از دو معیار که با استفاده از سامانه‌ی دریافت حرکات انسان در اختیار قرار می‌گیرد استفاده شده است:

1. تمایل تصویر مرکز اسکلت بدن انسان به چپ یا راست
2. فاصله‌ی پای شناور از سطح زمین

با نظارت بر رفتار اسکلت خروجی از بدن انسان که توسط سامانه دریافت حرکات انسان در اختیار قرار می‌گیرد، مشاهده گردید زمانی که انسان قصد گام برداشتن دارد، مرکز هندسی بدن که نشان دهنده مرکز نیم تنه بالایی می‌باشد به سمت پای مخالف متمایل می‌گردد. معیار دیگر فاصله‌ی پای شناور از سطح زمین می‌باشد. به منظور تشخیص شناور بودن پا، فاصله‌ی عمودی آن از سطح زمین زمین محاسبه می‌گردد. چنانچه این فاصله از مقدار معینی بیشتر شود، نشان دهنده آن است که پا از سطح زمین جدا شده و در حالت شناور قرار دارد که در این حالت ربات بایستی در حالت تک تکیه‌گاهی مطالعه گردد.

4-2- حفظ تعادل در حالت جفت تکیه گاهی

در حالت جفت تکیه گاهی با تغییر دادن زاویه‌ی پیچ مفصل قوزک، تصویر مرکز جرم ربات که به‌صورت یک پاندول معکوس مدل گشته در ناحیه‌ی تکیه‌گاهی حفظ می‌گردد. با توجه به این‌که مفاصل ربات نائو دارای پسخور[1] موقعیت زاویه با دقت مطلوب می‌باشند، لذا این پسخورها به منظور تخمین موقعیت دقیق لحظه‌ای مرکز جرم ربات استفاده می‌گردد. در وضعیت جفت تکیه‌گاهی می‌توان گفت که ربات متمایل به روبرو یا پشت واژگون می‌گردد و نسبت به جوانب دارای پایداری می‌باشد. در واقع در این حالت چنانچه ربات بخواهد واژگون گردد، ابتدا بر روی پای آن سمت (حالت تک تکیه گاهی) قرار می‌گیرد.

لذا تنها حرکات در صفحه‌ی جانبی[2] مورد مطالعه قرار می‌گیرد و ربات به صورت یک پاندول معکوس صفحه‌ای مدل می‌گردد. با توجه به مدل مرکز جرم به‌دست آمده از ربات نائو، پاندول معکوس به‌صورت "شکل 12" مجسم می‌گردد. در این شکل، مرکز جرم ربات، موتورهای محرک در این حالت، چند ضلعی تکیه گاه و مرکز این چند ضلعی مشخص شده‌اند. در صورتی که مرکز جرم در زاویه‌ی θ_{ref} قرار گیرد، تصویر آن بر روی زمین منطبق بر مرکز چند ضلعی تکیه‌گاهی خواهد بود. همان‌طور که قبلاً اشاره گردید، تا زمانی که حرکات ربات شبه‌استاتیکی باشد و تصویر مرکز جرم در درون چندضلعی تکیه‌گاهی قرار داشته باشد، تعادل ربات انسان‌نما حفظ می‌گردد، بنابراین مرکز این ناحیه بهترین مرجع کنترل می‌باشد.

به منظور کنترل این سیستم ابتدا پاسخ پله حلقه باز سیستم به ازای حداکثر زاویه‌ی پایدار (4- درجه)، استخراج گشت. لازم به ذکر است که منظور از زاویه پایدار، زاویه‌ای است که ربات با حرکت از آن نقطه با داشتن شتاب و سرعت اولیه واژگون نمی‌گردد. در تحریک انجام گرفته، مرکز جرم ربات به اندازه 4 درجه از حالت عمود به سمت عقب منحرف گشته و سپس دستور حرکت به سمت زاویه θ_{ref} را دریافت می‌نماید.

در واقع اختلاف زاویه فعلی مرکز جرم با زاویه‌ی θ_{ref} به عنوان خطای کنترل، وارد کنترل کننده می‌شود. با توجه به تشابه زیاد خروجی در انحراف از سمت مقابل (مثبت) به سمت θ_{ref}، از لحاظ نمودن حالت ثانویه صرف نظر شده است. اعمال تحریک پله به ربات در این حالت نشان‌گر زمان نشست 5 ثانیه و فراجهش بسیار زیاد 95٪ می‌باشد. در پیاده سازی عملی مشاهده گردید که رسیدن به زمان نشست کمتر دارای اولویت بالاتری می‌باشد، بنابراین در طراحی کنترل کننده کاهش حداکثری این پارامتر مد نظر قرار گرفت. بدین منظور از کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی استفاده گردید. به منظور تنظیم ضرایب کنترل کننده ابتدا از روش زیگلر نیکولز[3] ضرایب تقریبی استخراج گردید و سپس با سعی و خطا ضرایب نهایی انتخاب گشت.

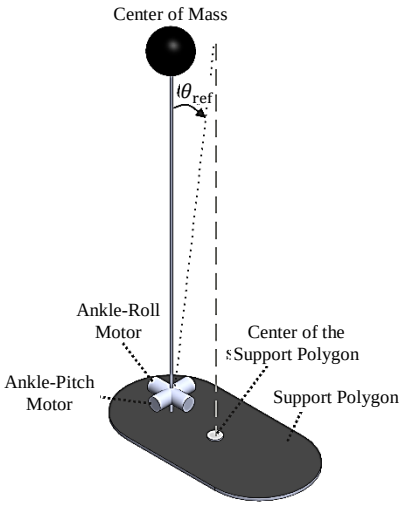

Fig. 13 Inverted pendulum model for the single support phase

شکل 13 مدل پاندول معکوس صفحه‌ای برای حالت تک تکیه گاهی

[1] Feedback

[2] Sagittal

[3] Ziegler Nichols

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.30.2]

جدول 5 ضرایب کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی پیاده سازی شده.

Table 5 Implemented coefficients for the PID controller.

حالت	T_d	T_i	K_p
جفت تکیه گاهی	0.1	0.4	0.84
تک تکیه گاهی-پیچ	0.125	0.5	0.84
تک تکیه گاهی- رول	0.875	0.35	0.888

پاسخ سیستم به کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی به ازای ضرایب کنترل نشان داده شده در جدول 5 به صورت "شکل 14-الف" می‌باشد.

3-4- حفظ تعادل در حالت تک تکیه‌گاهی

در زمانی که ربات بر روی یک پا مستقر می‌گردد (حالت تک تکیه‌گاهی) امکان واژگونی در هر سمتی وجود دارد. لذا بایستی در این حالت ربات را به صورت یک پاندول معکوس دارای دو درجه آزادی فضایی تحلیل نمود که موتورهای پیچ و رول موجود در قوزک پا، این درجات آزادی را تشکیل می‌دهند. "شکل 13" نشان دهنده شمایی از این مدل می‌باشد.

در این حالت نیز طراحی کنترل کننده همانند حالت جفت تکیه گاهی انجام گرفت که نتایج خروجی سیستم به کنترل کننده طراحی شده برای درجه آزادی پیچ در "شکل 14-ب" و برای درجه آزادی رول در "شکل 14-ج" نشان داده شده است.

5- نتایج تحقیق

تحقیق انجام گرفته در این مقاله ابتدا به صورت شبیه سازی در محیط وباتز و بعد از اطمینان از صحت محاسبات و مدل استخراجی بر روی ربات نائو اچ 25 نسخه 4 موجود در آزمایشگاه تعامل انسان و ربات دانشگاه تهران پیاده سازی شده است. لازم به ذکر است که مدل سینماتیکی و مرکز جرم تصویری نوشته شده در نرم‌افزار تحلیل ریاضی متمتیکا کمک بزرگی در عیب‌یابی مدل و محاسبات پیاده‌سازی شده بر روی ربات نمود. متأسفانه با توجه به کیفی بودن خروجی پروژه‌های تقلیدی و متمایز بودن تجهیزات با یکدیگر قابلیت مقایسه با سایر پژوهش‌ها به صورت عددی وجود ندارد و مانند سایر مقالات تنها می‌توان با ارائه تصویر از عملکرد ربات، نتایج تحقیق را ارائه نمود. مستندات نشان داده شده در "شکل 15" و همچنین وب‌گاه آزمایشگاه تعامل انسان و ربات دانشگاه تهران[1] نشان‌دهنده عملکرد مطلوب ربات در این مقاله برای حرکات تمام-بدن به صورت شبه بلادرنگ و با تأخیری در حدود 200 میلی‌ثانیه می‌باشند. خطاهای احتمالی در تقلید را می‌توان به ساختار متفاوت ربات با انسان، محدودیت در استفاده از روش‌های مبتنی بر دینامیک و محدودیت در سامانه دریافت حرکات انسان مرتبط دانست.

1-5- مزایا و معایب روش‌های مورد استفاده در تحقیق

در اکثر مقالات همچون [9-12] از روش‌های عددی در حل سینماتیک معکوس و برقراری تعادل استفاده نموده‌اند که این روش‌ها بر پایه حدس اولیه و بهینه‌سازی می‌باشند. به طور کلی روش تحلیلی نسبت به روش‌های عددی نتایج قابل درک‌تر و مطمئن‌تری را نتیجه می‌دهند و به این دلیل بیشتر مورد اقبال محققان قرار می‌گیرد. اما راجع به سرعت اجرا نمی‌توان اظهارنظر قطعی نمود. حل سینماتیک معکوس در این روش با چند رابطه مثلثاتی ساده امکان‌پذیر شده است که نتایج پیاده‌سازی نشان دهنده سرعت، نرمی حرکت و دقت مطلوب در تقلید حرکات تمام-بدن انسان نسبت به سایر پروژه‌های

[1] http://taarlab.com/~pourya/album/taarlab_album

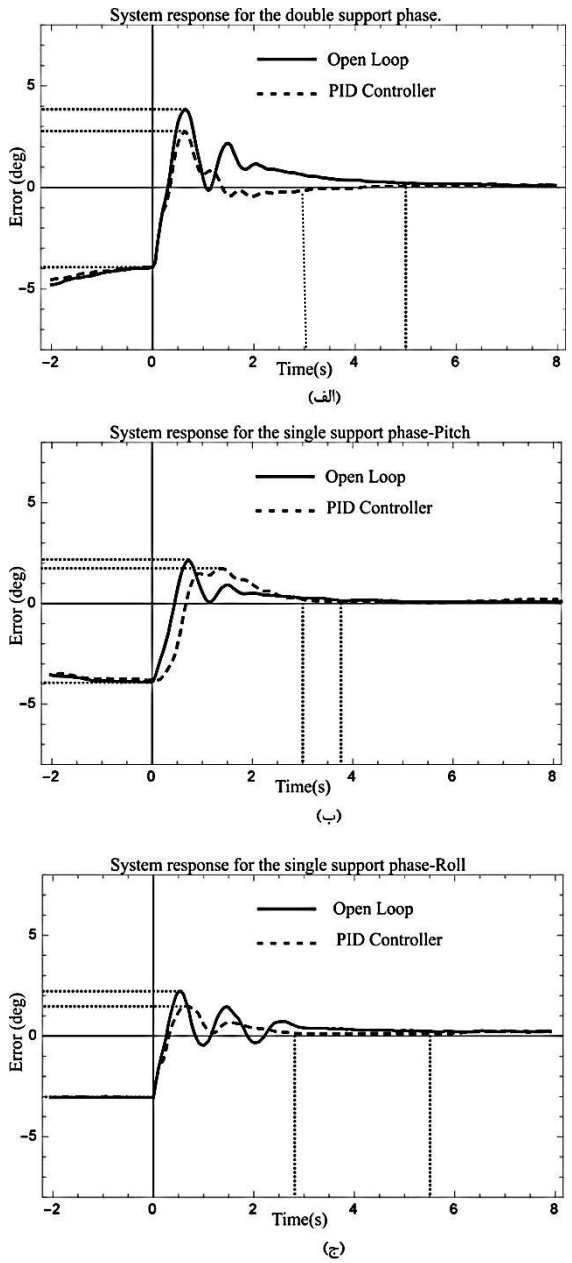

Fig. 14 System response for PID controller in each double or single support phases

شکل 14 پاسخ سیستم در هر یک از حالت‌های جفت یا تک تکیه گاهی

مشابه مورد اشاره می‌باشد.

6- جمع‌بندی و ادامه پژوهش

در این تحقیق روشی به منظور تقلید برخط حرکات تمام-بدن انسان به وسیله ربات انسان‌نمای نائو ارائه شد. در این روش ابتدا اسکلتی از حرکات انسان به وسیله دوربین کینکت و به واسطه‌ی چارچوب کاری سیستم عامل ربات دریافت شد. به دلیل اختلاف ابعاد انسان و ربات این حرکات بایستی به ابعاد ربات نگاشت می‌شدند تا بعد از آن زوایای مطلوب موتورهای ربات به منظور تقلید حرکات انسان محاسبه شوند. این مرحله مستلزم حل سینماتیک مستقیم و معکوس ربات بود. یکی از نوآوری‌های این مقاله ارائه یک روش تحلیلی در حل سینماتیک معکوس به واسطه در اختیار داشتن موقعیت مکانی مفاصل آرنج (در شاخه دست) و زانو (در شاخه پا) بود. نوآوری دیگر

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.30.2]

این مقاله مربوط به روش برقراری تعادل همزمان با تقلید حرکات انسان برمبنای روش قوزک پا بود. برای تنظیم کنترل کننده تعادل در آزمایش عملی ابتدا پاسخ پله حلقه باز به حداکثر انحراف زاویه‌ی پایدار استخراج شد. با توجه به پیاده‌سازی انجام شده، مشاهده گردید که دو عامل فراجهش و زمان نشست نقش بسزایی را در انجام بهتر عملیات تقلید ایفا می‌کنند و زمان نشست دارای اولویت بالاتری می‌باشد. لذا با استفاده از کنترل کننده، زمان نشست برای حالت جفت تکیه‌گاهی 2.4 ثانیه، تک تکیه‌گاهی پیچ 0.75 ثانیه و تک تکیه‌گاهی رول 2.7 ثانیه کاهش یافت و همچنین در فراجهش نیز بهبود نسبی حاصل گشت. با پیاده‌سازی این کنترل کننده ربات قادر بود تا حرکات پویاتری از کاربر را در حالت تمام-بدن تقلید نماید. عملیات تقلیدی انجام گرفته در این مقاله با احتساب تأخیر در ارتباطات از دریافت حرکات انسان تا تقلید، زمانی در حدود 200 میلی ثانیه به طول می‌انجامد.

پیشنهادات ادامه پژوهش شامل استفاده از سایر کنترل‌کننده‌ها و روش‌های حفظ پایداری مانند روش ترکیبی قوزک و ران و همچنین استفاده از سینماتیک معکوس به صورت یک مساله بهینه سازی مقید که در آن علاوه بر تقلید حرکت، حفظ تعادل نیز لحاظ شده است می‌باشد. در نظر گرفتن رفع اغتشاشات خارجی در حین تقلید حرکات انسان نیز یکی دیگر از پیشنهادات ادامه پژوهش می‌باشد.

7- تقدیر و تشکر

بدین وسیله نویسندگان این مقاله از همکاری آقای محمد جواد انصاری کمال تشکر و قدردانی را به عمل می‌آورند. همچنین این پروژه توسط بنیاد علوم و فناوری‌های شناختی (شماره حمایت 3719) مورد حمایت مالی قرار گرفته است که از این بنیاد نیز تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

8- مراجع

[1] Kuniyoshi Y., Inaba M., Inoue H, Learning by watching: Extracting reusable task knowledge from visual observation of human performance, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 10 No. 6 pp. 799-822, 1994.

[2] Riley M., Ude A., Atkeson C. G., Methods for motion generation and interaction with a humanoid robot: Case studies of dancing and catching, Technical Report, Georgia Institute of Technology, 2000.

[3] Atkeson CG, Hale JG, Pollick F, Riley M, et al. Using humanoid robots to study human behavior. IEEE Intelligent Systems and their applications. Jul 15, 2000.

[4] M. Riley, A. Ude, K. Wade, C. G. Atkeson, Enabling real-time full-body imitation: A natural way of transferring human movement to humanoids, *Robotics and Automation, Proceedings, ICRA'03, IEEE International Conference on*, Vol. 2 pp. 2368–2374, 2003.

[5] Dariush B, Gienger M, Arumbakkam A, Goerick C et al. Online and markerless motion retargeting with kinematic constraints, *Intelligent Robots and Systems, IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, Sep 22, pp. 191-198, 2008.

[6] Dariush B, Gienger M, Arumbakkam A, Zhu Y et al. Online transfer of human motion to humanoids, *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 6, No. 02, pp. 265-89, 2009.

[7] B. Dariush, M. Gienger, B. Jian, C. Goerick, K. Fujimura, Whole body humanoid control from human motion descriptors, *Robotics and Automation, 2008, ICRA 2008, IEEE International Conference on*, 2008 May 19, pp. 2677–2684, 2008.

[8] Zhu Y, Dariush B, Fujimura K., Controlled human pose estimation from depth image streams, *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, CVPRW'08, IEEE Computer Society Conference on*, 2008 Jun 23, pp. 1-8, 2008.

[9] J. Koenemann, F. Burget, M. Bennewitz, Real-time imitation of human whole-body motions by humanoids, *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2014 May 31, pp. 2806–2812, 2014.

[10] K. Munirathinam, S. Sakka, C. Chevallereau, Using joint trajectories and time-scaling optimization for humanoid motion imitation of human beings, *Mobile Service Robotics, CLAWAR 2014*, 2014 Jul 7, Vol. 12 pp. 69, 2014.

[11] L. P. Poubel, S. Sakka, D. Ćehajić, D. Creusot, Support changes during online human motion imitation by a humanoid robot using task specification, *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 31, pp. 1782–1787, 2014.

[12] Y. Ou, J. Hu, Z. Wang, Y. Fu, X. Wu, X. Li, A real-time human imitation system using kinect, *International Journal of Social Robotics*, Vol. 7 No. 5 pp. 587–600, 2015.

[13] R. Parandeh, H. Shahbazi, K. Jamshidi, B. Khodabandeh Jahromi, Design of a trainable controller inspired from neural system to generate complex behaviors in humanoid robots, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16 No. 2, pp. 59-68, 2016. (in Persian فارسی)

[14] P. Shahverdi, M. Tale. Masouleh, A simple and fast geometric kinematic solution for imitation of human arms by a NAO humanoid robot, *4th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM)*, Oct 26, Tehran, Iran, pp. 572-577, 2016.

[15] Aldebaran Documentation,Online, Available: www.aldebaran.com

[16] Reallusion, The Kinect Motion Capture. Online. Available: http://www.reallusion.com/iclone/mocap./

[17] P. Ghassemi, M. Tale. Masouleh, Dynamic equation of constrained motion of humanoid robots using the analytical method, *International Conference - Iranian Society of Mechanical Engineering (ISME)*,13 June, 2014. (In Persian فارسی)

[18] Angeles, Jorge, *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems*, Second Edittion, Springer, New York, pp. 105-137, 2002.

[19] Kofinas N., Orfanoudakis E., M. G. Lagoudakis, Complete analytical forward and inverse kinematics for the NAO humanoid robot, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 77 No. 2 pp. 251, 2015.

[20] B. Stephens, Humanoid push recovery, *Humanoid Robots, 7th IEEE-RAS International Conference on*, 2007 Nov 29, pp. 589–595, 2007.

[21] S. Kajita, H. Hirukawa, K. Harada, K. Yokoi, *Introduction to Humanoid Robotics*, Springer, Vol. 101, pp. 69-71, 2014.

[22] M. S. Ashtiani, A. Yousefi-koma, M. Shariat-panahi, M. Khadiv, Balance recovery of a humanoid robot using hip and ankle joints on small contact surfaces, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 413–422, 2017. (In Persian فارسی)

[23] B. Beigzadeh, Amputee walking robot: A different approach to biped walking problem, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 273–284, 2016. (In Persian فارسی)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.30.2]