

تحلیل سینماتیکی - سینتیکی پیمایش مستقیم الخط ربات انسان نما

محمود سعادت فومنی^۱، محمد مهدی خطیبی^{۲*}، مهدی مرادی^۳، مرتضی کارآموز مهدی آبادی^۳

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|---|---|
| دریافت مقاله: آذر ۱۳۸۷ | <p>بررسی‌ها و مطالعات صورت گرفته در زمینه ربات‌های انسان نما، شناخت دقیق پارامترهای دینامیکی ربات را لازمه اجرای یک حرکت شبه انسانی دانسته‌اند. تعداد درجات آزادی بالای این نوع ربات‌ها، رسیدن به این شناخت را به مراتب پیچیده‌تر می‌کند. در این مقاله، ابتدا با استفاده از مدل راه رفتن انسان، یک الگوی راه رفتن برای یک ربات با ۱۲ درجه آزادی انتخاب می‌شود. سپس به کمک روش دیناویت- هارتنبرگ روابط بین لینک‌های ربات محاسبه شده است. در ادامه، معادلات لازم برای اجرای الگوی انتخاب شده، بر مبنای روابط بین لینک‌ها و معیار تعادل مرکز جرم استخراج شده است. این معادلات با ترکیب دو روش نیوتن-رافسن و تجزیه مقادیر تکین حل شده‌اند. در ادامه با استفاده از الگوی تولید مسیر خطی با مرزهای سهموی، توابع سرعت زاویه‌ای درجات آزادی فعال در هر گام محاسبه شده‌اند و به کمک آن‌ها، پارامترهای سینماتیکی- سینتیکی ربات به دست آمده‌اند. در نهایت بر اساس نتایج حاصل، از طریق Simulink در نرم افزار MATLAB، یک مدل شماتیک ربات، در فضای نرم افزار Visual Nastran شبیه سازی شده و نتایج آن ارائه شده است.</p> |
| پذیرش مقاله: تیر ۱۳۸۷ | |
| <p>واژگان کلیدی: ربات انسان نما روابط دیناویت- هارتنبرگ روش نیوتن-رافسن معیار تعادل مرکز جرم</p> | |

۱- مقدمه

حرکت انسان بر روی یک ربات پیاده سازی شده است [۲ و ۳]. از آن جا که بدن انسان علاوه بر انعطاف پذیری دارای تعداد درجات آزادی زیادی می‌باشد؛ مدل سازی و به حرکت در آوردن رباتی با ویژگی‌های حرکتی انسان، نیازمند محاسبات طولانی و پیچیده‌ای خواهد بود. نمونه‌های ساخته شده از ربات‌های انسان نما، نشان داده است که ساخت رباتی با تمام درجات آزادی انسان، تقریباً غیر ممکن است. بنابراین، نخستین گام‌ها در طراحی حرکت ربات انسان نما، تعیین تعداد درجات آزادی مورد نیاز و انتخاب الگوی حرکتی مناسب با توجه به نوع فعالیت ربات می‌باشد.

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه الگو برداری از شیوه حرکت انسان صورت گرفته است. در این مطالعات با استفاده از داده برداری از حرکت انسان، نحوه گام برداشتن بررسی شده است [۱]. همچنین در مطالعات دیگری با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری و نتایج تجربی، حرکت به چندین گام تقسیم شده است. در واقع نتایج

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.m.khatybi@gmail.com

۱. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

۲. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

۲- خصوصیات بدن انسان

در تحقیقات صورت گرفته، به رباتی انسان نما گفته می‌شود که اولاً قادر به راه رفتن بر روی دو پا باشد (از چرخ و موارد مشابه استفاده نکند) و ثانیاً با تقریبی نزدیک به حرکت انسان حرکت کند [۴].

برای استفاده از مدل انسانی دلایل زیادی وجود دارد که از آن جمله به موارد زیر می‌توان اشاره کرد:

- داده‌ها و اطلاعات وسیعی پیرامون اصول حرکت انسان وجود دارد.
- مطالعات آناتومیک زیادی درباره ویژگی‌های حرکت ایده‌آل صورت گرفته است.
- بهترین روش تولید حرکت در این گونه ربات‌ها، استفاده از الگوی انسانی می‌باشد [۴].

مطالعات زیادی پیرامون استخوان بندی بدن انسان انجام شده است تا روشی برای برآورد ابعاد قامت یک انسان بالغ به دست آید. نتیجه این تحقیقات و مطالعات، ابداع فرمول‌های رگرسیون تروتتر-گلوستر^۶ بوده است [۹]. با توجه به این روابط، برای مدل کردن ربات، ابعاد زیر استخراج شده است (جدول ۱).

جدول ۱- ابعاد مدل ربات بر اساس رابطه‌های رگرسیون تروتتر-گلوستر

| نام | طول متناسب برای ربات 1.75 متری (cm) | طول متناسب برای ربات 1 متری (cm) |
|------|--|-------------------------------------|
| بازو | ۳۴ | ۱۹/۵ |
| ساعد | ۲۶ | ۱۵ |
| ران | ۴۸ | ۲۷/۴ |
| ساق | ۳۸ | ۲۲ |

۳- مدل ربات

با بررسی اسکلت و استخوان بندی بدن انسان و صرف نظر از درجات آزادی بی نهایت تک تک اعضا، می‌توان ۲۳ درجه آزادی، برای بدن تشریح کرد [۱۰].

در این مقاله با توجه به مطالعات آناتومیک صورت گرفته [۴]، الگوی راه رفتن به دست آمده و تعداد ۱۲ درجه آزادی برای ربات، انتخاب شده است. سپس به کمک روش دیناویت-هارتنبگ^۱ [۵] روابط بین لینک‌های ربات محاسبه شده است. این روابط بر مبنای چهار پارامتر هندسی بین دو لینک مجاور بیان شده که در این جا پارامتر متغیر، زاویه بین عمود مشترک محورهای دوران دو لینک مجاور می‌باشد. در ادامه با توجه به الگوی راه رفتن و روابط بین لینک‌ها، معادلات حاکم بر اساس معیار تعادل مرکز جرم^۲ استخراج شده است. بر اساس این معیار، ربات هنگامی می‌تواند تعادل استاتیکی خود را حفظ کند که تصویر مرکز جرم آن در ناحیه پایداری واقع باشد [۶].

تاکنون روش‌های عددی مختلفی برای حل معادلات سینماتیکی ربات‌ها ارائه شده است [۷]. به دلیل پیچیدگی و غیرخطی بودن معادلات ربات مورد مطالعه، از ترکیب دو روش عددی نیوتن-رافسون^۳ و تجزیه مقادیر تکین^۴ برای حل این معادلات استفاده شده است. با حل این معادلات، میزان تغییرات زوایای مختلف، در طی مسیر حرکت محاسبه شد. برای ایجاد حرکت، با توجه به شتاب گیری اولیه و نهایی موتورها، روش تولید مسیر خطی با مرزهای سهموی^۵ [۸]، انتخاب و تابع سرعت زاویه‌ای موتورها محاسبه شده‌اند. در نهایت پارامترهای سینماتیکی-سینتیکی حرکت ربات مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

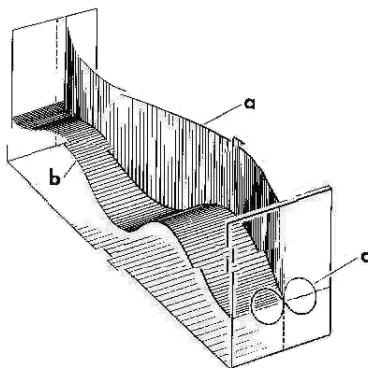
همه مراحل فوق، در محیط MATLAB برنامه نویسی و نتایج از طریق Simulink به محیط نرم‌افزار Visual Nastran منتقل شده و ربات، شبیه سازی و نتایج آن ارائه شده است.

1- Denavit-Hartenberg
2- Center of Mass (COM)
3-Newton- Rophson
4- Singular Value Decomposition
5- linear trajectory generation with parabolic limits

6- Trotter-Glosser regression formulas

۴- الگوی حرکت انسانی

آزمایشات نشان می‌دهند که الگوبرداری از مسیر حرکتی انسان، بهترین شیوه در جهت مصرف بهینه انرژی می‌باشد [۱۱]. هنگام راه رفتن، همه اعضا موثر در حرکت انسان، رفتاری هماهنگ دارند. اولین مسئله‌ای که هنگام توصیف حرکت باید مورد بررسی قرار گیرد؛ جابجایی مرکز جرم است. در هنگام حرکت، مرکز جرم، متمایل به باقی ماندن در محدوده لگن می‌باشد [۱۲]. در یک انسان معمولی، این حرکت، یک منحنی سینوسی ملایم است که در جابجایی عمودی و در سرعت‌های معمولی، دامنه‌ای حدود ۵ سانتی‌متر دارد [۱۲]. نزدیک بودن حرکت مرکز جرم ربات به این منحنی می‌تواند معیاری برای بهینه بودن ربات باشد. منحنی این تغییرات در شکل ۳ نشان داده شده است.



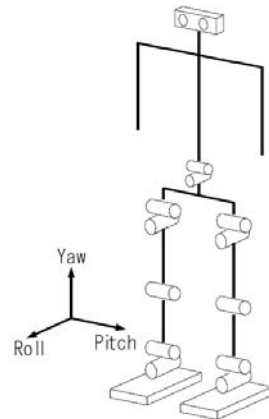
شکل ۳- منحنی حرکت مرکز جرم انسان (a- نمای از بالا،

b-نمای جانبی، c- نمای روبرو) [۱۲]

حرکت انسان از دو حالت متمایز تشکیل شده است (شکل ۴). اولین حالت، حالت یک تکیه گاهی^۱ یا معلق^۲ و حالت دوم، دو تکیه گاهی^۳ یا ایستایش^۴ نامیده می‌شود. در حالت یک تکیه گاهی، یک پا روی زمین و

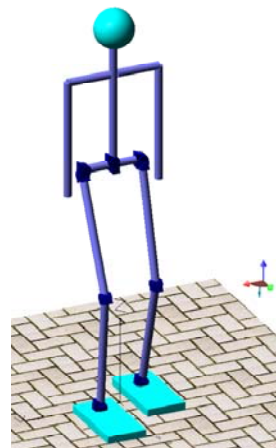
- 1 - Single support phase
- 2- Swing
- 3- Double support phase
- 4- Stance

با توجه به پیچیدگی‌های تحلیل و کنترل ربات، مدل ربات با حداقل تعداد درجات آزادی، یعنی ۱۲ درجه انتخاب شده است (شکل ۱). می‌توان حرکت انسان را به دو قسمت بالا تنه و پایین تنه تقسیم نمود [۱۰]. با توجه به نقش اصلی پایین تنه (پاها) در حرکت، مدل‌سازی آن با ۱۰ درجه آزادی (۵ درجه آزادی در هر پا) بدین صورت انجام گرفت: ۲ درجه در مچ پا، ۲ درجه در لگن و یک درجه در زانو، تا بیشترین نزدیکی را به حرکت پاها داشته باشد. برای جلوگیری از پیچیدگی مدل، در بالا تنه تنها ۲ درجه آزادی در کمر قرار داده شد تا به حفظ تعادل ربات در حین حرکت کمک کند.

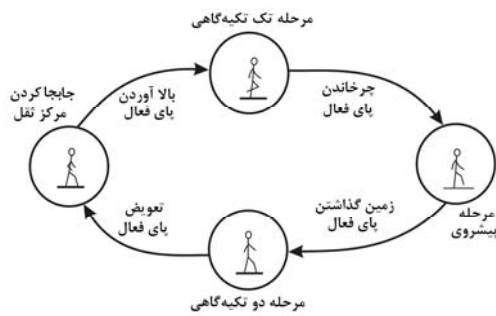


شکل ۱- مدل شماتیک ربات ۱۲ درجه آزادی

بر اساس تعداد درجات آزادی و ابعاد محاسبه شده، مدل ربات در نرم افزار Visual Nastran طراحی شده است (شکل ۲).

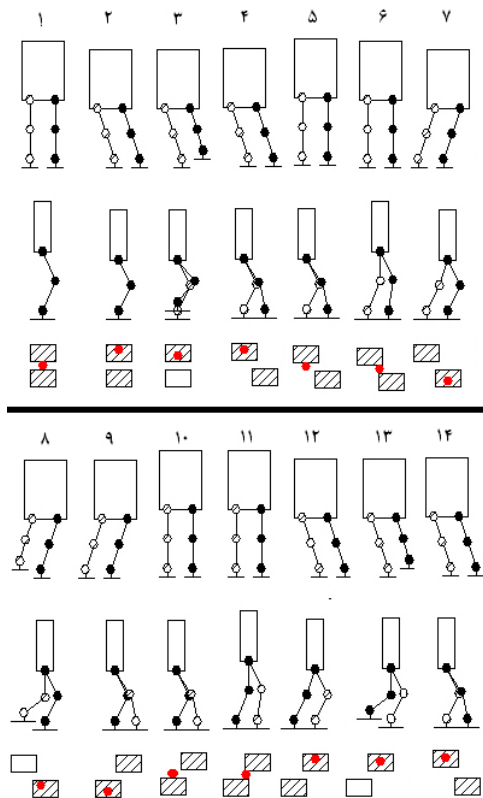


شکل ۲- مدل ربات در نرم‌افزار Visual Nastran



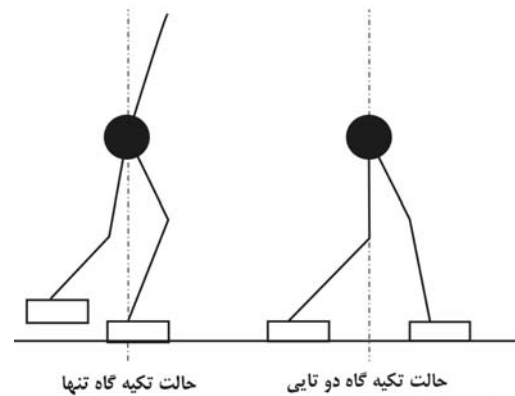
شکل ۵- دیاگرام حالت فازهای حرکتی انسان

با توجه به مطالب فوق و مطالعات انجام شده [۱۴ و ۱۵] الگوریتمی مطابق شکل ۶ طراحی شد. در این الگوریتم ابتدا ربات از حالت ۱ تا حالت ۱۴ حرکت می‌کند و سپس با تکرار، از حالت ۵ تا ۱۴ حرکت را به طور متناوب ادامه می‌دهد (حالت ۱۴ با حالت ۴ یکسان می‌باشد).



شکل ۶- الگوریتم حرکتی طراحی شده

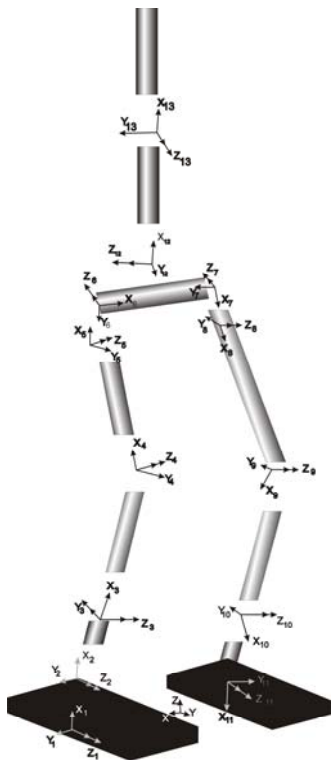
دیگری معلق می‌باشد. این فاز قسمت اصلی حرکت انسان (حدود ۹۰-۸۰٪) را تشکیل می‌دهد در حالی که در حالت دو تکیه‌گاهی، هر دو پا روی زمین بوده و بدن به جلو حرکت می‌کند. این فاز بخش کوچکی از حرکت را شامل می‌شود (حدود ۲۰-۱۰٪) [۱۱].



شکل ۴- دو حالت کلی حرکت انسان

در ابتدای حرکت، ربات در حالت دو تکیه‌گاهی قرار دارد. سپس ربات وزن خود را به روی یک پا جابجا می‌کند (حالت دریافت وزن^۱) و با بلند کردن پای دیگر، وارد حالت تک تکیه‌گاهی^۲ می‌گردد. حال با جلو بردن پای معلق، ربات به سمت جلو حرکت می‌کند (حالت پیشروی^۳) و سرانجام ربات با قرار دادن پای معلق بر روی زمین، به حالت دو تکیه‌گاهی باز می‌گردد. این فرایند بدون هیچ تغییری در پای مقابل تکرار می‌شود (شکل ۵) [۱۳ و ۱۴].

- 1-Weight acceptance phase
- 2-Single support phase
- 3-Advancement phase



شکل ۷- دستگاه‌های مختصات انتخاب شده در روش دیناویت- هارتنبرگ

۵- مدل هندسی ربات

در این جا برای مدل سازی هندسی ربات، از روش دیناویت- هارتنبرگ^۱ استفاده شده است. در این روش، وضعیت هر لینک نسبت به لینک قبلی توسط یک ماتریس تبدیل (رابطه ۱) تعریف می‌شود. این ماتریس بر اساس چهار پارامتر هندسی بین دو لینک، به دست می‌آید [۵].

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i \times c\alpha_{i-1} & c\theta_i \times c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} \times d_i \\ s\theta_i \times s\alpha_{i-1} & c\theta_i \times s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} \times d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

که i شماره لینک، C مخفف \cos ، S مخفف \sin ، θ_i زاویه بین دو لینک، α_i زاویه بین راستای دوران دو لینک، a_{i-1} طول عمود مشترک دو لینک و d فاصله بین راستای دو لینک مجاور می‌باشد [۵].

ماتریس تبدیل رابطه ۱، برای هر یک از دو لینک مجاور ربات نوشته شده است. بنابراین اگر ربات دارای N لینک باشد، با ضرب ماتریس‌های فوق در یکدیگر، موقعیت یک لینک نسبت به دستگاه مختصات جهانی به دست می‌آید (رابطه ۲).

$${}^0T_N = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^{N-1}T_N \quad (2)$$

برای استفاده از روش دیناویت- هارتنبرگ برای ربات انسان نما، مورد بررسی، برای هر لینک یک دستگاه مختصات محلی تعریف شده است، به طوری که محور Z هر دستگاه در راستای دوران مفصل در نظر گرفته شده و جهت دیگر بر اساس روش D-H انتخاب شده است. مختصات جهانی، روی زمین و بین کف پاها قرار داده شده است و موقعیت مرکز جرم تمامی لینک‌ها به کمک روابط ۱ و ۲، نسبت به دستگاه جهانی به دست آمده است. در شکل ۷، نحوه قرارگیری دستگاه‌های مختصات محلی، بر روی مدل ربات نشان داده شده است.

۶- مسیر حرکت ربات

۶-۱- معیار تعادل

مهم‌ترین هدف در راه رفتن ربات‌های انسان نما، حفظ تعادل در شرایط مختلف می‌باشد. برای محاسبه حالت تعادل، معیارهای مختلفی وجود دارد. یکی از مهم‌ترین این معیارها، COM می‌باشد. این معیار بیانگر تعادل استاتیکی ربات می‌باشد که برای حرکت‌های آرام و با شتاب بسیار کم مناسب می‌باشد. معیارهای تعادل دیگری نیز برای حرکت سریع‌تر ربات نظیر نقطه صفر گشتاوری^۲ ارائه شده است که در آن شتاب حرکت در نظر گرفته می‌شود. در این جا به منظور ایجاد حرکت آرام در ربات معیار COM مورد استفاده قرار گرفت.

طبق معیار COM برای برقراری تعادل، تصویر مرکز جرم ربات، همواره باید در ناحیه‌ای موسوم به ناحیه‌ی

2- Zero Moment um Point (ZMP)

1-Denavit-Hartenberg

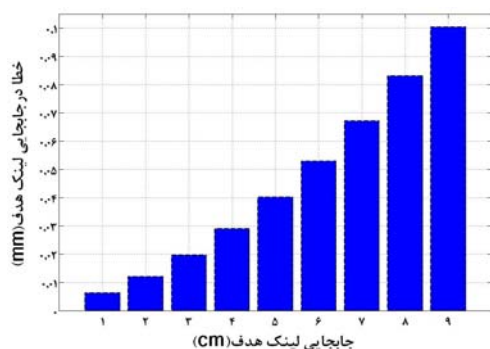
حالت یک تکیه گاهی می‌باشد، به طور مختصر در رابطه ۴ ارائه شده است.

$$\begin{aligned} & -0.4 * \text{Cos}(1.23 + x_1) - 0.06 * \\ & \text{Sin}(1.23 + x_1) + \dots + 0.008 * \\ & \text{Sin}(1.23 + x_3) * \text{Sin}(0.66 + x_2) \\ & * \text{Sin}(1.2 + x_1) = 0.122 \end{aligned} \quad (4)$$

که x_1 زاویه مفصل لگن، x_2 زاویه مفصل زانو و x_3 زاویه مفصل مچ می‌باشد.

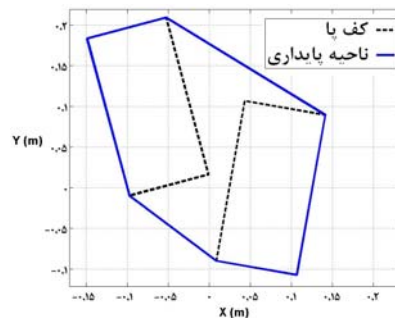
۳-۶ - روش حل

معادلات به دست آمده غیر خطی بوده و بنابراین باید از روش‌های عددی حل معادلات غیر خطی استفاده کرد. در این جا، روش نیوتن-رافسون مورد استفاده قرار گرفت. در استفاده از این روش، دترمینان ماتریس ژاکوبی مسئله حاضر، خیلی نزدیک به صفر شد، که برای حل این مشکل روش SVD نیز به کار گرفته شد. در نتیجه ترکیب این دو روش، دقت خوبی برای جابجایی‌های کوچک به دست آمد. در شکل ۹، نمودار خطای محاسبه برای یک دستگاه ۶ معادله، ۶ مجهول، بر حسب میزان جابجایی لینک هدف ترسیم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود به ازای افزایش جابجایی لینک هدف، خطا افزایش می‌یابد.



شکل ۹- نمودار خطای حل معادلات مسیر بر حسب میزان جابجایی لینک هدف

پایداری باشد. این ناحیه با توجه به روابط تعادل به دست می‌آید که عبارت است از Convex hull نقاط تماس کف پا با زمین [۱۶]. (Convex hull ناحیه‌ی در برگزیده تعدادی نقاط معین با کم‌ترین تعداد ضلع می‌باشد) (شکل ۸).



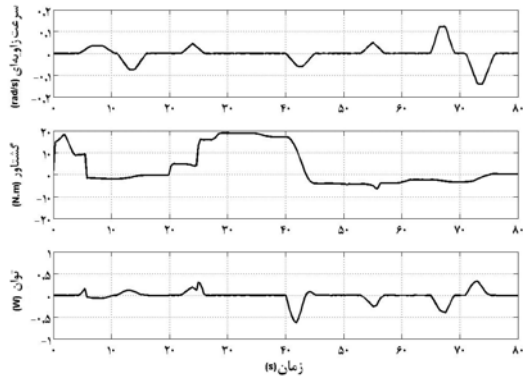
شکل ۸- ناحیه پایداری برای یک حالت دلخواه پاها

۲-۶ - معادلات مسیر

با توجه به گام‌های حرکتی انتخاب شده و معیار تعادل COM، در هر گام، مفصل ربات طوری حرکت می‌کنند که اولاً به موقعیت مد نظر در گام دست یابند و ثانیاً تعادل ربات برقرار شود. بدین منظور ارتباط بین موقعیت مرکز جرم در ناحیه پایداری و میزان چرخش مفصل به کمک روابط هندسی به دست آمد. از آن جا که ربات، دارای ۱۲ درجه آزادی می‌باشد، در روابط فوق، ۱۲ مجهول، وجود دارد. برای به دست آوردن این ۱۲ مجهول، از مجموعه‌ای از قیود حرکتی همچون تقارن، ثابت بودن فاصله دو مفصل دو طرف لگن و جهت حرکت استفاده شد و معادلات لازم (رابطه ۳) با کمک قیود فوق و با استفاده از روابط دینامیک-هارتنبرگ به دست آمده است.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{COM} = f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{12}) \quad (3)$$

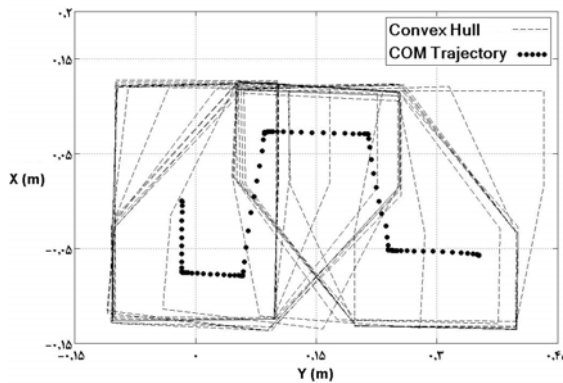
به عنوان نمونه معادله اول از دسته معادلات حرکت ربات در گام ۳ که مربوط به بالا آوردن پای ربات در



شکل ۱۱- نمودار گشتاور، سرعت زاویه‌ای و توان موتور زانوی راست در کل حرکت

۸- شبیه سازی

همان‌طور که بیان شد به منظور حفظ تعادل ربات در حین حرکت، باید همواره تصویر مرکز جرم در ناحیه پایداری، قرار داشته باشد (معیار COM) بنابراین به منظور بررسی تعادل ربات، مسیر تصویر مرکز جرم آن با ناحیه پایداری مقایسه شده است تا از برقراری تعادل اطمینان حاصل گردد. در شکل ۱۲ موقعیت تصویر مرکز جرم ربات در تمامی فازهای حرکتی با ناحیه پایداری متناظر با آن حالت مقایسه شده است که در کل حرکت نقطه مذکور در ناحیه پایداری قرار دارد و در نتیجه توابع محاسبه شده می‌توانند ربات را با حفظ تعادل به حرکت درآورند.

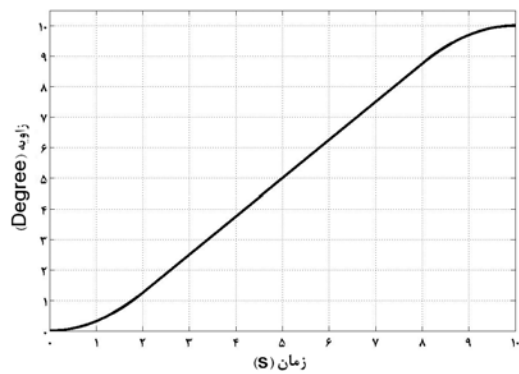


شکل ۱۲- نمودار حرکت جانبی تصویر مرکز جرم بر حسب پیشروی آن در ناحیه پایداری

۷- محاسبه پارامترهای سینماتیکی - سینتیکی

۷-۱- الگوریتم تولید مسیر

میزان چرخش مفاصل در هر گام، از حل معادلات مسیر به دست آمد. برای اجرای این مقادیر در موتورها از یک الگوریتم تولید مسیر استفاده شد. برای ایجاد مسیری هموار، شکل مسیر در ابتدا و انتها سهموی و در هر نقطه مسیر، (نقاط میانی) خطی در نظر گرفته شد. استفاده از شتاب ثابت در قسمت سهموی مسیر، سرعت را به نرمی تغییر می‌دهد. شکل ۱۰، مسیری ساده که به این ترتیب ساخته شده است را نشان می‌دهد. در نتیجه‌ی استفاده از این الگوریتم، توابع سرعت زاویه‌ای موتورها محاسبه شدند.



شکل ۱۰- مسیر خطی با نواحی مرزی سهموی

۷-۲- روابط سینماتیکی - سینتیکی

با محاسبه سرعت زاویه‌ای موتورها و با استفاده از روابط سینماتیکی موجود [۸] سرعت و شتاب هر لینک به دست آمد. در ادامه برای محاسبه پارامترهای سینتیکی با استفاده از الگوریتم تکراری نیوتن-اوایلر [۸]، مقادیر نیرو و گشتاور هر لینک محاسبه شد که به عنوان نمونه، نمودارهای مربوط به موتور زانوی راست ارائه می‌شود (شکل ۱۱).

۹- نتیجه گیری

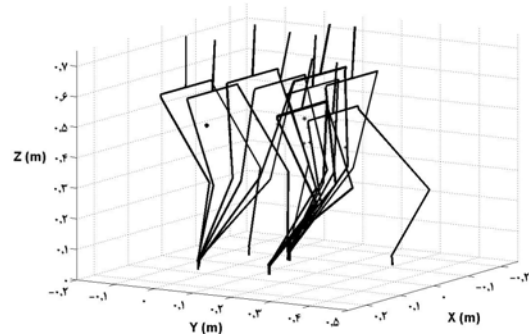
در این مقاله با بهره گیری از روابط آناتومیک، ابعاد ربات به دست آمد. سپس به کمک الگوی حرکت انسان، الگوریتم حرکت ربات طراحی شد. در ادامه با به کارگیری روابط دینامیت- هارتنبرگ و الگوریتم طراحی شده، معادلات مسیر حرکت مرکز جرم ربات بر مبنای معیار پایداری COM استخراج گردید. معادلات غیر خطی مذکور با ترکیب روش SVD و نیوتن-رافسون حل شده‌اند که از دقت مناسبی در جابجایی های کوچک برخوردار است. در نهایت با استفاده از نتایج حل معادلات مسیر و به کمک روابط موجود، پارامترهای سینماتیکی- سینتیکی ربات مورد محاسبه قرار گرفت.

از مقایسه موقعیت مرکز جرم در تمام حالت‌های حرکتی با ناحیه پایداری متناظر با آن حالت (شکل ۱۲)، تعادل ربات در گام‌های مختلف اثبات شد. بدین ترتیب که در هر حالت قرارگیری تصویر مرکز جرم ربات در ناحیه پایداری، نشان دهنده تعادل استاتیکی ربات می‌باشد. الگوریتم ارائه شده در این مقاله، برای طراحی و راه اندازی آرام یک ربات انسان نما کافی می‌باشد ولی برای جابجایی های بزرگ و ایجاد حرکت سریع‌تر باید از روش‌های حل دقیق‌تری مانند شبکه عصبی و نیز معیارهای تعادل دینامیکی مانند نقطه صفر گشتاوری استفاده شود. همچنین الگوریتم طراحی شده، یک مجموعه معادله فرم بسته، برای مسیر حرکت ربات ارائه می‌کند که این معادلات به فرایند بهینه سازی مسیر حرکت کمک خواهد کرد.

تشکر و قدردانی

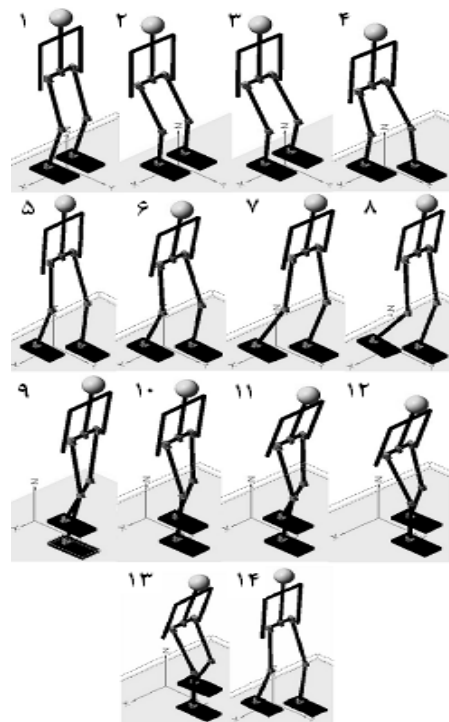
از ریاست محترم مرکز علوم و فنون سمنان جناب آقای ادب، آقای مهندس سعید عبدالشاه و پژوهشگرده رویش بسیج دانشجویی دانشگاه سمنان که خالصانه ما را در پروژه تحقیقاتی ربات انسان نما یاری کردند، کمال تشکر و امتنان را داریم.

مراحل محاسباتی در محیط MATLAB صورت گرفته و ربات به حرکت در آمده است (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- حرکت ربات در ۳ بعد

به منظور شبیه سازی نتایج حاصل از محاسبات صورت گرفته، توابع سرعت زاویه‌ای محاسبه شده، از طریق Simulink به محیط نرم افزار Visual Nastran ارسال و ربات طراحی شده، به حرکت در می‌آید. حرکت ربات، مطابق الگوریتم طراحی شده می‌باشد، که در شکل ۱۴ ارائه می‌شود.



شکل ۱۴- حرکت ربات در ۱۴ فاز طراحی شده

مراجع

1. Kagamia, S., Mochimarua, M., Eharac, Y., Miyataa, N., Nishiwakid, K., Kanadea, T. and Inoued, H., "Measurement and Comparison of Humanoid H7 Walking with Human Being", *Robotics and Autonomous Systems*, 48(4), pp. 177–187, (2004).
2. Kim, S. H. and Sankai, Y., "Task Generation for Humanoid Robot Walking Using Human Motion by Phase Sequence", *IEEE International Workshop on Robots and Human Interactive Communication* (2005).
3. Pollard, N. S., Hodgins, J. K., Riley, M. J. and Atkeson C. G., "Adapting Human Motion for the Control of a Humanoid Robot", *Proc. of Int. Conference on Robotics & Automation (ICRA)*, (2002).
4. Hunter, A., "The Mechanical Design of a Humanoid Robot", Undergraduate Thesis. Department of Computer System Engineering, University of Queensland, (2001).
5. Denavit, J. and Hartenberg, R. S., "A Kinematics Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices", *ASME Journal of Applied Mechanics*, 222, pp. 215-221, (1955).
6. Popovic, M. B., Goswami, A. and Herr, H., "Ground Reference Points in Legged Locomotion: Definitions, Biological Trajectories and Control Implications", *Int. J. of Robotics Research*, 24(12), pp. 1013–1032, (2005).
7. Kalra, P., Mahapatra, P. B. and Aggarwal, D. K., "An Evolutionary Approach for Solving the Multimodal Inverse Kinematics Problem of Industrial Robots", *Mechanism and Machine Theory*, 41(10), pp. 1213–1229, (2006).
۸. کریگ، ج.، "مکانیک و کنترل در رباتیک"، ترجمه علی مقداری، فائزه میرفخرایی، تهران، صنعتی شریف (۱۳۷۷).
9. El-Najjar, M. Y. and McWilliams, K. R., "*Forensic Anthropology: The Structure, Morphology, and Variation of Human Bone and Dentition*", Springfield, IL: Charles C. Thomas, (1978).
10. Martini, F.H., "*Fundamentals of Anatomy & Physiology*", Prentice Hall International INC, New Jersey, (1998).
11. Hardt, M., Delgado, K. K. and Helton, J.W., "*Modeling Issues and Optimal Control of Minimal Energy Biped Walking*", *Proc. of 2nd Int. Climbing and Walking Robots Conf.*, (1999).
12. Inman, V. T., Ralston, H. S. and Todd, F., "*Human Walking*", William and Wilkins, Baltimore, (1981).
13. Perry, J., "*Gait Analysis: Normal and Pathological Function*", McGraw Hill, (1992).
14. Marlow, P.J., "Development of Practical Walking Algorithms for the UQ Biped Robot", Undergraduate Thesis, University of Queensland, (2000).
15. Oh, S.N., Kim, K.I. and Lim, S., "Motion Control of Biped Robots Using a Single-Chip Drive", *Proc. of the IEEE Int. Robotics & Automation Conf.*, (2003).
16. Sugihara, T., "Mobility Enhancement Control of Humanoid Robot Based on Reaction Force Manipulation via Whole Body Motion", Ph.D. Thesis, University of Tokyo, (2004).