

روشی جدید برای محاسبه‌ی ناحیه‌ی پایداری ربات انسان‌نما

محمود سعادت فومنی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

محمدمهدی خطیبی (دانشجوی دکتری)

معصومه صادقی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

عاطفه حبیب‌اللهی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مهدی مرادی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

مهم‌ترین نکته در راه رفتن ربات‌های انسان‌نما، حفظ تعادل است. مطالعات گسترده‌یی که تاکنون در این زمینه صورت گرفته به ارائه‌ی نظریه‌های مرکز جرم (COG) و نقطه‌ی صفر گشتاوری (ZMP) انجامیده است. تعادل ربات اساساً مبتنی بر قرارگیری این نقاط در ناحیه‌ی موسوم به ناحیه‌ی پایداری است. در این پژوهش روشی جدید برای به دست آوردن ناحیه‌ی پایداری ارائه شده است. بدین منظور ابتدا به کمک معادلات تعادل حاکم بر ربات انسان‌نما، رابطه‌ی اصلی توصیف‌کننده‌ی ناحیه‌ی پایداری به دست آمده و سپس نیروهای تکیه‌گاهی به کمک اصطکاک کلمب محاسبه شده‌اند. پس از آن، به کمک یک الگوریتم هوشمند، ناحیه‌ی پایداری برای حالت کلی قرارگیری پاها به دست آمده و در نهایت، با شبیه‌سازی مدل ربات در فضای نرم‌افزار Visual Nastran، تغییرات پارامترهای سینماتیکی ربات در طول حرکت بررسی شده است.

واژگان کلیدی: ربات انسان‌نما، ناحیه‌ی پایداری، الگوریتم هوشمند، چندگوشه‌یی محدب.

۱. مقدمه

آن ارائه شده است. همچنین در منابع موجود رابطه‌ی صریحی برای اثبات ناحیه‌ی پایداری ارائه نشده است.

از سوی دیگر در بسیاری از کاربردهای زیست‌مکانیک، شناسایی بارهای وارده به بدن در حالات مختلف راه رفتن انسان بسیار ضروری و نخستین گام در تحلیل سیستم است.^[۷] برخی سیستم‌های حس‌گری شامل سیستم ثبت حرکت با چند دوربین و صفحات اندازه‌گیری نیرو، برای تعقیب حرکت، اندازه‌گیری نیروها و ممان‌های عکس‌العمل تکیه‌گاهی با موفقیت به‌کار گرفته شده است.^[۹،۸] چنین سیستم‌هایی بسیار پرهزینه‌اند و کاربرد صنعتی نیز ندارند.^[۹] همچنین در مطالعات دیگری، از سیستم جرم و فنر برای مدل‌سازی ربات استفاده شده که این مدل قادر به پیش‌بینی صحیح نیروهای عکس‌العمل زمین است.^[۱۰]

در این نوشتار، روشی ساده برای به دست آوردن ناحیه‌ی پایداری ارائه شده است. در این روش ناحیه‌ی پایداری به کمک روشی ساده و جدید اثبات شده و به کمک آن نیروهای تماسی کف پا محاسبه شده‌است. در این نوشتار روابطی صریح برای محاسبه‌ی نیروهای کف پا براساس محل مراکز فشار کف پا ارائه می‌کنند. با استفاده از این نیروها در الگوریتم بازگشتی نیوتن - اویلر،^[۱۱] می‌توان توان مورد

مهم‌ترین موضوع در حرکت ربات‌های انسان‌نما «حفظ تعادل» است. طی مطالعات گسترده‌یی که در این زمینه صورت گرفته، نظریه‌هایی برای حفظ تعادل ارائه شده که نظریه‌های مرکز جرم (COG)^۱، نقطه‌ی صفر گشتاوری (ZMP)^۲ و شاخص چرخش پا (FRI)^۳ از آن جمله‌اند.^[۱۲] این نظریه‌ها شرط اصلی تعادل را قرارگیری نقاط مذکور در ناحیه‌ی موسوم به «ناحیه‌ی پایداری» عنوان کرده‌اند.^[۴] در برخی از مطالعات ناحیه‌ی پایداری را چندگوشه‌یی محدب^۴ مجموعه‌ی نقاط تماس کف پاها با سطح تماس بیان کرده‌اند که در این روش، یک چندضلعی با کم‌ترین تعداد ضلع و شامل همه‌ی نقاط تماس، به عنوان ناحیه‌ی پایداری مشخص می‌شود.^[۴] در برخی مطالعات دیگر، این ناحیه را بزرگ‌ترین چندضلعی تشکیل‌شده از کف پاها عنوان کرده‌اند که با قرارگیری تصویر مرکز جرم در این ناحیه ربات تعادل استاتیکی خواهد داشت.^[۵] همچنین در بررسی‌های دیگری با استفاده از معادلات حرکت و تقاطع آن‌ها با سطح تماس، ناحیه‌ی پایداری را به دست آورده‌اند.^[۶] در این مطالعات ناحیه‌ی پایداری یک موضوع بدیهی در نظر گرفته شده با مراحل اثبات پیچیده‌یی برای

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۱۰/۲۱، اصلاحیه ۱۳۸۸/۸/۹، پذیرش ۱۳۸۸/۱۱/۱۲.

۲.۲. نیروها

نیروهای خارجی وارد به ربات، به نیروهای تماسی و گرانشی منحصر شده‌اند. بنابراین بردار نیروی گرانش $\vec{W} = (0, 0, -Mg)$ بردار نیروی تماسی پای راست و $\vec{F}_l = (F_{x_l}, F_{y_l}, F_{z_l})$ بردار نیروی تماسی پای چپ در نظر گرفته شده است.

۳.۲. معادلات تعادل

برای تعادل ایستا، طبق قوانین نیوتن و اویلر روابط ۳ و ۴ به دست آمده‌اند.

$$\sum F_i = 0 \quad i: x, y, z \quad (3)$$

$$\sum M_{ol} = 0 \Rightarrow \vec{r}_{ol-or} \times \vec{F}_r + \vec{r}_{ol-c} \times \vec{W} = 0 \quad (4)$$

با ترکیب روابط ۱، ۲ و ۴، رابطه‌ی ۵ به دست آمده است.

$$\begin{cases} \sum M_{ol-x} = 0 \rightarrow F_{z_r} \times (y_{or} - y_{ol}) - (y_C - y_{ol}) \times Mg = 0 \\ \sum M_{ol-y} = 0 \rightarrow -F_{z_r} \times (x_{or} - x_{ol}) + (x_C - x_{ol}) \times Mg = 0 \\ \sum M_{ol-z} = 0 \rightarrow F_{y_r} \times (x_{or} - x_{ol}) - F_{x_r} \times (y_{or} - y_{ol}) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

با استفاده از رابطه‌ی ۳ و ۵، صورت ماتریسی معادلات تعادل به دست آمده است (رابطه‌ی ۶):

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ -(y_{or} - y_{ol}) & (x_{or} - x_{ol}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -(x_{or} - x_{ol}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (y_{or} - y_{ol}) & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{x_r} \\ F_{x_l} \\ F_{y_r} \\ F_{y_l} \\ F_{z_r} \\ F_{z_l} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ Mg \\ - (x_C - x_{ol}) \times Mg \\ (y_C - y_{ol}) \times Mg \end{bmatrix} \quad (6)$$

با استفاده از دو سطر آخر ماتریس ضرایب رابطه‌ی ۶، رابطه‌ی ۷ به دست آمده است:

$$\frac{(y_{or} - y_{ol})}{(x_{or} - x_{ol})} = \frac{(y_C - y_{ol})}{(x_C - x_{ol})} \quad (7)$$

با استفاده از رابطه‌ی ۷، مقادیر نیروهای F_{z_l} و F_{z_r} از سطرهای سوم و پنجم ماتریس ضرایب رابطه‌ی ۶ محاسبه شده‌اند (روابط ۸ و ۹).

$$F_{z_r} = \frac{x_C - x_{ol}}{x_{or} - x_{ol}} Mg \quad (8)$$

$$F_{z_l} = \frac{x_{or} - x_C}{x_{or} - x_{ol}} Mg \quad (9)$$

و با استفاده از قانون اصطکاک کلمب رابطه‌ی ۱۰ نتیجه شده است.

$$\sqrt{F_{x_r}^2 + F_{y_r}^2} = \mu F_{z_r} \quad (10)$$

نیاز برای حرکت ربات را محاسبه کرد. همچنین با تقریب توزیع فشار کف پا در سیستم‌های زیست‌مکانیک می‌توان استفاده از این روابط را به مدل‌هایی انعطاف‌پذیر از ربات‌های انسان‌نما تعمیم داد.

به منظور اثبات ناحیه‌ی پایداری و محاسبه‌ی نیروهای کف پا، ربات بر روی یک صفحه‌ی مسطح^۵ قرار گرفت و با فرض حرکت بسیار آهسته، از نیروهای اینرسی آن صرف‌نظر شد (بنابراین در تعادل ایستا، نیروهای خارجی به نیروهای تماسی و گرانشی منحصر شده‌اند). سپس با استفاده از معادلات تعادل حاکم بر ربات، رابطه‌ی بین موقعیت مرکز جرم و مکان مراکز فشار کف پاها به دست آمد. به کمک رابطه‌ی به دست آمده و با به کارگیری اصطکاک کلمب، روابطی برای محاسبه‌ی نیروهای کف پا ارائه شده است. سپس با به کارگیری یک الگوریتم هوشمند در نرم‌افزار Matlab، ناحیه‌ی پایداری برای یک حالت کلی قرارگیری پاها به دست آمد. در نهایت ربات در فضای نرم‌افزار Visual Nastran شبیه‌سازی شد و با اعمال حرکتی بسیار آهسته، تغییرات پارامترهای سینماتیکی ربات در طول حرکت و در خروج از ناحیه‌ی پایداری مورد بررسی قرار گرفته است.

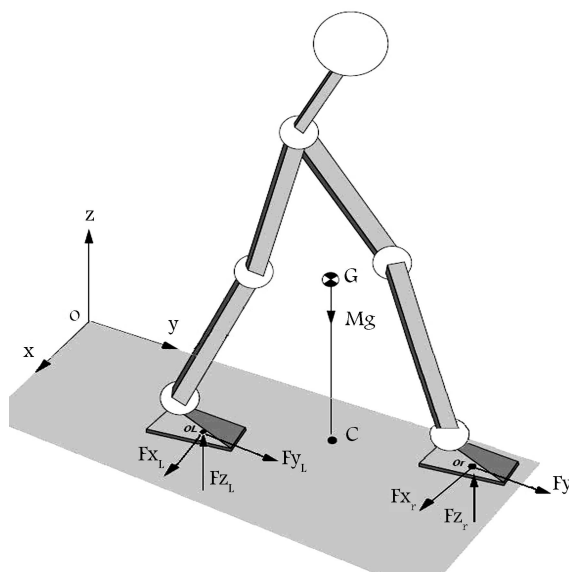
۲. روابط حاکم بر ناحیه‌ی پایداری

۱.۲. مختصات

از مدل ربات انسان‌نمای نشان داده شده در شکل ۱، برای به دست آوردن ناحیه‌ی پایداری استفاده شده است. نقطه‌ی $O(0, 0, 0)$ دستگاه مختصات جهانی، نقطه‌ی $O_l(x_{ol}, y_{ol}, 0)$ مرکز فشار کف پای چپ، نقطه‌ی $O_r(x_{or}, y_{or}, 0)$ مرکز فشار کف پای راست، نقطه‌ی $G(x_G, y_G, z_G)$ مرکز جرم ربات، نقطه‌ی $C(x_C, y_C, 0)$ تصویر مرکز جرم بر سطح و P صفحه‌ی تماس است. بردار واصل مراکز فشار پاها (رابطه‌ی ۱)، و $\vec{r}_{ol-c}$ بردار واصل مرکز فشار پای چپ به مرکز جرم (رابطه‌ی ۲) هستند.

$$\vec{r}_{ol-or} = (x_{or} - x_{ol}, y_{or} - y_{ol}, 0) \quad (1)$$

$$\vec{r}_{ol-c} = (x_C - x_{ol}, y_C - y_{ol}, 0) \quad (2)$$



شکل ۱. مدل ربات انسان‌نما.

۳. استخراج ناحیه‌ی پایداری به کمک یک الگوریتم

هوشمند

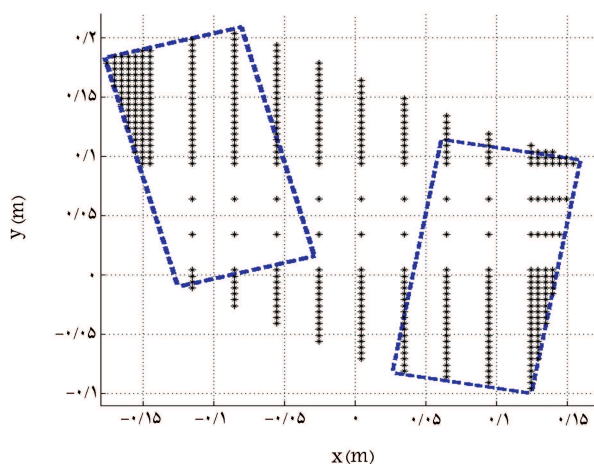
۱.۳. الگوریتم برنامه

در این بخش به کمک شرایط تعادل به دست آمده در بخش ۴.۳، الگوریتمی بر مبنای جست‌وجوی عمقی اول سطح^۷ و جست‌وجوی عمقی محدود شده^۸ طراحی شده و در محیط نرم‌افزار Matlab پیاده‌سازی شده است.

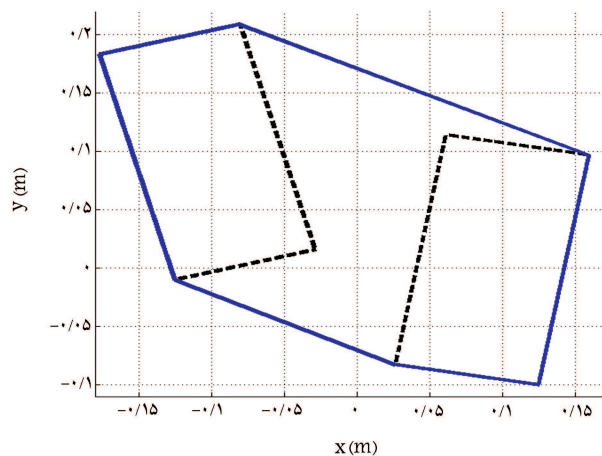
در این الگوریتم، با جابه‌جا کردن تصویر مرکز جرم (C) بر روی سطح تماس (P) و ترسیم خطوطی (این خطوط از مرکز جرم عبور می‌کنند) با شیب‌های مختلف، قرارگیری نقطه‌ی C در ناحیه‌ی پایداری بررسی شده است. بدین صورت که اگر خطی یافت شود که هر دو پا را قطع کند و تصویر مرکز جرم بین محل‌های تقاطع باشد، آنگاه ربات در حال تعادل خواهد بود؛ تصویر مرکز جرم، یکی از نقاط ناحیه‌ی پایداری است.

۲.۳. ارائه‌ی نتایج حاصل از برنامه

بر اساس الگوریتم ارائه‌شده برای حالت کلی قرارگیری پاها، ناحیه‌ی پایداری به دست آمد (شکل ۳) و با ناحیه‌ی پایداری حاصل از روش چندگوشه‌ی محذب (شکل ۴) مقایسه شده است.^[۴]



شکل ۳. ناحیه‌ی پایداری به دست آمده از الگوریتم هوشمند.



شکل ۴. ناحیه‌ی پایداری به دست آمده از روش چندگوشه‌ی محذب.

که در آن μ ضریب اصطکاک است. در ادامه، با استفاده از سطر چهارم ماتریس ضرایب رابطه‌ی ۶، رابطه‌ی ۱۱ به دست آمده است:

$$F_{y_r} = \frac{(y_{or} - y_{ol})}{(\chi_{or} - \chi_{ol})} F_{x_r} \quad (11)$$

با ترکیب روابط ۸، ۱۰ و ۱۱ و با استفاده از سطر دوم رابطه‌ی ۶، نیروهای F_{y_r} و F_{y_l} محاسبه شده‌اند (رابطه‌ی ۱۲):

$$F_{y_l} = F_{y_r} = \frac{(\chi_C - \chi_{ol})}{\sqrt{(\chi_{or} - \chi_{ol} + y_{or} - y_{ol})(\chi_{or} - \chi_{ol})}} \sqrt{\frac{y_{or} - y_{ol}}{\chi_{or} - \chi_{ol}}} \mu M g \quad (12)$$

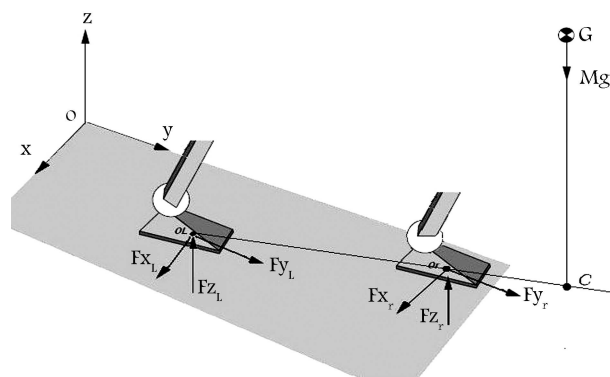
با ترکیب روابط ۸ تا ۱۲ و سطر اول رابطه‌ی ۶، نیروهای F_{x_r} و F_{x_l} محاسبه شده‌اند (رابطه‌ی ۱۳):

$$F_{x_l} = F_{x_r} = \frac{(\chi_C - \chi_{ol})}{\sqrt{(\chi_{or} - \chi_{ol} + y_{or} - y_{ol})(\chi_{or} - \chi_{ol})}} \mu M g \quad (13)$$

مقادیر نیروهای تکیه‌گاهی به مکان مرکز فشارکف هر پا مرتبط است (روابط ۸، ۹، ۱۲ و ۱۳). این مراکز فشار در حالت کلی نامشخص‌اند و چنان که در مطالعات قبلی نیز اشاره شده^[۶] روش محاسبه‌ی دقیق نیروهای تماسی، در حالت کلی نامشخص^۶ است. بنابراین روش ارائه شده در این نوشتار، مستقل از مقادیر نیروهای تماسی، به استخراج ناحیه‌ی پایداری می‌پردازد.

۴.۲. ناحیه‌ی پایداری

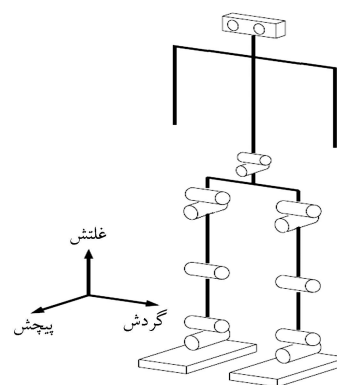
به بیان رابطه‌ی ۷، بردارهای $\vec{r}_{or-ol}$ (بردارهای واصل مراکز فشار پاها) و $\vec{r}_{ol-C}$ (بردارهای واصل مرکز فشار پای چپ به مرکز جرم) در یک راستا قرار دارند. به عبارت دیگر رابطه‌ی ۷ بیان‌گر این مطلب است که مراکز فشارکف پاها و تصویر مرکز جرم روی یک خط قرار دارند، و این شرط اصلی برقراری تعادل است. ولی شرط دیگری نیز وجود دارد که در معادلات تأثیری نهفته داشته است و آن قرارگیری مرکز جرم بین مراکز فشار است. برای بررسی این شرط پنهان، چنین در نظر گرفته شد که هر سه نقطه‌ی پادشده بر روی یک خط قرار می‌گیرند و تصویر مرکز جرم بین دو مرکز فشار نیست (شکل ۲). سپس با به‌کارگیری معادلات تعادل، تناقضی در جهت نیروی F_{z_l} مشاهده شد. در نتیجه امکان برقراری تعادل در چنین حالتی وجود ندارد. البته در مطالعات قبلی نیز به این موضوع اشاره شده است.^[۱۲] در نتیجه برای متعادل بودن ربات دو شرط اساسی وجود دارد: الف) مرکز جرم و مراکز فشارکف پاها روی یک خط قرار بگیرند؛ ب) مرکز جرم بین دو مرکز فشار قرار بگیرد.



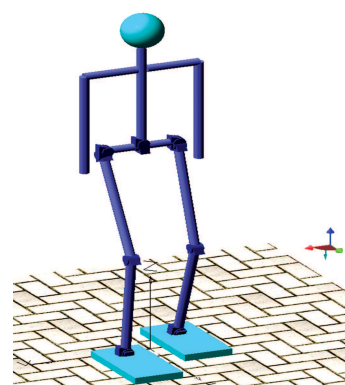
شکل ۲. قرارگیری تصویر مرکز جرم خارج از مرکز فشارکف پاها.

۴. شبیه‌سازی حرکت ربات

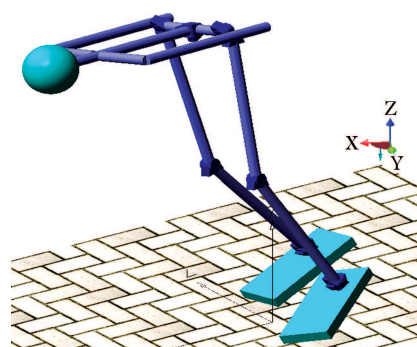
در این بخش با استفاده از مدل ربات ارائه شده در مطالعات پیشین،^[۱۳] ضمن شبیه‌سازی حرکت ربات، تغییرات پارامترهای سینماتیکی ربات به‌هنگام خروج تصویر مرکز جرم از ناحیه‌ی پایداری مورد بررسی قرار گرفته است. در شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته، برای آن‌که ربات در هر لحظه در تعادلی ایستا باشد، حرکت ربات بسیار آهسته فرض شده است. بنابراین برای بررسی پایداری ربات کافی است موقعیت مرکز جرم نسبت به ناحیه‌ی پایداری بررسی شود و به‌دلیل تعادل ایستا در هر لحظه نیازی به استفاده از معیار نقطه‌ی صفرگشتاری نیست. از این نظریه در حرکت‌های سریع و شتاب‌دار، مثلاً در ساخت ربات مورد نظر در سال ۲۰۰۶^[۱۴] استفاده می‌شود.



شکل ۵. شمای کلی و درجات آزادی ربات.

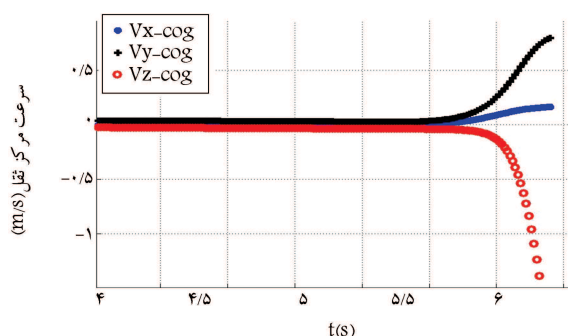
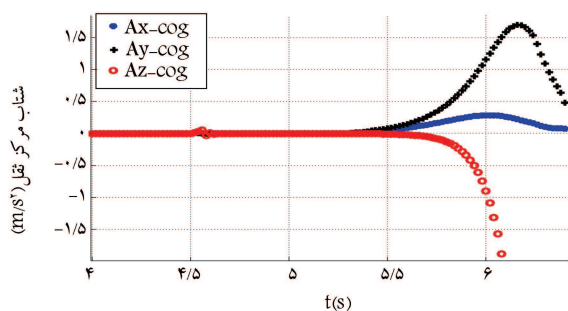


شکل ۶. ربات مدل‌سازی شده در نرم‌افزار Visual Nastran.

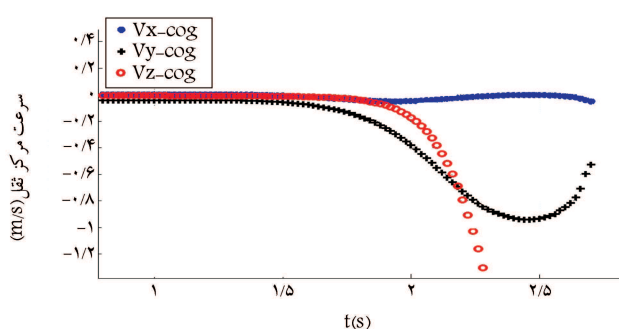
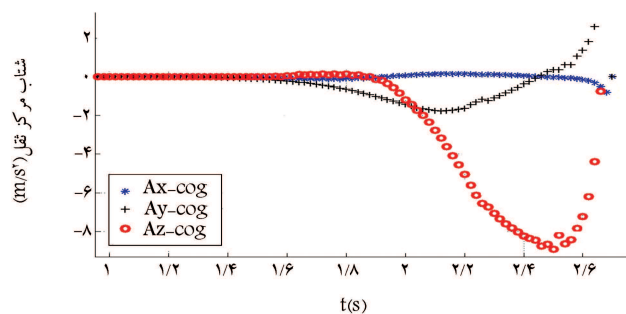


شکل ۷. سقوط ربات.

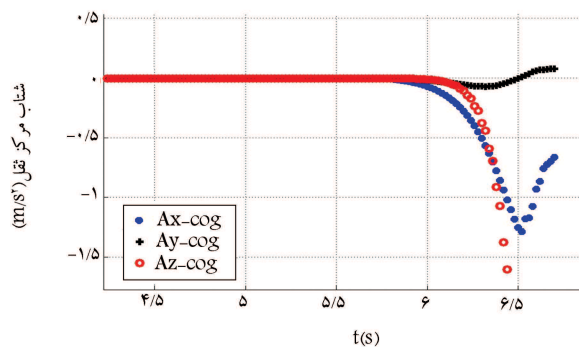
مدل ربات ارائه شده، دارای ۱۳ لینک و ۱۲ درجه آزادی است. بالانته دارای دو درجه آزادی و هریک از پاها دارای پنج درجه آزادی است (شکل ۵). این ربات در نرم‌افزار Visual Nastran مدل‌سازی شده است (شکل ۶). در شبیه‌سازی، طی یک حرکت بسیار آهسته ربات از وضعیت تعادل خارج شده است (شکل ۷). این رویه در ۴ جهت مختلف اجرا شد و در هر حالت، نمودارهای سینماتیکی مرکز جرم ربات به دست آمده‌اند. در نمودارهای سینماتیکی، تغییرات سرعت و شتاب مرکز جرم ربات، از لحظه‌ی حرکت تا سقوط ترسیم شده است (شکل‌های ۸ تا ۱۱).



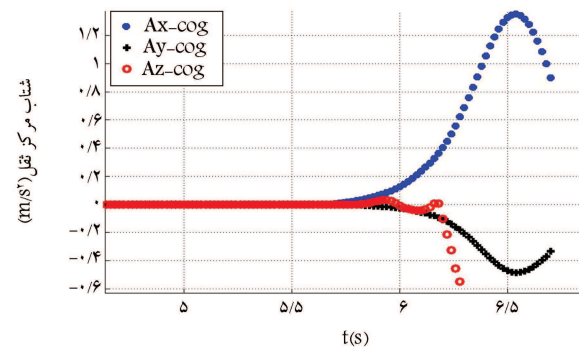
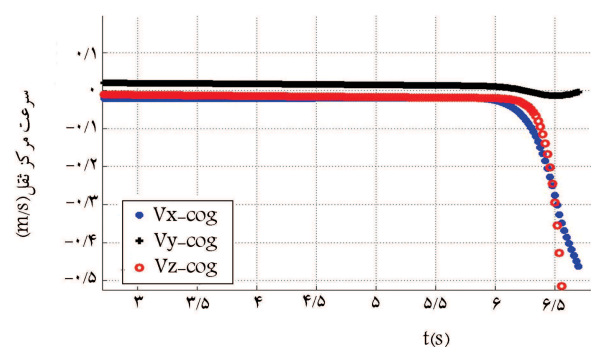
شکل ۸. نمودار تغییرات سرعت و شتاب مرکز جرم در هنگام خروج مرکز جرم از مرکز جلو.



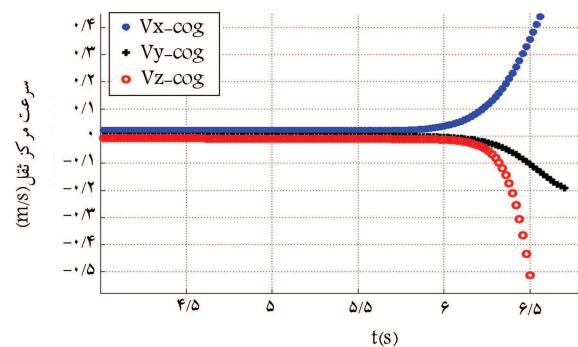
شکل ۹. نمودار تغییرات سرعت و شتاب مرکز جرم در هنگام خروج از مرکز عقب.



شکل ۱۰. نمودار تغییرات سرعت و شتاب مرکز جرم در هنگام خروج از مرز چپ.



شکل ۱۱. نمودار تغییرات سرعت و شتاب مرکز جرم در هنگام خروج از مرز راست.



۵. نتیجه‌گیری

سینماتیکی سقوط ربات، مشاهده شد که تغییرات سرعت و شتاب مرکز جرم ربات در حین تعادل، بسیار آرام است ولی در آستانه‌ی سقوط ربات -- که هم‌زمان با خروج مرکز جرم از ناحیه‌ی پایداری است -- تغییرات ناگهانی در مؤلفه‌های سینماتیکی رخ می‌دهد. هم‌زمانی این تغییرات ناگهانی و سقوط ربات، با خروج مرکز جرم از ناحیه‌ی پایداری نشان‌دهنده‌ی صحت این ناحیه است.

شرایط تعادل به دست آمده نسبت به کارهای گذشته توصیف ساده‌تری از تعادل ربات ارائه می‌کند. همچنین از شرط الف بیان‌شده، روابط نیروهای تماسی به دست آمده است، که در مقالات بعدی محاسبه‌ی این نیروها در محیط شبیه‌سازی گزارش می‌شود.

تقدیر و تشکر

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

منابع

پانویس

1. center of gravity (COG)
2. zero momentum point (ZMP)
3. foot rotation indicator (FRI)
4. convex hull
5. flat plane
6. indeterminate
7. depth-first-search
8. depth-limited-search

1. Vukobratovic, M. and Borovac, B. "Zero-moment point - thirty five years of its life", *Int. Journal of Humanoid Robotics*, **1**(1), (2004).
2. Goswami, A. and Kallem, V. "Rate of change of angular momentum and balance maintenance of biped robots", *Proc. Int. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, (2004).

3. Popovic, M.B.; Goswami, A. and Herr, H. "Ground reference points in legged locomotion: Definitions, biological trajectories and control implications", *Int. Journal of Robotics Research*, **24**(10), (2005).
4. Sugihara, T., *Mobility Enhancement Control of Humanoid Robot based on Reaction Force Manipulation Via Whole Body Motion*, PhD Thesis, The University of Tokyo (2004).
5. Bretl, T. and Lall, S. "A fast and adaptive test of static equilibrium for legged robots", *Proc. Int. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, USA, (2006).
6. Hirukawa, H.; Hattori, S.; Harada, K.; Kajita, S.; Kaneko, K.; Kanehiro, F.; Fujiwara, K. and Morisawa, M. "A universal stability criterion of the foot contact of legged robots - adios ZMP", *Proc. Int. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, USA (2006).
7. Kawakami, H.; Sugano, N.; Yonenobu, K.; Yoshikawa, H.; Ochi, T.; Hattori, A. and Suzuki, N. "Gait analysis system for assessment of dynamic loading axis of the Knee", *Gait and Posture*, **21**, pp. 125-130 (2005).
8. Kim, C.M. and Eng, J.J. "Magnitude and pattern of 3D kinematic and kinetic gait profiles in persons with stroke: Relationship to walking speed", *Gait and Posture*, **20**, pp. 140-146 (2004).
9. Liu, T.; Inoue, Y. and Shibata, K. "Wearable force sensor with parallel structure for measurement of ground-reaction force", *Measurement*, **40**, pp. 644-653 (2007).
10. Tamaddoni, S.H., *Simulation and Dynamic Analysis of Running in Humanoid Robots*, MSc.Thesis, Sharif University of Technology (2007).
11. Carig, J.J., *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 2nd Ed, Addison-Wesley (1989).
12. Wieber, P.B.; Rhône-Alpes, I. and Montbonnot, Z. "On the stability of walking systems", *Proc. Int. Workshop on Humanoid and Human Friendly Robotics*, France (2002).
13. Khatibi, M.M. and Abdolshah, S., *Kinematics and Kinetic Analysis of a Humanoid Robot*, BSc. Thesis, Semnan University (2007).
14. Azad, M., *Dynamic Analysis and Stability Study of Humanoid Robots and Motion Optimization Using Genetic Algorithm*, MSc. Thesis, Sharif University of Technology (2006).