

دینامیک حرکت ربات راه رونده دوپا با الگو برداری از مدل غیر فعال

احمد باقری

استادیار

دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

فرید نجفی

استادیار

دانشکده مکانیک، دانشگاه خواجه نصیر طوسی

رضا فرخی

کارشناس ارشد

دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

چکیده

در این مقاله هدف ارائه مدل جدیدی از رباتهای دو پای فعال بوده که از ساختار مکانیکی رباتهای غیر فعال (که فاقد هرگونه محرک و سیستم کنترلی بوده و تنها بواسطه نیروی جاذبه، در یک سرایشی حرکت کرده و تعادل خود را حفظ می کنند) الهام گرفته شده است. از مزایای این ساختار جدید می توان به کاهش دو درجه آزادی فعال ربات (بدون کاستن از قدرت مانور ربات) و همچنین خم نبودن زانوی پای تکیه گاه هنگام قدم برداشتن (نظیر انسان) اشاره نمود. پس از استخراج معادلات دینامیکی ساده شده حرکت برای دو وضعیت ربات، یعنی حرکت بر روی یک پا و حرکت بر روی دو پا، حفظ تعادل ربات با استفاده از روش نقطه ممان صفر (ZMP) ایجاد گردیده است. ضمناً برای بدست آوردن معادلات دینامیکی هر یک از وضعیتهای دوگانه ربات، مدل جداگانه ای برای پای تکیه گاه و پای نوسان کننده در نظر گرفته شده است. همچنین برای آنکه تصویر نقطه ممان صفر در کف پای ربات قرار بگیرد، دینامیک بالاتنه اصلاح شده است.

کلمات کلیدی

ربات دوپای راه رونده، مدل فعال و غیر فعال ربات، نقطه ممان صفر، تعادل دینامیکی.

Motion Dynamics of a Bipedal Walking Robot By Means of a Passive Model

A. Bagheri
Assistant Professor
Guilan University

F. Najafi
Assistant Professor
K. N. Toosi University

R. Farrokhi
M.Sc Graduated
Guilan University

Abstract

The main goal of this study is to present a new model of bipedal walking robot by means of a passive mechanical structure. The advantage of such model is the capability of simulating human motion when supporting by toe and heel and also straight legged walking. After obtaining dynamic equations the simplified for both motion type (single support phase and double support phase), the stability of robot achieved by the zero moment point procedure. Beside, for constituting the dynamic equations for each motion types, a separate model was used for the swing leg and for supporting leg and torso. Also a dynamic modifications is done for locating the zero moment point inside leg's bed region.

Keywords

Bipedal Walking Robot, Powered and Passive Model, Zero Moment Point, Dynamic Equilibrium

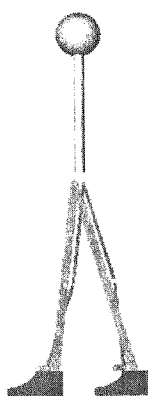
مقدمه

طراحی، تحلیل و ساخت رباتهای دوپا همواره یکی از مسائل مورد علاقه محققان در طول سالیان گذشته بوده است. از جمله مسائل مهم در زمینه رباتهای راه رونده می‌توان به ارائه مدل سینماتیک و دینامیک ربات، الگوریتم کنترلی مناسب، نحوه گام برداشتن و تجزیه و تحلیل پایداری ربات اشاره نمود. وکابراتوویچ (Vukobratovic) از جمله محققانی است که دارای مطالعات گسترده‌ای در زمینه حرکت رباتهای دوپا می‌باشد [۱]. مک گیر (McGeer) نیز مدل جدیدی از مکانیزمهای دوپا ارائه داده است که بدون استفاده از محرک و الگوریتم کنترلی و تنها بر اساس نیروی وزن خود بر روی یک سطح شیبدار به سمت پایین حرکت می‌کند [۲]. از جمله رباتهای دوپای ساخته شده می‌توان به رباتهای دانشگاه واسدا (Waseda) (۱۹۶۹-۱۹۹۹) اشاره کرد که در تمام آنها حرکت مفاصل از پیش تعیین شده و مفاصل از آن حرکت پیروی می‌کنند [۳]. نمونه‌ای دیگر، رباتهای P1, P2 ساخته شده در مرکز تحقیقات هوندا (Honda) (از سال ۱۹۸۶ تا به امروز) می‌باشند. این رباتها با تکرار منحنی مفاصل، که با اندازه‌گیری مستقیم از بدن انسان بدست آمده، حرکت کرده و کنترل می‌شوند [۴]. در مرجع [۵] ربات هفت درجه آزادی ارائه شده است که کلیه درجات آزادی آن فعال بوده و برای به حرکت در آوردن آن از هفت محرک مستقل استفاده شده است.

در این مقاله دینامیک حرکت یک ربات پنج درجه آزادی صفحه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و الگوی حرکتی مناسبی برای حرکت ربات به منظور حفظ تعادل آن فرموله شده است. در ربات مورد نظر با استفاده از تلفیق مکانیزم کف پای رباتهای غیرفعال (رباتهایی که برای حرکت نیاز به محرک نداشته و در اثر نیروی وزن خود حرکت می‌کنند) با مکانیزم کف پای ربات فعال، دو درجه آزادی فعال ربات بدون کاهش قابلیت حرکت آن، کاهش داده شده و بنابراین دو محرک کم شده است. تعادل ربات نیز با جابجایی نقطه ممان صفر (Zero Moment Point (ZMP)) و قرار دادن آن در داخل چندضلعی کف پای تکیه‌گاه حاصل شده است. (نقطه ممان صفر نقطه‌ای است که مجموع گشتاور نیروهای مؤثر بر ربات در این نقطه برابر صفر است. به عبارت دیگر، نقطه ممان صفر محل اعمال نیروی عکس‌العملی اعمال شده به ربات است [۶]). در انتها چگونگی عملکرد ربات توسط نرم افزار ((Visual Nastarn Desktop (VND)) شبیه‌سازی شده است.

۱- مدل ربات دوپای صفحه‌ای پنج درجه آزادی

نمای ربات موردنظر در شکل ۱ نشان داده شده است.

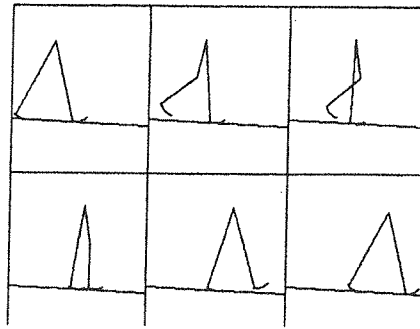


شکل (۱) ربات دوپای صفحه‌ای.

با توجه به این شکل، ربات مورد بحث یک ربات صفحه‌ای محسوب شده که حرکت آن فقط در داخل صفحه حرکت (Sagital Plane) انجام می‌شود و نظیر اکثر رباتهای ساخته شده دوپا، از دو قسمت بالاتنه و پایین تنه تشکیل یافته است.

بالا تنه ربات یک جرم سنگین می‌باشد که از آن به منظور برقراری تعادل استفاده می‌گردد. پایین تنه نیز شامل دو پا بوده که حرکت و پیشروی ربات توسط این قسمت صورت می‌گیرد.

یکی از نکات حائز اهمیت در این ربات ساختار کف پای ربات بوده که از رباتهای غیرفعال الگو برداری شده است. با بررسی طرز حرکت رباتهای دوپای غیر فعال (شکل شماره ۲) مشاهده می‌گردد که در این گونه رباتها با استفاده از کف پای دایره‌ای شکل، توانسته‌اند حرکت برروی پنجه و پاشنه را مدل‌سازی و اجرا نمایند [۲]. با توجه به این نکته، در ربات مورد بررسی، یک درجه آزادی فعال ربات در هر پا (جمعا دو درجه آزادی) به نحوی کاهش داده شده است که از توانایی حرکتی ربات کاسته نشود [۷].

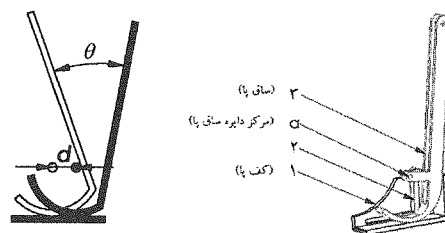


شکل (۲) نحوه حرکت ربات دوپای غیر فعال [۲].

در شکل ۳ نمایی از مکانیزم کف پا نشان داده شده است. حرکت این مکانیزم به گونه‌ای است که قطعه شماره ۱ کف پای ربات محسوب شده، قسمت خارجی آن بر روی زمین قرار دارد و از داخل با قطعه شماره ۳ (ساق پای ربات) در تماس می‌باشد. تماس این دو قطعه (۱ و ۳) به صورت مکانیزم چرخ دنده‌های شانه‌ای بوده و توسط این مکانیزم قابلیت مانوردهی پای ربات، بدون استفاده از محرک، افزایش داده شده است [۷]. بمنظور تکمیل مکانیزم از قطعه شماره ۲ استفاده شده است. این قطعه وظیفه اتصال قطعات ۱ و ۳ را داشته و حرکت آنها را نسبت بهم مقید می‌کند. بنابراین با حرکت قطعه ۲ به جلو و یا عقب (به اندازه d) ساق پا نسبت به کف پا به اندازه d جابجا شده و به مقدار θ حول نقطه a (مرکز دایره ساق پا) دوران می‌کند.

$$d = R\theta \quad (1)$$

در رابطه بالا R شعاع قسمت دایره‌ای ساق پای ۳ است.



شکل (۳) ساختار مکانیزم کف پای ربات.

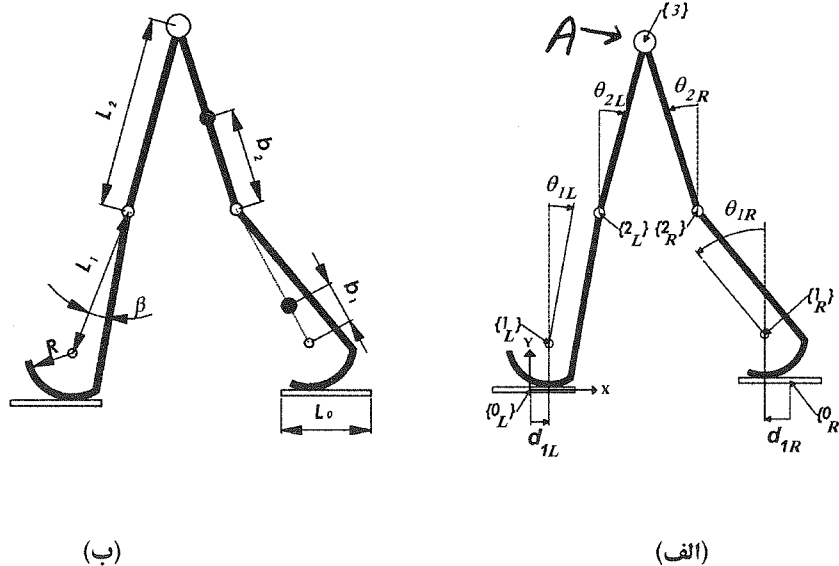
مزیت‌های استفاده از این مکانیزم عبارتند از:

- الف - شبیه‌سازی و اجرای حرکت برروی پنجه و پاشنه؛
- ب - در هنگام حرکت برروی یک پا زانوی پای تکیه‌گاه نظیر انسان قائم بوده و در طول حرکت خم نمی‌گردد؛
- ج - سطح اتکای کف پا با زمین در تمام موارد فوق ثابت بوده و به اندازه سطح خارجی قطعه ۱ (شکل ۳) می‌باشد (بنابراین حفظ تعادل ربات ساده‌تر است).

با در نظر گرفتن توضیحات فوق، ربات مورد بحث دارای پنج درجه آزادی می‌باشد که یک درجه آزادی در بالاتنه ربات وجود داشته و در هر پا نیز دو درجه آزادی در نظر گرفته شده است (که در زانو و کف پا قرار دارند). از اینرو در بخش بعد پس از استخراج معادلات سینماتیکی حاکم بر ربات، نحوه حرکت پایین تنه که صرفاً در پیشروی ربات موثر بوده، ارائه شده و نحوه حرکت بالاتنه ربات نیز با در نظر گرفتن مفهوم نقطه ممان صفر و بمنظور حفظ تعادل ربات در بخش ۴ ارائه گردیده است.

۲- معادلات سینماتیکی ربات (پائین تنه)

مدل ریاضی پایین تنه ربات در شکل ۴ نشان داده شده است. پارامترهای مدل شامل θ_{1R} , d_{1R} , θ_{1L} , d_{1L} , θ_{2R} , θ_{2L} و همچنین طول اجزاء و موقعیت مرکز جرم (دوایر توپر) می‌باشند. لازم به ذکر است که θ_{1L} و d_{1L} و همچنین θ_{1R} و d_{1R} طبق رابطه (۱) با هم در ارتباط هستند. همچنین بالاتنه ربات نیز در نقطه A دارای یک درجه آزادی می‌باشد (شکل ۷).



شکل (۴) مدل ریاضی ربات دوپا (پائین تنه).

با توجه به شکل ۴، پای جلوی ربات (پای چپ) در این مرحله از حرکت پای تکیه‌گاه محسوب می‌گردد. دستگاه مختصات مرجع (دستگاه XY) در وسط کف پای تکیه‌گاه قرار دارد (وضعیت کف پای تکیه‌گاه در طول این گام ثابت فرض می‌گردد). موقعیت هر یک از مفاصل ربات نسبت به دستگاه مختصات مرجع بصورت زیر می‌باشد (از زیرنویس L برای پای چپ و از R برای پای راست استفاده شده است):

$$\vec{r}_{1L} = (d_{1L})\vec{i} + (R)\vec{j} \quad (۲)$$

$$\vec{r}_{2L} = (d_{1L} + l_{1L} \sin(\beta + \theta_{1L}))\vec{i} + (R + l_{1L} \cos(\beta + \theta_{1L}))\vec{j} \quad (۳)$$

$$\vec{r}_3 = (d_{1L} + l_{1L} \sin(\beta + \theta_{1L}) + l_{2L} \sin(\theta_{2L}))\vec{i} + (R + l_{1L} \cos(\beta + \theta_{1L}) + l_{2L} \cos(\theta_{2L}))\vec{j} \quad (۴)$$

$$\vec{r}_{2R} = \vec{r}_3 + (-l_{2R} \sin(\theta_{2R}))\vec{i} + (-l_{2R} \cos(\theta_{2R}))\vec{j} \quad (۵)$$

$$\vec{r}_{1R} = \vec{r}_3 + (-l_{2R} \sin(\theta_{2R}) - l_{1R} \sin(\beta + \theta_{1R}))\vec{i} + (-l_{2R} \cos(\theta_{2R}) - l_{1R} \cos(\beta + \theta_{1R}))\vec{j} \quad (۶)$$

بردار موقعیت مرکز کف پای عقب (بردار r_{OR}) نیز مطابق رابطه زیر می‌باشد:

$$\vec{r}_{OR} = \vec{r}_3 + (-l_2 \sin(\theta_{2R}) - l_1 \sin(\beta + \theta_{1R}) - d_{1R})\vec{i} + (-l_2 \cos(\theta_{2R}) - l_1 \cos(\beta + \theta_{1R}) - R)\vec{j} \quad (7)$$

در رابطه (۴) بردار r_3 موقعیت نقطه A را بدست می‌دهد (شکل ۴).

حال با استفاده از معادلات فوق، مقادیر مختلف متغیرهای مفصلی پائین تنه (ورودی‌های حرکتی) $(d_{1L}, \theta_{2L}, \theta_{2R}, d_{1R})$ برای یک گام ربات و در دو حالت حرکت بر روی دو پا و حرکت بر روی یک پا ارائه می‌گردند.

۱-۲- حرکت بر روی دو پا

در این وضعیت هر دو پای ربات بر روی زمین قرار دارند. بنابراین X_{OR} و Y_{OR} معلوم و برابر مقادیر ثابت می‌باشند. از طرف دیگر همانطور که در بخش قبل اشاره شد، زانوی پای تکیه‌گاه در هنگام حرکت صاف فرض می‌گردد $(\theta_{2L} = \theta_{1L})$. با فرض اینکه زانوی پای عقب در ابتدای حرکت بر روی دو پا، صاف بوده و در انتهای حرکت (بر روی دو پا) به اندازه زاویه α خم شود می‌توان نوشت:

$$\theta_{2R} = \theta_{1R} \quad \text{در شروع حرکت}$$

$$\theta_{2R} = \theta_{1R} - \alpha \quad \text{در انتهای حرکت}$$

با جاگذاری معادلات (۴) در معادلات (۷) تنها مجهولات این معادلات θ_{1R} و d_{1R} و d_{1L} می‌باشند. نتایج حاصل از حل عددی این معادلات در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، D.S. نشان دهنده حرکت بر روی دو پا و S.S. نشان دهنده حرکت بر روی یک پا می‌باشد.

مقدار α برابر با ۱۴ درجه فرض می‌گردد. اگر α بزرگتر از این زاویه فرض شود حرکت پای جلو به سمت عقب خواهد بود. اگر α یک زاویه کوچکتر در نظر گرفته شود، زمان تعویض پای تکیه‌گاه کوچک خواهد شد و این مورد نظر طراحی نیست. اگرچه در بعضی طراحی‌های انجام شده α ی کوچک مد نظر بوده و در واقع از بررسی حرکت بر روی دو پا صرف نظر شده است.

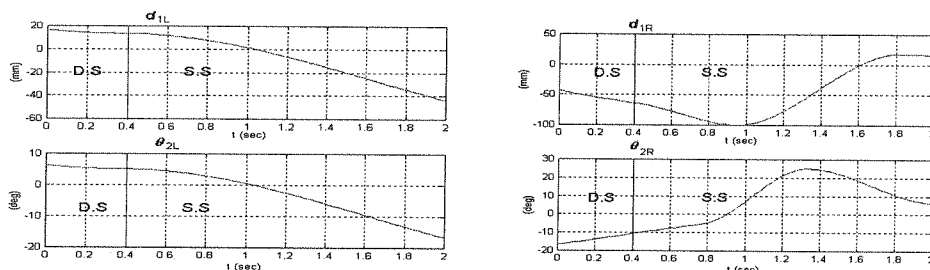
۲-۲- حرکت بر روی یک پا

در این مرحله کف پای نوسان کننده (پای راست) دیگر بر روی زمین قرار نداشته و باید با فاصله گرفتن از زمین، حرکت کرده و جلوی پای تکیه‌گاه (پای چپ) قرار گیرد. از آنجایی که تنها فرض مسئله صاف بودن پای تکیه‌گاه در تمام طول مسیر می‌باشد $(\theta_{2L} = \theta_{1L})$ ، بنابراین مسئله دارای جوابهای مختلفی بوده که البته آنهایی مورد قبول هستند که موارد زیر را نقض نکنند. این موارد عبارتند از:

- کف پای نوسان کننده همواره باید با زمین فاصله داشته باشد $(Y_{OR} > 0)$

- زانوی پای نوسان کننده نباید برعکس خم شود $(\theta_{1R} < \theta_{2R})$

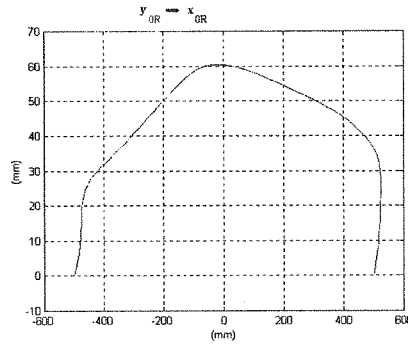
نمونه‌ای از جوابهای مورد قبول (متغیرهای مفصلی یا ورودیهای مربوط به درجات آزادی) در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین نمودار جابجایی Y_{OR} بر حسب X_{OR} در این گام در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل (۵) منحنی متغیرهای مفصلی در یک گام.

S.S.: حرکت بر روی یک پا

D.S.: حرکت بر روی دو پا



شکل (۶) منحنی جابجایی y_{0R} بر حسب x_{0R} .

همانطور که در بخشهای قبل اشاره شد، راه رفتن یک پروسه تناوبی بوده و بنابراین در گام بعدی فقط ترتیب پای نوسان کننده و تکیه گاه عوض شده و معادلات یکسان باقی می ماند. یعنی پای راست پای تکیه گاه و پای چپ پای نوسان کننده می شود.

۳- معادلات دینامیکی حرکت

فرم کلی معادلات دینامیکی حرکت بصورت رابطه زیر می باشد:

$$\tau = H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (۸)$$

که در آن $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]$ متغیرهای مفصلی و τ نیز بردار گشتاورهای (نیروهای) اعمالی به مفاصل می باشند. به منظور استخراج روابط دینامیکی می توان از روش لاگرانژ استفاده نمود [۶]. به این ترتیب که ابتدا با استفاده از معادلات سینماتیکی و مشتق گیری از آنها، سرعت مرکز جرم هر یک از اجزای ربات را محاسبه کرده، انرژی جنبشی هر یک از اجزاء را با استفاده از رابطه زیر محاسبه می کنیم:

$$T = \frac{1}{2} m_i v_{gi}^2 + \frac{1}{2} I_i \omega_i^2 \quad (۹)$$

که در آن ω_i ، v_{gi} بترتیب سرعت مرکز جرم و سرعت زاویه ای هر یک از اجزاء بوده و m_i ، I_i جرم و ممان اینرسی لینک i ام می باشند. انرژی جنبشی کل را نیز می توان با جمع کردن انرژی جنبشی کلیه اجزاء بدست آورد. در رابطه (۸) ماتریس $H(q)$ ماتریس لختی ربات بوده که یک ماتریس متقارن و مثبت است. رابطه بین ماتریس لختی H و انرژی جنبشی کل عبارت است از:

$$T = \dot{q}^T H \dot{q} / 2 \quad (۱۰)$$

با محاسبه ماتریس H ماتریس C را نیز می توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$C\dot{q} = \dot{H}\dot{q} - \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \quad (۱۱)$$

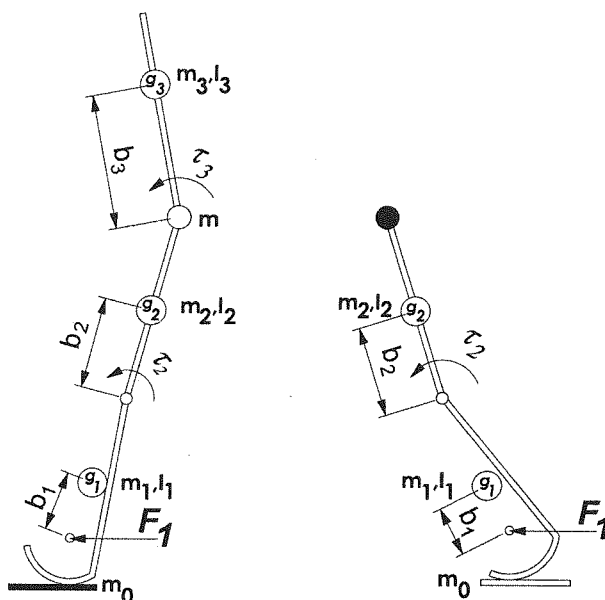
اگر P معرف انرژی پتانسیل کل سیستم باشد، ماتریس $G(q)$ برابر است با:

$$G = \frac{\partial P}{\partial q} \quad (۱۲)$$

با توجه به اینکه دینامیک سیستم در دو وضعیت حرکت بر روی یک پا و حرکت بر روی دوپا متفاوت می‌باشند، معادلات دینامیکی سیستم برای دو حالت فوق بطور جداگانه بررسی می‌گردند.

۳-۱- حرکت بر روی یک پا

با صرفنظر کردن از تاثیر پای نوسان‌کننده بر پای تکیه‌گاه و بالعکس معادلات دینامیکی حرکت بر روی یک پا را می‌توان بطور مجزا و برای دو مجموعه زیر محاسبه و استخراج نمود: مجموعه اول شامل پای تکیه‌گاه و بالاتنه و مجموعه دوم شامل پای نوسان‌کننده. لازم به ذکر است که عدم تاثیر پای نوسان‌کننده بر پای تکیه‌گاه در صورتی به واقعیت نزدیک است که جرم ساق و کف پا در مقایسه با جرم بالاتنه کوچک و قابل صرفنظر باشد. همچنین عدم تاثیر مجموعه اول بر مجموعه دوم در صورتی است که حرکت مجموعه اول بدون شتاب فرض گردد [۸]. مدل ریاضی پای تکیه‌گاه و بالاتنه و همچنین پای نوسان‌کننده بصورت مجزا در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل (۷) تقسیم ربات به دو مجموعه (در حرکت بر روی یک پا):

شکل سمت چپ: مجموعه پای تکیه‌گاه و بالاتنه - شکل سمت راست: مجموعه پای نوسان‌کننده

۳-۱-۱- معادلات دینامیکی پای تکیه‌گاه و بالاتنه

باتوجه به مدل ریاضی پای تکیه‌گاه و بالاتنه در شکل ۷، بردار q در این حالت برابر است با $q = [d_{1L}, \theta_{2L}, \theta_3]$ (فرض می‌کنیم پای چپ پای تکیه‌گاه است).

انرژی جنبشی کل سیستم عبارت است از:

$$T = \frac{1}{2} (A_1 + A_2 \cos(\beta + \theta_1)) \dot{d}_1^2 + \frac{1}{2} A_3 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} A_4 \dot{\theta}_3^2 + A_5 \cos(\theta_2 - \theta_3) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + (A_5 \cos \theta_2 + A_6 \cos(\beta + \theta_1 - \theta_2)) \dot{d}_1 \dot{\theta}_2 + (A_7 \cos \theta_3 + A_8 \cos(\beta + \theta_1 - \theta_3)) \dot{d}_1 \dot{\theta}_3 \quad (13)$$

که در آن

$$\begin{cases}
 A_1 = m_1 + m_1 \left(\frac{b_1}{R} \right)^2 + \frac{I_1}{R^2} + m_2 + m_2 \left(\frac{l_1}{R} \right)^2 + m + m \left(\frac{l_1}{R} \right)^2 + m_3 + m_3 \left(\frac{l_1}{R} \right)^2 \\
 A_2 = 2 \left(\frac{m_1 b_1}{R} + \frac{m_2 l_1}{R} + \frac{m l_1}{R} + \frac{m_3 l_1}{R} \right) \\
 A_3 = m_2 b_2^2 + I_2 + m l_2^2 + m_3 l_2^2 \\
 A_4 = m_3 b_3^2 + I_3 \\
 A_5 = m_2 b_2 + m l_2 + m_3 l_2 \\
 A_6 = \frac{m_2 l_1 b_2}{R} + \frac{m l_1 l_2}{R} + \frac{m_3 l_1 l_2}{R} \\
 A_7 = m_3 b_3 \\
 A_8 = \frac{m_3 l_1 b_3}{R} \\
 A_9 = m_3 l_2 b_3
 \end{cases} \quad (14)$$

و انرژی پتانسیل کل سیستم نیز برابر است با:

$$P = m_1 g (R + b_1 \cos(\beta + \theta_1)) + m_2 g (R + l_1 \cos(\beta + \theta_1) + b_2 \cos(\theta_2)) + m g (R + l_1 \cos(\beta + \theta_1) + l_2 \cos(\theta_2)) + m_3 g (R + l_1 \cos(\beta + \theta_1) + l_2 \cos(\theta_2) + b_3 \cos(\theta_3)) \quad (15)$$

ماتریسهای H , C , G (مربوط به معادله (۸)) را می‌توان با ساده‌سازی معادلات (۱۰) و (۱۱) و (۱۲) با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) و (۱۵) تعیین نمود:

$$H = \begin{bmatrix} A_1 + A_2 \cos(\beta + \theta_1) & A_5 \cos \theta_2 + A_6 \cos(\beta + \theta_1 - \theta_2) & A_7 \cos \theta_3 + A_8 \cos(\beta + \theta_1 - \theta_3) \\ A_5 \cos \theta_2 + A_6 \cos(\beta + \theta_1 - \theta_2) & A_3 & A_9 \cos(\theta_2 - \theta_3) \\ A_7 \cos \theta_3 + A_8 \cos(\beta + \theta_1 - \theta_3) & A_9 \cos(\theta_2 - \theta_3) & A_4 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} -\frac{A_2}{2R} \dot{d}_1 \sin(\beta + \theta_1) & (-A_5 \sin \theta_2 + A_6 \sin(\beta + \theta_1 - \theta_2)) \dot{\theta}_2 & (-A_7 \sin \theta_3 + A_8 \sin(\beta + \theta_1 - \theta_3)) \dot{\theta}_3 \\ -A_5 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 - \frac{A_6}{R} \dot{d}_1 \sin(\beta + \theta_1 - \theta_2) & A_3 \dot{d}_1 \sin \theta_2 & A_9 \dot{\theta}_3 \sin(\theta_2 - \theta_3) \\ -A_7 \dot{\theta}_3 \sin \theta_3 - \frac{A_8}{R} \dot{d}_1 \sin(\beta + \theta_1 - \theta_3) & -A_9 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_2 - \theta_3) & A_7 \dot{d}_1 \sin \theta_3 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} -\frac{A_2}{2} g \sin(\beta + \theta_1) \\ -A_5 g \sin \theta_2 \\ -A_7 g \sin \theta_3 \end{bmatrix}$$

۳-۱-۲- معادلات دینامیکی پای نوسان کننده

باتوجه به مدل ریاضی پای نوسان کننده (شکل ۷) بردار q عبارت است از $q = [d_{1R}, \theta_{2R}]$.
 نظیر حالت قبل انرژی جنبشی کل سیستم برابر است با:

$$T = \frac{1}{2} (B_1 + B_2 \cos(\beta + \theta_1)) \dot{d}_1^2 + \frac{1}{2} B_3 \dot{\theta}_2^2 + (B_4 \cos(\beta + \theta_1 - \theta_2) + B_5 \cos \theta_2) \dot{d}_1 \dot{\theta}_2 \quad (16)$$

و انرژی پتانسیل سیستم نیز عبارت است از:

$$P = m_2 g (-l_2 - b_2) \cos \theta_2 + m_1 g (-l_2 \cos \theta_2 - (l_1 - b_1) \cos(\beta + \theta_1)) + m_0 g (-l_2 \cos \theta_2 - l_1 \cos(\beta + \theta_1) - R) \quad (17)$$

$$\begin{cases} B_1 = m_1 \left(\frac{l_1 - b_1}{R} \right)^2 + m_0 \left(\left(\frac{l_1}{R} \right)^2 + 1 \right) + I_1 \\ B_2 = 2m_0 \frac{l_1}{R} \\ B_3 = m_2 (l_2 - b_2)^2 + I_2 + m_1 l_2^2 + m_0 l_2^2 \\ B_4 = \frac{m_1 (l_1 - b_1) l_2}{R} + \frac{m_0 l_1 l_2}{R} \\ B_5 = m_0 l_2 \\ B_6 = m_1 \frac{l_1 - b_1}{R} + m_0 \frac{l_1}{R} \\ B_7 = m_2 (l_2 - b_2) + m_1 l_2 + m_0 l_2 \end{cases} \quad (18)$$

نظیر حالت قبل ماتریسهای H' , C' , G' (مربوط به معادله (۸)) را می‌توان با ساده‌سازی معادلات (۱۰) و (۱۱) و (۱۲) با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) و (۱۵) تعیین نمود:

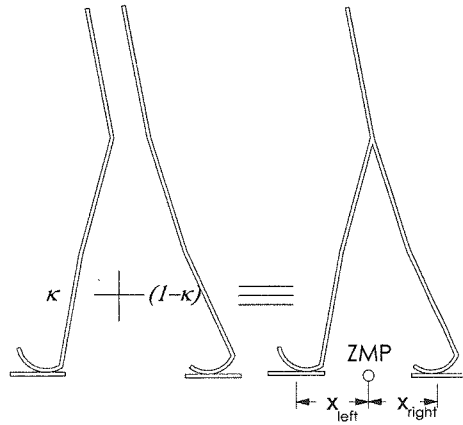
$$\begin{aligned} H' &= \begin{bmatrix} B_1 + B_2 \cos(\beta + \theta_1) & B_4 \cos(\beta + \theta_1 - \theta_2) + B_5 \cos \theta_2 \\ B_4 \cos(\beta + \theta_1 - \theta_2) + B_5 \cos \theta_2 & B_3 \end{bmatrix} \\ C' &= \begin{bmatrix} -\frac{B_2}{2R} \dot{d}_1 \sin(\beta + \theta_1) & (B_4 \sin(\beta + \theta_1 - \theta_2) - B_5 \sin \theta_2) \dot{\theta}_2 \\ -\frac{B_4}{R} \dot{d}_1 \sin(\beta + \theta_1 - \theta_2) - B_5 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 & B_5 \dot{d}_1 \sin \theta_2 \end{bmatrix} \\ G' &= \begin{bmatrix} B_6 g \sin(\beta + \theta_1) \\ B_7 g \sin \theta_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

۳-۲- حرکت بر روی دوپا

در این مرحله از حرکت با استفاده از معادلات مجموعه‌ی "پای تکیه‌گاه و بالاتنه" (که در بخش ۳-۱-۱ ارائه شده است) و روش ساده‌ای که در مرجع [۹] به آن اشاره گردیده، معادلات دینامیکی ساده شده را برای ربات بدست می‌آوریم (البته لازم به ذکر است که در این مرجع از جرم پایین تنه صرف‌نظر شده است).
در این روش ابتدا ربات را به دو سیستم مجزای مجموعه "پای جلو و بالاتنه" و "پای عقب و بالاتنه" (نظیر شکل ۸) تقسیم می‌کنیم. معادلات دینامیکی هریک از دو سیستم فوق نظیر معادلات "پای تکیه‌گاه و بالاتنه" بوده که در بخش ۳-۱-۱ توضیح داده شده‌اند. از طرف دیگر، با توجه به اینکه هر دو مجموعه در حرکت ربات به سمت جلو مؤثر می‌باشند، می‌بایست با اعمال ضریبی (ضریب κ) حرکت بین دو مجموعه تقسیم گردد. از اینرو ضریب κ با در نظر گرفتن موقعیت نقطه ممان صفر مطابق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\kappa = \frac{x_{right}}{x_{right} + x_{left}} \quad (19)$$

که در آن x_{left} فاصله افقی نقطه ممان صفر از مرکز کف پای چپ و x_{right} فاصله افقی نقطه ممان صفر از مرکز کف پای راست می‌باشد. به عبارت دیگر اگر نقطه ممان صفر در مرکز کف پای راست قرار داشته باشد، $\kappa=0$ و اگر در مرکز کف پای چپ قرار داشته باشد، $\kappa=1$ و برای وضعیت بین این دو حالت $0 < \kappa < 1$.



شکل (۸) تقسیم حرکت ربات بین دو پا (در حرکت بر روی دوپا).

با توجه به معادله (۱۹) ضریب موثر برای مجموعه "پای جلو و بالاتنه" برابر با κ و برای مجموعه "پای عقب و بالاتنه" برابر با $(1-\kappa)$ می‌باشند. بنابراین معادلات دینامیکی ربات در این مرحله از حرکت بصورت زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{bmatrix} F_1^L \\ T_2^L \\ F_1^R \\ T_2^R \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa H_{11}^L & \kappa H_{12}^L & 0 & 0 & \kappa H_{13}^L \\ \kappa H_{21}^L & \kappa H_{22}^L & 0 & 0 & \kappa H_{23}^L \\ 0 & 0 & (1-\kappa)H_{11}^R & (1-\kappa)H_{12}^R & (1-\kappa)H_{13}^R \\ 0 & 0 & (1-\kappa)H_{21}^R & (1-\kappa)H_{22}^R & (1-\kappa)H_{23}^R \\ \kappa H_{31}^L & \kappa H_{32}^L & (1-\kappa)H_{31}^R & (1-\kappa)H_{32}^R & \kappa H_{33}^L + (1-\kappa)H_{33}^R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{d}_1^L \\ \ddot{\theta}_2^L \\ \ddot{d}_1^R \\ \ddot{\theta}_2^R \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \kappa C_{11}^L & \kappa C_{12}^L & 0 & 0 & \kappa C_{13}^L \\ \kappa C_{21}^L & \kappa C_{22}^L & 0 & 0 & \kappa C_{23}^L \\ 0 & 0 & (1-\kappa)C_{11}^R & (1-\kappa)C_{12}^R & (1-\kappa)C_{13}^R \\ 0 & 0 & (1-\kappa)C_{21}^R & (1-\kappa)C_{22}^R & (1-\kappa)C_{23}^R \\ \kappa C_{31}^L & \kappa C_{32}^L & (1-\kappa)C_{31}^R & (1-\kappa)C_{32}^R & \kappa C_{33}^L + (1-\kappa)C_{33}^R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{d}_1^L \\ \dot{\theta}_2^L \\ \dot{d}_1^R \\ \dot{\theta}_2^R \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \kappa G_1^L \\ \kappa G_2^L \\ (1-\kappa)G_1^R \\ (1-\kappa)G_2^R \\ \kappa G_3^L + (1-\kappa)G_3^R \end{bmatrix}$$

با G_i, C_{ii}, H_{ii} بترتیب عناصر ماتریسهای G, C, H بوده که برای مجموعه "پای تکیه گاه و بالاتنه" بدست آمده است.

۴- اصلاح حرکت بالاتنه ربات با جابجایی نقطه ممان صفر

همانطور که در بخشهای قبل اشاره شد از حرکت بالاتنه ربات بمنظور پایداری آن استفاده می‌گردد. به عبارت دیگر، با معلوم بودن حرکت پایین تنه ربات (بخش ۲)، حرکت بالاتنه باید بگونه‌ای اصلاح شود تا نقطه ممان صفر (محل عکس العمل نیروهای خارجی وارد بر ربات) همواره در موقعیت مناسب قرار داشته باشد. موقعیتهای مطلوب نقطه ممان صفر در وضعیتهای مختلف ربات عبارتند از [۱۰]:

الف- حرکت بر روی دوپا: نقطه ممان صفر از کف پای عقب (که در گام قبلی تکیه‌گاه بوده‌است) حرکت کرده و در کف پای جلو (که در این گام پای تکیه‌گاه محسوب می‌شود) قرار گیرد.

ب- حرکت بر روی یک پا: نقطه ممان صفر همواره در کف پای تکیه‌گاه قرار گیرد.

نقطه ممان صفر، که در آن مجموع گشتاورهای موثر برابر صفر است، را می‌توان با استفاده از رابطه زیر بدست آورد [۱۱] (از آنجایی که حرکت ربات موردنظر، حرکت صفحه‌ای می‌باشد تنها موقعیت x_{ZMP} حائز اهمیت می‌باشد):

$$x_{ZMP} = \frac{\sum (y_{gi} F_{ix} - x_{gi} F_{iy}) + \sum M_{iz}}{\sum F_{iy}} \quad (20)$$

که در آن موقعیت مرکز جرم هریک از میله‌ها نسبت به دستگاه مرجع XY و ω_i نیز سرعت زاویه‌ای آنها می‌باشد. نیروی اینرسی $F_i=[F_{ix}, F_{iy}]$ و گشتاور $M_i=[M_{iz}]$ موثر بر مرکز جرم هریک از اجزاء از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$F_i = -m_i \ddot{r}_{gi} \quad (21)$$

$$M_i = -I_i \dot{\omega}_i - \omega_i \times I_i \omega_i \quad (22)$$

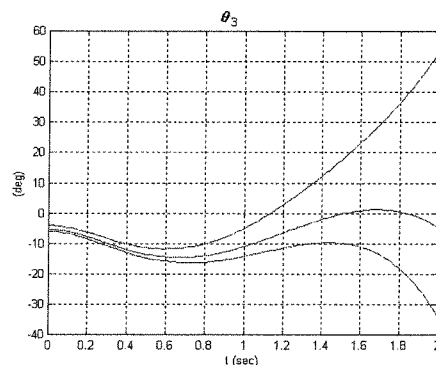
با مشخص بودن نحوه حرکت پایین تنه و همچنین موقعیتهای مطلوب نقطه ممان صفر، تنها مجهولات رابطه (۲۰) وضعیت بالاتنه ربات $(\theta_3, \dot{\theta}_3, \ddot{\theta}_3)$ می‌باشند. بمنظور حل عددی معادله (۲۰)، از روابط تفاضل متناهی برای $\dot{\theta}_3, \ddot{\theta}_3$ استفاده گردیده است:

$$\dot{\theta}(k) = \frac{\theta(k+1) - \theta(k-1)}{2(\Delta t)} \quad (23)$$

$$\ddot{\theta}(k) = \frac{\theta(k+1) - 2\theta(k) + \theta(k-1)}{(\Delta t)^2} \quad (24)$$

با فرض اینکه سرعت زاویه‌ای $\dot{\theta}_3$ در لحظه شروع برابر صفر بوده و با در نظر گرفتن یک مقدار اولیه برای θ_3 معادله حاصله در کل مسیر حل شده، حرکت بالاتنه مشخص می‌گردد.

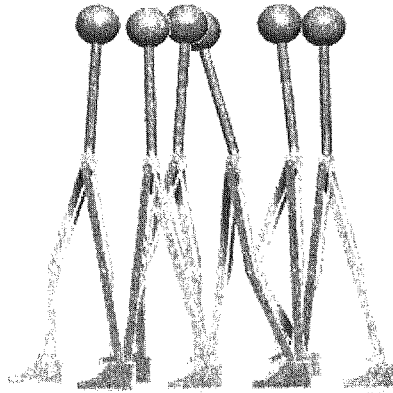
منحنی زاویه θ_3 برای سه مقدار شروع در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به اینکه گام برداشتن حرکت تناوبی بوده و تکرار می‌گردد، بهترین جواب برای θ_3 جوابی است که مقدار ابتدا و انتهای آن تا حد ممکن بهم نزدیک باشد. بنابراین در شکل ۹ منحنی وسط، یعنی $(\theta_3 = -6)$ ، حرکتی مطلوب برای بالاتنه ربات محسوب می‌گردد.



شکل (۹) منحنی زاویه θ_3 در یک گام حرکت برای سه زاویه شروع مختلف (۴- و ۶- و ۷- درجه). (منحنی مطلوب با توجه به یکسان بودن نقطه شروع و انتهای حرکت، منحنی وسط می‌باشد)

۵- شبیه سازی

به منظور بررسی عملکرد ربات طراحی شده و معادلات فرموله شده، مدل سه بعدی ربات در نرم افزار (Visual Nastran Desktop (VND) ایجاد شده است (شکل ۱۰). برای حرکت دادن مدل ساخته شده، معادلات حرکت ورودی‌های مربوط به درجات آزادی به نرم افزار (VND) ارسال شده و حرکت‌های ربات مشاهده شده‌اند. اجرای کامپیوتری نشان‌دهنده پایداری و تناسب حرکت می‌باشد. همچنین مکانیزم جدید کف پای ربات در حرکت مدل، مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاکی از عملکرد صحیح مکانیزم می‌باشد.



شکل (۱۰) شبیه سازی کامپیوتری در نرم افزار VND.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا یک ربات دوپای پنج درجه آزادی ارائه شده است. بارزترین مزیت در مدل طراحی شده، استفاده از مکانیزمی جدید در کف پای ربات بوده که شبیه سازی حرکت بر روی پنجه و پاشنه را ممکن می سازد. در ادامه پس از استخراج معادلات سینماتیکی حاکم بر ربات، منحنی متغیرهای مفصلی ربات در یک گام از حرکت نشان داده شده است. همچنین معادلات دینامیکی ربات در وضعیتهای مختلف ارائه شده و با توجه به مفهوم نقطه ممان صفر در پایداری حرکت، دینامیک بالاتنه به منظور حفظ تعادل ربات اصلاح گردیده است. از آنجا که حرکت بالاتنه براساس حرکت پایین تنه تعیین می گردد، محاسبه منحنی مسیر بالاتنه باید بصورت مداوم و در حین حرکت ربات اصلاح گردد. زاویه شروع حرکت بالاتنه با توجه به یکسان بودن نقطه شروع و انتهای حرکت انتخاب شده است.

همچنین بمنظور شبیه سازی مجازی حرکت ربات و بررسی درستی موارد فوق از نرم افزار شبیه سازی دینامیکی Visual Nastran Desktop استفاده گردیده است. نتایج حاصل از شبیه سازی حاکی از عملکرد صحیح و حرکات موزون ربات می باشد.

مراجع

- [1] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla, and D. Stokic, "Biped Locomotion: Dynamics, Stability, Control, and Applications", Springer-Verlag, Berlin, (1990).
- [2] T. McGeer, "Passive Dynamic Walking", International Journal of Robotics Research, vol. 9, no. 2, pp. 62-68, (1990).
- [3] J. Yamaguchi, A. Takanishi, and I. Kato, "Development of a Biped Walking Robot Compensating for Three-Axis Moment By Trunk Motion", IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 561-566, (1993).
- [4] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka, "The Development of Honda Humanoid Robot", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1321-1326, (1998).
- [5] C. Shih, "Analysis of the Dynamics of a Biped Robot with Seven Degrees of Freedom", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3008-3013, (1996).
- [6] K. Mitobe, G. Capi, and Y. Nasu, "Control of Walking Robots Based on Manipulation of the Zero Moment Point", Robotica, vol. 18, pp. 651-657, (2000).
- [7] F. Najafi, A. Bagheri, and R. Farrokhi, "Design and Simulation Analysis of a New Planar Biped Robot", 6th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR2003), Italy, 17-19 September, pp. 551-557, (2003).
- [8] J. Pratt, "Exploiting Inherent Robustness and Natural Dynamics in the Control of Bipedal Walking Robots", PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, (2000).
- [9] J. Pratt, C. Chew, A. Torres, P. Dilworth, and G. Pratt, "Virtual Model Control: An Intuitive Approach for Bipedal Locomotion", International Journal of Robotics Research, vol. 20, no. 2, pp. 129-143, (2001).
- [10] G. Tan and P. Zhang, "A New Method for Key Dynamic Parameters of Dynamic Walking of Bipedal Robots", IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems, pp. 1292-1296, (1997).
- [11] Y. Zhu, C. Shih, and W. Gruver, "Optimization of the Biped Robot Trajectory", IEEE International Conference on Systems, pp. 899-903, (1991).