

SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی



مقاله نویسی علوم انسانی



اصول تنظیم قراردادها



آموزش مهارت های کاربردی در تدوین و چاپ مقاله

تولید مسیر حرکت راه رفتن و بالارفتن از پله برای یک ربات دوپایی به صورت آنلاین: استفاده از معادله‌ی اندازه حرکت زاویه‌ای

حسین احسانی* و مصطفی رستمی

گروه بیومکانیک دانشکده مهندسی پزشکی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

E-mail: Ehsani_hossein@yahoo.com

* نویسنده مسئول مکاتبات

چکیده

ربات‌های دوپایی باید قادر باشند در محیط‌هایی که دینامیک‌شان برای آنها از پیش تعیین شده نیست به طور مناسبی حرکت کنند و در برابر اغتشاشات خارجی واکنش‌های مناسبی از خود بروز دهند. در این مقاله قصد داریم روشی جدید برای کنترل حرکت ربات‌های دوپایی به صورت آنلاین، ارائه کنیم. در این روش با استفاده از معادله‌ی اندازه حرکت زاویه‌ای حرکت ربات و مختصات مفصل هیپ، ربات را کنترل می‌کنیم. مدلی که در این تحقیق این روش را بر روی آن مورد بررسی قرار می‌دهیم، شامل ۷ قسمت می‌باشد. فاز دو تکیه‌گاهی را نیز به صورت آنی در نظر می‌گیریم. برای بررسی میزان صحت این روش، از شبیه سازی کامپیوتری استفاده خواهیم کرد.

واژه‌های کلیدی: " ربات دوپایی، مسیر حرکت آنلاین، معادله ی اندازه حرکت زاویه ای "

۱- مقدمه

از پاهای خود با زمین در ارتباط می باشند. این موضوع امکان ناپایداری ربات را تا حد بسیار زیادی بالا می برد. مسئله‌ی ناپایداری ربات‌های داری پا زمانی که توجه خود را به یک ربات دوپایی که قصد راه رفتن دارد، معطوف می کنیم، جدی تر به نظر می رسد. علت این موضوع در آن است که در طول فاز تک تکیه گاهی (SSP) راه رفتن، پایداری ربات باید تنها با استفاده از یکی از دوپا تأمین شود. علاوه بر این یک ربات دوپایی که قصد تقلید از حرکات انسان را دارد، باید بتواند در مقابل اغتشاشات خارجی به نحو مطلوبی واکنش نشان دهد.

فعالیت‌ها و پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی تولید حرکت برای ربات‌های دوپایی را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد [7]:

الف- تولید مسیر حرکت به صورت آفلاین

ب. تولید مسیر حرکت به صورت آنلاین یا بلادرنگ

برتری ربات‌های پادار در مقایسه با ربات‌های چرخ‌دار در طول سالیان دراز کار محققان این دانش، به وضوح روشن گردیده است. توانایی بالا در حرکت، امکان حضور در مناطق با شرایط محیطی نامناسب، مشابهت‌های انسانی و ... از جمله‌ی این مزیت‌ها به شمار می آیند [1].

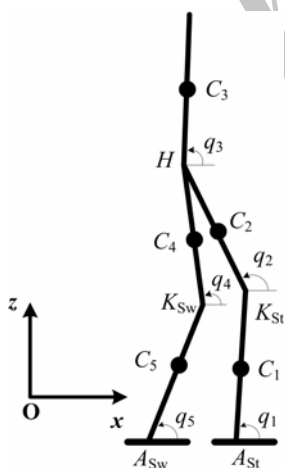
در دهه‌های اخیر پیشرفت‌های بسیاری در زمینه‌ی ربات‌های دارای پا حاصل شده است [6]-[2]. اما با وجود این پیشرفت‌ها، به سبب دشواری کنترل این سیستم‌ها، هنوز تولید ربات‌های دارای پا با حرکات مشابه حیوانات و انسان‌ها، در مراحل ابتدایی کار می باشد. تولید مسیر حرکت برای ربات‌های دارای پا، با آنچه در گذشته برای برنامه‌ریزی حرکت بازوهای مکانیکی صنعتی انجام می شد، بسیار متفاوت است. ربات‌های دارای پا در طول حرکت با استفاده

بسیاری از روش‌های تولید مسیر حرکت، از نقطه‌ی گشتاور صفر [21] و [23] به عنوان معیاری برای کنترل حرکت ربات استفاده می‌کنند. در سال‌های اخیر معیارهای متفاوت دیگری نیز ابداع شده است. از آن جمله می‌توان به کنترل حرکت ربات‌های دوپایی با استفاده از معادله‌ی اندازه حرکت زاویه‌ای ربات اشاره کرد [24]. در بیشتر این بررسی‌ها، کنترل حرکت ربات با استفاده از موقعیت کف پاها صورت می‌گیرد.

در این مقاله قصد داریم با استفاده از معادله‌ی اندازه حرکت زاویه‌ای دوپایی، مسیر حرکت راه رفتن و بالا رفتن از پله را به صورت آنلاین تولید کنیم. در این مقاله از موقعیت قرارگیری مفصل هیپ برای کنترل حرکت ربات استفاده خواهیم کرد. مزیت این نقطه نسبت به قوزک پا را در بخش ۱-۲ بیان خواهیم کرد.

۲- مدل‌سازی

مدل اصلی که در اینجا قصد داریم مسیر حرکت راه رفتن را برای آن تولید کنیم، در شکل ۱ نمایش داده شده است. این مدل دارای یک بالا تنه (عضو ۳)، دو ران (اعضای ۲ و ۴)، دو ساق (اعضای ۱ و ۳) و دو کف پا می‌باشد. از جرم و اینرسی کف پاها صرف نظر می‌کنیم.



شکل ۱: مدل ربات دوپایی. برای تعریف علائم به متن مراجعه کنید.

مفاصل پایایی که در فاز سکون (Stance) قرار دارد را با زیرنویس St و مفاصل پایایی که در حال حرکت تاب خوردن (Swing) می‌باشد را با زیرنویس Sw نمایش می‌دهیم. به

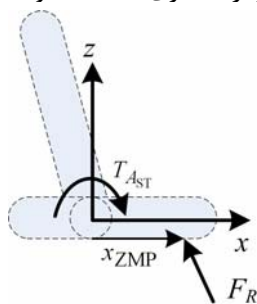
در روش اول، ابتدا مسیر حرکت مورد نظر با استفاده از تکنیک‌های مختلف نظیر بهینه سازی، ایجاد می‌شود. سپس این مسیر حرکت با اندکی تغییر در زمان حرکت، توسط ربات دنبال می‌شود. این در حالی است که در روش دوم، تولید مسیر حرکت و کنترل آن به صورت هم زمان صورت می‌گیرد. در این روش، مسیر حرکت با توجه به بازخوردهای مختلفی که از وضعیت سیستم به دست می‌آید، ایجاد می‌شود.

از آنجا که در روش اول، زمان مورد نیاز برای محاسبات معیار چندان مهمی نمی‌باشد، روش‌های عددی بهینه سازی مانند برنامه‌ریزی مربعی، برنامه‌ریزی غیرخطی، برنامه‌ریزی دینامیک و... برای محاسبه‌ی مسیرهای حرکتی بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این روش‌ها معیارهایی مانند انرژی لازم برای راه اندازها [8]-[11]، انتگرال زمانی توان دوم گشتاورهای راه اندازها [12] و ... به عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. یکی دیگر از روش‌های بهینه سازی که استفاده از آن نسبتاً متداول است، اصل ماکزیمم پانتریاگین است [13] و [14]. مسئله‌ی بهینه سازی در این روش، به یک مسئله‌ی کنترل بهینه تبدیل می‌شود. یکی از اصلی‌ترین دلایل توجه به این روش در آن است که با استفاده از این روش می‌توانیم به صورت دقیق و مستقیم، محدودیت‌های ورودی‌های راه اندازها و نیروهای تماسی را در نظر بگیریم. اصلی‌ترین اشکال روش‌های بهینه‌سازی در آن است که برای به دست آوردن پاسخ بهینه لازم است که مدل ریاضی سیستم به صورت دقیق معلوم باشد. به عنوان مثال در صورتی که یکی از پارامترهای دینامیکی سیستم، مثل ممان اینرسی به طور دقیق معلوم نباشد، پاسخی که از محاسبات به دست می‌آید، به هیچ عنوان بهینه نخواهد بود. برای تولید مسیر حرکت به صورت آنلاین توجه به دو نکته بسیار ضروری است: ۱- حجم محاسبات و ۲- میزان استحکام ربات در برابر اغتشاشات خارجی. در سال‌های اخیر روش‌های متفاوتی برای رسیدن به این اهداف ابداع شده است. برخی از این روش‌ها بر مبنای مدل پاندول معکوس ۳ بعدی خطی [15] بنا نهاده شده‌اند [20]-[16]. این مدل‌ها از آنجا که از مدل بسیار ساده شده‌ای برای حرکت استفاده می‌کنند، در پارهای از موارد با مشکل روبه‌رو می‌شوند.

درجات آزادی سیستم از تعداد راه اندازهای فعال کمتر می‌شود. در چنین حالتی سیستم یک درجه‌ی غیرفعال دارد. چنین فرضی این امکان را به ما می‌دهد که بتوانیم ربات را به گونه‌ای کنترل کنیم که تعادل ربات به صورت دینامیک حفظ گردد. این مطلب در شکل ۲ با جزئیات بیشتری نمایش داده شده است. در صورتی که مبدأ مختصات را در مفصل قوزک پای تکیه گاه فرض کنیم، مختصه‌ی x نقطه‌ی گشتاور صفر، یعنی x_{ZMP} ، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$x_{ZMP} = \frac{T_{AST}}{F_{Rz}} \quad (3)$$

که در آن F_{Rz} مؤلفه‌ی نیروی عکس العمل زمین در راستای z و T_{AST} اندازه‌ی گشتاور راه انداز مفصل قوزک پای تکیه‌گاه می‌باشد. حال اگر مقدار این گشتاور صفر باشد، x_{ZMP} در مبدأ مختصات، یا به عبارت دیگر در مفصل قوزک پای تکیه‌گاه واقع می‌شود. به این ترتیب همواره در چندضلعی تکیه‌گاهی قرار می‌گیرد و ربات می‌تواند به صورت دینامیک تعادل خود را حفظ کند. در این رابطه در بخش ۳-۲ با تمرکز بیشتری صحبت خواهیم کرد.



شکل ۲: ارتباط میان مختصات نقطه‌ی گشتاور صفر، نیروی عکس العمل زمین و گشتاور وارد بر مفصل قوزک پا.

۲-۱- سینماتیک و دینامیک

در صورتی که برای کنترل ربات‌های دوپایی از تغییر محل قرارگیری کف پا استفاده کنیم، کنترل حرکت ربات در محیط‌هایی مانند آنچه در شکل ۳ نمایش داده شده است، با مشکل روبه‌رو می‌شود [26]. در چنین مکان‌هایی جابجایی ربات مکان‌های مشخصی می‌باشند و تغییر دلخواه این محل برای حفظ کنترل ربات ممکن نیست. یکی دیگر از راه‌های

عنوان مثال محل اتصال ران و ساق پای سکون (مفصل زانوی پای سکون) را با K_{St} نمایش می‌دهیم. مرکز جرم عضو i ام را نیز به صورت C_i نمایش می‌دهیم. محل قرارگیری این مراکز جرم را با استفاده از محل قرارگیری انتهای دیستال (Distal) هر یک از اعضا به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$A_{St}C_1 = \rho_1 l_1, K_{St}C_1 = \rho_2 l_1, HC_3 = \rho_3 l_3 \quad (1)$$

در این روابط، $l_i, i=1,2,3$ طول عضو i ام می‌باشد. $\rho_i, i=1,2,3$ ها نیز اعدادی مابین صفر و یک می‌باشند. با توجه به تقارن میان ویژگی‌های دینامیکی دوپایی، روابط مشابهی در مورد پای در حال تاب خوردن نیز به دست می‌آید. از آنجا که حرکت این دوپایی را تنها در صفحه‌ی ساجیتال (Sagittal) در نظر می‌گیریم، این ربات در فاز تک تکیه‌گاهی دارای پنج درجه‌ی آزادی خواهد بود. در فاز دو تکیه‌گاهی (DSP) به علت تشکیل یک زنجیره‌ی بسته میان اعضای اندام تحتانی، دو درجه‌ی آزادی به یکدیگر مرتبط می‌شوند و تعداد درجات آزادی سیستم به ۳ کاهش می‌یابد. در این بررسی، فاز دو تکیه‌گاهی را به صورت آنی در نظر می‌گیریم. با توجه به این فرض، سیستم بجز در فاز دو تکیه‌گاهی آنی، در طول حرکت دارای ۵ درجه‌ی آزادی می‌باشد. بردار درجات آزادی این سیستم را نیز به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5]^T \quad (2)$$

علاوه بر اینکه فاز دو تکیه‌گاهی را به صورت آنی در نظر می‌گیریم، از اثر برخورد پای در حال تاب خوردن با زمین و تغییر ناگهانی سرعت صرف نظر می‌کنیم.

برای حرکت این ربات دوپایی به شش راه انداز، که به ترتیب در مفاصل هیپ، زانو و قوزک قرار می‌گیرند، نیاز داریم. با توجه به آنکه گشتاور مورد نیاز در قوزک پای در حال تاب خوردن صفر می‌باشد، تنها پنج تا از این راه اندازها همزمان عمل می‌کنند.

یکی از فرض‌های اساسی مدل فوق، که در ادامه در رابطه با آن بیشتر صحبت خواهیم کرد، صفر فرض کردن گشتاور راه‌انداز مفصل قوزک پای تکیه‌گاه است. با این فرض، تعداد

به دست می‌آیند. حال با توجه به اینکه نقطه‌ی قوزک پای تکیه گاه را به صورت نقطه‌ای ساکن و بدون سرعت و شتاب در نظر می‌گیریم، می‌توانیم معادله‌ی نرخ اندازه حرکت زاویه‌ای را حول این نقطه بنویسیم:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{L}_{A_{St}} = \mathbf{A}_{St} \mathbf{C} \times M \mathbf{g} - \mathbf{T}_{A_{St}} \quad (۸)$$

در این رابطه، M جرم کل ربات و \mathbf{C} مکان مرکز جرم عمومی ربات می‌باشد. با صفر فرض کردن بردار گشتاور اعمالی در مفصل قوزک، یعنی $\mathbf{T}_{A_{St}}$ ، و انجام ضرب برداری سمت راست رابطه‌ی (۸) و جایگزینی (۷)، نتیجه‌ی زیر را به دست می‌آوریم:

$$\phi_1 \ddot{q}_3 + \dot{\phi}_1 \dot{q}_3 + \dot{\phi}_2 = -Mg(X_G - X_{A_{St}}) \quad (۸)$$

در این رابطه، X_G و $X_{A_{St}}$ به ترتیب مختصات x مرکز جرم عمومی سیستم و قوزک پای تکیه گاه می‌باشند. با توجه به اینکه مرکز مختصات را در نقطه‌ی A_{St} فرض کرده‌ایم، خواهیم داشت:

$$\phi_1 \ddot{q}_3 + \dot{\phi}_1 \dot{q}_3 + \dot{\phi}_2 = -Mg X_G \quad (۹)$$

معادله‌ی دیفرانسیل غیرخطی مرتبه دوم فوق در صورتی که مقادیر زوایای اندام تحتانی، یعنی q_1, q_2, q_4 و q_5 ، را در اختیار داشته باشیم، یا استفاده از روش‌های عددی، مانند روش رانگ-کوتا مرتبه‌ی چهارم، قابل حل است. حل عددی معادله‌ی دیفرانسیل (۹) بسیار وقت گیر است و در صورتی که بخواهیم مسیر حرکتی آنلاین را تولید کنیم، چندان مفید نمی‌باشد. در ادامه روشی برای تخمین پاسخ این معادله با استفاده از توابع چندجمله‌ای ارائه خواهیم داد.

۳- تولید مسیر حرکت

۳-۱- شرایط مرزی و شرایط میانی

یک چرخه‌ی راه رفتن شامل یک گام و دو قدم می‌باشد. در قدم اول یکی از پاها (برای مثال پای راست) نقش تکیه گاهی را دارد و پای مخالف (پای چپ) در فاز تاب خوردن قرار دارد. در قدم بعد (با توجه به آنی در نظر گرفتن فاز دو تکیه گاهی) نقش دو پا به صورت آنی تغییر می‌کند و پای سکون به فاز تاب خوردن می‌رود و پای دیگر نقش تکیه

کنترل حرکت ربات‌های دوپایی، استفاده از موقعیت مفصل هیپ می‌باشد [27]. در این مقاله با استفاده از این نقطه، حرکتی پایدار برای ربات به وجود می‌آوریم. موقعیت قرارگیری مراکز جرم هر یک از اعضاء ربات را می‌توانیم بر حسب بردار مکان هیپ بیان کنیم. به عنوان مثال در مورد عضو دوم داریم:

$$\mathbf{OC}_2 = [X_H, Y_H]^T - (1 - \rho_2) l_2 [\cos q_2, \sin q_2]^T \quad (۴)$$



شکل ۳: محدودیت مکانی برای حرکت یک ربات دوپایی. [26].

محور مختصات را در قوزک پای تکیه گاهی فرض می‌کنیم. حال معادله‌ی اندازه حرکت زاویه‌ای را حول این نقطه می‌نویسیم، خواهیم داشت:

$$\mathbf{L}_{A_{St}} = \sum_{i=1}^5 \left(\mathbf{A}_{St} \mathbf{C}_i \times m_i \frac{d}{dt} \mathbf{A}_{St} \mathbf{C}_i + I_i \dot{q}_i \mathbf{e}_y \right) \quad (۵)$$

در این رابطه \mathbf{e}_y بردار یکه در راستای محور y می‌باشد. I_i نیز ممان اینرسی عضو i ام می‌باشد. با توجه به اینکه بردار اندازه حرکت زاویه‌ای بر صفحه‌ی حرکت عمود می‌باشد، خواهیم داشت:

$$\mathbf{L}_{A_{St}} = L_{A_{St}} \mathbf{e}_y \quad (۶)$$

که در آن:

$$L_{A_{St}} = \phi_1 \dot{q}_3 + \phi_2 \quad (۷)$$

در این رابطه، ϕ_1 تابعی از موقعیت قرارگیری مفصل هیپ و q_3 می‌باشد. این در حالی است که تابع ϕ_2 تابعی مستقل از سرعت زاویه‌ای بالاتنه می‌باشد. مقادیر این توابع با جایگزین کردن روابط سینماتیکی حرکت در معادله‌ی (۵)

$$X_{A_{Sw}}(0) = -D_S \quad (14)$$

$$Y_{A_{Sw}}(0) = -h_S \quad (15)$$

با مشتقگیری از رابطه‌ی (۱۲) نسبت به زمان می‌توانیم سرعت‌های زاویه‌ای اولیه‌ی پای تکیه‌گاه را به دست آوریم. به روشی مشابه، با دو بار مشتقگیری از رابطه‌ی سینماتیکی (۱۲)، می‌توانیم مقادیر شتاب‌های زاویه‌ای اولیه را بدست آوریم:

$$\begin{cases} \ddot{X}_H(0) = -l_1 \sin q_1(0) \ddot{q}_1(0) - l_2 \sin q_2(0) \ddot{q}_2(0) \\ \quad - l_1 \cos q_1(0) \dot{q}_1^2(0) - l_2 \cos q_2(0) \dot{q}_2^2(0) \\ \ddot{Y}_H(0) = l_1 \cos q_1(0) \ddot{q}_1(0) + l_2 \cos q_2(0) \ddot{q}_2(0) \\ \quad - l_1 \sin q_1(0) \dot{q}_1^2(0) - l_2 \sin q_2(0) \dot{q}_2^2(0) \end{cases} \quad (16)$$

راه رفتن با یک سرعت افقی ثابت، مسیر حرکتی هموار را به وجود می‌آورد. در این مدل فرض می‌کنیم سرعت افقی مرکز جرم و هیپ برابر مقدار ثابتی باشد:

$$\dot{X}_G \equiv \dot{X}_H = \alpha \quad (17)$$

بنابراین مقدار شتاب افقی اولیه‌ی هیپ، $\ddot{X}_H(0)$ ، برابر صفر به دست می‌آید. چنین فرضی با مدل پاندول معکوس برای ربات‌های دوپایی در تضاد قرار دارد. در رابطه با $\ddot{Y}_H(0)$ در بخش ۳-۲ صحبت خواهیم کرد. روابطی مشابه برای شتاب‌های زاویه‌ای پای در فاز تاب خوردن به دست می‌آید. به منظور جلوگیری از برخورد ناگهانی پای در حال تاب خوردن با زمین یک شرط میانی اضافی برای توابع چندجمله‌ای بیان‌کننده‌ی مسیر حرکت در نظر می‌گیریم. این شرط اضافی را وضعیت ربات در زمان $t = T/2$ در نظر می‌گیریم. ارتفاع قوزک در حال تاب خوردن از زمین را در این زمان، برابر مقدار h_{mid} فرض می‌کنیم. به عبارت دیگر:

$$Y_{A_{Sw}}(T/2) = h_{mid} \quad (18)$$

در مورد مختصه‌ی x قوزک پای در حال تاب خوردن نیز، فرض می‌کنیم که در $t = T/2$ این پا به اندازه‌ی نصف کل مسافتی که در طول یک قدم طی می‌کند، حرکت کند:

$$X_{A_{Sw}}(T/2) = X_{A_{Sw}}(0) + D_S = 0 \quad (19)$$

با جایگذاری این مقادیر در رابطه‌ی (۱۲)، خواهیم داشت:

گاهی را به عهده می‌گیرد. بنابراین مقادیر زوایا، سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای اعضاء متناظر (برای مثال، ران‌های دو پا) در ابتدا و انتهای یک نیم چرخه با هم برابر خواهد بود. بنابراین اگر زمان یک چرخه‌ی راه رفتن را برابر $2T$ در نظر بگیریم، به عنوان نمونه، در مورد زوایای q_1 و q_5 خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} q_1(T) &= q_5(0), q_1(0) = q_5(T) \\ \dot{q}_1(T) &= \dot{q}_5(0), \dot{q}_1(0) = \dot{q}_5(T) \\ \ddot{q}_1(T) &= \ddot{q}_5(0), \ddot{q}_1(0) = \ddot{q}_5(T) \end{aligned} \quad (10)$$

در مورد زوایای q_2 و q_4 نیز روابط مشابهی را خواهیم داشت. در مورد بالاتنه نیز خواهیم داشت:

$$q_3(T) = q_3(0), \dot{q}_3(T) = \dot{q}_3(0), \ddot{q}_3(T) = \ddot{q}_3(0) \quad (11)$$

برای محاسبه‌ی مقادیر زوایای اندام تحتانی در ابتدای حرکت، از معادلات سینماتیکی حاکم بر سیستم استفاده می‌کنیم. با شروع از نقطه‌ی A_{St} و استفاده از سینماتیک سیستم خواهیم داشت:

$$\begin{cases} X_H = X_{A_{St}} + l_1 \cos q_1 + l_2 \cos q_2 \\ Y_H = Y_{A_{St}} + l_1 \sin q_1 + l_2 \sin q_2 \end{cases} \quad (12)$$

با توجه به آنکه مقادیر $X_{A_{St}}(0)$ و $Y_{A_{St}}(0)$ برابر صفر می‌باشند، می‌توانیم رابطه‌ی فوق را به صورت زیر بازنویسی کنیم:

$$\begin{cases} X_H(0) = l_1 \cos q_1(0) + l_2 \cos q_2(0) \\ Y_H(0) = l_1 \sin q_1(0) + l_2 \sin q_2(0) \end{cases} \quad (13)$$

مقدار $X_H(0)$ در ایجاد پایداری برای حرکت دوپایی نقشی بسیار کلیدی دارد. مقدار عددی این عبارت با توجه به موقعیت ربات و با استفاده از یک حدس اولیه و یک حلقه‌ی تکرار، به صورت آنلاین به دست می‌آید. بر خلاف $X_H(0)$ ، مقدار $Y_H(0)$ اثر کمتری در پایداری ربات دارد.

به طریقی مشابه، با شروع از پای در حال تاب خوردن می‌توانیم مقادیر اولیه‌ی زوایای پای دوم را نیز به دست آوریم. لازم به تذکر است که مقادیر اولیه‌ی $X_{A_{Sw}}(0)$ و $Y_{A_{Sw}}(0)$ صفر نمی‌باشند. در صورتی که طول و ارتفاع یک قدم را به ترتیب برابر D_S و h_S فرض کنیم، خواهیم داشت:

چندجمله‌ای از مرتبه‌ی ششم را برای درجات آزادی سیستم به دست آوریم. با جایگذاری این مقادیر در معادله‌ی دیفرانسیل (۹) و حل عددی آن، می‌توانیم حرکت بالاتنه را به دست آوریم. در ادامه روشی دیگر را برای تقریب و کنترل حرکت بالاتنه مورد بررسی قرار خواهیم داد.

۲-۳- تقریب حرکت بالاتنه

فرض می‌کنیم چندجمله‌ای $q_3^a(t)$ تقریبی از منحنی حرکت بالاتنه، یعنی $q_3(t)$ ، باشد:

$$q_3^a(t) \cong q_3(t) \quad (24)$$

تابع چندجمله‌ای $q_3^a(t)$ باید دارای شرایط مرزی مشابه $q_3(t)$ باشد تا حرکتی پایا و پیوسته را به وجود آورد. برای آنکه بتوانیم تقریبی مناسب برای $q_3(t)$ به دست آوریم، به مسئله به طور وارون نگاه می‌کنیم. به این ترتیب که شرایط مسئله را به گونه‌ای تغییر می‌دهیم که با تغییر در منحنی‌های مرجع پایین تنه و شرایط اولیه‌ی $q_3(t)$ ، تقریبی مناسب برای $q_3^a(t)$ باشد.

با دو بار انتگرالگیری از رابطه‌ی (۵) نسبت به زمان و انجام پاره‌ای محاسبات ریاضی، خواهیم داشت:

$$\int_0^T L_{A_{St}}(t) dt - L_{A_{St}}(0)T = -Mg \int_0^T (T-t) X_G dt \quad (25)$$

حال با جایگذاری رابطه‌ی (۷) در سمت چپ معادله‌ی (۲۵) و حل آن بر حسب $\dot{q}_3(0)$ خواهیم داشت:

$$\dot{q}_3(0) = \frac{Mg}{T\phi_1(0)} \int_0^T (T-t) X_G dt - \frac{\phi_2(0)}{\phi_1(0)} + \frac{1}{T\phi_1(0)} \int_0^T \phi_2 dt + \frac{1}{T\phi_1(0)} \int_0^T \phi_1 \dot{q}_3 dt \quad (26)$$

برای محاسبه‌ی تقریب بالاتنه، از رابطه‌ی فوق استفاده می‌کنیم. با توجه به آنکه سمت راست این رابطه نیز شامل $\dot{q}_3(0)$ می‌باشد، این معادله یک رابطه‌ی بازگشتی است. بنابراین با استفاده از یک حدس اولیه و طی عملیاتی تکراری، می‌توانیم مقدار تقریبی $\dot{q}_3^a(0)$ را به دست آوریم. با توجه به شرایط مرزی گفته شده در (۱۰)، این مقدار باید با $\dot{q}_3^a(T)$ برابر باشد. مقدار $\dot{q}_3^a(0)$ نیز، که با $\dot{q}_3^a(T)$ برابر می‌باشد، در حدود ۹۰ درجه است. با استفاده از رابطه‌ی (۹)

$$\begin{cases} X_H\left(\frac{T}{2}\right) = l_1 \cos q_4\left(\frac{T}{2}\right) + l_2 \cos q_5\left(\frac{T}{2}\right) \\ Y_H\left(\frac{T}{2}\right) = h_{mid} + l_1 \sin q_4\left(\frac{T}{2}\right) + l_2 \sin q_5\left(\frac{T}{2}\right) \end{cases} \quad (20)$$

برای حل این دستگاه معادلات و محاسبه‌ی مقادیر $q_4(T/2)$ و $q_5(T/2)$ ، باید مقادیر $X_H(T/2)$ و $Y_H(T/2)$ را در اختیار داشته باشیم. برای به دست آوردن این مقادیر یکی از راه‌ها آن است که از دستگاه معادلات (۱۲) استفاده کنیم. اما زمانی که از توابع درونیاب مرتبه پنجم برای بیان مسیر حرکت ربات‌های دوطایی استفاده می‌کنیم، رفتاری غیرطبیعی به دست می‌آید. به همین جهت مرتبه‌ی توابع چندجمله‌ای بیان کننده‌ی زوایا و موقعیت هیپ را یک درجه افزایش می‌دهیم. برای این کار باید مقادیر $X_H(T/2)$ و $Y_H(T/2)$ را به طریقی جز آنچه گفته شد به دست آوریم. در رابطه با $X_H(T/2)$ ، با توجه به آنکه سرعت حرکت هیپ را ثابت فرض کردیم، خواهیم داشت:

$$X_H\left(\frac{T}{2}\right) = X_H(0) + \frac{D_S}{2} \quad (21)$$

اما محاسبه‌ی مقدار $Y_H(T/2)$ کمی دشوارتر است. با کمی عملیات ریاضی می‌توان ثابت کرد که رابطه‌ی زیر در مورد مقدار مختصه‌ی y هیپ در زمان $t = T/2$ برقرار است:

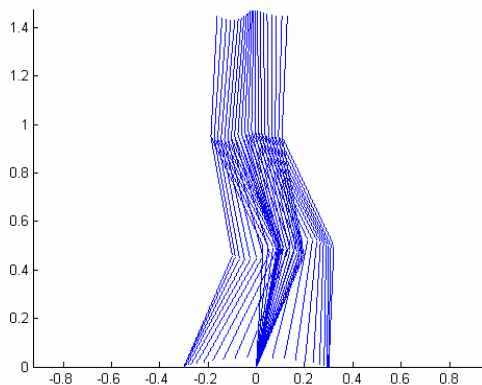
$$Y_H\left(\frac{T}{2}\right) = Y_H(0) + \frac{h_S}{2} + T^2 \left[\frac{1}{96} \ddot{Y}_H(0) - \frac{1}{24} \ddot{Y}_H\left(\frac{T}{2}\right) \right] \quad (22)$$

برای محاسبه‌ی مقدار $\ddot{Y}_H(0)$ ابتدا یک حدس اولیه را در نظر می‌گیریم و در ادامه با استفاده از یک حلقه‌ی تکرار مقدار بهینه‌ی این پارمتر را محاسبه می‌کنیم. با توجه به این مطلب تمام مقادیر سمت راست رابطه‌ی فوق، بجز $\ddot{Y}_H(T/2)$ معلوم می‌باشند. برای این مقدار نیز، فرض می‌کنیم رابطه‌ی زیر برقرار باشد:

$$\ddot{Y}_H\left(\frac{T}{2}\right) = \frac{\ddot{Y}_H(0)}{2} \quad (23)$$

حال با در اختیار داشتن مقادیر $X_H(T/2)$ و $Y_H(T/2)$ می‌توانیم مقادیر زوایای پای تکیه گاه و پای سوئینگ را محاسبه کنیم. با توجه به شرایط مرزی و میانی فوق می‌توانیم توابعی

واسط گرافیکی کاربر (GUI) طراحی می‌کنیم. این واسط گرافیکی، چهار ورودی را از کاربر گرفته و با توجه به این ورودی‌ها حرکت را تولید می‌کند. این ورودی‌ها، طول گام (D_S)، ارتفاع گام (h_S)، سرعت افقی هیپ (α) و بیشترین ارتفاع قوزک پا از زمین (β) می‌باشند. نتیجه‌ی حاصل از شبیه سازی حرکت راه رفتن با استفاده از این نرم‌افزار در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۳: نتایج حاصل از شبیه سازی حرکت ربات.

از آنجا که منحنی مرجع برای حرکت بالاتنه‌ی ربات را با استفاده از حل عددی معادله‌ی دیفرانسیل (۹) به دست نیاوردیم، فرض صفر بودن گشتاور راه انداز مفصل قوزک پای تکیه‌گاه به صورت ۱۰۰٪ محقق نمی‌شود. مقدار گشتاور راه انداز این مفصل در صورتی که بخواهیم دوپایی از مسیرهای حرکت به دست آمده از تقریب پیروی کند، در شکل ۴ نمایش داده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

موقعیت قرارگیری نقطه‌ی گشتاور صفر، نسبت به قوزک پا در شکل ۵ نمایش داده شده است. بیشترین فاصله‌ی خروج این نقطه از قوزک پا در $t = T/2$ با مقداری در حدود ۵ سانتی‌متر می‌باشد. بنابراین اگر از روش فوق برای کنترل حرکت یک ربات دوپایی با کف پایی در حدود ۱۰ سانتی‌متر استفاده کنیم، یقیناً تعادل حرکت ربات حفظ می‌گردد. با استفاده از روش فوق می‌توانیم مسیرهای حرکت راه رفتن و بالارفتن از پله را به صورت آنلاین برای ربات‌های دوپایی تولید کنیم. با توجه به اینکه این روش از معادله‌ی اندازه

نیز می‌توانیم مقادیر $\ddot{q}_3^a(0) = \ddot{q}_3^a(T)$ را محاسبه کنیم. با توجه به این شرایط، می‌توانیم یک چندجمله‌ای از مرتبه‌ی پنجم را به عنوان تقریب $q_3(t)$ به دست آوریم. این تقریب چندان مناسب نمی‌باشد. این تقریب نامناسب باعث می‌شود مقدار گشتاور راه انداز مورد نیاز قوزک پای تکیه‌گاه به مقدار قابل توجهی از صفر فاصله بگیرد. این موضوع احتمال خروج ZMP از چندضلعی تکیه‌گاهی و در نتیجه ناپایداری را افزایش می‌دهد. به همین جهت مرتبه‌ی چندجمله‌ای تقریب را با اضافه کردن دو شرط دیگر به ۷ افزایش می‌دهیم. این شرایط که مقادیر $\ddot{q}_3^a(0)$ و $\ddot{q}_3^a(T)$ می‌باشند با مشتقگیری از رابطه‌ی (۹) به دست می‌آیند. با استفاده از معادله‌ی اندازه حرکت زاویه‌ای ربات می‌توان نشان داد در صورتی که مقدار تغییر در زاویه‌ی بالاتنه در طول یک نیم سیکل $(\Delta q_3 = q_3(T) - q_3(0))$ ، برابر صفر باشد، تغییرات سرعت زاویه‌ای بالاتنه ($\Delta \dot{q}_3$) در صورتی برابر صفر به دست می‌آید که رابطه‌ی زیر برقرار باشد:

$$-g \int_0^T X_G^a dt = D_S \dot{X}_G(0) - h_S \dot{X}_G(0) \quad (27)$$

بالانویس a در X_G^a بیانگر آن است که برای محاسبه‌ی مقدار این عبارت از چندجمله‌ای تقریبی استفاده می‌کنیم. مشابه این رابطه را می‌توان برای شتاب زاویه‌ای بالاتنه نیز به دست آورد. در صورتی که مقادیر Δq_3 و $\Delta \dot{q}_3$ برابر صفر باشند، آنگاه رابطه‌ی $\Delta \dot{q}_3 = 0$ در صورتی برابر صفر به دست می‌آید که رابطه‌ی زیر برقرار باشد:

$$D_S [\ddot{Y}_G(0) + g] - h_S \ddot{X}_G(0) = 0 \quad (28)$$

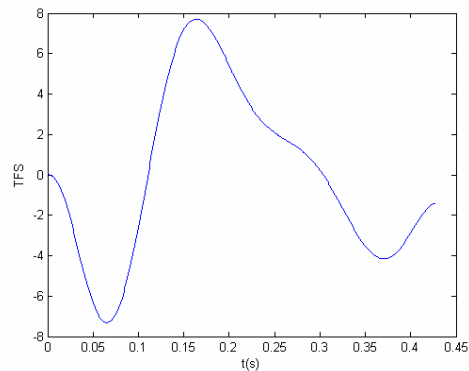
با تغییر در مقادیر $X_H(0)$ و $\ddot{Y}_H(0)$ می‌توانیم روابط (۲۷) و (۲۸) را برقرار سازیم. ابتدا برای این مقادیر حدس‌های اولیه را در نظر می‌گیریم. سپس با استفاده از عملیات تکراری محاسبات را تا جایی ادامه می‌دهیم که همگرایی مورد نظر به دست آید.

۴- شبیه سازی

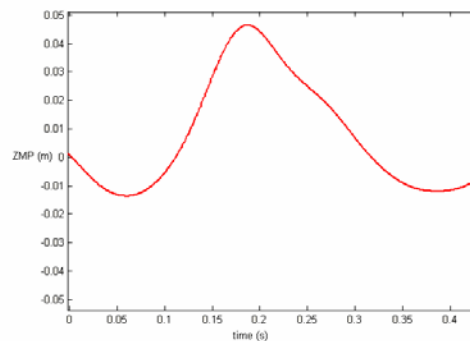
برای شبیه‌سازی حرکت حاصل از روش فوق، از نرم‌افزار MATLAB استفاده می‌کنیم. به همین منظور، ابتدا یک

- Robotica vol. 10, pp. 165-172, 1992.
- [8] G. Cabodevilla, N. Chaillet, and G. Abba, "Energy minimized gait for a biped robot", Proceedings Fachgespräch Autonomie Mobile Systemer, pp. 90-99, 1995.
- [9] C. Chevallereau, and Y. Aoustin, "Optimal running trajectories for a biped", Proceedings 2nd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR '99), Professional Engineering Publishing, pp. 559-570, 1999.
- [10] K. Ono, and R. Liu, "Optimal biped walking locomotion solved by trajectory planning method", Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol. 124, pp. 554-565, 2000.
- [11] T. Saidouni, and G. Bessonnet, "Generating globally optimized sagittal gait cycles of a biped robot", Robotica vol. 21, pp. 199-210, 2003.
- [12] M. Rostami, and G. Bessonnet, "Sagittal gait of a biped robot during the single support phase. part II: Optimal motion", Robotica, vol.19, pp. 241-253, 2001.
- [13] M. Nikkhah, M. Rostami, and F. Towhidkhal, "Sagittal optimal gait of biped robot during double support phase (DSP)", Proc. 2nd International Conf. on Mechatronics and Information Technology (ICMIT 2003), Jecheon, Korea, pp. 225-230, 2003.
- [14] S. Kajita, and K. Tani, "Study of dynamic biped locomotion on rugged-terrain derivation and application of the linear inverted pendulum mode", Proc. 1991 IEEE International Conf. on Robotics and Automation, Sacramento, California, USA, pp. 1405-1411, 1991.
- [15] S. Kajita, O. Matsumoto, and M. Saigo, "Real-time 3D walking pattern generation for a biped robot with telescopic legs", Proc. of the 2001 IEEE International Conf. on Robotics and Automation, Seoul, Korea, pp. 2299-2306, 2001.
- [16] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "A Realtime Pattern Generator for Biped Walking", Proc. 2002 IEEE International Conf. on Robotics and Automation, Washington, DC, pp. 31-37, 2002.
- [17] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point", Proc. 2003 IEEE International Conf. on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, pp 1620-1626, 2003.
- [18] J. Park, and H. Chung, "ZMP compensation by on-line trajectory generation for biped robots", Proc. of IEEE Conf. on Systems, Man and Cybernetics (SMC'99), Tokyo, Japan, pp. 960-965 (IV), 1999.
- [19] J. Park, and K. Kim, "Biped robot walking using gravity-compensated inverted pendulum mode and computed torque control, Proc. of the 1998 IEEE International Conf. on Robotics and Automation, pp. 3528-3533, 1998.
- [20] M. B. Popovic, A. Goswami and H. Herr, "Ground Reference Points in Legged Locomotion: Definitions, Biological Trajectories and Control Implications", The International Journal of Robotics Research Vol. 24, No. 12, pp. 1013-1032, December 2005.
- [21] P. Sardain, and G. Bessonnet, "Forces acting on a biped robot. Center of pressure-zero moment point", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Part A Vol. 34, No. 5 pp. 630-637, 2004.
- [22] K. Mitobe, G. Capi, and Y. Nasu, "A new control method for walking robots based on angular momentum", Mechatronics Vol. 14, pp. 163-174, 2004.
- [23] A. Hofmann, "Robust Execution of Bipedal Walking Tasks from Biomechanical Principles", Ph.D. Thesis, submitted to the Computer Science and Electrical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [24] Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, H. Arai, N. Koyachi, and K. Tanie, "Planning walking patterns for a biped robot", IEEE Transactions on Robotics and Automation Vol. 17, No. 3: 280-289, 2001.

حرکت زاویه‌ای ربات برای کنترل آن استفاده می‌کند، می‌توان با گسترش این روش، آن را برای کنترل ربات در برابر اغتشاشات خارجی گسترش داد.



شکل ۴: نمودار گشتاور راه انداز مفصل قوزک پای تکیه گاه در طول یک نیم سیکل راه رفتن.



شکل ۵: موقعیت نقطه‌ی گشتاور صفر.

مراجع

- [1] M. Raibert, "Trotting, pacing and bounding by a quadruped robot", Journal of Biomechanics Vol. 23, No 1, pp. 79-98, 1990.
- [2] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka, "The Development of Honda Humanoid Robot," Proc. of the 1998 ICRA, pp.1321-1326, 1998.
- [3] K. Nishiwaki, T. Sugihara, S. Kagami, F. Kanehiro, M. Inaba, and H. Inoue, "Design and Development of Research Platform for Perception-Action Integration in Humanoid Robot: H6," Proc. Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1559-1564, 2000.
- [4] H. Inoue, S. Tachi, Y. Nakamura, K. Hirai, et.al, "Overview of Humanoid Robotics Project Of METI," Proc. Int. Symp. Robotics, pp.1478-1482, 2001.
- [5] M. Gienger, et.al, "Toward the Design of a Biped Jogging Robot," Proc. of the 2001 ICRA, pp.4140-4145, 2001.
- [6] S. Kajita, T. Nagasaki, K. Yokoi, K. Kaneko and K. Tanie, "Running Pattern Generation for a Humanoid Robot", Proc. OF the 2002 IEEE Conf. on Robotics and Automation, Washington, DC, pp. 2755-2761, 2002.
- [7] P. Channon, S. Hopkins, and D. Pham, "Derivation of optimal walking motion for a bipedal walking robot",

SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی



مقاله نویسی علوم انسانی
تربیه آموزشی

مقاله نویسی علوم انسانی



اصول تنظیم قراردادها
تربیه آموزشی

اصول تنظیم قراردادها



آموزش مهارت های کاربردی در تدوین و چاپ مقاله
تربیه آموزشی

آموزش مهارت های کاربردی در تدوین و چاپ مقاله