بررسی مدل های کنترل حرکتی روبات های دوپا[1]

آرش آرامی | دانشجوی کارشناسی ارشد کنترل (دانشگاه تهران)

چکیـــــــــده

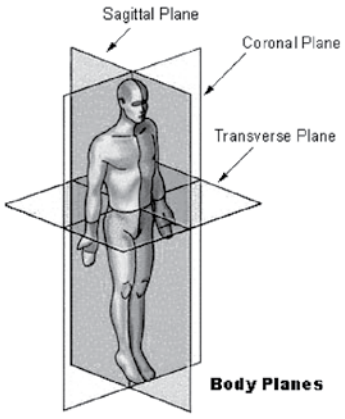
در این مقاله به بررسی مدل های کنترل حرکتی انسان از دیدگاه مهندسی و به منظور استفاده در روبات های دوپا پرداخته شده است. اهمیت به کارگیری این گونه روبات ها و ضرورت بررسی مدل های کنترل حرکتی از چند دیدگاه مختلف مورد بحث قرار گرفته است. سپس به معرفی سه روش طراحی پرداخته و جزئیات طراحی روش(Central Pattern Generator (CPG برای یک روبات انسان نما مرور می شود.

مقدمـــــــــه

تحقیقات در حوزه locomotion به صورت فعالی در حال دنبال شدن است و نگرش های مختلفی جهت رسیدن قوام در راه رفتن روبات ها انجام شده است. اما هنوز توانایی روبات ها برای راه رفتن در محیط های ناشناخته و یا دارای عدم قطعیت های اساسی ناچیز است. مساله راه رفتن دوپا مساله سختی به حساب می آید و در طی بیست سال اخیر حتی بهترین راه حل های پیشنهادی با توانایی های طبیعی راه رفتن فاصله زیادی دارند. اکثر روبات های کنونی با تغییر ناگهانی محیط شان در صورت عدم برنامه ریزی برای محیط جدید دچار مشکلات جدی می شوند. اولین دشواری مساله ناشی از محیط است. مشکل دوم ناشی از خود روبات است به این معنی که راه حل های به خصوص، تنها در مورد روبات های به خصوصی که این راه حل برایش طراحی شده است جواب گو می باشند. بیشتر نگرش ها نیاز به مدل دقیق روبات دارند و به طبع برای دیگر روبات ها حتی آن هایی که تا حدودی مشابه اند کارآیی ندارند. در این مقاله به معرفی چند روش برای کنترل حرکتی روبات های دوپا پرداخته می شود و همچنین جزئیات روش CPG که وابستگی کمی به مدل روبات ها دارد بررسی می گردد.

چرا باید به بررسی مدل های کنترل حرکتی موجودات زنده از جمله انسان پرداخت؟

سیر تکاملی طبیعت و حضور مکانیزم انتخاب طبیعی باعث به وجود آمدن موجوداتی با سخت افزار و روش های کنترلی شده که اکنون در حال زند گی در پهنه ی هستی می باشند. با اعتماد به طبیعت و مکانیزم های بهینه سازی موجود در آن (به خصوص انتخاب طبیعی) می توان ادعا کرد که این روش های حرکتی برای محیط های زندگی این موجودات به طور نسبی بهینه سازی شده اند. لذا منافعی که در راه رفتن دو پا در محیط های با تکیه گاه های گسسته و یا برای عبور از موانع وجود دارد باعث شده که راه رفتن و دویدن روبات های دو پا و به طور کلی بررسی این مدل های حرکتی یکی از جذابیت های تحقیقات کنونی باشد. همچنین تولید روبات های یاری دهنده ی انسان و حضور این روبات ها در محیط های زندگی بشر علاوه بر بهینگی نسبی این گونه راه رفتن باعث می شود که انسان ها با موجوداتی شبیه خود در تعامل باشند که خوگرفتن با این موجودات را آسان تر می سازد. همچنین بررسی مدل های کنترل حرکتی برای زیست شناسان، پزشکان و حرکت شناسان مهم بوده و برای توان بخشی افراد آسیب دیده، معلول و یا مسن کاربرد دارد. گروه دیگری که این بررسی ها برایشان اهمیت دارد اَنیماتورها می باشند که سعی در طراحی رفتارهای واقعی تر برای شخصیت های انیمیشنی دارند.



شکل۱: صفحه های مرجع

روش های بررسی کنترل حرکتی در انسان شامل مطالعات آناتومیکال از جمله Anthropometry همچنین مطالعات بیومکانیکی و نروفیزیولوژیکی می باشد. در مطالعات آناتومیکال در علوم جانورشناسی بدن را توسط سه صفحه مرجع اصلی (شکل۱) به نواحی مختلف تقسیم می کنند. این صفحه ها عبارت اند از : صفحه Sagittal که بدن را به دو ناحیه چپ و راست (sinister و dexter) تقسیم می کند. صفحه Coronal و یا جلویی که بدن را به دوناحیه پشتی و پیشین (dorsal و ventral) تقسیم می کند. صفحه افقی : که به صفحه محوری یا Cross-Section معروف است. این صفحه بدن را به دو ناحیه نزدیک به جمجمه و نزدیک به انتهایی (cranial and caudal) تقسیم می کند. همچنین آناتروفومتری به اندازه گیری جرم اجزای مختلف بدن، ممان های اینرسی مراکز دوران در مفاصل و غیره می پردازد. مطالعات بایومکانیکی شامل بررسی الگوهای نیرویی برای حرکت و همچنین مطالعه روی تبادل کار و انرژی در سیستم ماهیچه ای-حرکتی بدن و بررسی مدل های غیرخطی ماهیچه ها و ... می باشد. بررسی های نروفیزیولوژی نیز به مطالعه مسائلی از جمله چگونگی فعال کردن ماهیچه ها توسط سیستم عصبی می پردازد.

راه رفتن روبات ها را می توان از دیدگاه های مختلفی دسته بندی کرد:

از نقطـه نظـر میـزان پیچیدگـی حرکـت دوپـا؛

راه رفتن دوپای دو بعدی که حرکت تنها در Sagittal plane انجام می شود. راه رفتن دوپای سه بعدی که حرکت هم درون و هم خارج Sagittal plane صورت مـی گیرد. Minimalist biped که که تعداد کمـی درجه آزادی دارد و یا راه رفتن شبیه انسان که تعداد بسیار زیادی درجه آزادی دارد و ....

از نقطـه نظـر کنتـرل و طراحـی؛

بر حسـب این که روش کنترلی استاتیک باشد و یا دینامیک. همچنین راه رفتن به صـورت غیرفعال (passive) کنترل شـود و یا به صورت فعال (active) تحت کنترل قرار بگیرد. طراحی سیسـتم کنترلی وابسته به مدل ریاضی روبات باشد و یا تا حدی مستقل از آن طراحی شود.

لازم به ذکر است که روبات های عملی دوپا نیاز دارند به صورت عملکردی تطبیق پذیر و مقاوم باشند تا بتوانند در محیط های متنوع و مختلفی حرکت کرده در مقابل عدم قطعیت ها و اغتشاشـات احتمالی حساسیت زیادی از خود نشان ندهد. قابلیت حمل تنه و بار با وزن نامعلوم یا ضربه خوردن و برخورد با موانع را دارا باشند.

انـواع مختلـف راه رفتـن از دیـدگاه کنتـرل:

در گام نخسـت دو دسـته اساسـی راه رفتن static و dynamic را می توان از هم تمییز داد.

آ) راه رفتن استاتیک به معنی حرکت همواره پایدار می باشد. به بیان دیگر هنگامی می گوییم که راه رفتن استاتیک است که تصویر مرکز جرم (جاذبه) روبات بر روی زمیـن درون ناحیـه پایدار قرار بگیـرد. مثلا زمانی که روبات روی یک پا ایسـتاده باشـد تصویر مرکز جرم آن در کف پای تکیه گاه باشـد و یا هنگامی که هر دو پای روبات روی زمین اسـت مرکز جرم درون شـکل چند وجهی که توسط دو پا ایجاد شـده قرار بگیرد. این محدودیت ها بسـیار قوی هستند چنان که راه رفتن روبات را بسیار کند می کنند ولی در مقابل پیاده سازی آن تا حدودی آسان تر از روش های کنترلی دیگر می باشد. در ادبیات مربوطه این نوع راه رفتن به راه رفتن مرکز جاذبه (CoG) معروف است.

شکل۲: نمونه ای از روبات با راه رفتن passive

ب) در راه رفتن دینامیک محدودیت های روش قبل برداشـته شده اسـت و مرکز جاذبـه روبـات درون محـدوده پایداری روبات باقی نمی ماند. در طول راه رفتن، روبات در اکثر زمان ها در شرایط ناپایدار اسـتاتیک قرار دارد. بدیـن ترتیب تعادل روبـات در این روش نـه تنها به موقعیت روبـات بلکه بـه کل دینامیک سیسـتم بستگی دارد. این دینامیک شامل سرعت و اینرسـی هر قسـمت روبات می باشد. وارد شـدن دینامیک های سیستم مساله را پیچیده تر می کند و تعریف محدودیت های لازم در این حالت سـخت تر می شـود. ولی از طرف دیگر این نوع راه رفتن سـریعتر و کاراتر می باشـند. به عنوان نمونه این نوع راه رفتـن می تواند منجر به مکانیـزم های مربوط بـه دویدن در روبات ها گردد. در مسـاله دویدن محدوده ی پایداری به شدت کوچک می شود و دویدن ذاتاً دینامیک است.

پ) نوع سـومی از راه رفتن نیز وجود دارد که راه رفتن passive نامیده می شـود. این نوع راه رفتن یک دسـته از راه رفتن dynamic به حسـاب می آید که در آن روبـات به صورت خودکار و بـدون هیچ ورودی خارجی یا محرکی حرکت می کند. بـه عنوان مثال روبات هایی که بر اسـاس وزن و نـوع طراحی مکانیکی می توانند روی یک شیب حرکت کرده و قوام خوبی از خود نشان دهند. به بیان دیگر کل هنر کنترلی این روبات ها در طراحی دقیق مکانیکی شـان لحاظ شـده است (شکل۲). مطالعه روی passive walking باعث شده تا این نگرش که روباتها به واسطه طراحی مکانیکی خاص، دینامیک های طبیعی خودشان را دارند، بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. این دینامیک های طبیعی باید هنگامی که روبات را با یک سـری موتور کنترل می کنیـم(active control) مورد توجه قرار بگیرد، زیرا می تواند درناسازگاری با دینامیک های تحمیل شده توسط موتورها قرار به گیرد.

برای طراحی CPG اول باید نوسان سازهایش را بسازیم بدین منظور یک نگرش مهم ساختن مدلی است که تا اندازه ی ممکن به رفتار نوسان سازهای نرونی طبیعی شبیه باشد.

روش هـای کنترل locomotion روبات هـای دوپا در حالت راه رفتـن دینامیـک:

شکل ۳: هرم کنترلی robot locomotion

می توان هرم کنترلی این روبات ها را به سـه لایه تقسـیم نمود (شکل۳). دو لایه اول وظیفه تولید سـیگنال هـای مرجع را برای حرکت مفاصـل روبات دارند. لایه سـوم شامل کنترل کننده هایی اسـت که برای کنترل بازوهای روبات و بسیاری از مصـارف صنعتی به طور معمول به کار مـی روند. و تضمین کننده ی tracking سـیگنال های مرجع تولید شـده در دو لایه بالایی می باشـد. با توجه به متفاوت بـودن دو لایـه بالای هـرم کنترلی در مسـاله راه رفتن دو پا در ادامه به بررسـی متدهای مربوط به این دو لایه می پردازیم. اسـاس بسـیاری از روش هایی که به کار گرفته شـده یکی می باشـد، در نتیجه تمامی الگوریتم ها را می توان به سـه دسته تقسیم بندی کرد.

آ) متدهای بر اسـاس خط سـیر حرکت

در این روش ها یک سـری خط سـیر حرکتی از قبل تعیین شـده تولید می شـود.

سپس با اعمال معادلات دینامیکی روبات به این خط سیر ها امکان تست پایداری locomotion فراهم می شـود. این متدها هیـچ گونه متدولوژی برای طراحی کنترلر به ما نمی دهند. در مقابل تنها روش هایی هسـتند که استدلال های قدرت مندی برای وجود و یا عدم وجود پایداری در Locomotion به همراه دارند.

روش نقطـه‌ممـان صفـر (Zero Moment Point (ZMP) method)

ایـن روش یکی از موفق تریـن روش های حاصل از این نگرش بوده اسـت. این روش بـرای راه رفتن های دینامیک نیز به کار می رود در صورتی که در این روش مرکز جاذبه روبات مثل روش های اسـتاتیک راه رفتن تنظیم می شود. از معادلات دینامیکی سیسـتم برای محاسبه ZMP استفاده می شود. ZMP نقطه ای روی زمین اسـت که در آن نقطه ممان نیروهای اینرسـی و نیروهای وزنی (جاذبه ای) هیچ مولفه ای در راسـتای افقی نداشـته باشـند. این نقطه همچنین مرکز فشار نیز نامیده می شـود(CoP). بـرای این که locomotion روبـات پایدار بماند این نقطه بایسـتی همواره درون stability shape روبات قرار گیرد. پیاده سـازی این روش نتایج قابل قبولی به همراه داشـته و در بسـیاری از روبات های معروف مثـل روبات هـای Honda و همچنین مدل های جدیـد تر روبات های Sony مثل QRIO به کار رفته اسـت ولی مشـکل این است که پایداری تنها در شرایط کاملا شـناخته شده امکان پذیر اسـت. و نیاز به مدل ریاضی دقیق روبات دارد که در بسـیاری از روبات ها این مدل ها یا وجود ندارند و یا در صورت وجود کاملاً هم ارز سیسـتم واقعی روبات نمی باشـند. برای تعامل مناسب با اختلال ها و اغتشاش ها یک سیسـتم خارجی برای تنظیم کردن جهت ZMP لازم اسـت. معمولا این تصحیح با قابل تنظیم کردن حرکت لگن و پیچش های جزئی تنه انجام می شـود. برخی مزایا و معایب این روش به شرح زیر می باشد:

مـــــــــــزایـا:

– روشی خوش تعریف برای اثبات پایداری دارد.
– برای روبات های گران قیمت که نباید هرگز زمین بخورند مناسب می باشد.
– پیاده سازی شان روی روبات های واقعی نسبتاً ساده است.
– می توانند در روش های Dynamic Walking استفاده شوند.

معایـب:

– احتیاج به دانش کامل و جامعی از روبات دارند.
– برای رفع مشکلات ناشی از اغتشاشات و آشفتگیها نیاز به کنترهمزمان و مستقیم خارجی دارند.
– اگر یک قسمت از روبات آسیب ببیند بشکند و یا دچار تغییر شود هیچ راهی برای ادامه ی حرکت نداریم.
– ZMP ، پایداری را در شرایط خاص تثبیت می کند ولی راه کاری برای طراحی خط سیر ها به ما نمی دهد.
– برقراری ارتباط مناسب با دینامیک های طبیعی آسان نمی باشد و نیازمند ملاحظات فراوان است (این دینامیک ها ناشی از مکانیک و ساختار روبات می باشد).

ب) متدهـای ذهنـی

مشـکل اصلی در ZMP پیچیدگی معادلاتی اسـت که برای محاسـبه دینامیک های روبات به کار می رود. با توجه به پیچیدگی های ذکر شـده برای برنامه نویس روبات بسـیار سخت است که دید کلی درباره ی تمام رفتارهای روبات داشته باشد. ایـن موضوع یکـی از دلایل اصلی به کارگیری روش های تجربی برای فرار از این پیچیدگی ها و رسیدن به درک قابل حصول تری از روبات می باشد.

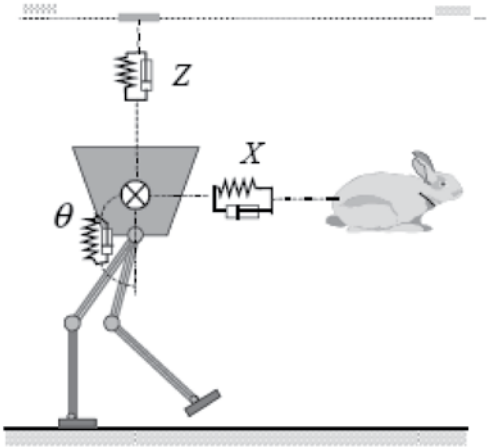
روش کنتـرل مـدل مجـازی(Virtual Model Control)

یکـی از موفق ترین روش ها در بین روش های تجربی روش VMC می باشـد. این روش توسـط Jerry E. Pratt در MIT leg lab. توسعه پیدا کرده است . در VMC، component هـای مجازی مثل فنر و دَمپر برای کنترل موقعیت، نقطه تعادل و سـرعت روبات به کار گرفته می شوند. در گام بعد نیروهای مجازی تولید شده توسط این المان ها به گشتاورهای فیزیکی روی مفصلهای روبات ترسیم می شـود. برای این کار مهم لازم اسـت تا ماتریس ژاکوبین مربوط به متغیرهای مفاصل در هر پیکربندی روبات محاسـبه شـود. این متد احتیـاج به دانش کامل و جامعی از دینامیک های روبات دارد. ولی طراحی کنترل کننده در این حالت سـاده می شـود. بدین ترتیب که در ابتدا تعدادی المان مجازی جای گذاری می شـوند تا وضعیت راسـت و اطمینان برای پایداری را ایجاد کنند. فنر باعث بهبود وضعیت در حالت ایسـتاده می شـود و دمپر از ایجاد نوسـان ها جلوگیری می کند. سپس یک مجموعه دیگر از المان های مجازی در نظر گرفته می شـود تا باعث حرکت روبات گردنند. به عنوان مثال اسـتفاده از مکانیزم دمپر و Docktrap bunny که در شـکل ۴ آورده شده است. به بیان دیگر مشـابه کنترل امپدانس در روباتیک، سعی می شـود تا سیگنال های کنترلی به گونه ای اعمال شوند که رفتارهای جرم–فنر–دمپری مطلوب در هر جهت در task space روبات مشاهده شود.

مشـکلی هنوز در مسـاله راه رفتن دو پا وجود دارد این اسـت که خود راه رفتن از بخش های مختلفی تشـکیل شـده (بخشـی که روی یک پا تکیه کرده و بخشی که هر دو پا روی زمین باشـد) که هر مرحله نیاز به المان های مجازی به خصوص خود دارد و المانهای مجازی مختلف مورد نیاز اسـت. همچنین نیاز به یک ماشـین حالت محدود (finite state machine) دارد که بخش های مختلف حرکت را به هم ربط دهد. روش VMC نسـبت به اغتشاشـات بیرونی حساسیت کمتری نسـبت به روش های مبتنی بر خط سـیر حرکتی دارد. مزایا و معایب استفاده از این روش عبارتند از:

مـــــــــــزایـا:

–یک متدولوژی واقعی برای توصیف کنترل کننده به ما می دهد.
– توصیف کنترل کننده به صورت قابل فهم در می آید.
– سختی مساله در پشت المان های مجازی مخفی می شود.
– در مقابل آشفتگیهای کوچک مقاوم است.
– نیاز به مدل دقیق محیط ندارد.
– عملکرد کنترل سریع بوده و می تواند به صورت همزمان و مستقیم اعمال گردد.



شکل۴ : روش VMC متود Docktrap bunny

معـــــــــایـب:

–نیاز به مدل دقیق روبات دارد. در صورت نا دقیق بودن مدل، ممکن است رفتارهای بسیار عجیب و به شدت غیرخطی از روبات دیده شود.
– به دلیل ویژگیهای منحصر به فرد در ماتریس ژاکوبین که ترسیم کننده نیروها از المانهای مجازی به گشتاور مفصل ها می باشد همواره ممکن نمی باشد.
– بـرای روبات میتواند مضر و یا حتی خطرناک باشـد چـون المانهای مجازی می توانند گشتاورهای بزرگی در مفصل های روبات ایجاد کنند.
– اسـتفاده از ماشـین حالت حدی باعث تغییرات ناگهانی در فازهای راه رفتن می گردد.

پ) متدهای بر اسـاس CPG

مشکل اصلی روش های قبلی نیاز اساسی این روش ها به مدل دقیقی از روبات بود.

بـه بیان دیگر برای هر روبات به خصوص نیاز بود که با تمام جزئیات این متد ها از نو طراحی و پیاده سازی شوند. روش CPG روشی است که برای کاهش وابستگی روش کنترلی به مدل روبات و در مقابل بر اساس رفتار روبات طراحی شده است.

مولد الگوی مرکزی و روش واکنشی (Central Pattern Generator and Reflex based method):

این روش به طور مستقیم با الهام گیری از طبیعت به دست آمده است و می توان آن را به دو بخش اساسی تقسیم بندی کرد: CPG هایی که تولید کننده حرکت ها به شمار می آیند. و دوم یک سیستم مبتنی بر رفلکس که می تواند از اطلاعات سنسوری بازخورد گرفته و وضعیت راه رفتن را تصحیح کند و همچنین می تواند با تغییرات غیر قابل پیش بینی در محیط تقابل کند.

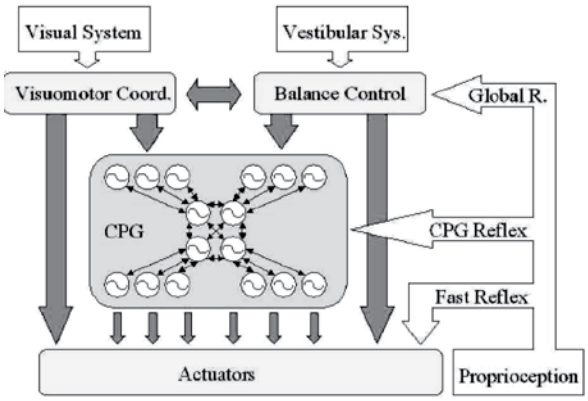
مطالعات نروفیزیولوژی روی حیوانات نشان می دهد که حرکات ریتمیک این موجودات با شبکه های ریتم دهنده ای که در سیستم عصبی این موجودات بوجود آمده (CENTERAL PATTERN GENERATOR) کنترل می شود . این CPGها یک ترکیب از نوسان سازهای عصبی کوپل شده به یک دیگر می باشد که توانایی تولید سیگنال های ریتمیک کنترلی را برای locomotion فراهم می آورند. CPG در بسیاری از مهره داران و بی مهره گان مشاهده شده است. ایده اساسی این است که مدل ریاضی CPG را توسعه دهند و سپس آن را در روبات ها برای ایجاد الگوی های حرکتی به کار بندند. بر اساس این نگرش مدل حرکتی برای مارماهی و همچنین سمندر و روباتهای آن ها پیشنهاد شده است.

هنوز وجود این CPG در انسان به اثبات نرسیده ولی مدارکی دال بر این که فُرمی از CPG در بسیاری از حرکات از جمله Locomotion انسان وجود دارد به دست آمده است. همچنین کارهایی که توسط CPG روی راه رفتن دوپا انجام شده اثباتی بر این مدعاست که CPG می تواند یک راه حل برای راه رفتن دو پا باشد.

رفلکس ها که برای بستن لوپ کنترل به کار می روند. لوپ سیستم CPG می تواند با اعمال رفلکس های ناشی از بازخورد هایی که جانور و یا روبات از محیط می گیرد بسته شود. یکی از مهمترین مدل های مطرح شده برای سیستم حلقه بسته (closed loop) رفلکس CPG مدل Ijspeert است که در شکل ۵ آورده شده است. مزایا و معایب این روش عبارتند از:

مزایا:

- احتیاج به مدل دقیق روبات ندارد.
- CPG بعد از یک perturbation به صورت نرم وسریع به حالت اولیه باز میگردد.
- این مدل تا به حال در شبیه سازی هایی برای locomotion در مهره داران به کار رفته و نتایج خوبی به همراه داشته است.
- به ورودی های کنترلی پیچیده نیاز نیست.



شکل۵: مدل کنترلی CPG و Reflex feedback

نوسان ساز های غیر خطی به کار رفته ساده و محلی هستند و باعث ایجاد کنترل سریع می شوند.کنترل به کار رفته به صورت متمرکز نبوده بلکه در تمام مفصل های روبات پخش شده است.

معایب:

- تعداد پارامترهایی که برای توصیف CPG لازم است بسیار زیاد است و با افزایش درجه آزادی روبات به صورت توانی زیاد می شوند.
- این که چه مدل ریاضی را برای طراحی CPG به کاربندیم مهم و تقریبا نامعلوم است.
- برای تعیین پارامترهای CPG راه کار مشخصی و واحدی وجود ندارد.
- تعیین بازخورد ها برای CPG و نحوه اعمال آن مشکل و تا حدودی هنوز به اندازه ی کافی آنالیز نشده و بهبود نیافته است.

ریاضیات حاکم بر نوسان سازهای غیر خطی CPG و نحوه ی Coupling:

برای طراحی CPG اول باید نوسان سازهایش را بسازیم بدین منظور یک نگرش مهم ساختن مدلی است که تا اندازه ی ممکن به رفتار نوسان سازهای نرونی طبیعی شبیه باشد. ولی به دلیل این که رفتار نرون ها پیچیده بوده و به اندازه کافی شناخته شده نیست و همچنین در صورت مدل کردن مشابه نرون–های طبیعی این سیستم ها بسیار پیچیده شده و قابل جایگذاری در روبات ها نیستند دانشمندان و مهندسان رویکرد دیگری را مد نظر قرار داده اند.

نوسان‌سازها:

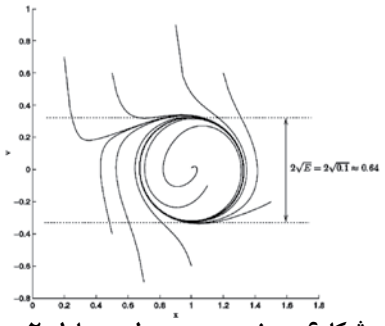
مدلی که Taga برای ایجاد نوسان سازهای راه رفتن دوپا به کار گرفت به صورت زیر تعریف شده است:

$$\tau \dot{v} = -x$$
$$\tau \dot{x} = v \qquad (۱)$$

این معادلات بیان کننده یک نوسان ساز هارمونیک با پریود است .

مشکلی اصلی موجود در این نوسان ساز نداشتن کنترل روی دامنه سیگنال می باشد. برای اینکه بتوان تغییرات دامنه را کنترل کرد (بر اساس آشفتگی دامنه می تواند ناگهان تغییر کند.) یک جمله به معادلات فوق اضافه می شود.

$$\tau \dot{v} = -\alpha \frac{x^2 + v^2 - E}{E} v - x \qquad (۲)$$
$$\tau \dot{x} = v$$



شکل۶: چرخه حدی مربوط به معادله ۲

ایده اصلی پشت این معادلات ثابت نگه داشتن انرژی نوسانات بوده است. E انرژی حقیقی نوسان ساز را نشان میدهد. برای نمایش انرژی پتانسیل سیستم و برای نمایش انرژی جنبشی و به بیان دیگر نمایان گر خطای انرژی سیستم است. در ضمن بزرگتر به معنی نوسان گر سریعتر می باشد که سریعا به چرخه ی حدی اش می رسد.

نوسان گر معرفی شده ویژگی های خوبی دارد از جمله آن که رفتار چرخه حدی (limit Cycle) آن تقریباً به صورت سیگنال سینوسی با دامنه و پریود می باشد.

برای اینکه که نوسان سازها حول نقاط خاصی نوسان کنند. با به کارگیری پارامترهای زیر limit cycle نشان داده شده در شکل ۶ به دست می آید:

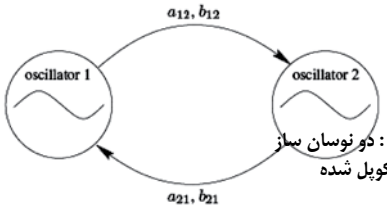
$$E = 0.1, x_0 = 1, \alpha = 1, \tau = (2\pi)^{-1}$$

با کوپل کردن نوسان گرها روابط حاکم بر آن ها به صورت زیر در می آید:

$$\tilde{x}_i = x_i - x_{0i}$$
$$\tau \dot{v}_i = -\alpha \frac{\tilde{x}_i^2 + v_i^2 - E}{E} v_i - x_i + \sum_j \frac{a_j \tilde{x}_j + b_j v_j}{\tilde{x}_j^2 + v_j^2} \qquad (۳)$$
$$\tau \dot{\tilde{x}}_i = v_i$$

به طوری که V وزن ارتباط بین نوسانگر i ام و j ام است.
نرمال سازی جمله جدید که توسط مخرج آن صورت گرفته لازم و ضروری است، زیرا انرژی سیگنال های گذرنده از هر اتصال، ربطی به میزان انرژی نوسانگر تاثیر گزارنده ندارد. این نرمالیزاسیون باعث محتاطانه تر شدن طرح کل سیستم و همچنین کم شدن حساسیت سیستم به تغییرات کوچک به وجود آمده در نوسانگرها می شود.

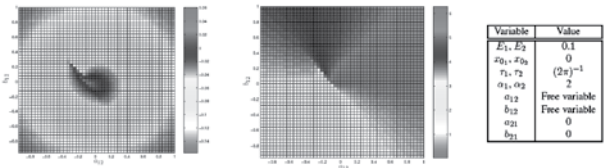
بررسی سیستمی با دو نوسانگر (شکل ۷):



شکل ۷ : دو نوسان ساز کوپل شده

با توجه به معادلات هر نوسانگر با تنظیم چهار پارامتر E و x_0 و a و τ تعریف و آماده کار می شود.
با اضافه شدن هر نوسانگر تعداد زیادی متغییر اضافه می شود (شامل ۴ متغییر مربوط به خود نوسان ساز و متغییرهای مربوط به وزن های ارتباطی بینشان)
نکته مهم دیگر در CPG ها این است که علاوه بر دامنه و فرکانس نوسان ها که به سادگی کنترل می شد نیاز است که اختلاف فاز بین هر نوسان گر نیز به درستی کنترل شود.
چند مثال از نحوه couple کردن دو نوسان ساز در زیر آورده شده است:
در صورتی که تنها یک نوسانگر روی دیگری تاثیر بگذارد اختلاف فاز ایجاد شده با رابطه زیر محاسبه می شود. نتایج شبیه سازی در شکل ۸ آورده شده است. رنگ هر پیکسل نشان دهنده اختلاف فاز بر حسب رادیان در آن شرایط می باشد.

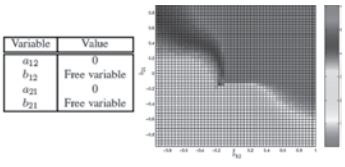
$$\Delta\phi \approx -\arctan 2(\frac{b_2}{a_2}) \qquad (۴)$$



شکل۸: چپ: جدول پارامترها- وسط: تغییرات اختلاف فاز بر اساس تغییرات a۱۲ و b۱۲ - راست: تغییرات دامنه بر اساس تغییرات a۱۲ و b۱۲

مشکل جانبی کوپل کردن: این اتصالات به آرامی دامنه سیگنال های نوسانی را نیز تغییر می دهند، ولی خوشبختانه این تغییرات می تواند جزئی باقی بماند.
در صورتی که پارامترها به صورت جدول شکل۹ تنظیم شوند. اختلاف فاز ایجاد شده از روی معادله ۳ به دست آمده و نتایج در شکل ۹ نشان داده شده است.

$$(a_2 = a_1 = 0) \wedge (b_2 > 0) \wedge (b_1 > 0) \rightarrow \Delta\phi = 0$$
$$(a_2 = a_1 = 0) \wedge (b_2 < 0) \wedge (b_1 < 0) \rightarrow \Delta\phi = \pi \qquad (۵)$$

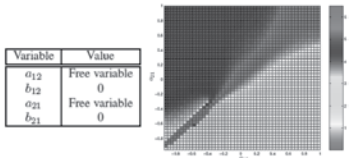


شکل۹: چپ: جدول پارامترها- وسط: تغییرات اختلاف فاز بر اساس تغییرات a۱۲ و b۱۲

این ساختار بسیار مهم است به خصوص در راه رفتن دو پا که یک گونه راه رفتن متقارن است و معمولا بیشتر اعضای سمت راست و چپ بدن با هم اختلاف فاز π در حرکت دارند.

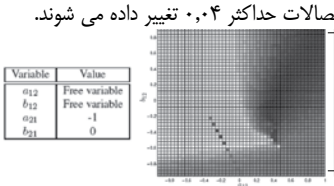
با اعمال پارامترهای جدول شکل ۱۰ اختلاف فاز از روی معادلات ۶ به دست می آید.

$$(b_2 = b_1 = 0) \wedge (a_2 > 0) \wedge (a_1 < 0) \rightarrow \Delta\phi = \frac{\pi}{2}$$
$$(b_2 = b_1 = 0) \wedge (a_2 < 0) \wedge (a_1 > 0) \rightarrow \Delta\phi = 3\frac{\pi}{2} \qquad (۶)$$



شکل۱۰: چپ: جدول پارامترها- وسط: تغییرات اختلاف فاز بر اساس تغییرات a۱۲ و b۱۲

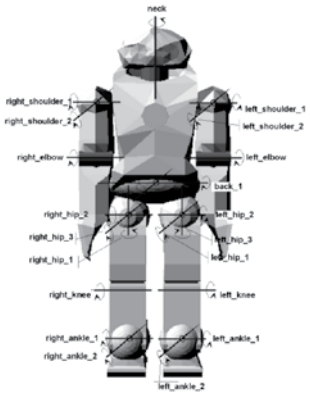
در حالتی که هر چهار پارامتر کوپلینگ غیر صفر باشند تغییرات فاز بر اساس ذات غیر خطی سیستم می تواند به شدت از نقطه ای به نقطه ی دیگر، تغییر کند. البته لازم به ذکر است که در گذر از هر نقطه به نقطه دیگر و در صورت اعمال فیدبک reflex هر یک از ضرایب وزنی اتصالات حداکثر ۰,۰۴ تغییر داده می شوند.



شکل۱۱: چپ: جدول پارامترها-وسط: تغییرات اختلاف فاز بر اساس تغییرات a۱۲ و b۱۲

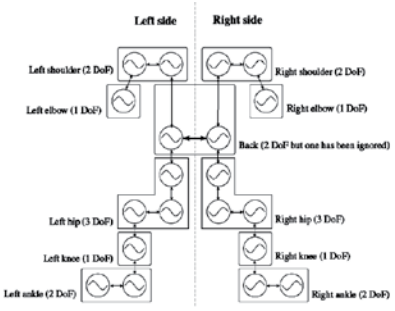
نحوه به کارگیری CPG در کنترل یک روبات

در این بخش روش پیاده سازی CPG روی روبات QRIO Sony مطرح شده و نتایج شبیه سازی ها در ادامه آورده شده است. همان طور که در برای پیاده سازی CPG برای کنترل روبات چند سوال اساسی وجود دارد.
چه تعداد نوسانگر برای ایجاد CPG لازم است؟
کدام نوسانگرها بایستی به یکدیگر link شوند؟



شکل۱۲ نشان داده شده دارای ۲۱ درجه آزادی می باشد.

چگونه این نوسانگرها فعالسازها را کنترل کنند؟
مطالعه روی مهره داران نشان می دهد که این موجودات به ازای هر درجه آزادی شان یک نوسانگر نرونی دارند. با استفاده از این نکته بر روی هر مفصل تاثیر گزار بر locomotion یک نوسان ساز قرار داده شده است(شکل ۱۳).



شکل ۱۳: نوسان سازهای اعمال شده

برای متصل کردن نوسانگر ها به یکدیگر باید دو محدودیت اساسی: ایجاد تقارن بین نیمه راست و چپ برای رسیدن به حرکت متقارن(نوسان سازهای روی کمر روبات). و همچنین الهام از راه رفتن انسان را در نظر داشت.
برای به دست آوردن پارامترها از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.
۳۷ ژن، اتصالات بین نوسانگرها را توصیف می کنند۲۰ ژن، نوسان سازها را توصیف می کنند

Connection 37	...	Connection 1	Oscillator 20	...	Oscillator 1

چنان چه هر ژن نوسان ساز شامل:

E	x_0	τ	α	x	ν

و هر ژن اتصال شامل:

a_{12}	b_{12}	a_{21}	b_{21}

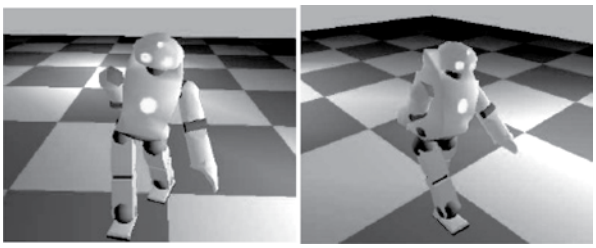
با تعریف تابع تناسب به صورت زیر :

$$fitness = \max\left(distREACHED \cdot \frac{STANDingTime}{totalTime} \cdot \frac{-stabTime + totalTime}{totalTime}, 0.001\right) \quad (۷)$$

پارامترهای نسبی بهینه به دست آمده اند.

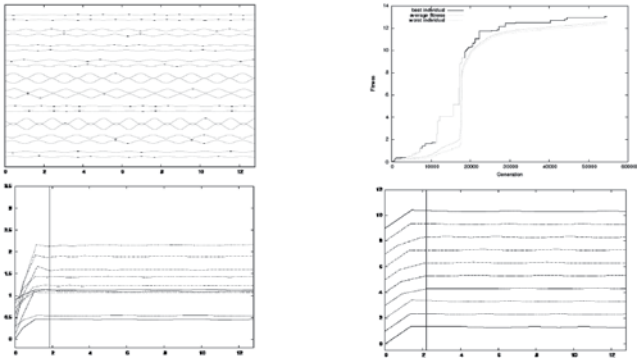
نتایج به دست آمده از پیاده سازی در محیط شبیه سازی WeBots :

همان طور که پیش بینی می شد روبات QRIO در شبیه سازیها ها به خوبی راه می رود(شکل۱۴).



شکل۱۴: شبیه سازی راه رفتن روبات QRIO در محیطWeBots

همچنین نتایج به دست آمده از بهینه سازی پارامترها توسط GA و نیز چگونگی عملکرد نوسان سازها در شکل ۱۵ آورده شده است.



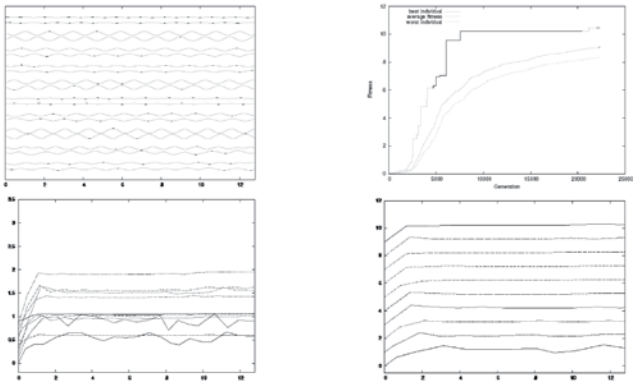
شکل۱۵ : شکل بالا سمت چپ: تغییرات تابع برازندگی در طول نسل های GA – شکل بالا سمت راست: x state مربوط به تمامی نوسان سازه

شکل پایین سمت چپ: تغییرات دامنه نوسان ها – شکل پایین سمت راست: تغییرات پریود نوسان

با اضافه کردن یک فیدبک ساده به CPG روابط به صورت زیر در می آید:

$$\tau \dot{v}_i = -\alpha \frac{\tilde{x}_i^{\,2} + v_i^{\,2} - E}{E} v_i - x_i + \sum_j \frac{a_j \tilde{x}_j + b_j v_j}{\tilde{x}_j^{\,2} + v_j^{\,2}} + \beta_S \quad (۸)$$

نتایج حاصل از بهینه سازی پارامترها توسط GA و نیز چگونگی عملکرد نوسان سازها در شکل ۱۶ نشان داده شده است.



شکل۱۶ : شکل بالا سمت چپ: تغییرات تابع برازندگی در طول نسل های GA – شکل بالا سمت راست: x state مربوط به تمامی نوسان سازها

جمع بندی

طراحی مدل های کنترلی برای روبات هایی با مدل ریاضی دقیق می تواند با روش های مبتنی بر خط سیر و یا روش های ذهنی انجام شود لیکن روش های نامبرده حساسیت زیادی به دقت مدل دارند و به خصوص در مواردی که لازم است مدل روبات شناسایی شود شاید رسیدن به چنین دقتی در فرآیند شناسایی پرمشقت و پر هزینه باشد, در ضمن هزینه طراحی در این روش ها به خصوص در روش مبتنی بر خط سیر بسیار بالا بوده نیازمند تحلیل های فراوان, شبیه سازی و آزمون و خطا می باشد. روش های مانند VMC نیز در شرایط خاصی قابل اعمال می باشند و بیم مشاهده رفتارهای ناخواسته از روبات اکثراً گریز ناپذیر است. مشکل دیگر روش های مذکور آن است که برای هر روبات باید به صورت مجزا وبا جزییات طراحی شوند. در مقابل در این مقاله روش CPG که روشی الهام گرفته شده از طبیعت می باشدمعرفی گردیده است. بر خلاف روش های قبل این روش وابستگی چندانی به معادلات و مدل ریاضی سیستم نداشته بر اساس مدل رفتاری روبات طراحی می شود. نتایج شبیه سازی عملکرد قابل قبول این روش که از نظر محاسبات طراحی نیز به نسبت کم هزینه بوده را تایید می کند.

مراجع

[1] D. A. Winter, “Biomechanics and motor control of human movement”, third edition, John Wiley & Sons Inc., 2005, ISBN0-471-44989-X (cloth).

[2] M. L. Latash, M. F. Levin, “Progress in motor control”, Vol. 3. , Human Kinetics, 1998, ISBN 0-7360-4400-0.

[3] E.R. Westervelt, C. Canudas-de-wit, “Walking and running biped robots”, IEEE Robotics and Automation magazine, june 2007.

[4] M. Vucobratovic, B. Borovac, D. Surla, D. Stoki, “Biped locomotion: dynamics, Stability”, Journal of Control and Applications, Springer, 1990.

[5] J. Pratt, P. Dilworth and G. Pratt. “virtual model control of a biped walking robot.” In Proc. IEEE Int’l Conf. on Robotics & Automation, pp. 193-198, 1997.

[6] A. J. Ijspeert, “A connectionist central pattern generator for the aquatic and terrestrial gaits of a simulated salamander”, Biological Cybernetics, 84(5):331-348, 2001.

[7] A. Ijspeert, J. Hallam, and D.Willshaw, “Evolving swimming controllers for a simulated lamprey with inspiration from neurobiology”, Adaptive Behavior, 7(2):151-172, 1999.