

شبیه‌سازی حرکت پای انسان با مکانیزم یک درجه آزادی

دامون بختیاریان^۱، دکتر هادی همایی^{۲*}، امین ملکی زاده^۳، مراد شهبازی تک آبی^۴

* نویسنده مسئول: hadi-h@eng.sku.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی

بیومکانیک گام انسان، دینامیک غیرفعال، مکانیزم شش میله ای، الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات، تحلیل سینماتیک

نیاز به شبیه سازی الگوی حرکت پای انسان محققان و مهندسان را به سوی ارائه الگوهای متفاوت برای توصیف این حرکت کرده است. در این میان راه حل های بهینه از لحاظ مصرف انرژی و دقت و غیره از اهمیت بالایی برخوردارند. در این مقاله تلاش شده تا با طراحی یک مکانیزم کاملاً دو بعدی شش میله ای با یک درجه آزادی به گونه ای که کمترین خطا را با حالت طبیعی راه رفتن پای انسان داشته باشد، راه حل جدیدی ارائه داده شود. ضمن اینکه یافته های این مقاله فرآیندی برای بهینه سازی مکانیزم های چندمیله ای ارائه می کند تا بتوان آن را در هر زمینه ی دیگری مانند ساخت پروتز پای انسان بکار برد.

در اینجا از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات استفاده شد. نتایج کار حاصل از بهینه سازی با داده های آزمایشگاهی پای انسان مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که مکانیزم شش میله ای پیشنهادی، ضمن بهینه کردن بسیاری از پارامترهای حرکتی به خوبی قادر به شبیه سازی حرکت پای انسان است.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه شهر کرد

۲- دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه شهر کرد

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی، دانشگاه امیرکبیر

۴- کارشناس ارشد، فارق التحصیل دانشگاه امیرکبیر

۱- مقدمه

در مطالعات بعدی برای شبیه سازی هرچه بیشتر حرکات لغزشی و غلتشی بین سطوح مفصل زانو از مکانیزم های چند محوری^{۱۳} استفاده شد. سپس این روش توسط افراد دیگر نظیر هابسون و تورفاسون^{۱۴} [۴] تعمیم داده شد. بدین ترتیب که محاسبه ابعاد بهینه مکانیزم چهار میله ای به وسیله روش های ریاضی بهینه سازی و استفاده از کامپیوتر صورت گرفت.

سنگوان و همکاران [۶] یک ربات دو پا معرفی کردند که در محل اتصال مفصل لگن دارای موتور بود. بعلاوه یک مفصل زانوی غیرفعال^{۱۶} دارای یک متوقف کننده زانو که حرکت روبه جلو را محدود میکند به مکانیزم اضافه شده بود. در میان بسیاری از میله بندی های پیشنهاد شده در مقالات، مکانیزم شش میله ای نتایج امیدبخشی مرکب از ظاهر و عملکرد مکانیزم پا نشان میدهد.

در تمامی کارهای اشاره شده تا کنون عمده تمرکز تنها بر روی شبیه سازی مکانیزم زانو و مچ پا صورت گرفته است. در این مقاله، تمرکز ویژه ای بر شکل کلی پا برای باقی نگاه داشتن مزایای ابزار راه رفتن انسان شده است. در انتها، مقاله یک مکانیزم مکانیکی یک درجه آزادی^{۱۷} باز تولید شکل و جابه جایی پای انسان ارائه میدهد. نوع و ترکیب حرکت مکانیزم از طریق اثرات متقابل طراحی کیفی و ابتکاری حاصل می گردد. برای رسیدن به شکل مطلوب راه رفتن^{۱۸} آزمایش و تنظیم کردن پارامترهای مختلف مکانیزم، در کنار روشهای تحلیلی از بسته های نرم افزاری کار مدل^{۱۹} استفاده شده است. مکانیزم حاصل شده، باز تولید کننده ی الگوی

خاصیت ویژه پاهای انسان کمک به دور نگه داشتن مرکز جرم بدن از سطح زمین است، جایی که عمده نیروهای پیش برنده و کنترلرهای ابزار راه رفتن قرار دارند [۱].

در ابتدا علاقه مندی لئونارد داوینچی^۵ بر دقت در نقاشی در قرن شانزدهم میلادی سبب افزایش تمرکز بر بدن انسان گردید و در قرن هفدهم به سبب پیگیری اسحاق نیوتن^۶ منجر به انتشار قانون سوم وی شد. در سال ۱۹۹۱ برادران وبر^۷ با انتشار دقیق ترین مقاله در مورد تحلیل گام برداشتن، راه رفتن و دویدن، دستور العملی جهت تحقیقات آینده تا به امروز ارائه دادند. آنها فهرستی از ۱۵۰ فرضیه، از جمله اینکه اعضای بدن می توانند مانند پاندول عمل کنند، ارائه دادند [۲].

از طرفی پس از آمپوتاسیون^۸ یا قطع عضو به دلایل پزشکی، استفاده از مفاصل مصنوعی^۹ یا پروتزها^{۱۰} به منظور باز گرداندن قسمتی از توانایی های اعضای از دست رفته، پر کاربرد گردید. بررسی تاریخچه پروتزهای زانو روشن می سازد که اولین پروتز از مدل های امروزه از نوع تک محوری^{۱۱} بوده است. نحوه طراحی این دسته پروتزها به گونه ای بوده است که در هنگام تحمل وزن بدن، با استفاده از موقعیت نسبی محور زانو نسبت به خط انتقال نیروی وزن، زانو در حالت کشش کامل^{۱۲} قرار می گیرد و این امر موجب میشد که شکل راه رفتن حالت نامتوازن و غیر طبیعی پیدا کند [۳].

⁵ Leonardo da Vinci

⁶ Isaac Newton

⁷ Weber brothers (Wilhelm and Eduard)

⁸ Amputation

⁹ Artificial joints

¹⁰ Prostheses

¹¹ Single axis

¹² Full extension

¹³ Multi-axis

¹⁴ D.A. Hobson, and L.E. Torfason

¹⁵ Sangwan et al. (2004)

¹⁶ Passive knee joint

¹⁷ Single degree-of-freedom

¹⁸ Desired walking gait

¹⁹ Working model



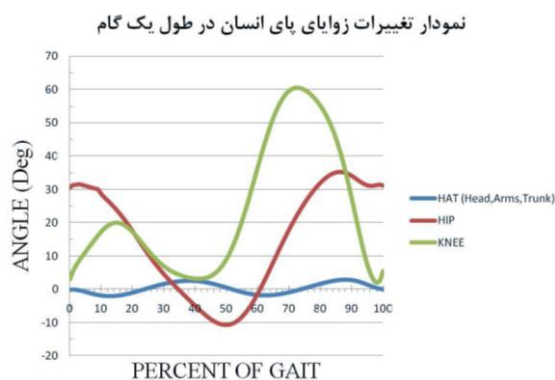
شکل (۱) دو مکانیزم فعال و غیرفعال دینامیکی (از چپ به راست):

The Cornell Passive ،McGeer's original design
The TU ،The Cornell Biped ،Biped With Arms
(Delft Biped

عمدتا در پروتزهای زانو و مچ برای آنکه بتوان بین قسمت ران^{۲۵} و ساق^{۲۶} موقعیت های مشابه با زانوی طبیعی ایجاد کرد، از مکانیزم های صفحه ای چند میله ای استفاده شده است (شکل ۱).

۳- فرضیات و مقادیر مطلوب^{۲۷}

در ابتدا مقادیر مطلوب زوایایی که پای انسان در چرخه راه رفتن طی می کند برای گام نرمال پای انسان از منبع [۸] بدست آمده شد:



شکل (۲) مقادیر مطلوب تنه، مفصل ران و زانو از داده های آزمایشگاهی در طی فرآیند مدل سازی به منظور دو بعدی سازی الگوی حرکت از چرخش تنه، ران و مچ در صفحه افقی و جانبی صرف نظر شده است. تنه در طول حرکت بدون چرخش در نظر گرفته شده و اختلاف زاویه میان تنهها و ران در صفحه قائم به ران منتقل گشته است.

راه رفتن انسان با کمترین کنترل و بیشترین کارایی ممکن است.

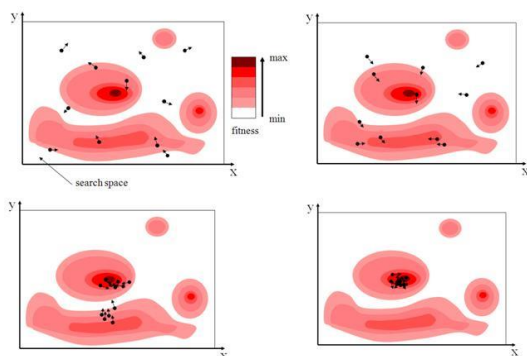
۲- ایده‌ی راه رفتن

تا به حال دو استراتژی عمده برای کنترل حرکت شبیه سازهای شیوه راه رفتن انسان ارائه شده است و در پی آن دو الگوی مولدهای مکانیکی حلقه باز و بسته^{۲۰} پیشنهاد شده است. اولین دیدگاه سنتی کنترل زوایای تمامی مفاصل در هر لحظه است. زنجیره های سینماتیکی^{۲۱} باز دارای چندین درجه آزادی هستند که آنها را به طور کلی قابل انعطاف تر و کاربرد آنها را ساده تر می سازد. از طرف دیگر عملگرهای بسیاری که برای بکار انداختن این زنجیره ها لازم است، به کم بازده شدن از نظر مصرف انرژی^{۲۲} و پیچیده تر شدن کنترلر و در پی آن بهای تمام شده ی ماشین می انجامد [۶].

دومین و به نوعی استراتژی جدیدتر راه رفتن دینامیک غیرفعال^{۲۳} است که در اوایل دهه نود میلادی توسط مک گیر^{۲۴} معرفی شد. یک راه رونده بر پایه اصول دینامیک غیرفعال از خصوصیات دینامیکی خود برای تعیین حرکت خود بهره می جوید. اینچنین راه رونده هایی میتوانند بدون نیاز به هیچ عملگر، حسگر و یا کنترلی به پایین حرکت کنند. انرژی مورد نیاز حرکت راه رفتن توسط نیروی جاذبه فراهم می شود. نیروی جاذبه همچنین برای متعادل کردن تلفات ناشی از ضربه ی پا به زمین و غلبه بر اصطکاک کافی است. راه رفتن دینامیک غیرفعال جدای از طراحی پیچیده دارای بازده انرژی بالا، کنترل ساده یا بدون کنترل، و گام برداشتن شبیه انسان است [۷].

²⁵ Femur
²⁶ Tibia
²⁷ Desired motion

²⁰ Open and closed-loop
²¹ Kinematic chain
²² Energy consumption
²³ Passive-dynamic walking
²⁴ Tad McGeer



شکل (۳) مراحل تدریجی یافتن پاسخ در PSO

با توجه به مقادیر P_{best} و G_{best} ، هر پرنده از روابط زیر برای تعیین موقعیت بعدی استفاده می کند:

$$X_i = [x_{i1} \quad x_{i2} \quad \dots \quad x_{id}] \quad (1)$$

$$V_i = [v_{i1} \quad v_{i2} \quad \dots \quad v_{id}] \quad (2)$$

که در آنها X_{id} و V_{id} به ترتیب موقعیت مکان و سرعت ذره هستند و i اندیس i امین ذره و d تعداد ابعاد مسئله هستند.

$$v_{id}(t+1) = w \cdot v_{id}(t) + c_1 \cdot r_1 [pbest - x_{id}(t)] + c_2 \cdot r_2 [gbest - x_{id}(t)] \quad (3)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (4)$$

که t شمارنده تکرار^{۳۱}، $x_{id}(t+1)$ و $v_{id}(t+1)$ به ترتیب موقعیت و سرعت جدید ذره i ام هستند. w ضریب اینرسی^{۳۲} نام دارد و پارامتری است که لختی حرکت ذرات را کنترل می نماید و کاهش می یابد. در ابتدای اجرای الگوریتم، با سرعت بیشتر و بعد از مدتی که به پاسخ نزدیکتر می شویم، به کندی کاهش می یابد. توابع مورد استفاده برای این منظور معمولاً کاهشی خطی را بعد از هر بار تکرار سبب می شوند. c_1 ضریب یادگیری شخصی^{۳۳} و c_2 ضریب یادگیری جمعی^{۳۴} هستند و معمولاً برابر با ۲

۴- روش بهینه سازی اجتماع ذرات

در اینجا تلاش می شود تا ابتدا روشی برای طراحی بهینه مکانیزمی ارائه شود و سپس با استفاده از این روش به طراحی مدلی منطبق بر آن پرداخته و در نهایت به تجزیه و تحلیل و مقایسه نتایج طراحی با دیگر داده ها پرداخته شود. برای حل این مسئله از الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات^{۲۸} استفاده شده که توسط جیمز کندی^{۲۹} (روان شناس) و راسل ابرهارت^{۳۰} (مهندس کامپیوتر) در سال ۱۹۹۵ میلادی پیشنهاد شده و جهت بهینه سازی توابع غیرخطی پیوسته ارائه شده است [۹]. در این الگوریتم، هر پرنده یک جواب ممکن در فضای جستجوی مسئله می باشد که آن را ذره می نامند. در ابتدا، PSO بوسیله گروهی از پرندگان که به طور تصادفی در فضای مسئله تولید شده اند، مقداردهی می شود و سپس جستجو برای رسیدن به بهترین جواب آغاز می گردد [۱۰].

در هر مرحله از تکرار الگوریتم، ذره به سمت موقعیت بهتر جابجا می شوند. موقعیت بعدی برای هر ذره با توجه به دو مقدار بدست می آید: اولین مقدار، بهترین موقعیتی است که آن ذره تا کنون داشته است (P_{best}) و دومین مقدار، بهترین موقعیتی است که تا به حال توسط کل ذره های آن اجتماع بدست آمده است و بهترین P_{best} در کل گروه می باشد (G_{best}) این فرایند تا زمانی که نتیجه مطلوب حاصل گردد و یا اینکه به حداکثر تعداد تکرار در نظر گرفته شده برای الگوریتم PSO برسیم، تکرار می گردد. (شکل ۳)

³¹ Iteration counter

³² Inertia weight

³³ Personal learning factor

³⁴ Global learning factor

²⁸ Particle swarm optimization (PSO)

²⁹ James Kennedy

³⁰ Russell Eberhart

که در آن پارامتر t به صورت زیر تعریف می شود:

$$t = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 + A^2 - C^2}}{C - A} \quad (7)$$

که در آن A و B و C به ترتیب زیر هستند:

$$A = 2r_1r_4 \cos(\theta_1) - 2r_2r_4 \cos(\theta_2) \quad (8)$$

$$B = 2r_1r_4 \sin(\theta_1) - 2r_2r_4 \sin(\theta_2) \quad (9)$$

$$C = r_1^2 + r_2^2 + r_4^2 - 2r_1r_2 \cos(\theta_1) - 2r_2r_4 \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) - 2r_1r_2r_4^2 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) \quad (10)$$

پس از ساده سازی رابطه ی (۷) حاصل می شود.

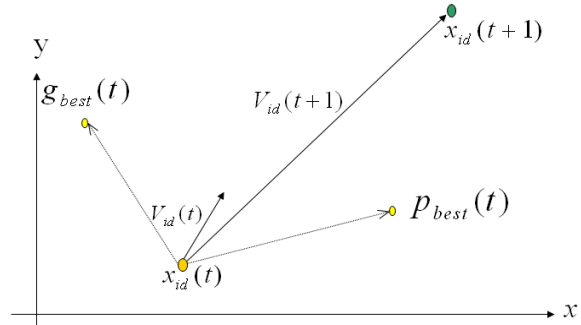
۶- بهینه سازی

حال تابعی موجود است که زوایای حرکت ران را بر حسب طول اعضا و زاویه ورودی عضو چرخان توصیف می کند. برای بهینه سازی از الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات استفاده شد. بدین صورت که در نرم افزار متلب تابع بهینه ساز تعریف شد و تابع نیز با در نظر گرفتن طول اعضا و معیاری برای مقایسه مقادیر مطلوب ران و مقادیر بدست آمده از مکانیزم بهینه سازی شده برای θ_4 تعریف شد. جهت مقایسه مقادیر مطلوب و مقادیر به دست آمده از مکانیزم از جذر تفاضل این دو مقدار استفاده شد. این بهینه سازی با ۱۰۰ نقطه ورودی انجام شد.

$$e = \text{abs}[(\theta_4) - \text{femur_angle_desired}]^2 \quad (11)$$

پس از اجرای بهینه ساز نمودار همگرایی^{۳۶} ظاهر می شود که در نهایت این نمودار پس از ۱۵۰ تکرار^{۳۷} به جواب بهینه می رسد. در شکل (۶) این نمودار نمایش داده شده است. عددی که در بالای این شکل درج شده، مقدار e را نشان می دهد ($e = 0.312866$) که در واقع مقدار نقطه ی آخر پس از ۱۵۰ تکرار در شکل روی محور y است و نشان دهنده خطای بین حرکت واقعی ران پای انسان و حرکت

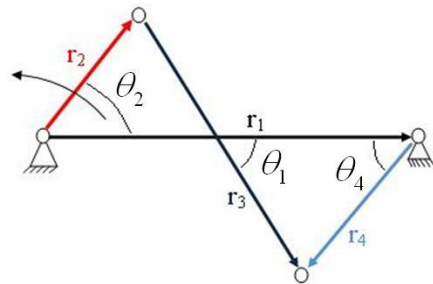
انتخاب می شوند. r_2 و r_1 نیز دو عدد تصادفی در بازه [۱، ۱۰] در نظر گرفته می شوند. در شکل (۴) می توان شماتیکی از بردارهای مورد ذکر را مشاهده کرد.



شکل (۴) نحوه قرار گیری بردارهای مکان و سرعت

۵- تحلیل سینماتیکی

مکانیزم چهار میله ای ران ساده ترین مکانیزمی که بتواند حرکتی مشابه ران را تولید کند، مکانیزم چهارمیله ای است. در شکل (۵) عضو Γ_1 زمین، عضو Γ_2 ورودی لنگ است که از عضو Γ_4 لینک ران است و بایستی زاویه ی عضو Γ_4 به عنوان تابعی از زاویه عضو ورودی و طول هر یک از اعضا و زاویه عضو زمین بیان شود. توجه شود که در اینجا طول زمین یک و زاویه ی عضو زمین صفر در نظر گرفته شد.



شکل (۵) مکانیزم چهارمیله ای برای شبیه سازی حرکت ران انسان معادله حلقه برداری^{۳۵} به دست می آید:

$$\vec{r}_1 + \vec{r}_4 = \vec{r}_2 + \vec{r}_3 \quad (5)$$

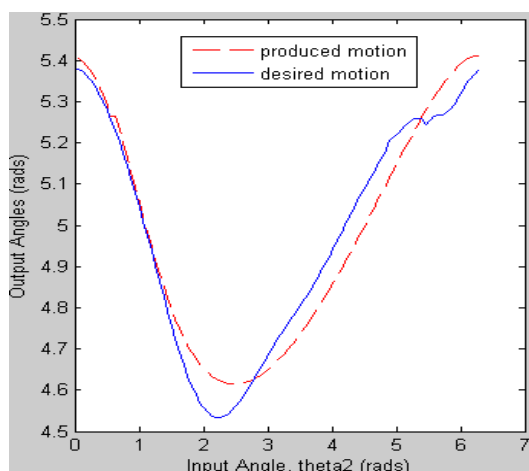
از حل ساده سازی معادله برداری فوق در فضای کارترین داریم:

$$\theta_4 = 2 \tan^{-1}(t) \quad (6)$$

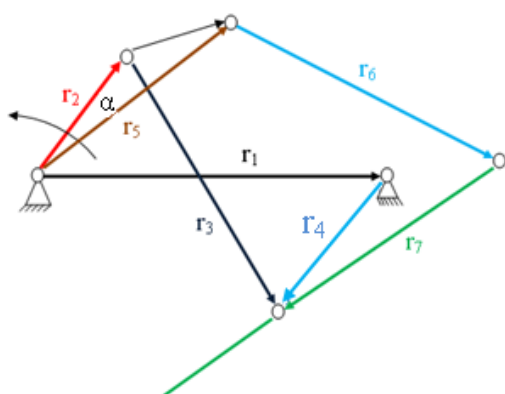
³⁶ Convergence plot

³⁷ Iteration

³⁵ Vector loop



شکل (۷) نمودار مقادیر مطلوب و حاصله از مکانیزم برای ران پا



شکل (۸) مکانیزم شش میله ای برای شبیه سازی حرکت ران و ساق

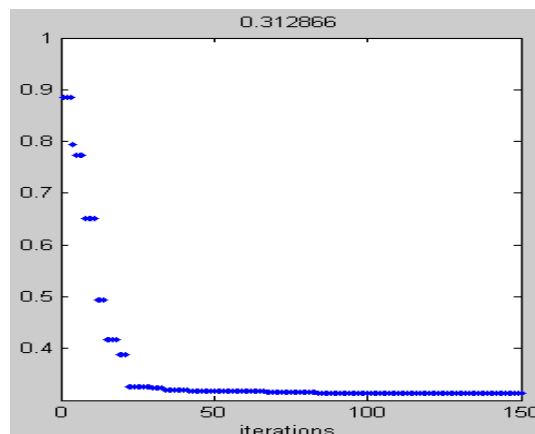
بدست آوردن معادلات مشابه سنتز مکانیزمی است که برای چهارمیله ای انجام شده است، بنابراین در اینجا تنها معادله ی حلقه برداری استفاده می شود.

$$\vec{r}_6 = \vec{r}_1 + \vec{r}_4 - \vec{r}_5 - \vec{r}_7 \quad (12)$$

مشابه آنچه برای محاسبه θ_4 صورت پذیرفته است می توان θ_7 را نیز محاسبه نمود. پس از ساده سازی در نرم افزار میپل^{۳۸} تابعی برای θ_7 بدست می آید که بر حسب طول اعضا و زوایای θ_2 و θ_4 و زاویه ی بین دو عضو r_5 و r_2 می باشد.

مشابه برنامه ای که در نرم افزار متلب برای چهارمیله ای تابع بهینه ساز تعریف شد، عینا برای شش میله ای انجام داده شد. تابع در اینجا جذر تفاضل مقادیر مطلوب ساق و مقادیر بدست از مکانیزم بهینه سازی برای θ_7 است:

مکانیزم بهینه سازی شده است. محور X تعداد تکرار را نشان می دهد.



شکل (۹) نمودار همگرایی چهار میله ای

در شکل (۷) خط آبی رنگ نمودار مقادیر مطلوب برای ران پا و خط چین قرمز رنگ مقادیر θ_4 که از مکانیزم بهینه شده بدست آمده را نشان می دهند.

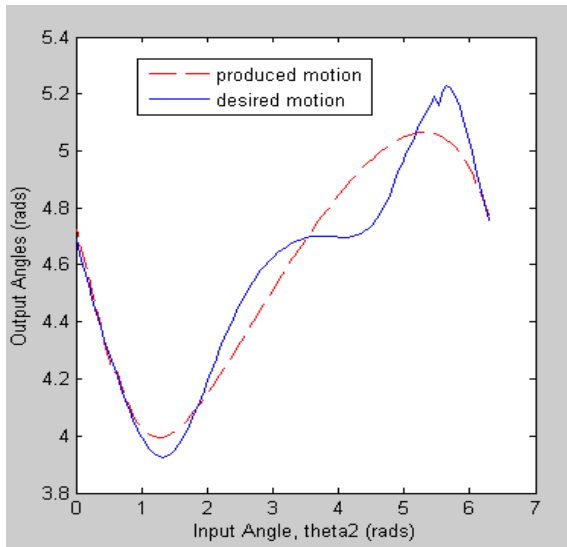
مقادیری که پس از بهینه سازی برای طول اعضای مکانیزم بدست آمده در جدول (۱) آورده شده است. این اعضا در شکل (۵) نمایش داده شده اند.

جدول ۱: طول اعضای بهینه شده مکانیزم چهارمیله ای

عضو	طول
r_1	۱
r_2	۰/۳۱۹۱
r_3	۳
r_4	۲/۵۹۳۴

نمودار مقادیر مطلوب و مقادیر بدست آمده از مکانیزم بهینه سازی شده در شکل (۷) آمده است.

برای شبیه سازی حرکت ساق پای انسان دو عضو دیگر به چهارمیله ای اضافه می کنیم که در شکل (۸) مکانیزم مربوطه نشان داده شده است. عضو r_4 حرکت ران پای انسان را همانطور که در قسمت قبل توضیح داده شد، تولید می کند و امتداد عضو r_7 حرکت ساق را بوجود می آورد.



شکل (۱۰) نمودار مقادیر مطلوب و حاصل از مکانیزم بهینه شده برای ساق پا

۷- نتایج

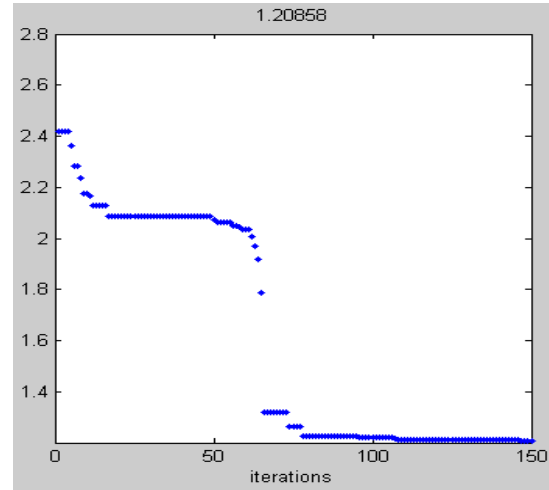
در قسمت قبل مکانیزم شش میله‌ای بهینه شد به گونه‌ای که حرکت ران و ساق انسان را شبیه‌سازی کند. خطایی که مکانیزم بهینه شده با حالت طبیعی راه رفتن انسان دارد از مجموع خطاهای ران و ساق که در قسمت قبل بدست آمد، حاصل می‌شود. در جدول (۳) خطای کلی مکانیزم محاسبه شده است. باید به این نکته توجه کرد که خطای بدست آمده در حقیقت مجموع خطاهای محاسبه شده بین دو حالت پای واقعی و پای شبیه‌سازی شده در ۱۰۰ نقطه می‌باشد، به عبارتی بهینه‌سازی با ۱۰۰ نقطه ورودی انجام شده است.

جدول (۳) خطای مکانیزم

اختلاف خطاها	خطای محاسبه شده برای ساق پا	خطای مجموع
۰/۳۱۲۸۶۶	۱/۲۰۸۵۸	۱/۵۲۱۴۴۶

$$e = \text{abs}[(\theta_4) - \text{tibiaangle_desired}]^2 \quad (۱۳)$$

عددی که در بالای شکل (۹) است e را نشان می‌دهد که در واقع مقدار نقطه‌ی آخر پس از ۱۵۰ تکرار در شکل روی محور y است. محور x تعداد تکرار را نشان می‌دهد.



شکل (۹) نمودار همگرایی شش میله‌ای

در شکل (۱۰) خط آبی رنگ نمودار مقادیر مطلوب برای ساق پا و خط چین قرمز رنگ مقادیر θ_7 که از مکانیزم بهینه شده بدست آمده را نشان می‌دهند. مقادیری که پس از بهینه‌سازی برای طول اعضای مکانیزم بدست آمده در جدول (۲) آورده شده است. این اعضا در شکل (۸) نمایش داده شده‌اند.

جدول (۲) طول اعضای بهینه شده مکانیزم شش میله‌ای

عضو	طول
I_1	۱,۰۰۰۰
I_2	۰/۳۱۹۱
I_3	۳,۰۰۰۰
I_4	۲/۵۹۳۴
I_5	۱/۳۸۹۰
I_6	۲/۴۰۴۹
I_7	۲/۸۹۸۰
α (زاویه بین I_2 و I_5)	۰/۱۵۱۳(rad)

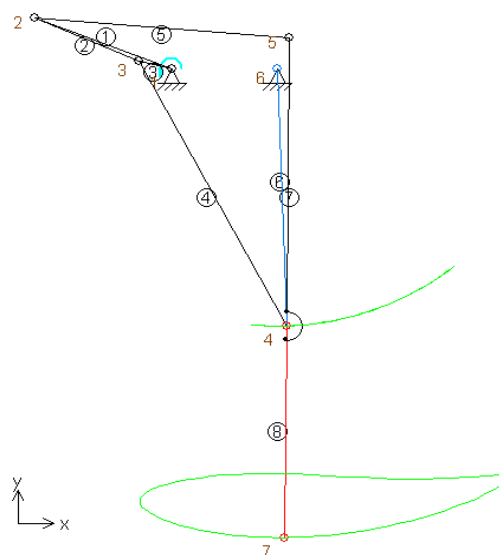
کند. برای بهینه سازی از الگوریتم تکاملی دسته ذرات استفاده شد. خطای حرکت ران انسان با حرکت عضو چهارمیله ای که نقش ران را ایفا می کند، محاسبه شد. به منظور تولید حرکت ساق پای انسان، دو میله به چهارمیله ای افزوده شد و یک مکانیزم شش میله ای طراحی شد و معادلات سنتز مکانیزم برای شش میله ای محاسبه و ساده سازی شد، به گونه ای که یکی از اعضا نقش ساق را ایفا کند. خطای حرکت ساق پای انسان با حرکت عضو شش میله ای که نقش ساق را ایفا می کند محاسبه شد. در نهایت خطای مجموع حرکت واقعی پای انسان با حرکت شبیه سازی شده بوسیله شش میله ای محاسبه شد. مکانیزم بهینه شده در نرم افزار سم به منظور اطمینان از حرکت مطلوب و بدون توقف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مکانیزم شش میله ای طراحی شده قادر است حرکت پای انسان را با خطای بسیار پایین شبیه سازی کند.

مراجع:

- [1] Batayneh, W., Al-Araidah, O., Mattson, C.A., Ismail-Yahaya A., Design and Implementation of Human-Like Biped Walking Mechanism. The Third International Conference in Mechatronics, Kuala Lumpur, Malaysia, 2008.
- [2] Cavanagh PR., The mechanics of distance running: a historical perspective, Champaign, IL, Human Kinetics Publishers; Chapter 1, 1990, pp.1-34.
- [3] Rose J., Gamble J.G., Human Walking, 3rd Edition, Lippincott Williams & Wilkins, 2006.
- [4] Hobson D.A., Torfason L.E., Optimization of four-bar knee mechanisms – A computerized approach, *Journal of Biomechanics*, Vol. 7, No. 4, 1974, pp. 371-376.
- [5] Sangwan V., Taneja A., Mukherjee S., Design of a robust self-excited biped walking mechanism, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 39, 2004, pp. 1385-1397.
- [6] Collins S.H., Ruina A.L., Tedrake R., Wisse M., Efficient bipedal robots based on passive passivedynamic Walkers. *Science magazine*, Vol. 307, 2005, pp. 1082-1085.
- [7] McGeer T., Passive dynamic walking. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 2, 1990, pp. 62-82.

به منظور اطمینان از اینکه مکانیزم شش میله ای به درستی عمل می کند و در هیچ نقطه ای دچار قطع^{۳۹} نمی شود و با زوایایی که با نرم افزار متلب برای ساق و ران به دست آوردهیم مطابقت دارد، مکانیزم در نرم افزار سم^{۴۰} بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که مکانیزم فوق موارد خواسته شده را کاملاً برآورده می کند.

شکل (۱۱) مکانیزم را در نرم افزار سم نشان می دهد. عضو آبی رنگ حرکتی مشابه ران و عضو قرمز رنگ حرکتی مشابه ساق را فراهم می کنند و دو منحنی سبز رنگ، الگوی مسیر حرکت مفاصل زانو و مچ هستند.



شکل (۱۱) مکانیزم شش میله ای بهینه شده در نرم افزار سم

۸- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله برای شبیه سازی حرکت پای انسان در ابتدا برای بدست آوردن از داده های آزمایشگاهی مربوط به پای انسان استفاده شد. در ابتدا چهارمیله ای برای تولید حرکت ران انتخاب شد و معادلات سنتز مکانیزم این چهارمیله ای در نرم افزار میپل ساده سازی شد. سپس چهارمیله ای برای تولید حرکت ران پای انسان بهینه سازی شد، به گونه ای که یکی از اعضای چهارمیله ای حرکتی شبیه ران انسان را تولید

³⁹ Trip

⁴⁰ SAM

- [8] Neumann D.A., *Kinesiology of the Musculoskeletal System: Foundations for Rehabilitation*, 2nd Edition, 2010.
- [9] L.D.S. Coelho, A quantum particle swarm optimizer with chaotic mutation operator, *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol. 37, No. 5, 2008, pp. 1409- 1418.
- [10] Poli R., Kennedy, J., Blackwell, T., *Particle swarm optimization An overview*, *s.l., Springer Science*, 2007, pp. 33–57, *Swarm Intell.*