

تحلیل دینامیکی و طراحی حرکتی یک ربات خزنده بر روی سطح شیب‌دار

محسن نخعی نژاد (دانشجوی کارشناسی ارشد)
علی مقداری (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
داود نادری (استادیار)
دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

حرکت خزشی به عنوان یک مد حرکتی که در طبیعت، در برخی جانوران از جمله مارها دیده می‌شود، از تحلیل سینماتیکی و دینامیکی خاص خود برخوردار است. ربات مار مانند که با الهام از طبیعت و حرکت خزشی مار طراحی می‌شود جزء ربات‌های خزنده محسوب می‌شود. در این نوشتار یک ربات خزنده‌ی مار مانند با $n+2$ درجه آزادی مورد بررسی و تحلیل سینماتیکی و دینامیکی قرار می‌گیرد. از آنجا که قابلیت حرکت یک ربات خزنده بر روی سطوح ناهموار و شیب‌دار از اهمیت خاصی برخوردار است، در این تحقیق معادلات حرکت ربات بر روی سطوح شیب‌دار بررسی می‌شود. به منظور بررسی و تحلیل حرکت ربات، پس از طراحی یک شبیه‌ساز نرم‌افزاری، و با استفاده از شبیه‌ساز فوق پارامترهای بهینه‌ی حرکتی با معیار انرژی برای حرکت ربات بر روی یک سطح ناهموار تعیین می‌شود. نتایج این پژوهش بیانگر ارتباط بین پارامترهای بهینه‌ی سینماتیکی و دینامیکی ربات با ناهمواری بستر حرکتی آن است که در طراحی حرکتی و کنترل ربات مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مقدمه

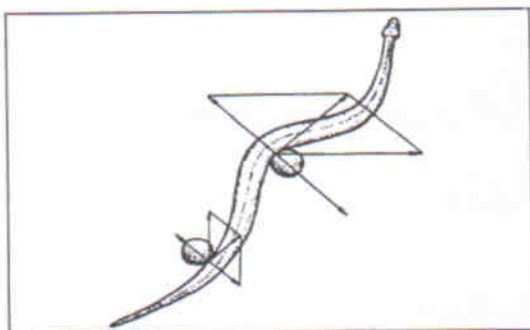
ربات مار مانند که با الهام از طبیعت و حرکت خزشی مار طراحی می‌شود جزء ربات‌های خزنده محسوب می‌شود که بدون استفاده از چرخ‌های محرک قادر به حرکت است. حرکت خزشی به عنوان یک مد حرکتی که در طبیعت، در برخی جانوران از جمله مارها، دیده می‌شود از تحلیل سینماتیکی و دینامیکی خاص خود برخوردار است. در طبیعت، مار با حرکات گوناگون خود می‌تواند در محیط‌های مختلفی نظیر آب، خاک، زمین‌های سفت و حتی ناهموار حرکت کند. این جانور حتی قادر است از اجسام یا درختان بالا رود^[1]، از موانع عبور کند و یا در محیط‌های شنی و لغزنده نیز به حرکت خود ادامه دهد. بنابراین یک ربات خزنده می‌تواند از قابلیت‌های بالایی برخوردار باشد.

بندبند بودن بدنه‌ی ربات، افزایش و یا کاهش طول بدنه و مونتاژ عضوها به یکدیگر را به سادگی امکان‌پذیر ساخته است.^[2] بالا بودن درجه‌ی آزادی باعث افزایش قدرت مانور و درجه‌ی مهارت ربات شده است.^[3] کوتاهی ابعاد ارتفاعی و عرضی ربات امکان حرکت در مسیرهای باریک «مثل لوله» و همچنین قابلیت استتار را برای آن فراهم ساخته است. در چنین رباتی مشکل تعادل و پایداری عمودی

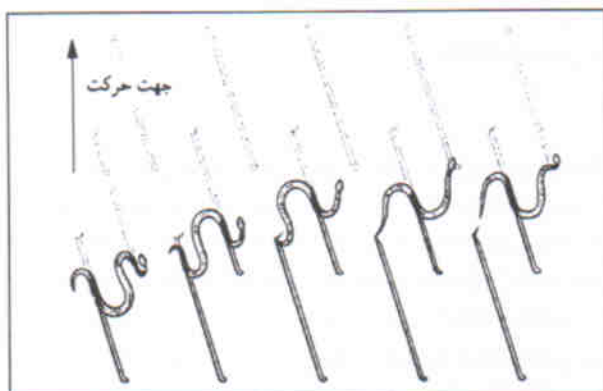
ربات وجود ندارد. با ثابت کردن جزء انتهایی ربات مار مانند می‌توان از آن به عنوان یک بازوی مکانیکی ماهر با درجه‌ی آزادی اضافی^۱ استفاده کرد.^[4] عامل محرک در چنین رباتی چرخ و یا اجزاء دیگر نیست؛ بلکه می‌توان با استفاده از تعدادی راه‌انداز زاویه‌یی، از طریق ایجاد گشتاور در مفاصل، عامل محرک را ایجاد کرد.^[5] در کنترل حرکتی ربات می‌توان فقط با کنترل موقعیت سر ربات مسیر حرکت آن را تعیین کرد، به طوری که دیگر عضوها از آن پیروی کنند.^[6]

به عنوان نمونه‌هایی از کاربردهای یک ربات خزنده‌ی ماری شکل، می‌توان از عملیات مین‌یابی^[7]، بازرسی لوله‌های گاز و نفت^[8]، حرکت در مسیرهای پر پیچ و خم، بازرسی پل‌های شکسته، ربات امدادگر، جراحی وسیع^[9]، بازرسی در زیر آب و یا عملیات شناسایی در محیط‌های جنگی نام برد.^[۱۰]

در زمینه‌ی ربات‌های خزنده تحقیقات گوناگونی صورت گرفته است. هیروز^[۱۱] در زمینه‌ی ربات‌های مار مانند چرخ‌دار، تحقیقات گسترده‌یی انجام داده است. البته چرخ در این گونه ربات‌ها محرک نیست، بلکه چرخ‌هایی آزادند که باعث کاهش ضریب اصطکاک در امتداد مماس بر بدنه ربات و افزایش آن در جهت عمود بر آن می‌شود، به طوری که از لغزش بدنه‌ی ربات در جهت عمود بر راستای بدنه‌ی آن



شکل ۱. سازوکار حرکتی نوسانی جانبی.^[۱۵]



شکل ۲. سازوکار حرکتی مارپیچی از بغل در مار.^[۱۵]

نگه داشتن یک قسمت از بدن خود، از طریق تاخوردگی بدن از انتها بر روی یکدیگر موج‌های لایه‌یی با دامنه‌ی کم ایجاد می‌کند و سپس از جلو این موج‌ها را آزاد می‌کند. این حرکت بر اساس اصل تفاوت نیروی اصطکاک استاتیکی و دینامیکی در طول بدن عمل می‌کند. از مشخصه‌های این حرکت بازدهی کم و قابلیت حرکت در مکان‌های کم عرض است.^[۱۴]

۳. حرکت مارپیچی از بغل^۵ سومین نوع حرکت خزشی است که در شکل ۲ نشان داده شده است. در این سازوکار حرکتی، راستای حرکت مار در امتداد طولی آن نیست بلکه به صورت عرضی است. برای انجام چنین حرکتی به سطحی صاف با حداقل نیروی برشی نیاز است که در زمین‌های شنی وجود دارد. مار با بالا نگه داشتن قسمتی از بدن خود و قرار دادن چند نقطه از بدن بر روی زمین از طریق ایجاد تاخوردگی‌های متوالی در طول بدن، با لغزش از بغل حرکت می‌کند. مشخصه‌ی این حرکت عبارت است از: بازدهی نسبی بالا، عملکرد خوب در زمین‌های نرم و شنی، حداقل تماس بدن با سطح و عدم کارآیی در مسیرهای باریک.^[۱۶]

۴. حرکت راست‌خطی^۶ است که حرکتی کرمی شکل است. در این نوع حرکت انقباض و آزادسازی ماهیچه‌های طولی بدنه‌ی مار

جلوگیری می‌شود؛ بنابراین به نوعی می‌توان این نوع ربات‌ها را «ربات‌های خزنده» نامید. داشتن چرخ عاملی محدودکننده برای چنین رباتی محسوب می‌شود؛ به همین دلیل تحقیقات اخیر در زمینه‌ی ربات‌های خزنده‌ی بدون چرخ در حال افزایش است. در زمینه‌ی تحلیل دینامیکی و بررسی ربات‌های مارمانند خزنده از دیدگاه انرژی نیز تحقیقاتی صورت گرفته است^[۱۱] که در این تحقیق بستر حرکتی ربات فاقد هرگونه شیب و ناهمواری در نظر گرفته شده است.

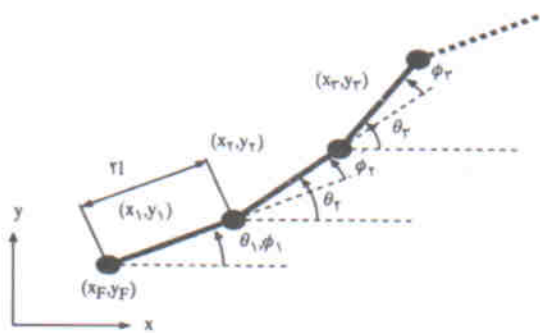
از آنجاکه قابلیت حرکت یک ربات خزنده بر روی سطوح ناهموار و شیب‌دار از اهمیت خاصی برخوردار است، در این تحقیق معادلات حرکت ربات بر روی سطوح شیب‌دار با زوایای شیب مشخص در صفحه مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور بررسی و تحلیل حرکت ربات یک شبیه‌ساز مجازی به صورت نرم‌افزاری طراحی شده و پارامترهای بهینه‌ی حرکتی برای حرکت ربات بر روی یک سطح ناهموار در زوایای شیب‌گونگون با استفاده از شبیه‌سازی فوق تعیین می‌شود. نتایج این تحقیق بیانگر ارتباط بین پارامترهای بهینه‌ی سینماتیکی و دینامیکی ربات با ناهمواری مسیر حرکتی آن است که در طراحی حرکتی و کنترل ربات^[۱۲] مورد استفاده قرار می‌گیرد.

سازوکارهای حرکت خزشی در ربات مارمانند با الهام از طبیعت

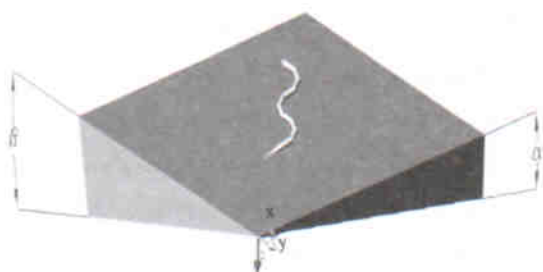
حرکت خزشی که در ربات‌ها استفاده می‌شود، با شکل‌های مختلف در مارها دیده می‌شود که می‌توان آنها را به چهار نوع عمده تقسیم کرد:^[۱۳]

۱. حرکت نوسانی جانبی^۲ یا حرکت ماری^۳، که در این حرکت موج حاصل از انقباض و آزادسازی ماهیچه‌ها از سر تا دم مار گسترش می‌یابد و هر نقطه از بدن مار با سرعت ثابت در امتداد یک منحنی مشخص می‌لغزد بدون اینکه هیچ نقطه‌یی از بدن نسبت به زمین ساکن باشد. معیار اصلی در این حرکت اختلاف ضریب اصطکاک در جهت مماس و عمود بر بدنه‌ی مار است که در نتیجه باعث ایجاد لغزش ربات در امتداد بدن خود می‌شود و آنرا به جلو می‌راند. در اغلب مارها این نوع حرکت مشاهده می‌شود. از مشخصه‌های این حرکت بازدهی نسبی بالا، نیاز به دامنه‌ی عرضی زیاد برای حرکت و عملکرد مناسب در زمین‌های نرم و شنی است. این سازوکار حرکتی در شکل ۱ نشان داده شده است.^[۱۳]

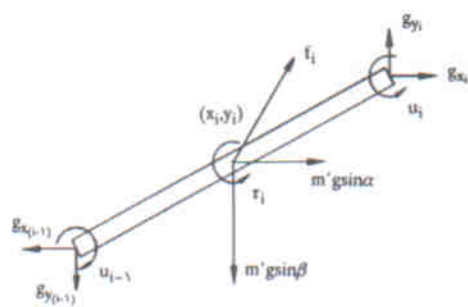
۲. حرکت موجی پیش‌رونده^۴ که در این حرکت، مار با ثابت



شکل ۳. مدل چندعضوی از یک ربات خزنده.^[۱۹]



شکل ۴. مدل سطح شیب‌دار برای تحلیل حرکت خزشی در ربات خزنده.



شکل ۵. نمودار آزاد عضو iام ربات خزنده.

معادلات حرکتی ربات

با نوشتن معادلات تعادل برای هر رابطه معادلات حرکتی ربات از روش نیوتن-اولیئر به دست خواهد آمد. با توجه به شکل ۶ معادلات تعادل را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$m' \ddot{x}_i = f_{x_i} + g_{x_i} - g_{x_{i-1}} + m' g \sin \alpha \quad (7)$$

$$m' \ddot{y}_i = f_{y_i} + g_{y_i} - g_{y_{i-1}} + m' g \sin \beta \quad (8)$$

$$j \ddot{\theta}_i = \tau_i - \sin \theta_i \mathcal{L} (g_{x_{i-1}} + g_{x_i}) + \cos \theta_i \mathcal{L} (g_{x_{i-1}} + g_{x_i}) + u_i - u_{i-1} \quad (9)$$

با جای‌گذاری τ و f از روابط ۵ و ۶ در معادلات فوق، و بیان x_i و y_i برحسب موقعیت مرکز جرم ربات $c = (c_x, c_y) \in \mathbb{R}^2$ و بیان آن به فرم ماتریسی، معادله‌ی زیر به دست می‌آید که بیان‌گر معادله‌ی حرکتی

باعث حرکت مار به سمت جلو می‌شود. از مشخصه‌های این حرکت می‌توان به سرعت نسبی پائین و قابلیت گذر از مسیرهای بسیار باریک اشاره کرد.^[۱۷]

علاوه بر چهار حرکت فوق، سازوکارهای حرکتی گوناگون دیگری^[۱۸] نیز برای مارها وجود دارد که به دلیل پیچیدگی و یا محدودیت‌های خاص خود، کمتر در ربات‌های خزنده استفاده می‌شود. در این تحقیق از حرکت نوسانی جانبی که به اختصار حرکت ماری خوانده می‌شود، به منظور سازوکار حرکتی ربات خزنده‌ی مارمانند استفاده می‌شود.

مدل‌سازی دینامیکی ربات خزنده

به منظور تحلیل دینامیکی، ربات خزنده را به صورت رباتی که از n رابط متصل به یکدیگر تشکیل شده است در نظر می‌گیریم که از طریق (n-1) راه‌انداز مفصلی زاویه‌یی، عامل محرک ربات ایجاد می‌شود (شکل ۳). چنین رباتی از $n+2$ درجه آزادی برخوردار است.^[۱۹] بستر ربات به صورت سطح شیب‌داری در نظر گرفته می‌شود که در دو جهت x و y به ترتیب دارای شیب α و β است (شکل ۴).

برخی روابط سینماتیکی ربات و روابط مربوط به جرم و گشتاور اینرسی هر یک از رابطه‌های ربات به صورت زیر است:

$$\phi = D\theta \quad ; \quad \phi \in \mathbb{R}^{n-1}$$

$$\theta \in \mathbb{R}^n; \quad D = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & -1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & -1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(n-1) \times n} \quad (1)$$

$$m = nm' \quad (2)$$

$$j = \frac{1}{\psi} m' \mathcal{L}^\dagger \quad (3)$$

$$Z = \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2n \times 1} \quad ; \quad X, Y \in \mathbb{R}^n \quad (4)$$

شکل ۵ نمودار آزاد عضو iام ربات را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک c_1 و c_n در دو جهت طولی و عمودی برای هر عضو، با حرکت ربات بر روی سطح نیرو، گشتاور اصطکاک‌های در هر یک از اعضاء ظاهر می‌شود که به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{cases} f_{x_i} \\ f_{y_i} \end{cases} = -m' R_{\theta_i} \begin{bmatrix} C_1 & \cdot \\ \cdot & C_n \end{bmatrix} R_{\theta_i}' \begin{cases} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \end{cases};$$

$$R_{\theta_i} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\{\tau\} = -C_n j \{\dot{\theta}\} \quad (6)$$

حاکم بر ربات خرنده‌ی مار مانند است.^[۱]

$$\begin{aligned}
 [M]_{(n+2) \times (n+2)} \begin{Bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{c} \end{Bmatrix} + [C(\theta, \dot{\theta})]_{(n+2) \times n} \begin{Bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{c} \end{Bmatrix} \\
 + [K(\theta)]_{(n+2) \times (n+2)} \begin{Bmatrix} \theta \\ c \end{Bmatrix} + \{G(\theta, \alpha, \beta)\} \\
 = \begin{Bmatrix} D' \\ 0 \end{Bmatrix}_{(n+2) \times (n-1)} \{u\}
 \end{aligned} \quad (10)$$

در ربات، گشتاور کنترلی u باعث تغییر زوایای مفصلی ϕ_i می‌شود، و تغییرات ϕ_i جهت‌گیری و موقعیت ربات را تعیین می‌کند. بنابراین می‌توان معادله‌ی فوق را به دو معادله تبدیل کرد که اولی با ورودی u_i در هر لحظه، ϕ_i را به عنوان خروجی تعیین می‌کند و مشتق زمانی $\dot{\phi}_i$ به عنوان ورودی معادله‌ی دیگری است که خروجی آن، موقعیت و جهت‌گیری ربات در هر لحظه است. معادله‌ی اول موضوع بحث کنترل ربات است که با اعمال ورودی مناسب u می‌توان به تابع ϕ دلخواه دست یافت. در این تحقیق، طراحی حرکتی ربات به منظور یافتن تابع ϕ مناسب و بهینه در هر لحظه، برای دستیابی به سرعت، موقعیت و جهت‌گیری مورد نظر در ربات برای سطوح شیب‌دار با زوایای مختلف صورت می‌گیرد. معادله‌ی فوق پس از جداسازی دینامیکی به دو معادله تبدیل می‌شود که معادله‌ی دومی $(\ddot{\phi} + c, \dot{\phi})$ به صورت زیر است:

$$\begin{Bmatrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{c}_x \\ \ddot{c}_y \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix}_{(n+2) \times 1} = [V(\theta)]_{(n+2) \times (n+2)} \begin{Bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{c} \\ \dot{c}_y \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + [W(\theta)]_{(n+2) \times (n-1)} \{\dot{\phi}\} + \{S(\theta, \alpha, \beta)\} \quad (11)$$

جهت‌گیری ربات طبق معادله‌ی زیر در هر لحظه به دست می‌آید.

$$\gamma' = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \theta_i \right] \quad (12)$$

γ سرعت حرکت مرکز جرم ربات در امتداد γ نیز چنین به دست می‌آید:

$$v = \dot{c}_x \cos \gamma' + \dot{c}_y \sin \gamma' \quad (13)$$

بنابراین با حل معادله‌ی ۱۱ با شرایط اولیه و ورودی مناسب $\dot{\phi}$ در هر لحظه، در زوایای شیب مختلف می‌توان سرعت، جهت‌گیری ربات و موقعیت آن را به دست آورد.

شبیه‌سازی حرکت ربات خرنده بر روی سطوح ناهموار به منظور شبیه‌سازی حرکت ربات خرنده بر روی سطوح ناهموار،

منحنی حرکتی ربات $(\phi_i(t))$ باید مشخص شود. بدین منظور از منحنی ارائه شده توسط هیروز^[۱۸]، به نام شخص سرینوید استفاده می‌شود. معادله‌ی انحناء این منحنی به صورت زیر است:

$$k(s) = ab \sin(bs) - c \quad (14)$$

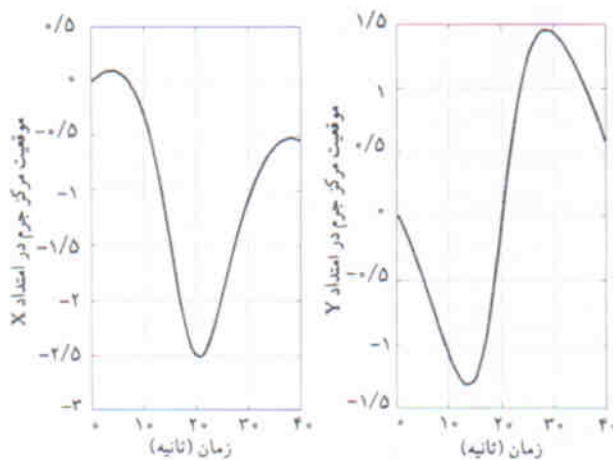
با توجه به تعداد عضوهای ربات (n) ، این منحنی به n جزء خطی تبدیل می‌شود و زاویه‌ی نسبی هر دو عضو مجاور به صورت تابع $\phi_i(t)$ بیان می‌شود.

$$\phi_i(t) = \xi \sin(\omega t + (i-1)\xi) + \gamma \quad (i=1, \dots, n-1) \quad (15)$$

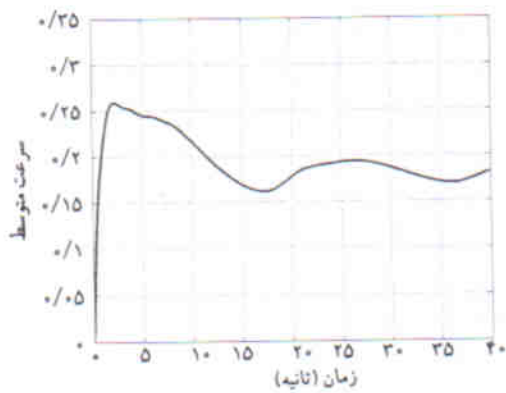
در این رابطه ω و γ به ترتیب پارامترهای غالب در تعیین سرعت و جهت حرکت ربات خرنده و ξ بیانگر دامنه‌ی حرکتی ایجاد شده در بدنه‌ی ربات است. شبیه‌سازی عددی و گرافیکی توسط نرم‌افزار MATLAB در دو حالت مختلف برای رباتی با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ صورت گرفته است. در حالت اول، بستر حرکتی ربات، سطحی شیب‌دار با زاویه‌ی شیب $\alpha = 10^\circ$ و $\beta = 20^\circ$ در نظر گرفته شده که نتایج این شبیه‌سازی مطابق شکل‌های ۶ الی ۸ می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات ربات خرنده شبیه‌سازی شده.

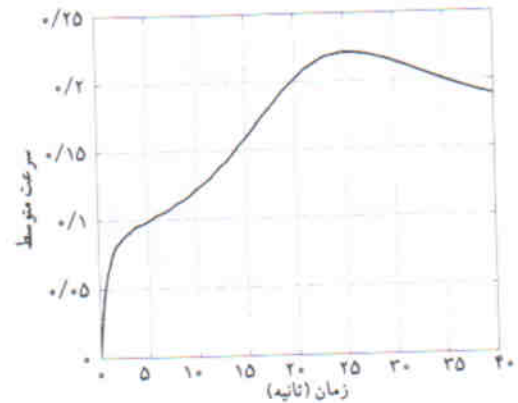
۱۰	n
۰/۸	l_i
۰/۸	m_i
۱	c_i
۱۰	c_n
$\pi/6$	ξ
$\pi/3$	ζ
۳	ω
۰/۱۵	γ



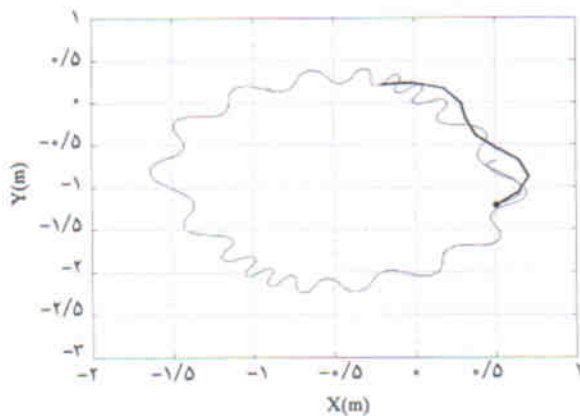
شکل ۶. موقعیت مرکز جرم ربات در مختصات دکارتی در حرکت بر روی سطح شیب‌دار.



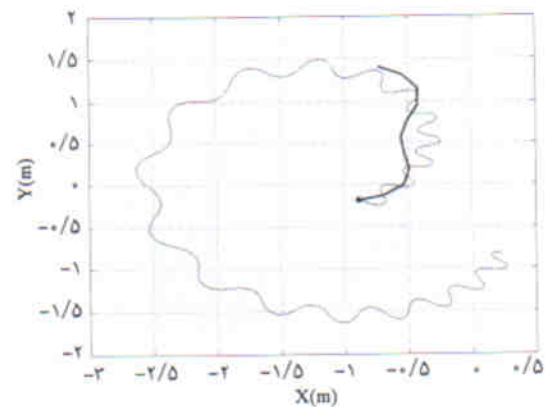
شکل ۱۰. سرعت میانگین مرکز جرم ربات در امتداد جهت گیری آن در حرکت بر روی بستر ناهموار.



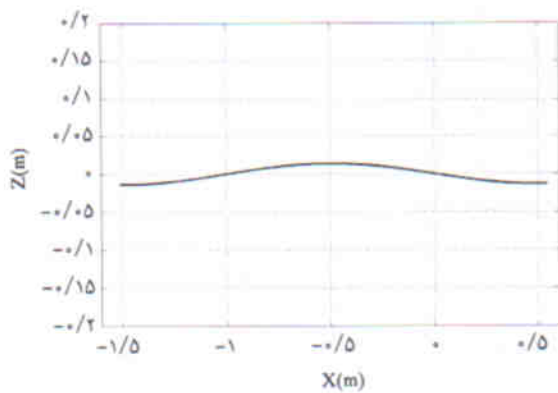
شکل ۷. سرعت میانگین مرکز جرم ربات در امتداد جهت گیری آن در حرکت روی سطح شیب‌دار.



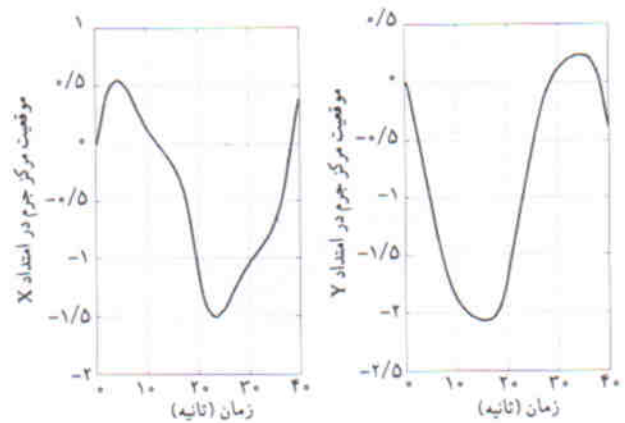
شکل ۱۱. شبیه‌سازی گرافیکی با بستر ناهموار.



شکل ۸. شبیه‌سازی گرافیکی ربات در ۴۰ ثانیه (خطوط کم‌رنگ بیانگر مسیر حرکت سر ربات می‌باشد).



شکل ۱۲. بستر حرکتی ربات در شبیه‌سازی.



شکل ۹. موقعیت مرکز جرم ربات در مختصات دکارتی در حرکت بر روی بستر ناهموار.

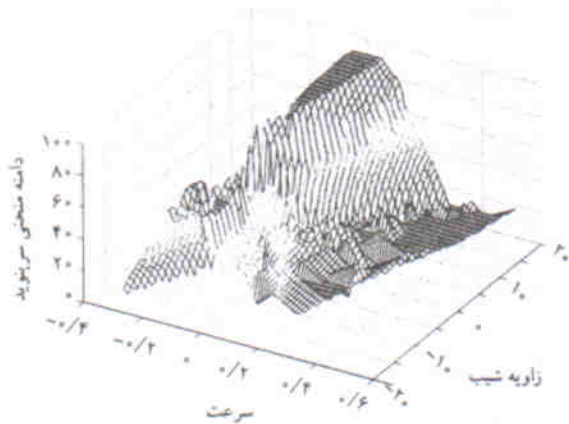
طراحی حرکتی ربات خزنده

در این قسمت به طراحی حرکتی و تعیین منحنی حرکتی مناسب برای ربات خزنده در زوایای شیب گوناگون پرداخته‌ایم. در حین حرکت، بدنه‌ی ربات بر روی سطح می‌لغزد، بنابراین مقداری از ایجاد شده توسط راه‌اندازها به صورت توان اصطکاکی تلف می‌شود. در

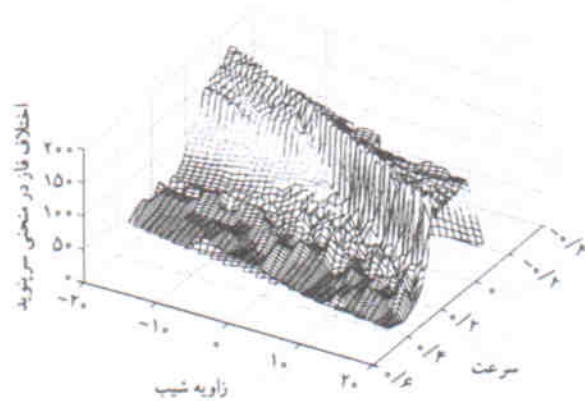
در حالت دوم، بستر حرکتی ربات، سطح ناهمواری در نظر گرفته می‌شود که معادله‌ی ناهمواری آن به صورت زیر است:

$$\Phi(x) = 0.2 \sin\left(\frac{\pi x}{1}\right), \quad (l=1) \quad (16)$$

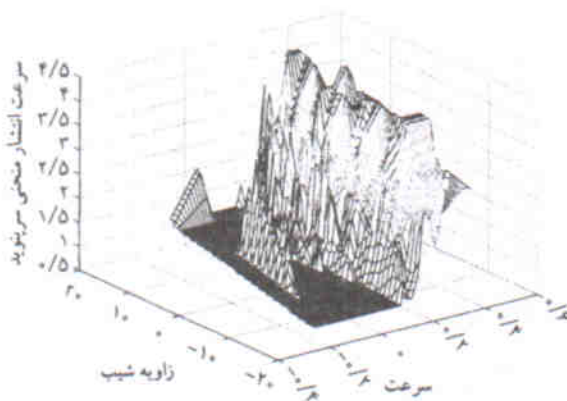
نتایج این شبیه‌سازی نیز مطابق با شکل‌های ۹ الی ۱۲ می‌باشد.



شکل ۱۳. نمودار تغییرات ξ بر حسب سرعت و شیب بستر حرکتی ربات.



شکل ۱۴. نمودار تغییرات β بر حسب سرعت و شیب بستر حرکتی ربات.



شکل ۱۵. نمودار تغییرات ω بر حسب سرعت و شیب بستر حرکتی ربات.

انجام شده توسط هیروز است. وی با آزمایش‌های تجربی گوناگون بامارهایی که با سازوکار حرکتی مارپیچ حرکت می‌کنند به نتایج قابل توجهی دست یافته است. قسمتی از نتایج تحقیقات تجربی وی در دسترس است.^[۱۸] از این نتایج می‌توان برای بررسی صحت نتایج به‌دست آمده در این تحقیق استفاده کرد. هیروز طی مطالعات تجربی

اینجا طراحی حرکتی براساس کمینه‌سازی توان اتلافی اصطکاکی در ربات، برای دستیابی به یک سرعت معین صورت می‌گیرد.

با نوشتن معادلات انرژی حاکم بر ربات خزننده توان اتلافی اصطکاکی به صورت زیر خواهد بود:^[۱]

$$P_1 [\dot{\theta} \quad \dot{c}] [K(\theta)] \begin{Bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{c} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

با تغییر پارامترهای حرکتی در یک سرعت ثابت، میزان توان اتلافی ناشی از اصطکاک طبق معادله‌ی فوق و در نتیجه میزان انرژی مصرفی ربات تغییر خواهد کرد. بنابراین برای طراحی بهینه‌ی حرکتی در چنین رباتی ضروری است پارامترهای حرکتی به‌گونه‌ی انتخاب شود که انرژی اتلافی اصطکاکی در ربات کمینه شود. این کار در حالت حرکت ربات بر روی یک بستر صاف صورت گرفته است.^[۱] در اینجا طراحی حرکتی برای بستر شیب‌دار که نوعی ناهمواری محسوب می‌شود صورت می‌گیرد. بدین منظور در زوایای شیب گوناگون برای α و β همچنین به ازای پارامترهای حرکتی مختلف (ξ, ζ, ω) مقدار P_1 محاسبه می‌شود و مقادیری از پارامترهای فوق که منجر به P_1 کمینه در سرعت ثابت می‌شود به عنوان پارامترهای حرکتی مناسب انتخاب می‌شود. بدین ترتیب طراحی حرکتی ربات در زوایای شیب گوناگون با در نظر گرفتن انرژی مصرفی ربات صورت می‌گیرد.

در این تحقیق طراحی حرکتی برای رباتی با مشخصات ارائه شده در جدول ۲ صورت گرفته است.

نتایج به‌صورت یک بانک اطلاعاتی که بیانگر مقادیر مناسب پارامترهای حرکتی ربات در سرعت و شیب مختلف است قابل دسترس است. از این بانک اطلاعات می‌توان به‌منظور طراحی حرکتی، کنترل ربات و همچنین آموزش شبکه‌ی عصبی مناسب برای طراحی ربات استفاده کرد.

شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ بیانگر نحوه‌ی تغییر پارامترهای حرکتی ربات نسبت به تغییر شیب و سرعت ربات است. در طراحی حرکتی ربات، در هر لحظه با توجه به سرعت درخواستی و شیب بستر حرکتی مقادیر مناسب و بهینه‌ی طراحی از نمودارهای زیر قابل دستیابی است.

از جمله منابع ارزشمند در زمینه‌ی ربات‌های مار مانند، کارهای

جدول ۲. مشخصات ربات خزننده‌ی مورد بررسی در طراحی حرکتی.

n	l_i	m_i	c_i	c_{11}	ξ	γ
۱۰	۰/۸	۰/۸	۱	۱۰	$\pi/6$	۰

معادلات حرکتی بر روی یک بستر شیب‌دار در دو جهت x و y در صفحه به دست آمده است. از آنجا که تحلیل و مدل‌سازی پدیده‌ی خزش در نرم‌افزارهای موجود به‌سادگی امکان‌پذیر نیست، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB یک برنامه به‌منظور شبیه‌سازی عددی و گرافیکی حرکت خزشی در ربات‌هایی با $n+2$ درجه آزادی بر روی بستری ناهموار تهیه شده است، به‌طوری‌که می‌توان با این شبیه‌ساز به تحلیل ربات‌های خزننده و تأثیر پارامترهای طراحی بر عملکرد آن پرداخت.

در ادامه با تعریف معیار انرژی، طراحی حرکتی ربات و تعیین پارامترهای بهینه‌ی حرکتی در سرعت و شیب‌گونگون صورت گرفته است. نتایج این قسمت بیانگر ارتباط بین سرعت و همچنین زاویه‌ی شیب بستر ربات با پارامترهای طراحی حرکت است که به‌صورت گرافیکی آورده شده است. این اطلاعات عددی به‌عنوان پارامترهای مناسب و بهینه برای طراحی حرکت، کنترل ربات و همچنین آموزش شبکه‌ی عصبی مناسب به‌منظور طراحی ربات مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نشان داد که در حرکت ماری شکل برای رسیدن به سرعت مورد نظر با افزایش شیب سطح، مقدار دامنه‌ی موج ایجاد شده در طول بدنه‌ی ربات خزننده نیز به تناسب باید افزایش یابد که این مطلب در شکل ۱۳ به‌وضوح نمایان است. همچنین ارتباط بین میزان شیب سطح حرکتی ربات با مقدار اختلاف فاز موج ایجاد شده (که در شکل ۱۴ نشان داده شده است) و نیز با نتایج ارائه شده توسط هیروز به خوبی مطابقت دارد. [۱۷ و ۱۸] قابل ذکر است که در مطالعات این محقق که به‌صورت تجربی بر روی حرکت مارها انجام شده است مبحث مربوط به انرژی مصرفی به‌طور نظری مورد بررسی قرار نگرفته است. در حالی که نتایج نظری به دست آمده در این نوشتار بر مبنای کمینه کردن انرژی مصرفی ربات مارمانند است و به‌خوبی با نتایج تجربی به دست آمده همخوانی دارد.

نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی یک ربات خزننده با منحنی حرکتی سرپنود پرداخته است. پس از تحلیل سینماتیکی ربات و مدل‌سازی آن،

پانوش

1. redundancy
2. lateral undulation
3. serpentine motion
4. concertina progression
5. side winding
6. rectilinear

منابع

1. Nilsson, M., "Snake robot free climbing", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (1997).
2. Hirose S. and Morishima, A., "Design and control of a mobile robot with an articulated body", *Int. J. Advanced Robotics*, 9 (2), pp 99-114 (1990).
3. Anthony, M. and Zehnpfennig, D., "R7: a snake like robot for 3-D visual inspection", *17th Int. Symposium on Industrial Robots* (April 1987).
4. Gray, J., Lissmann, H., "The kinetics of locomotion of the grass-snake", *J. Exp. Biol.* 26 (4), pp 354-367 (1950).
5. نخعی‌نژاد، محسن، مقداری، علی، و نادری، داود، «مدل‌سازی، تحلیل دینامیکی و بهینه‌سازی پارامترهای حرکتی ربات مارمانند با معیار انرژی»، یازدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک (۳۰۰۳ ISME)، مشهد، (۱۳۸۲).
6. Matsuno, F. and Mogi, K. "Redundancy controllable system and control of a snake robots based on kinematics model", *39th IEEE Conference on Decision and Control*, Sydney (December 2000)
7. Gravgne, A. and Woodfine, R. "Mine-sniffing robotic snakes and eels", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (1997).
8. Paljug, R., Ohm T. and Hayati, S., "The JPL serpentine robot: a 12 DOF system for inspection", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (1995).
9. Sastry, S. and Kohn, M., "Milli robotics for remote, minimally invasive surgery", *Robotics and Autonomous Systems* (1997).
10. Paap, K. L., Christaller, T. and Kirchner, F., "A robot snake to inspect broken buildings", *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems* (2000).
11. Hirose, S., "Three basic types of locomotion in mobile robots", *In Proc. 5th Int. Conf. On Advanced Robots* (1991).
12. Date, H. and Hoshi, Y., "Locomotion control of a snake robot with constraint force attenuation", *American Control Conference*, VA, USA (June 2001).
13. Massashi, S., "Serpentine locomotion with robotic snakes", *IEEE Journal of Control System*, 22 (2002).
14. Umetani, Y., "Mechanism and control of serpentine movement", *In Proc. 1st Biomechanism Symposium*, pp 253-260.
15. Dowling, K., "Limbless locomotion: learning to crawl", *In Proc. IEEE Int. Conf. Robotics & Automation*, Detroit, MI, pp 3001-3006 (1999).
16. Rdiok, J., Radford, J. and Chirikjian, G., "A side winding locomotion gait for hyper redundant robots", *Advanced Robotics*, 9 (1995).
17. Mori, M. and Hirose, S., "Development of active cord mechanism ACM-R3 with agile 3-D mobility", *IEEE Int. Conf. on Intelling Robotics and Systems*, Hawaii (Nov. 2001).
18. Hirose, S., "Biological inspired robots", Oxford University Press, (1993).
19. Date, H., Hoshi, Y. and Sampei, M., "Dynamic manipulability of a snake-like robot with consideration of side force and its application to locomotion control", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (1999).