



انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران

ICME 2010

۱۰-۱۲ اسفند ماه ۱۳۸۸

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل



دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

تحلیل دینامیکی ربات مارمانند در حرکت موج شکل بر اساس دو منحنی Serpenoid متقارن و غیرمتقارن

مسعود طهانی^۱، علیرضا اکبرزاده توتونچی^۲، هادی کلانی^۳، جواد صافحیان^{۴*}

1-دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد؛

2-استادیار، دانشگاه فردوسی مشهد؛

3-دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد؛

4-دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، safehian_javad@yahoo.com

چکیده

در این مقاله پس از بررسی مختصری بر روی دو منحنی Serpenoid متقارن و غیر متقارن، دینامیک ربات مارمانند در حرکت موج شکل بررسی شده است. منحنی Serpenoid غیرمتقارن نسبت به Serpenoid متقارن، دارای تعداد پارامترهای بیش تری برای کنترل شکل منحنی است، لذا با کنترل مناسب این پارامترها، می توان به شرایط مطلوب تری در دینامیک ربات مارمانند دست یافت. نیروهای گرانش زمین و اصطکاک، قیدهای محیطی این مدل حرکتی محسوب می شوند. در این مدل حرکتی نیروی اصطکاک به عنوان تنها نیروی پیشروی مطرح است. در دینامیک ربات مارمانند، ابتدا دیاگرام نیروهای آزاد وارد بر لینک آم بررسی می شود و سپس معادلات دینامیکی با توجه به سینماتیک ربات بدست می آیند. در این مقاله پس از پیاده سازی معادلات دینامیکی ربات مارمانند در قالب برنامه ای در نرم افزار MATLAB، حرکت ربات به کمک این نرم افزار و همچنین نرم افزار ADAMS شبیه سازی شده است. در انتها به بررسی گشتاورهای محرک در هر لینک پرداخته شده است. به علاوه تاثیر ضریب اصطکاک، زاویه مطلق لینک اول ربات مارمانند و پارامترهای منحنی Serpenoid غیرمتقارن بر روی گشتاورهای محرک ربات بررسی شده است.

واژه های کلیدی: ربات مارمانند، منحنی Serpenoid متقارن، منحنی Serpenoid غیرمتقارن، ضریب اصطکاک، حرکت موج شکل

۱-مقدمه

اغلب مدل های حرکت ربات مارمانند، معمولاً نیاز به چرخ در زیر بدنه ربات را دارند. برخلاف بیشتر مدل های حرکتی، در حرکت موج شکل، نیازی به چرخ نیست. به علاوه به علت حرکت در صفحه ای عمودی عرض مسیر این حرکت به طور تقریبی با عرض ربات مارمانند برابر است. در صورتی که در حرکتی مانند Serpentine به علت حرکت در صفحه ای افقی عرض مسیر با دامنه حرکت مار برابر است. یکی از منابع اصلی مطالعاتی ربات مارمانند توسط Hirose نوشته شده است [1] که در آن ربات مارمانند از دیدگاه بیولوژیکی بررسی شده است. در کتاب Hirose مسیری که مار بر روی آن حرکت می کند به منحنی Serpenoid نسبت داده شده است. Chen و همکارانش [۲] در مقاله ای خود مدلی برای حرکت موج شکل ارائه کرده و آن را از نظر سینماتیک و دینامیک مورد مطالعه قرار داده اند. همچنین ایشان نتایج محاسبات خود را بر روی یک ربات ۸ لینکی پیاده سازی کرده اند. Ma و همکارانش [۴] به بررسی ربات مارمانند در امتداد منحنی Serpenoid متقارن و غیرمتقارن بر روی



انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران

ICME 2010

۱۰-۱۲ اسفند ماه ۱۳۸۸

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل



دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

سطوح شیبدار پرداخته و تاثیر پارامتر غیرمقارن بر روی گشتاور مورد نیاز مفاصل را نیز مورد بررسی قرار داده‌اند. به علاوه Chirikijian و Burdick [5] مدل حرکت Slidwiding را از نظر سینماتیکی بررسی کرده‌اند. در مقاله‌ای دیگر [6] Ostrowski پس از مطالعه بر روی ربات ACM III و قیود سینماتیکی آن نشان می‌دهد که مدل حرکتی Serpentine بسیار به منحنی Serpenoid نزدیک می‌باشد. Ma و همکارانش [7] در ادامه تحقیقات خود با تحلیل حرکت خزشی ربات مارمانند و شبیه‌سازی آن، گشتاورهای ورودی به مفاصل ربات را بررسی نموده و در ادامه به بهینه‌سازی پارامترهای منحنی Serpenoid پرداخته‌اند. Ma و Ohmameuda در مقاله‌ای [8] سینماتیک و دینامیک ربات مارمانند سه بعدی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. سپس گشتاور مورد نیاز را در مفصل‌های مختلف بدست آورده‌اند. Wang و همکارانش [9] در مقاله خود نشان می‌دهند که از ترکیب حرکت Serpentine و حرکت موج‌شکل به حرکت جدیدی می‌توان دست یافت که آن را حرکت Lateral Rolling نام‌گذاری می‌کند.

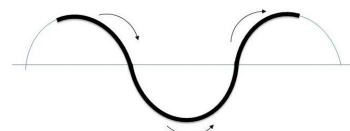
۲- آنالیز شکل بدن ربات مارمانند:

۲-۱- منحنی متقارن Serpenoid¹

این منحنی که در شکل (۱) و شکل (۲) نشان داده شده‌است. یکی از بهترین منحنی‌های فرض شده برای حرکت مار است.



شکل ۲، حرکت Serpentine

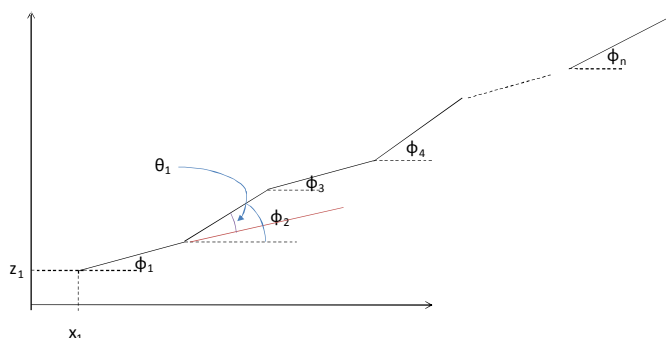


شکل ۱، منحنی Serpenoid

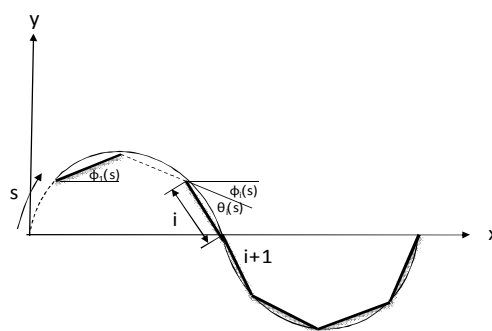
انحناء منحنی از رابطه (۱) بدست می‌آید [۱]:

$$\rho(s) = \frac{-2k_n\pi\alpha}{L} \sin\left(\frac{2k_n\pi s}{L}\right) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، L طول ربات مارمانند، k_n تعداد موج‌ها، α زاویه پیش‌اولیه منحنی و s طول بدنه در جهت منحنی بدن مار است که در شکل نشان داده شده‌است. ربات مارمانند شامل n لینک به طول l است که توسط $n-1$ مفصل به یکدیگر متصل شده‌اند.



شکل ۴، نمایش زوایای نسبی و مطلق



شکل ۳، قرار گرفتن لینکها بر روی منحنی Serpenoid

با فرض تطبیق شکل ظاهری بدن مار با منحنی Serpenoid، می‌توان زوایای نسبی لینک‌ها را به صورت زیر محاسبه کرد:

¹ Serpenoid curve



$$\theta_i(s) = -\alpha \sin\left(\frac{k_n \pi}{L}\right) \times \sin\left(\frac{\gamma k_n \pi s}{L} + \frac{\gamma k_n \pi i}{l} - \frac{k_n \pi}{n}\right) \quad (2)$$

که در رابطه‌ی بالا، n تعداد لینک‌ها و l طول هر لینک است. با داشتن s از معادله (۲) $\theta_i(s)$ قابل محاسبه خواهد بود. مشتق اول و دوم $\theta_i(s)$ به ترتیب سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای را ایجاد خواهد کرد. با توجه به شکل (۴) دیده می‌شود که زوایای مطلق هر لینک ربات مارمانند از مجموع زوایای لینک‌های قبلی و ϕ_1 (زاویه‌ی مطلق لینک اول) به راحتی قابل محاسبه است. همچنین اگر از این زوایا مشتق گرفته شود، می‌توان سرعت و شتاب زاویه‌ای مطلق لینک‌ها را استخراج نمود. لذا با کنترل θ_i پیکره‌ی ربات مارمانند قابل کنترل خواهد بود.

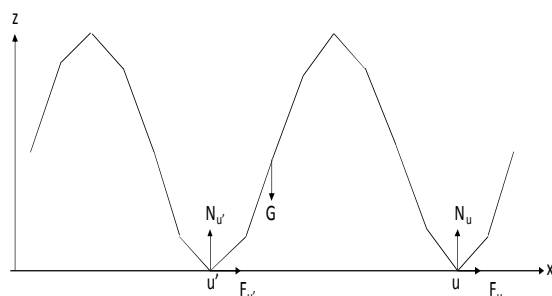
$$\phi_i = \phi_1 + \sum_{k=1}^{i-1} \theta_k \quad (3)$$

۲-۲ - منحنی Serpenoid غیر متقارن (Unsymmetrical curve)

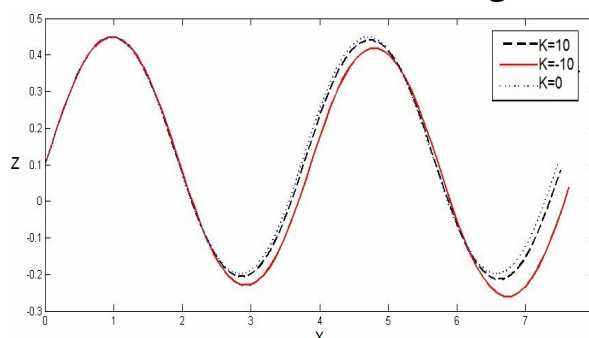
با تغییر زاویه پیچش اولیه برای هر کدام از مفصل‌ها، می‌توان منحنی Serpenoid را بهبود بخشید. منحنی حاصل Serpenoid غیرمتقارن نامیده می‌شود که شعاع انحنای منحنی به صورت رابطه‌ی (۴) تعریف می‌شود که $\alpha(i) = \frac{\pi}{180} ki + \alpha$.

$$\rho(s) = \frac{-\gamma k_n \pi \alpha(i)}{L} \sin\left(\frac{\gamma k_n \pi s}{L}\right) \quad (4)$$

با تغییر در پارامتر k منحنی غیرمتقارن ایجاد می‌شود. در شکل (۵) تاثیر پارامتر k بر روی منحنی Serpenoid غیرمتقارن را مشاهده می‌کنید [۴].



شکل ۶، نیروهای خارجی وارد بر ربات مارمانند



شکل ۵، نمایش منحنی Serpenoid غیرمتقارن برای $\alpha = \frac{\pi}{6}$

۳- دینامیک ربات مارمانند:

دینامیک ربات مارمانند از ترکیب قیود محیطی و دینامیک مکانیزم بدست می‌آید. دینامیک سیستم مدلی برای ارتباط بین گشتاورها و حرکت و همچنین نیروهای عمل و عکس‌العمل بین بدن ربات و قیود محیطی مانند اصطکاک، ایجاد می‌کند.

۳-۱- دینامیک سیستم

برای بررسی دینامیک ربات مارمانند، ابتدا باید دیاگرام نیرویی لینک i را رسم شود شکل (۷). در این شکل $N_{i,i+1}$ و $F_{i,i+1}$ به ترتیب نیروهای عکس‌العمل و اصطکاک لینک $i+1$ بر لینک i است. همچنین T_i و f_i و m_i و I_i به ترتیب نشان دهنده‌ی گشتاور، نیروی داخلی، جرم و ممان اینرسی لینک i هستند. که با توجه به قانون دوم نیوتن می‌توان نوشت:

درجهت x ,



$$f_{ix} - f_{i+1x} + F_{i,i} + F_{i,i+1} = m\ddot{x}_{iG} \quad (5)$$

در جهت y ,

$$f_{iz} - f_{i+1z} + N_{i,i} + N_{i,i+1} - mg = m\ddot{z}_{iG} \quad (6)$$

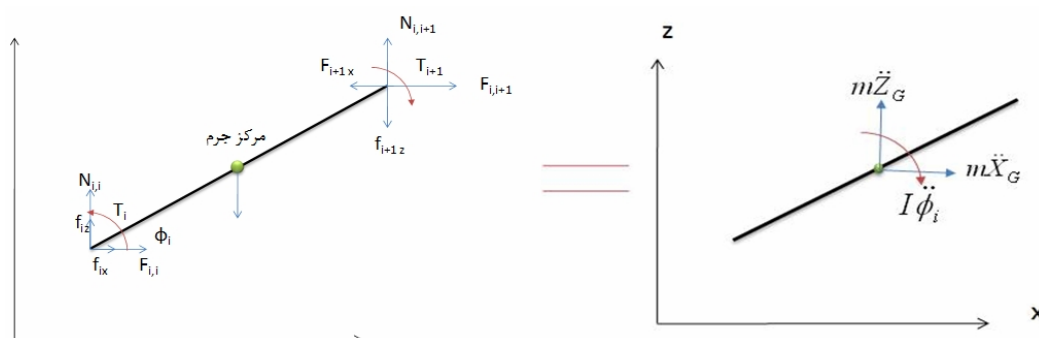
در عین حال با گشتاورگیری حول مرکزجرم:

$$\tau_i - \tau_{i+1} + (f_{ix} + f_{i+1x} + F_{i,i} - F_{i,i+1})l \sin \phi_i / 2 - (f_{iz} + f_{i+1z} + N_{i,i} - N_{i,i+1})l \cos \phi_i / 2 = I_i \ddot{\phi}_i \quad (7)$$

به علت آزاد بودن لینک‌های سر و دم ربات مارمانند داریم:

$$f_{1x} = f_{1z} = f_{n+1x} = f_{n+1z} = 0 \quad (8)$$

$$\tau_1 = \tau_{n+1} = 0 \quad (9)$$



شکل ۷. دیگرام نیروهای وارده بر لینک i

از معادلات ۵ و ۶ و ۷ می توان نوشت:

$$\sum_{i=1}^n m\ddot{x}_{iG} = \sum_{i=1}^n F_i \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n m\ddot{z}_{iG} = 0 \quad (11)$$

نکته‌ی قابل ذکر در رابطه‌ی (۱۱) اینکه، ربات مارمانند تنها در جهت محور x ها شتاب دارد و در جهت محور z ها شتاب مرکزجرم صفر است. حال اگر معادلات سینماتیک را در معادلات (۱۰) و (۱۱) قرار دهیم داریم:

$$m\ddot{x}_i - m \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\sum_{k=1}^{i-1} (l \cos(\phi_k) \dot{\phi}_k^2 + l \sin(\phi_k) \ddot{\phi}_k) + \frac{l}{\nu} \cos(\phi_i) \dot{\phi}_i^2 + \frac{l}{\nu} \sin(\phi_i) \ddot{\phi}_i \right] \right\} = \sum_{i=1}^n F_i \quad (12)$$

$$n\ddot{z}_i - \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\sum_{k=1}^{i-1} (l \sin(\phi_k) \dot{\phi}_k^2 - l \cos(\phi_k) \ddot{\phi}_k) + \frac{l}{\nu} \sin(\phi_i) \dot{\phi}_i^2 - \frac{l}{\nu} \cos(\phi_i) \ddot{\phi}_i \right] \right\} = 0 \quad (13)$$

معادلات بالا ارتباط بین $\ddot{z}_i, \dot{\phi}_i, \ddot{\phi}_i, \ddot{x}_i$ را بیان می‌کند. می‌توان معادلات (۵) و (۶) را به صورت زیر ساده کرد:

$$f_{ix} = \sum_{j=i}^n m\ddot{x}_j - \sum_{j=i+1}^{n+1} F_j - F_{i,i} \quad (14)$$

$$f_{iz} = \sum_{j=i}^n m\ddot{z}_j - \sum_{j=i+1}^{n+1} N_j + (n+1-i)mg - N_{i,i} \quad (15)$$

با جایگذاری روابط (۱۴) و (۱۵) را در رابطه‌ی (۷) رابطه‌ی (۱۶) حاصل خواهد شد:



$$\tau_i - \tau_{i+1} + \left(\sum_{j=i}^n m\ddot{x}_j - m\ddot{x}_i - \sum_{j=i+1}^{n+1} F_j \right) l \sin \phi_i / \tau - \left(\sum_{j=i}^n m\ddot{z}_j - m\ddot{z}_i - \sum_{j=i+1}^{n+1} N_j + (\tau n + 1 - \tau i) mg \right) l \cos \phi_i / \tau = I_i \ddot{\phi}_i \quad (16)$$

همانطور که می‌دانیم $\sum_{i=1}^n (\tau_i - \tau_{i+1}) = 0$ است، لذا از رابطه‌ی (۱۶) داریم:

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \left(\sum_{j=i}^n m\ddot{x}_j - m\ddot{x}_i - \sum_{j=i+1}^{n+1} F_j \right) l \sin \phi_i / \tau - \left(\sum_{j=i}^n m\ddot{z}_j - m\ddot{z}_i - \sum_{j=i+1}^{n+1} N_j + (\tau n + 1 - \tau i) mg \right) l \cos \phi_i / \tau \right\} = \sum_{i=1}^n I_i \ddot{\phi}_i \quad (17)$$

در این روابط $N_j = N_{j-1,j} + N_{j,j}$ و $F_j = F_{j-1,j} + F_{j,j}$ است. به کمک روابط (۱۲) و (۱۵) و (۱۷) که حاوی سه مجهول $\ddot{x}_1, \ddot{z}_1, \ddot{\phi}_1$ هستند و با استفاده از روابط اویلر (یا همان تعریف مشتق) می‌توان X_1, Z_1, ϕ_1 لحظه بعد را محاسبه کرد.

۳-۲- بررسی قیود محیطی

با توجه به شکل (۶) نیروهای تکیه‌گاهی به صورت زیر قابل تعریف هستند:

$$N_u = \frac{1}{d} \left[(G + M\ddot{Z}_G)(x_G - x_u) - M\ddot{X}_G z_G \right] \quad (18)$$

$$N_u = G - N_u' \quad (19)$$

در روابط (۱۸) و (۱۹)، d فاصله بین دو نقطه تکیه‌گاهی و همچنین $M\ddot{X}_G$ و $M\ddot{Z}_G$ نیروهای اینرسی در جهت X و Z هستند. نیروی اصطکاک ویسکوز قابل اغماض است، لذا نیروی اصطکاک کولمب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_i = -\mu \cdot \text{sign}(v) \cdot N_i \quad (20)$$

در حرکت ربات مارمانند، بدون وجود اصطکاک حرکتی اتفاق نمی‌افتد. نکته دیگر اینکه برای حفظ تعادل ربات مارمانند، بایستی مرکز جرم ربات میان دو نقطه‌ی در تماس با زمین قرار داشته‌باشد.

۴- نتایج شبیه سازی

۴-۱- منحنی Serpenoid متقارن

در این قسمت حرکت موج‌شکل شبیه‌سازی شده‌است و نتایجی از قبیل تاثیر اصطکاک و زاویه پیش‌اولیه بر گشتاور و همچنین تاثیر پارامتر k در منحنی Serpenoid غیرمتقارن مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پارامترهای شبیه‌سازی عبارتند از:

$$K_n = \tau, \quad m = 0.1 \text{ kg}, \quad l = 0.1 \text{ m}, \quad L = 1.6 \text{ m}, \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2, \quad n = 16, \quad I = 0.001 \text{ kgm}^2$$

در حرکت موج‌شکل، پیکره‌ی ربات بر اساس تغییر پارامتر s تغییر می‌کند. نحوه‌ی تغییر پارامتر s به صورت زیر است:

$$\dot{s} = \begin{cases} a & 0 \leq t < T/10 \\ 0 & T/10 \leq t < 9T/10 \\ -a & 9T/10 \leq t < T \end{cases} \quad \text{و } a = 0.625 \text{ m/s}^2$$

زمان حرکت $T=32 \text{ s}$ و همچنین شرایط اولیه به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$x_1 = 0, \quad z_1 = 0, \quad \dot{x}_1 = 0, \quad \dot{z}_1 = 0, \quad \phi_1 = \alpha, \quad \dot{\phi}_1 = 0$$

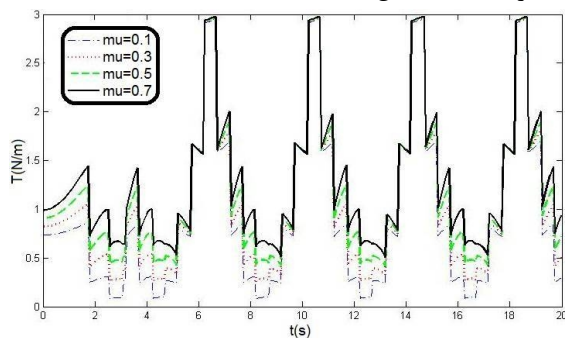
با توجه به کتاب Hirose و مقاله‌هایی که در مورد منحنی Serpenoid نوشته شده است، می‌توان زاویه مطلق لینک اول در ربات مارمانند را بر حسب متغیر s به صورت رابطه‌ی (۲۱) نوشته می‌شود.

$$\phi_1 = \alpha \cos\left(\frac{2\pi k_n s}{L}\right) \quad (21)$$

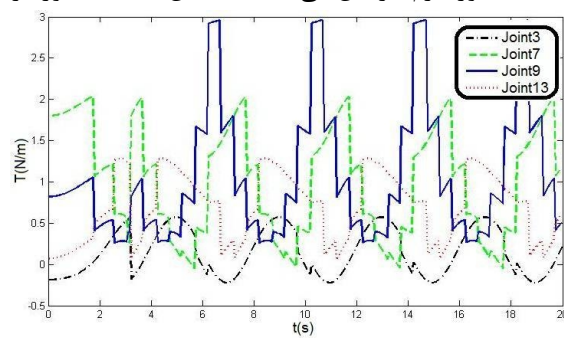


۱-۱-۴ بررسی گشتاور در مفصل‌های ربات

با فرض $\mu = 0.3, \alpha = \frac{\pi}{6}$ ، گشتاور مفصل‌های ۳ و ۷ و ۹ و ۱۱ در شکل (۸) نشان داده شده‌اند. همانطور که در شکل دیده می‌شود، گشتاور مورد نیاز در مفصل ۹ از بقیه گشتاورها بیش‌تر است. به طور کلی هرچه مفصل به مرکز جرم ربات نزدیک‌تر باشد، گشتاور لازم افزایش می‌یابد. به همین علت گشتاور در مفصل ۹ از بقیه‌ی مفاصل است.



شکل ۹. تاثیر محیط بر روی گشتاور مفصل ۹



شکل ۸. تغییرات گشتاور ($\mu=0.3$) و ($\alpha=\pi/6$)

۱-۲-۴ تاثیر ضریب اصطکاک بر گشتاور مفاصل

مفصل ۹ را در نظر بگیرید، وقتی که $\alpha = \pi/6$ و μ به عنوان ضریب اصطکاک در حال تغییر باشد، گشتاور مورد نیاز به صورتی که در شکل (۹) نشان داده شده‌است، تغییر می‌کند. همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش ضریب اصطکاک، گشتاور ورودی نیز افزایش می‌یابد.

۱-۳-۴ تاثیر زاویه پیچش اولیه بر گشتاور

در مفصل ۹ با فرض $\mu = 0.3$ و این‌بار تغییر α به صورت $\frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{12}$ ، گشتاورها به صورت شکل (۱۰) تغییر خواهند کرد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش زاویه پیچش اولیه، گشتاور ورودی کاهش می‌یابد. نکته این‌که اگر ربات مارمانند مجبور به حرکت بر روی سطح شیب‌دار باشد، این عمل باعث افزایش گشتاور مورد نیاز می‌شود. نتایج شبیه‌سازی این مقاله با نتایج شبیه‌سازی و تجربی که در مقاله [۲] انجام شده برابر است.

۲-۴ منحنی Serpenoid غیرمتقارن

در این حالت که زاویه پیچش هر مفصل با توجه به شماره‌ی مفصل مورد نظر تغییر می‌کند، با پیدا کردن یک مقدار k بهینه می‌توان گشتاورها را بهینه کرد [۴].

۱-۲-۴ تاثیر پارامتر k بر روی گشتاور

مفصل ۹ را در نظر بگیرید، فرض کنید که $\alpha = \pi/6$ و $\mu = 0.3$ و همچنین به صورت $k = -0.5, 0, 0.5, 5$ تغییر کند. نتیجه تاثیر این تغییرات بر گشتاور لینک‌ها در شکل (۱۱) نشان داده شده‌است. شکل‌های ۱۲-الف و ۱۲-ب تاثیر k را در دو حالت $k = -10$ و $k = 10$ بر روی مفصل‌های ۳ و ۷ و ۹ و ۱۳ را نشان می‌دهند. از طرفی اگر پارامتر غیرمتقارن را برابر ۳ در نظر بگیریم، تاثیر ضریب اصطکاک و همچنین زاویه پیچش اولیه بر روی گشتاور مفصل ۹ به صورت شکل‌های (۱۲) و (۱۳) می‌باشد، که با افزایش ضریب اصطکاک و افزایش زاویه پیچش اولیه، به ترتیب گشتاور مورد نیاز افزایش و کاهش می‌یابد.



انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران

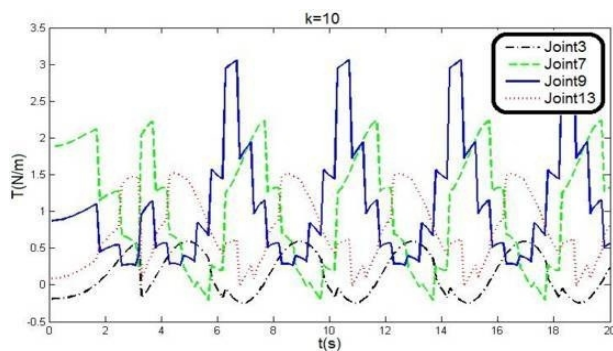
ICME 2010

۱۰-۱۲ اسفند ماه ۱۳۸۸

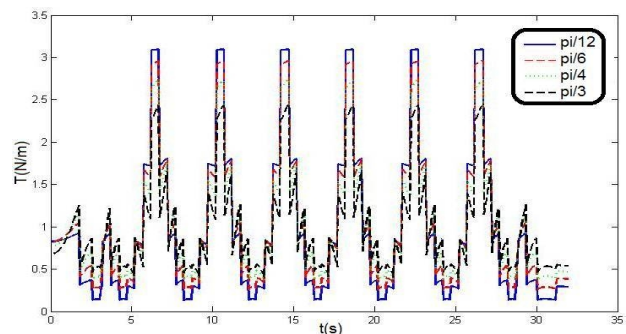
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل



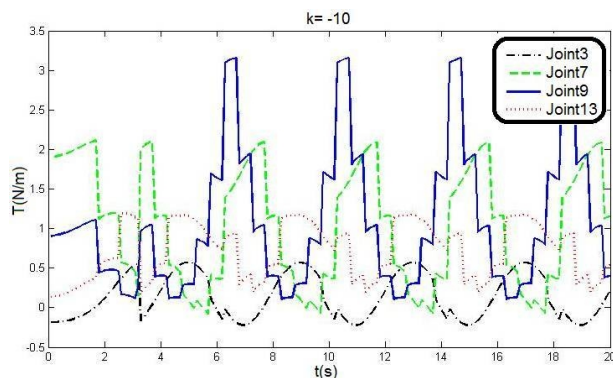
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل



الف) تغییرات گشتاور $(\mu=0,3)$ و $(\alpha=\pi/6)$ و $k=10$

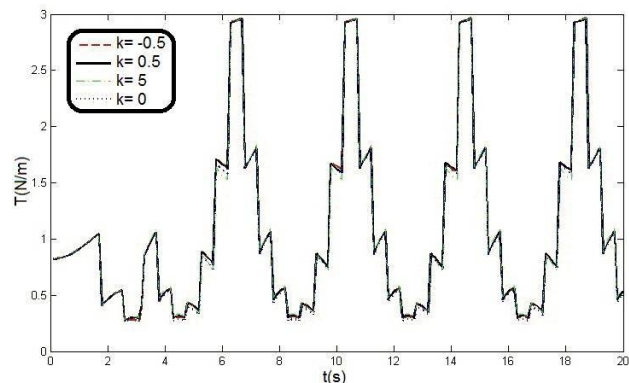


شکل ۱۰، تاثیر زاویه پیچش اولیه (α) بر روی گشتاور مفصل ۹



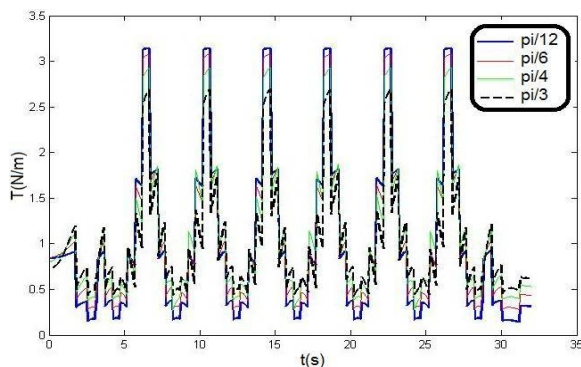
ب) تغییرات گشتاور $(\mu=0,3)$ و $(\alpha=\pi/6)$ و $k=-10$

شکل ۱۲

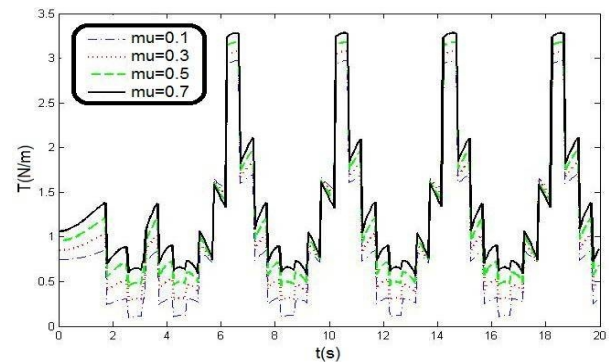


شکل ۱۱، تغییرات گشتاور در مفصل ۹ به طوریکه $(\mu=0,3)$ و $(\alpha=\pi/6)$ و

$k=-0,5,0,0,5,5$



شکل ۱۴، تاثیر زاویه پیچش اولیه بر گشتاور مفصل ۹ در $k=3$



شکل ۱۳، تاثیر ضریب اصطکاک بر گشتاور مفصل ۹ در $k=3$

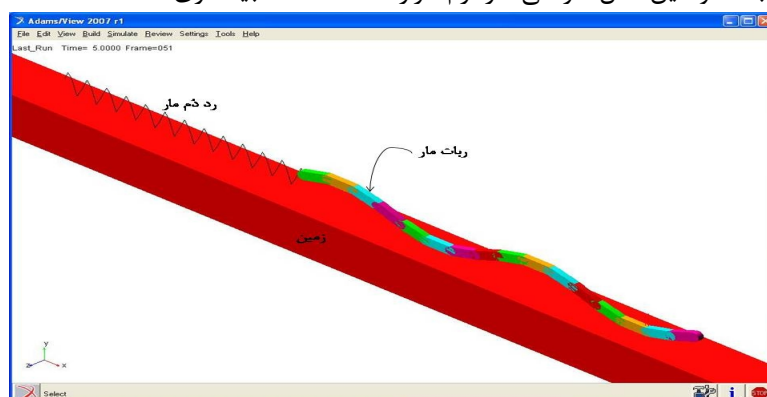
۵- شبیه سازی حرکت موج شکل در نرم افزار ADAMS

پس از ایجاد مدل ربات مارمانند در این نرم افزار و برای تعریف زمین، قیود مورد نیاز یعنی تماس با زمین و ضریب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی تعریف می شود. سپس به موتورهای روی مفصل های زاویه های نسبی رابطی (۲) داده شده است. در شکل (۱۵) نتیجه این شبیه سازی و همچنین رد دم مار نشان داده شده است. با انجام این شبیه سازی در محیط نرم افزار ADAMS و مشاهده تشابه نحوه پیش روی، صحت محاسبات در نرم افزار MATLAB تضمین می شود.



۶- نتایج:

در این مقاله دینامیک ربات مارمانند در حرکت موج‌شکل بر روی دو منحنی Serpenoid متقارن و غیرمتقارن مورد بررسی قرار گرفته‌است و نشان داده‌شد که هرچه لینک مورد نظر به مرکز جرم نزدیک‌تر باشد، گشتاور مورد نیاز افزایش می‌یابد. همچنین همان‌طور که در شبیه‌سازی این حرکت نشان داده‌شد با افزایش ضریب اصطکاک، گشتاور لازم برای حرکت افزایش و با افزایش زاویه اولیه پیچشی، گشتاور لازم کاهش می‌یابد. همچنین تاثیر پارامتر k در منحنی Serpenoid غیرمتقارن مورد بررسی قرار گرفته است. به علاوه این مدل حرکتی، در نرم افزار ADAMS شبیه‌سازی شده‌است.



شکل ۸، شبیه‌سازی شده‌ی حرکت موج‌شکل در نرم افزار ADAMS

منابع

- 1- S. Hirose, Biologically Inspired Robots (Snake-like Locomotor and Manipulator), Oxford University Press, 1993.
- 2- Li Chen, Shugen Ma, Yuechao Wang, Bin Li, Design and modelling of a snake robot in traveling wave locomotion, Mechanism and Machine Theory 42 (2007) 1632–1642.
- 3- L. Chen, Y.C. Wang, S.G. Ma, B. Li, Analysis of the traveling wave locomotion of snake robot, in: Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics, Intelligent Systems and Signal processing, 2003, pp. 365–369.
- 4- Shugen Ma, Naoki Tadokoro, Kousuke Inoue, Bin Liz, Influence of Inclining Angle of a Slope to Optimal Locomotion Curves of a Snake-like Robot, Proceedings of the 2003 IEEE Changsha, China - October 2003 International Conference on Robotics, intelligent Systems and Signal Processing.
- 5- G. S. Chirikjian and J. W. Burdick, The Kinematics of Hyper-Redundant Robotic Locomotion, IEEE Trans. On Robotics and Automation, Vol. 11, No.6, pp. 781-793, 1995.
- 6- J. Ostrowski, J. Burdick, Gait Kinematics for a Serpentine Robot, Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation Minneapolis, Minnesota- April 1996.
- 7- Shugen. Ma, Wen j. Li, Yuechao WANG, A Simulator to Analyze Creeping Locomotion of a Snake-like Robot, Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation Seoul, Korea' May 21-26, 2001.
- 8- Shugen. Ma, Yoshihiro Ohmameuda, Kousuke Inoue, Dynamic Analysis of 3-dimensional Snake Robots, in: Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.
- 9- L. Chen, Y.C. Wang, S.G. Ma, B. Li, Studies on lateral rolling locomotion of a snake robot, in: Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2004, pp. 5070–5074.