



ISAV2022

دوازدهمین کنفرانس بین المللی آگوستیک و ارتعاشات

تهران - ایران ۲۳ و ۲۴ آذر ماه ۱۴۰۱



مدلسازی دینامیکی و مطالعه پارامتری یک ربات ارتعاشی با حرکت صفحه‌ای

سیدمهدی موسوی^۱، وحید فخاری^{۲*}

^۱ ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشجوی کارشناسی ارشد

^۲ ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، استادیار

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: v_fakhari@sbu.ac.ir

چکیده

در این مقاله، مدلسازی دینامیکی و مطالعه پارامتری یک ربات ارتعاشی با حرکت صفحه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. ربات مورد نظر از یک بدنه صلب اصلی و دو جرم داخلی و محرک تشکیل شده است که حرکت محرک‌ها در دو جهت عمود بر هم می‌باشد و منجر به حرکت صفحه‌ای مورد انتظار می‌شود. به این ترتیب که با تغییر دامنه ارتعاشی و فرکانس تحریک جرم‌های محرک، مانورهای حرکتی مختلفی برای ربات به وجود می‌آید. در ابتدا معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت ربات با در نظر گرفتن اصطکاک خشک کولمب برای پدیده چسبیدن - لغزش^۱ و با استفاده از روش لاگرانژ استخراج می‌شود. سپس حل عددی انجام شده با حل نرم‌افزار سیم‌اسکیپ^۲ مقایسه و صحت‌سنجی شده و در ادامه اثر پارامترهای مختلف نظیر دامنه، فرکانس و اختلاف فاز بین دو محرک بر سرعت متوسط طولی، جانبی و دورانی ربات بررسی می‌شود. در انتها به بحث و نتیجه‌گیری پرداخته می‌شود.

کلمات کلیدی: ربات ارتعاشی؛ حرکت صفحه‌ای؛ مطالعه پارامتری؛ مدلسازی دینامیکی.

۱- مقدمه

اخیراً توسعه ربات‌های ارتعاشی توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. عدم نیاز به اجزای خاص پیش‌ران مانند پایه‌ها، چرخ‌ها، بال‌ها، پیچ‌ها، ملخ‌ها و غیره باعث شده تا ربات‌های ارتعاشی نیازی به قطعات خارج از بدنه ربات نداشته باشند. به همین دلیل ساخت و عایق کاری آن آسان بوده و می‌تواند در محیط‌های باریک حرکت کند. بنابراین، می‌توان از آنها به عنوان میکروروبات‌های کپسولی با کاربردهایی نظیر بازرسی خط لوله، تشخیص حیات در فاجعه، اکتشاف بستر دریا، آندوسکوپی پزشکی و غیره استفاده کرد.

^۱ Stick-slip

^۲ Simscape

چرنوسکو [۳-۱]، یک ربات ارتعاشی دارای یک بدنه و جرم داخلی را مورد بررسی قرار داد و حرکت را برای دو نوع ورودی شتاب (دو فازی و سه فازی) در حضور سه نوع اصطکاک (کولمب، مقاوم خطی و مقاوم مربع) بررسی کرد. سپس، پارامترهای سیستم را برای رسیدن به حداکثر سرعت متوسط به دست آورد. در ادامه فنگ و خو [۴، ۵]، ورودی سه فازی برای انجام حرکت حالت پایدار سیستم (سرعت تناوبی) در نظر گرفتند و در حالت عدم حضور اثر چسبیدن-لغزش، فرمولی برای سرعت متوسط با استفاده از روش میانگین‌گیری در حضور اصطکاک خشک و همچنین مقاومت خطی پیشنهاد کردند. سپس به بهینه‌سازی سرعت و حرکت ربات پرداختند و اثر ورودی‌های مختلف به سیستم را نشان دادند. ژووی دو و همکاران [۶]، مدل مکانیکی سیستم‌های حرکتی ارتعاشی را با تمرکز بر دستاوردهای تجربی و طبقه‌بندی حرکت لغزش چسبیده و تأیید طبقه‌بندی از دیدگاه انشعاب لغزشی تحلیل کردند. لینلین وو و همکاران [۷]، یک ربات ارتعاشی را با یک محرک مغناطیسی خطی با ساختاری ساده آزمایش کردند که می‌تواند توسط جریان کنترل شود. آنها همچنین یک نمونه اولیه به نام کپسول-بات ساختند و آن را با چندین ورودی جریان مختلف آزمایش کردند و بهترین شکل موج جریان را پیشنهاد کردند که می‌تواند جابجایی خالص کپسول را به حداکثر برساند. ون دو نگوین و نگوک توآن [۸]، طرح جدیدی از یک سیستم حرکتی مبتنی بر ارتعاش را برای بهبود تحرک این سیستم‌ها پیشنهاد کردند. به این ترتیب، حرکت بدون ضربه نسبت به محرک ارتعاشی خالص ایجاد می‌شود. سیستم جدید همچنین می‌تواند توسط نیروی سینوسی نیمه موج تحریک شود و از هر گونه الگوریتم کنترل حرکت پیچیده برای جرم داخلی اجتناب کند. علاوه بر این، ربات می‌تواند حتی در حضور اصطکاک همسانگرد به جلو حرکت کند و آن‌ها در [۹] دو سیستم حرکت ارتعاشی خالص و حرکت ارتعاشی ضربه‌ای را با توجه به نحوه حرکت به جلو و پاسخ دینامیکی آنها در سطوح مختلف نیروی اصطکاک مقایسه کردند. خاک توآن نگوین و همکاران [۱۰]، به بررسی اثر اصطکاک بر دینامیک حرکت ربات مرجع [۸] را بررسی کردند.

بولتونیک و همکاران [۱۱]، به بررسی یک ربات ارتعاشی، دارای یک بدنه و یک آونگ پرداختند و اثرات پارامترهای مختلف بر روی سرعت در حضور اصطکاک کولمب را بررسی کردند و در ادامه‌ی آن سوپولوو و سوروکین [۱۲]، به تأیید داده‌های تحلیلی با استفاده از داده‌های تجربی پرداختند. همچنین سوروکین [۱۳]، مدل ارائه شده در [۱۱] را در امتداد سطح شیب‌دار بررسی و اثر پارامترها را بر سرعت متوسط ربات ارائه کرد. پنگ لی و زیوانگ جیانگ [۱۴]، به تحلیل انشعابی چسبیدن-لغزش ربات ارتعاشی با محرک آونگی پرداختند. ساپرونوو و همکاران [۱۵]، رفتار یک سیستم ارتعاشی شامل دو بدنه متصل شده توسط عنصر ویسکو-الاستیک خطی و محرک الکترومغناطیسی را مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند سرعت متوسط به فرکانس و دامنه‌ی ولتاژ کنترلی و همچنین نسبت جرم دو بدنه بستگی دارد.

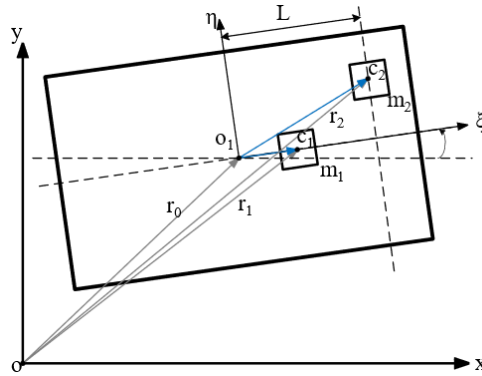
شیانگ ژان و همکاران [۱۶-۱۸]، حرکت مسطح سیستم‌های ارتعاش محور را بررسی کردند. آن‌ها سه مدل ربات ارائه دادند. اولین مدل دارای سه جرم داخلی است و اصطکاک آن از قانون کولمب پیروی می‌کند. آنها با در نظر گرفتن ورودی‌های سه فازی، رفتار ربات در صفحه را بررسی کردند. دومین مدل دارای دو جرم داخلی است و اصطکاک خشک کولمب برای تجزیه و تحلیل آن استفاده شد. در این مدل جرم‌های داخلی در دو جهت متعامد ارتعاش می‌کنند که یکی برای حرکت سیستم به جلو و دیگری برای چرخاندن آن استفاده می‌شود. همچنین با معرفی یک محدودیت غیرهولونومیک، از نظر تئوری سرعت انتقال و چرخش سیستم را به دست آوردند. سپس حرکت مسطح سیستم ناشی از اثر لغزش چوب را تحلیل کردند. در مدل سوم، آنها یک ربات مینیاتوری به نام شل را بر اساس سیستم ارتعاشی مدلسازی کردند. آنها دو جرم داخلی را در دو شیار موازی قرار دادند که به صورت سینوسی برای حرکت روی صفحه ارتعاش می‌کنند. همچنین با ساخت ربات و به دست آوردن نتایج تجربی مدل خود را تأیید کردند.

بر اساس مرور انجام شده بر پژوهش‌های پیشین، مطالعه پارامتری حرکت صفحه‌ای ربات‌های ارتعاشی یا انجام نشده است یا تحلیل انجام شده دارای قید و شرایط خاص بوده است. بنابراین این مقاله به مدلسازی دینامیکی و مطالعه پارامتری یک ربات ارتعاشی در صفحه بدون حضور قید می‌پردازد.

در این مقاله، در بخش ۲ معادلات دینامیکی با استفاده از روش لاگرانژ استخراج می‌شود، سپس در بخش ۳ در ابتدا معادلات استخراج شده و حل عددی با نرم افزار سیم‌اسکیپ صحت‌سنجی می‌شود و سپس به تحلیل تاثیر ورودی‌های مختلف بر سرعت ربات پرداخته می‌شود و در انتها، در بخش ۴ نتیجه‌گیری صورت می‌گیرد.

۲- معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت ربات

ربات ارتعاشی مورد نظر دارای یک بدنه صلب و دو جرم محرک است. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، محرکها عمود بر هم نوسان می کنند و باعث تحریک و حرکت ربات می شوند.



شکل ۱. نمای شماتیک ربات ارتعاشی صفحه‌ای.

برای به دست انرژی جنبشی ربات ارتعاشی، $r_i (i=1,2)$ را به عنوان بردار موقعیت جرم i ، $o_1 = (x, y)^T$ را به عنوان موقعیت مرکز بدنه m_0 در سیستم مختصات کارتزین xoy تعریف می کنیم و $o_1 c_i (i=1,2)$ را به عنوان موقعیت جرم i در سیستم مختصات کارتزین $\xi\eta$ تعریف می کنیم. بنابراین به راحتی می توان دید که انرژی جنبشی جرم i به صورت زیر است:

$$T_0 = \frac{1}{2} m_0 (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} J_0 \dot{\theta}^2 \quad (1)$$

$$T_1 = \frac{1}{2} m_1 ((\dot{x} + \dot{\xi} \cos \theta - \dot{\zeta} \dot{\theta} \sin \theta)^2 + (\dot{y} + \dot{\zeta} \sin \theta + \dot{\xi} \dot{\theta} \cos \theta)^2) + \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}^2 \quad (2)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} m_2 ((\dot{x} - L \dot{\theta} \sin \theta - \dot{\eta} \sin \theta - \dot{\theta} \eta \cos \theta)^2 + (\dot{y} + L \dot{\theta} \cos \theta + \dot{\eta} \cos \theta - \dot{\theta} \eta \sin \theta)^2) + \frac{1}{2} J_2 \dot{\theta}^2 \quad (3)$$

که در آن m_2 و m_1 به ترتیب جرم محرک اول و دوم هستند و J_0 ، J_1 و J_2 به ترتیب ممان اینرسی بدنه، محرک اول و محرک دوم هستند. بنابراین، کل انرژی جنبشی سیستم در نظر گرفته شده را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$T = \sum_{i=0}^2 T_i \quad (4)$$

با قرار دادن معادله (۴) در معادله لاگرانژ، معادلات سیستم به صورت زیر استخراج می شوند:

$$(m_0 + m_1 + m_2) \ddot{x} + (m_1 (\ddot{\zeta} - \dot{\zeta} \dot{\theta}^2) - m_2 (L \dot{\theta}^2 + 2 \dot{\eta} \dot{\theta} + \eta \ddot{\theta})) \cos \theta - (m_1 (2 \dot{\zeta} \dot{\theta} + \zeta \ddot{\theta}) + m_2 (-\eta \dot{\theta}^2 + L \ddot{\theta} + \dot{\eta})) \sin \theta = Q_x \quad (5)$$

$$(m_0 + m_1 + m_2) \ddot{y} + (m_1 (\ddot{\zeta} - \dot{\zeta} \dot{\theta}^2) - m_2 (L \dot{\theta}^2 + 2 \dot{\eta} \dot{\theta} + \eta \ddot{\theta})) \sin \theta + (m_1 (2 \dot{\zeta} \dot{\theta} + \zeta \ddot{\theta}) + m_2 (-\eta \dot{\theta}^2 + L \ddot{\theta} + \dot{\eta})) \cos \theta = Q_y \quad (6)$$

$$(J + m_1 \zeta^2 + m_2 (\eta^2 + L^2)) \ddot{\theta} + 2(m_1 \zeta \dot{\zeta} + m_2 \eta \dot{\eta}) \dot{\theta} + (m_1 \zeta_1 + m_2 L) (\ddot{y} \cos \theta - \ddot{x} \sin \theta) - m_2 \eta (\ddot{y} \cos \theta + \ddot{x} \sin \theta) + m_2 L \dot{\eta} = Q_\theta \quad (7)$$

که در آن Q_x ، Q_y و Q_θ نیروهای اصطکاک هستند. در ادامه با استفاده از ماتریس دوران فرمولها به شکل زیر در می آیند:

$$(m_0 + m_1 + m_2)\ddot{s} + m_1(\ddot{\zeta} - \zeta\dot{\theta}^2) - m_2(L\dot{\theta}^2 + 2\eta\dot{\theta} + \eta\ddot{\theta}) = -R_s \quad (۸)$$

$$(m_0 + m_1 + m_2)\ddot{n} + m_1(2\zeta\dot{\theta} + \zeta\ddot{\theta}) + m_2(-\eta\dot{\theta}^2 + L\ddot{\theta} + \ddot{\eta}) = -R_n \quad (۹)$$

$$(J + m_1\zeta^2 + m_2(\eta^2 + L^2))\ddot{\theta} + 2(m_1\zeta\dot{\zeta} + m_2\eta\dot{\eta})\dot{\theta} + (m_1\zeta + m_2L)\dot{s} - m_2\eta\ddot{n} + m_2L\ddot{\eta} = -M_\theta \quad (۱۰)$$

که در آن R_s ، R_n و M_θ به ترتیب نیروی اصطکاک در جهت ζ ، در جهت η و گشتاور آن‌ها می‌باشند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$R_s = \begin{cases} (m_0 + m_1 + m_2)gf_+ & \dot{s} > 0 \\ F_s & \dot{s} = 0 \\ -(m_0 + m_1 + m_2)gf_- & \dot{s} < 0 \end{cases}, \quad -(m_0 + m_1 + m_2)gf_- \leq F_s \leq (m_0 + m_1 + m_2)gf_+ \quad (۱۱)$$

$$R_n = \begin{cases} (m_0 + m_1 + m_2)gf & \dot{n} > 0 \\ F_n & \dot{n} = 0 \\ -(m_0 + m_1 + m_2)gf & \dot{n} < 0 \end{cases}, \quad -(m_0 + m_1 + m_2)gf \leq F_n \leq -(m_0 + m_1 + m_2)gf \quad (۱۲)$$

$$M_\theta = \begin{cases} (m_0 + m_1 + m_2)gV & \dot{\theta} > 0 \\ M_{fs} & \dot{\theta} = 0 \\ -(m_0 + m_1 + m_2)gV & \dot{\theta} < 0 \end{cases}, \quad -(m_0 + m_1 + m_2)gV \leq M_{fs} \leq (m_0 + m_1 + m_2)gV \quad (۱۳)$$

که در اینجا g شتاب گرانش و f_+ ، f_- ، f و V به ترتیب ضرایب اصطکاک هنگام حرکت رو به جلو، هنگام حرکت رو به عقب، هنگام حرکت جانبی و در هنگام دوران می‌باشند. مقدار V با انتگرال‌گیری از سطح تماس ربات با زمین به دست می‌آید که با فرض توزیع نیروی عمودی سطح یکنواخت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V = \frac{1}{2}(fa + 2f_+b) \quad (۱۴)$$

که در آن $2a$ و $2b$ ابعاد بدنه‌ی ربات هستند. در انتها جابجایی جرم‌ها، به صورت زیر به عنوان ورودی‌های سیستم در نظر گرفته می‌شود:

$$\zeta = A_1 \sin(\omega_1 t) \quad (۱۵)$$

$$\eta = A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (۱۶)$$

۳- صحت‌سنجی حل عددی و مطالعه پارامتری

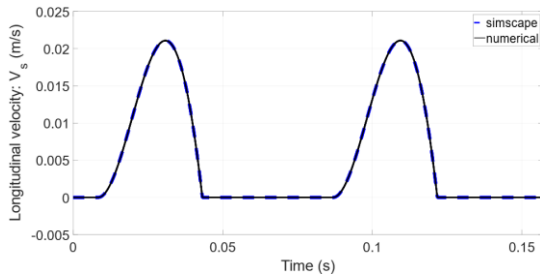
۳-۱ صحت‌سنجی حل عددی

برای مدل‌سازی حرکت صفحه‌ای ربات، پارامترهای فیزیکی سیستم به صورت زیر انتخاب می‌شوند:

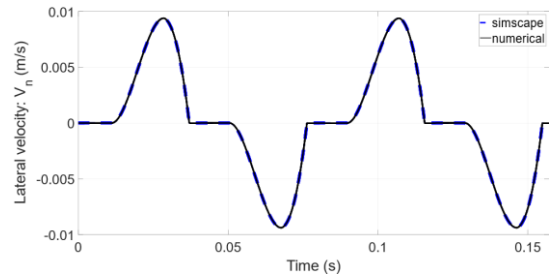
$$m_0 = 0.3 \text{ kg}, \quad m_1 = m_2 = 0.026 \text{ kg}, \quad A_1 = A_2 = 0.008 \text{ m}, \quad J = 5.2 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$$

$$f_- = 0.8, \quad f_+ = 0.24, \quad f = 0.3, \quad L = 0.05 \text{ m}, \quad a = 0.063 \text{ m}, \quad b = 0.035 \text{ m}$$

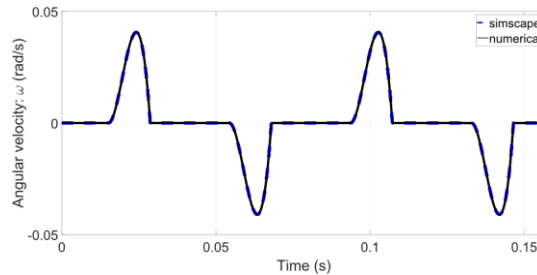
بر اساس پارامترهای انتخاب شده، مقدار V برابر با 0.0179 به دست می‌آید و مقدار φ نیز برابر 0 در نظر گرفته می‌شود. همانطور که در شکل (۲) قابل مشاهده است، حل عددی و حل سیم‌اسکیپ کاملاً بر روی هم منطبق هستند. همچنین حداکثر درصد خطا برای سرعت طولی برابر با 0.05% ، در راستای جانبی برابر با 0.15% و حداکثر درصد خطای سرعت دورانی نیز برابر با 0.3% به دست آمده است که نشان دهنده‌ی صحیح بودن معادلات و حل عددی انجام شده می‌باشد.



(ب)



(الف)

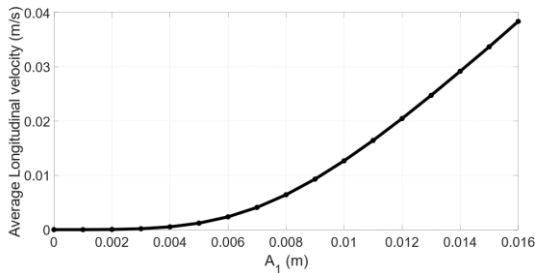


(ج)

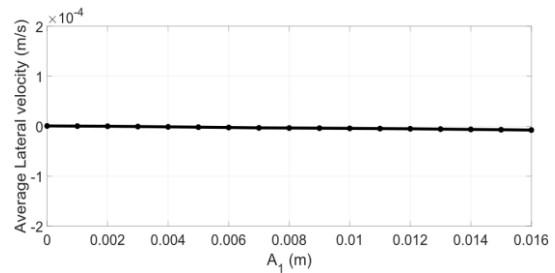
شکل ۲. نمودار سرعت طولی برای حل عددی و سیماسکپ: (الف) سرعت جانبی، (ب) سرعت طولی و (ج) سرعت دورانی.

۳-۲ مطالعه پارامتری

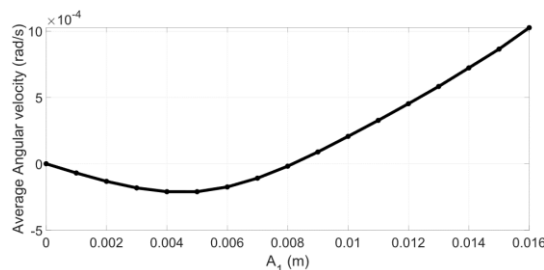
در این بخش برای رسم نمودارها و به دست آوردن اثر هر پارامتر بر سرعت متوسط در جهات مختلف، مقادیر فیزیکی در نظر گرفته شده در بخش (۳-۱) به عنوان مقادیر نامی در نظر گرفته می‌شود و فقط پارامتر مورد نظر تغییر می‌کند. بر اساس فرمول‌های (۱۵) و (۱۶)، پنج پارامتر که بر ورودی تاثیر می‌گذارند عبارتند از A_1 ، A_2 ، ω_1 ، ω_2 و ϕ_1 . نمودارهای (۳) تا (۷) نشان دهنده سرعت متوسط دورانی، سرعت متوسط جانبی و سرعت متوسط طولی بر اساس این پارامترها می‌باشند.



(ب)



(الف)

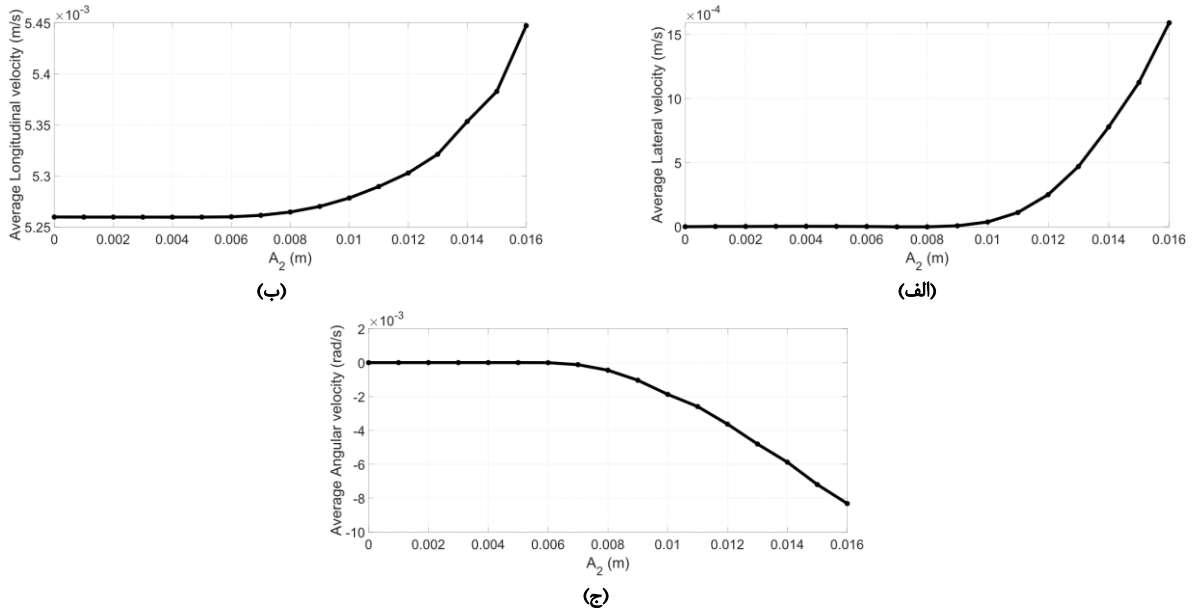


(ج)

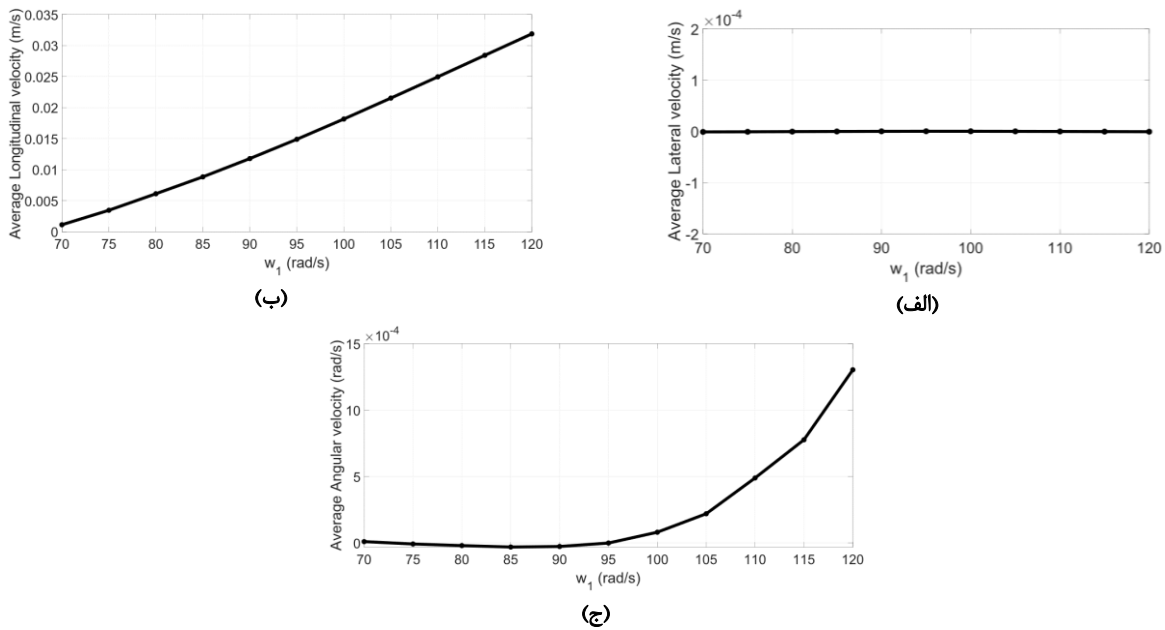
شکل ۳. نمودار سرعت متوسط بر حسب A_1 : (الف) سرعت جانبی، (ب) سرعت طولی و (ج) سرعت دورانی.

بر اساس نمودارهای شکل (۳)، با افزایش دامنه‌ی محرک اول، سرعت متوسط طولی افزایش پیدا می‌کند سرعت متوسط دورانی در ابتدا افزایش، سپس کاهش و در انتها افزایش پیدا می‌کند اما تاثیر آن بر متوسط سرعت جانبی کاهش و ناچیز است. نمودارهای

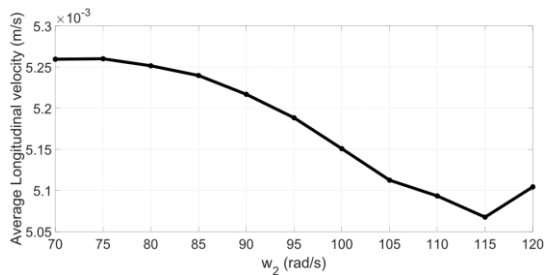
شکل (۴)، نشان دهنده‌ی افزایش سرعت متوسط طولی، جانبی و دورانی در هنگام افزایش دامنه‌ی محرک دوم هستند ولی بر اساس شکل (۴-ج) جهت حرکت ربات تغییر می‌کند. بر اساس شکل (۵)، با افزایش فرکانس محرک اول سرعت متوسط طولی افزایش پیدا می‌کند، سرعت متوسط جانبی ثابت می‌ماند و سرعت متوسط دورانی نیز در فرکانس‌های بالا افزایش می‌یابد. شکل (۶) نشان می‌دهد که بر اثر افزایش فرکانس محرک دوم سرعت متوسط طولی در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و سرعت‌های متوسط جانبی و دورانی نیز با علامت مخالف در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابند. همچنین، علت تغییر جهت در فرکانس‌های بالا ناشی از اثر متقابل فرکانس محرک اول می‌باشد. اختلاف فاز بین دو محرک تأثیری بر سرعت متوسط طولی و جانبی ندارد که در شکل (۷) قابل مشاهده است و سرعت متوسط دورانی با افزایش اختلاف فاز در ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.



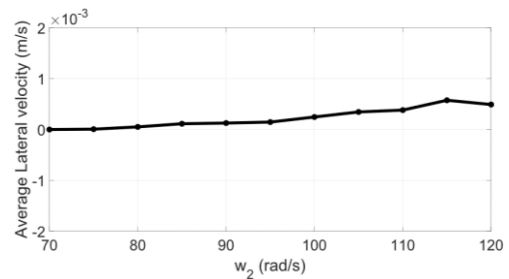
شکل ۴. نمودار سرعت متوسط بر حسب A_2 : (الف) سرعت جانبی، (ب) سرعت طولی و (ج) سرعت دورانی.



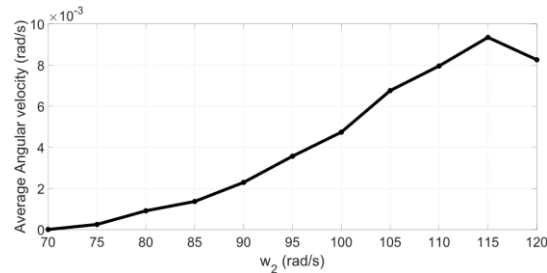
شکل ۵. نمودار سرعت متوسط بر حسب ω_1 : (الف) سرعت جانبی، (ب) سرعت طولی و (ج) سرعت دورانی.



(ب)

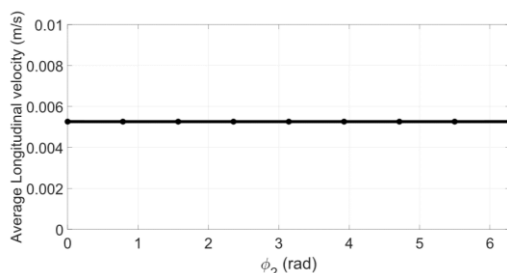


(الف)

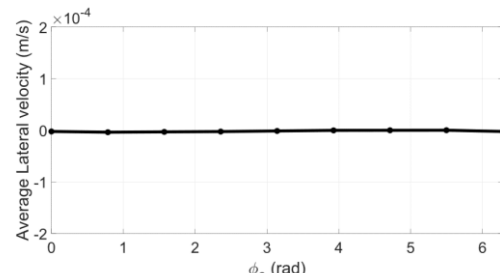


(ج)

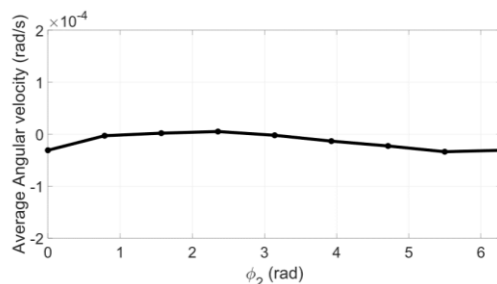
شکل ۶. نمودار سرعت متوسط بر حسب ω_2 : (الف) سرعت جانبی، (ب) سرعت طولی و (ج) سرعت دورانی.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۷. نمودار سرعت متوسط بر حسب ϕ_2 : (الف) سرعت جانبی، (ب) سرعت طولی و (ج) سرعت دورانی.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله به تحلیل رفتار یک ربات ارتعاشی دارای یک بدنه و دو جرم محرک متعامد در صفحه پرداخته شده است. در ابتدا معادلات دینامیکی حاکم استخراج و حل عددی آن با نرم افزار سیماسکیپ اعتبارسنجی شد و در انتها به تحلیل اثر پارامترهای مختلف بر سرعت متوسط ربات پرداخته شد. براساس نتایج به دست آمده، برای افزایش متوسط سرعت طولی بهتر است دامنه‌های دو محرک افزایش و فرکانس محرک اول کاهش یابد. همچنین، به منظور کاهش سرعت متوسط جانبی، کاهش دامنه و فرکانس دو محرک دوم پیشنهاد می‌شود و برای افزایش سرعت متوسط دورانی بر اساس جهت دلخواه، می‌توان از دامنه و فرکانس هر دو محرک استفاده کرد.

1. F. Chernous'ko, "Analysis and optimization of the motion of a body controlled by means of a movable internal mass," *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 70, no. 6, pp. 819-842, 2006.
2. F. Chernous'ko, "The optimal periodic motions of a two-mass system in a resistant medium," *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 72, no. 2, pp. 116-125, 2008.
3. F. Chernousko, "On the optimal motion of a body with an internal mass in a resistive medium," *Journal of Vibration and Control*, vol. 14, no. 1-2, pp. 197-208, 2008.
4. H. Fang and J. Xu, "Dynamic analysis and optimization of a three-phase control mode of a mobile system with an internal mass," *Journal of Vibration and Control*, vol. 17, no. 1, pp. 19-26, 2011.
5. H.-b. Fang and J. Xu, "Dynamics of a mobile system with an internal acceleration-controlled mass in a resistive medium," *Journal of sound and vibration*, vol. 330, no. 16, pp. 4002-4018, 2011.
6. Z. Du, H. Fang, X. Zhan, and J. Xu, "Experiments on vibration-driven stick-slip locomotion: a sliding bifurcation perspective," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 105, pp. 261-275, 2018.
7. L. Wu, K. Lu, and Y. Xia, "Investigation of Current Control for a New Bi-directional Linear Capsule Robot," in *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2019: IEEE, pp. 3707-3711.
8. V.-D. Nguyen and N.-T. La, "An improvement of vibration-driven locomotion module for capsule robots," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, pp. 1-15, 2020.
9. N.-T. La, T.-T. Nguyen, and V.-D. Nguyen, "A comparative study on the two vibration driven locomotion systems in various friction levels," *Vietnam Journal of Mechanics*, vol. 43, no. 2, pp. 121-137, 2021.
10. K.-T. Nguyen, N.-T. La, K.-T. Ho, Q.-H. Ngo, N.-H. Chu, and V.-D. Nguyen, "The effect of friction on the vibro-impact locomotion system: modeling and dynamic response," *Meccanica*, vol. 56, no. 8, pp. 2121-2137, 2021.
11. N. Bolotnik, I. Zeidis, K. Zimmermann, and S. Yatsun, "Dynamics of controlled motion of vibration-driven systems," *Journal of Computer and Systems Sciences International*, vol. 45, no. 5, pp. 831-840, 2006.
12. N. Sobolev and K. Sorokin, "Experimental investigation of a model of a vibration-driven robot with rotating masses," *Journal of Computer and Systems Sciences International*, vol. 46, no. 5, pp. 826-835, 2007.
13. K. Sorokin, "Motion of a mechanism along a rough inclined plane using the motion of internal oscillating masses," *Journal of Computer and Systems Sciences International*, vol. 48, no. 6, pp. 993-1001, 2009.
14. Y. Liu, J. Páez Chávez, B. Guo, and R. Birler, "Bifurcation analysis of a vibro-impact experimental rig with two-sided constraint," *Meccanica*, vol. 55, no. 12, pp. 2505-2521, 2020.
15. K. Saproinov, A. Cherepanov, and S. Yatsun, "Investigation of motion of a mobile two-mass vibration-driven system," *Journal of Computer and Systems Sciences International*, vol. 49, no. 1, pp. 144-151, 2010.
16. X. Zhan and J. Xu, "Locomotion analysis of a vibration-driven system with three acceleration-controlled internal masses," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 7, no. 3, p. 1687814015573766, 2015.
17. X. Zhan, J. Xu, and H. Fang, "Planar locomotion of a vibration-driven system with two internal masses," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 40, no. 2, pp. 871-885, 2016.
18. X. Zhan, J. Xu, and H. Fang, "A vibration-driven planar locomotion robot—Shell," *Robotica*, vol. 36, no. 9, pp. 1402-1420, 2018.