مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1396، دوره 17، شماره 8، ص‌ص 413-422

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مدل‌سازی، ساخت و ارزیابی یک میکرو ربات مجهز به عملگر ارتعاشی

مرضیه کرمی[1]، علیرضا توکل‌پورصالح[2*]، اشکان نوروزی[1]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز ، شیراز

* شیراز، صندوق پستی 515-71555، tavakolpour@sutech.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 خرداد 1396

پذیرش: 11 مرداد 1396

ارائه در سایت: 03 شهریور 1396

کلید واژگان:

میکرو ربات

عملگر ارتعاشی

نیروی اصطکاک

چکیده

هدف از این تحقیق مدل‌سازی، کنترل و ساخت یک میکرو ربات با استفاده از عملگرهای ارتعاشی و بررسی سختی پایه‌های میکرو ربات و ضریب اصطکاک بر روی حرکت می‌باشد. در این میکرو ربات از اصل حرکتی لغزش- چسبیدن، جهت حرکت و از دو عدد موتور ارتعاشی کوچک جهت راه‌اندازی آن، استفاده شده است. در ابتدا معادلات حاکم بر میکرو ربات استخراج و تحلیل شده‌اند. با مدل‌سازی آن، به صورت سیستم فشرده، شامل سه جرم که با فنرهای سخت به هم وصل شده‌اند، نیروهای اصطکاک محاسبه شده است. سپس به‌وسیله دو معادله کوپل مکانیکی و الکتریکی مدل مناسب عملگرها به‌دست آمد. در گام بعدی روند شبیه‌سازی با استفاده از محیط سیمولینک و متلب بیان شد و نتایج آن ارائه گردید. سپس به بررسی تاثیر ضریب فنریت پایه‌ها و ضریب اصطکاک بر روی حرکت میکرو ربات پرداخته شده است. پس از آن کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی- مشتقی یا همان PID برای این کار در نظر گرفته شد. در نهایت نیز فرآیند ساخت و ارزیابی تجربی میکرو ربات ارائه شده است. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده دقت حرکتی آن در حالت بیشترین سرعت مستقیم، حدود 17 میکرومتر می‌باشد و مطابق با ارزیابی تجربی، سرعت مستقیم میکرو ربات حدود 4mm/s، به ازای ولتاژ مرجع 1V، می‌باشد.

Modeling, development, and evaluation of a micro-robot equipped with vibratory actuator

Marzieh Karami[1], AliReza Tavakolpour Saleh[2*], Ashkan Norouzi[3]

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran
* P.O.B. 71555-515, Shiraz, Iran, tavakolpour@sutech.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 31 May 2017
Accepted 02 August 2017
Available Online 25 August 2017

Keywords:
Micro-robot
Vibratory actuator
Friction force

ABSTRACT

The aims of this research paper are modeling, control and development of a mobile micro-robot equipped with vibratory actuators and investigating the effect of stiffness of micro-robot's bases as well as friction coefficient on the robot dynamics. Accordingly, the motion principle of stick-slip is used and two small vibrating motors are utilized to run this micro-robot. First, the differential equations governing the micro-robotic platform are extracted and analyzed. Then, friction forces are calculated by modeling the micro-robot as a lumped system, consisting of three point masses connected together via stiff springs. Next, using mechanical and electrical coupled equations, an appropriate model for the vibratory actuators is obtained. In the next step, simulation process with SIMULINK and MATLAB is carried out and the simulation results are presented. Afterward, the influences of the stiffness of robot's bases as well as the friction coefficient on the motion of robot are investigated. A proportional-integral-derivative (PID) controller is applied to the micro-robot to precisely control its motion. Finally, the construction process and experimental evaluation of the micro-robot are presented. According to the simulation result, the positioning accuracy of the micro robot is about 17 μm at its maximum translational velocity. Furthermore, a translational velocity of about 4mm/s corresponding to the reference voltage of 1 V is acquired using experiment.

1- مقدمه

از آن جایی که میکرو ربات‌های بزرگ نمی‌توانند به محیط‌های کوچک دسترسی پیدا کنند و از دقت و حساسیت لازم برخوردار نیستند، میکرو رباتیک به یک شاخه مهم در علم رباتیک و یک زمینه تحقیقاتی مورد توجه برای بسیاری از مهندسان تبدیل شده است.

کاربرد میکرو ربات‌ها نه تنها به یک صنعت خاص محدود نمی‌شود، بلکه به طور چشمگیری در صنایع و علوم مختلف در حال افزایش می‌باشد. این میکرو ربات‌ها به علت حجم کم و دقت بالایی که دارند می‌توانند در صنایع نظامی و جاسوسی مورد استفاده قرار گیرند، همچنین می‌توان از آن‌ها برای دست‌یابی به فضاهایی که به دلایل مختلف قابل دسترسی نیستند استفاده کرد. به‌کارگیری در مکان‌هایی که در معرض اشعه‌های مضر قرار دارند یا استفاده درون لوله‌ها برای بازدید، تشخیص عیوب و حذف موانع نمونه‌هایی از کاربرد آن‌ها می‌باشد. در علم پزشکی نیز میکرو ربات‌ها کاربردهای بسیار مهمی دارند، برای مثال میکرو ربات‌هایی طراحی و ساخته شده‌اند که

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Karami, A. Tavakolpour Saleh, A. Norouzi, Modeling, development, and evaluation of a micro-robot equipped with vibratory actuator, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 413-422, 2017 (in Persian)

می‌توانند در رگ‌های بدن انسان حرکت کرده و دارو را به قسمت‌های مختلف بدن برسانند.

به طور کلی تعاریف متفاوتی از میکرو ربات در مراجع مختلف وجود دارد. میکرو ربات‌ها براساس وظایفی که به عهده دارند و همچنین ابعاد آن‌ها تعریف می‌شوند [1]. در حالتی که تعریف براساس وظیفه میکرو ربات صورت می‌گیرد، میکرو ربات به رباتی اطلاق می‌گردد که در ابعاد میکرو عمل می‌کند، به عنوان مثال می‌توان دقت حرکت در ابعاد میکرو را نام برد. ابعاد چنین میکرو ربات‌هایی از چند سانتی‌متر مکعب تا چند دسی‌متر مکعب می‌باشد. زمینه میکرو رباتیک تنها شامل طراحی این‌گونه میکرو ربات‌ها نمی‌شود، بلکه شامل کنترل، ابزار لازم و شیوه‌های خودکارسازی این میکرو ربات‌ها نیز می‌باشد.

ربات‌ها را می‌توان براساس ابعاد کلی نیز تعریف کرد. کاپاری آرگئوس [2] با توجه به ابعاد ربات‌ها، آنها را به چهار دسته تقسیم‌بندی می کند و برای هرکدام مرز مشخصی تعریف می نماید که در جدول 1 مشاهده می‌شود.

مرز تعیین شده توسط کاپاری برای ربات‌ها همخوانی خوبی با مقالات مختلف ندارد. ربات‌هایی با ابعاد چند میلی‌متر [4,3] یا با ابعاد چند صد میکرومتر، [5-7] توسط محققان، میکروربات شناخته می‌شوند و در یک تقسیم‌بندی کلی‌تر که مطابق با بسیاری از مقالات و تحقیقات می‌باشد، میکرو ربات به رباتی اطلاق می‌شود که ابعادی بین 100 میکرومتر مکعب و 1 اینچ مکعب داشته باشد [8].

تمام میکرو ربات‌ها در دسته میکرو ربات‌های متحرک[1] قرار نمی‌گیرند. برای ارائه یک تعریف کلی از میکرو ربات متحرک، پارامترهای مختلفی دخیل هستند. اما در یک تعریف جامع می‌توان گفت به رباتی کلمه متحرک نسبت داده می‌شود که دامنه حرکتی آن حداقل چندین برابر طول بدنه ربات باشد و یا به عبارتی میزان حرکت ربات تنها محدود به انرژی ذخیره شده در آن باشد. بنابراین می‌توان میکرو ربات متحرک را به‌طور خلاصه به‌صورت زیر تعریف کرد.

یک میکرو ربات متحرک میکرو رباتی است با ابعاد کوچکتر از 1 اینچ مکعب و بزرگتر از 100 میکرومتر مکعب، که دامنه حرکتی آن حداقل چندین برابر طول بدنه آن باشد.

ربات‌های متحرک نیز کاربردهای متنوعی در زندگی انسان دارند که از آن میان می‌توان به استفاده در صندلی‌های چرخ‌دار برای جابجایی افراد معلول و ناتوان، استفاده در تحقیقات فضایی به عنوان فضانورد، شناسایی مناطق جنگی و استفاده در محیط‌هایی که دارای اشعه رادیواکتیو هستند و بسیاری از کاربردهای دیگر اشاره کرد [9].

یکی از تقسیم‌بندی‌هایی که برای ربات‌های متحرک وجود دارد، تقسیم‌بندی آن‌ها براساس روش حرکتی مورد استفاده در آن‌ها می‌باشد. در طراحی و ساخت میکرو ربات مورد نظر در این پژوهش از اصل حرکتی

جدول 1 دسته‌بندی ربات‌ها توسط کاپارای [2]

Table 1 Classification of robots by Caprari [2]

ابعاد(حجم میکرو ربات)	دسته‌بندی
$1m^3$	ربات
$10^{-3}m^3 = 1dm^3$	مینی ربات
$10^{-6}m^3 = 1cm^3$	میکرو ربات
$10^{-9}m^3 = 1mm^3$	نانو ربات

[1] Mobile micro-robot

لغزش-چسبیدن[2] استفاده شده است . اصل حرکتی لغزش- چسبیدن با استفاده از مکانیزم مرحله‌ای، حرکت میکرو ربات را فراهم می‌کند. در روش حرکت به وسیله لغزش-چسبیدن، تولید لغزش، ناشی از ارتعاش جانبی و تغییر لغزش، ناشی از تغییر نیروی تکیه‌گاهی است که منجر به تغییر نیروی اصطکاک می شود. ارتعاش جانبی موجب لغزش متقارن پایه‌های میکرو ربات به سمت عقب و جلو می‌شود و در نتیجه ،حرکت خالص میکرو ربات صفر خواهد بود. اما اگر در حین این ارتعاش، نیروی تکیه‌گاهی و به تبع آن نیروی اصطکاک در یک جهت از لغزش کوچکتر و یا بزرگتر از جهت دیگر باشد، میزان لغزش نیز در دوجهت رو به جلو و رو به عقب متفاوت خواهد شد که باعث حرکت میکرو ربات خواهد شد.

وارتولومئوس[3] و پاپادوپلوس[4] [10] در سال 2005 یک مینی ربات متحرک با سه درجه آزادی که براساس اصل حرکتی لغزش-چسبیدن عمل می‌کرد را تحلیل و طراحی کردند. سیستم عملگر آن، سه میکرو موتور ارتعاشی می باشد. نتایج تحلیل و شبیه‌سازی این مینی ربات پیش‌بینی می‌کند که میانگین حداکثر سرعت آن 1.5 mm/s و بزرگ‌ترین گام آن حدود 40μm است. همین مولفان در سال 2005 به تحلیل دینامیک و کنترل سرعت یک میکرو ربات مجهز به سه عملگر ارتعاشی پرداختند[11] و در سال 2006 دینامیک، طراحی و شبیه‌سازی این میکرو ربات همراه با تشریح مدل اصطکاک، مورد مطالعه قرار دادند [12]. آن‌ها در سال 2006 مدل مشابهی را با استفاده از دو عملگر ارتعاشی معرفی کردند. سرعت آن از 0.5 mm/s تا 1.5 mm/s گزارش شده است [13]. رابنستین[5] و همکاران در سال2012 با طراحی مشابه، یک مینی ربات موسوم به کیلوبت[6] با استفاده از دو موتور ارتعاشی ساختند. آن‌ها تعداد 1024 عدد از آن را ساختند و مورد آزمایش و کنترل گروهی قرار دادند. از مزایای کیلوبت می‌توان به هزینه و مدت زمان کم، جهت ساخت اشاره کرد. جهت تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز، بر روی هر مینی ربات یک باتری لیتیوم-یون با ولتاژ 3/4 V و ظرفیت 160 mAh نصب گردیده بود [14]. اسپارتالی و همکاران در سال 2013 به کنترل سرعت میکرو موتورهای ارتعاشی میکرو ربات پرداختند [15].

هدف از انجام این تحقیق، طراحی و ساخت و کنترل یک میکرو ربات مجهز به عملگر ارتعاشی که دارای سه درجه آزادی (دو درجه آزادی مربوط به حرکت انتقالی و یک درجه آزادی مربوط به حرکت دورانی حول محور عمودی) است، می‌باشد. در این میکرو ربات از اصل حرکت لغزش- چسبیدن، استفاده شده است. همچنین به بررسی پارامترهای سختی پایه‌ها و ضریب اصطکاک سطح روی حرکت این میکرو ربات پرداخته شده است.

2- بررسی دینامیک میکرو ربات سه درجه آزادی

شماتیک این میکرو ربات شامل یک پلت فرم با مقطع دایره‌ای می‌باشد که به وسیله سه پایه A، B و C واقع بر روی رئوس یک مثلث متساوی الاضلاع، با سطح حرکت در تماس است و توسط دو موتور ارتعاشی D و E راه‌اندازی می‌شود. در "شکل 1" شماتیک میکرو ربات و نیروهای وارد شده به آن نشان داده شده است.

دینامیک میکرو ربات شامل دو بخش زیر می‌باشد:

معادلات دینامیکی میکرو ربات که نیروهای ناشی از موتورهای ارتعاشی را به حرکت میکرو ربات مرتبط می‌کنند.

[2] Stick-Slip
[3] Vartholomeos
[4] Papadopoulos
[3] Rubenstein
[4] Kilobot

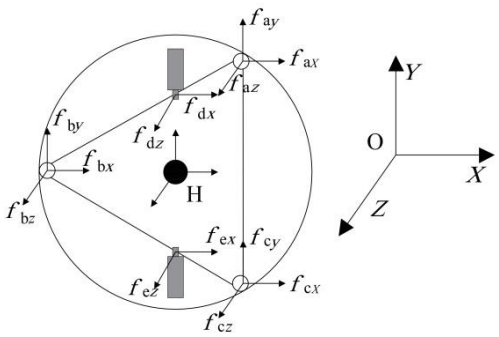

Fig.1 Micro-robot schematic and components of the applied forces on the platform

شکل 1 شماتیک میکرو ربات و مؤلفه‌های نیروهای وارد شده به پلت فرم

مدل دینامیکی عملگرها، که رفتار آن‌ها را نشان می‌دهد، و رابطه بین ولتاژ ورودی به آن‌ها و سرعت دورانی که منجر به تولید نیرو و عملکرد میکرو ربات می‌شود را بیان می‌کند.

در این پژوهش از روش نیوتن-اویلر جهت استخراج معادلات استفاده شده است.

در بررسی رفتار میکرو ربات‌های متحرک، جهت درک بهتر حرکت آن، می‌بایست یک مرجع ثابت در نظر گرفت تا بتوان سرعت و جابجایی میکرو ربات را نسبت به آن توصیف کرد. برای حل معادلات دینامیکی این میکرو ربات نیز یک دستگاه مختصات مرجع ثابت (O) و یک دستگاه مختصات متصل به مرکز میکرو ربات (H)، مطابق "شکل 1" انتخاب شده‌اند.

از آن‌جایی که نیروهای وارد شده به میکرو ربات نسبت به دستگاه مختصات متحرک نصب شده بر روی آن می‌باشند، یک تبدیل کلی جهت بیان این نیروها در دستگاه مختصات مرجع نیاز است. روش‌های متفاوتی برای بیان یک بردار در دستگاه مختصات دیگر وجود دارد، که در این تحقیق از تبدیل RPY[1] استفاده شده است. در این روش با سه دوران حول محورهای X، Y و Z با زوایای ψ، θ و φ، تبدیل از دستگاه مختصات اول به دستگاه مختصات دوم انجام می‌شود.

با توجه به این‌که میکرو ربات حرکت صفحه‌ای داشته و تنها حول محور Z به اندازه φ دوران می‌کند، بردار سرعت زاویه‌ای میکرو ربات به صورت زیر می‌باشد:

$$\omega_{\mathrm{P}} = [0 \quad 0 \quad \dot{\varphi}]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

بنابراین ماتریس دوران دستگاه مختصات متحرک نصب شده بر روی میکرو ربات، نسبت به دستگاه مختصات مرجع به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

معادلات دینامیکی میکرو ربات با استفاده از روش نیوتن-اویلر به صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$M\dot{V} = R\sum_i F_i \qquad i = \{\mathrm{a,b,c,d,e}\} \tag{3}$$

$$I\dot{\omega}_{\mathrm{p}} + \omega_{\mathrm{p}} \times I\omega_{\mathrm{p}} = \sum_i (r_i \times F_i) + \sum_j n_j$$
$$i = \{\mathrm{a,b,c,d,e}\} \quad j = \{\mathrm{d,e}\} \tag{4}$$

$$V = [\dot{X} \quad \dot{Y} \quad \dot{Z}]^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \Rightarrow I\omega_{\mathrm{p}} = [0 \quad 0 \quad I_{zz}\ddot{\varphi}]^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

$$\omega_{\mathrm{P}} = [0 \quad 0 \quad \dot{\varphi}]^{\mathrm{T}} \Rightarrow \omega_{\mathrm{P}} \times I\omega_{\mathrm{P}} = 0 \tag{7}$$

در معادلات فوق n_j گشتاور عکس‌العمل ناشی از چرخش موتورهای D و E می‌باشد، که به علت ناچیز بودن از آن‌ها صرف‌نظر می‌کنیم. در نتیجه با توجه به معادلات (6) و (7)، معادله (4) به شکل زیر ساده می‌شود:

$$\hat{Z} = [0 \quad 0 \quad 1]^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

$$I_{zz}\ddot{\varphi} = \hat{\mathrm{z}}\sum_i (r_i \times F_i) \tag{9}$$

r_i در معادلات فوق فاصله از مرکز جرم است. معادله (3) نیز برحسب مؤلفه‌ها به صورت زیر بیان می‌شود:

$$M\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \sum F_x \\ \sum F_y \\ \sum F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum F_x \cos\varphi - \sum F_y \sin\varphi \\ F_x \sin\varphi + \sum F_y \cos\varphi \\ \sum F_z \end{bmatrix} \tag{10}$$

r_i در معادلات فوق برای هرکدام از پایه‌ها و موتورها به صورت زیر به‌دست می‌آید. در "شکل 2" شماتیک نمای روبروی میکرو ربات و محل قرارگیری عملگرها و پایه‌ها و در "شکل 3" بردار موقعیت پایه‌ها و عملگرها نسبت به مرکز جرم نشان داده شده است.

با توجه به "شکل 3" معادلات زیر به دست می‌آید.

$$(q+e)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2 = l^2 \Rightarrow l^2 - \frac{l^2}{4} = (q+e)^2 \Rightarrow$$
$$(q+e) = \frac{\sqrt{3}}{2}l \tag{11}$$

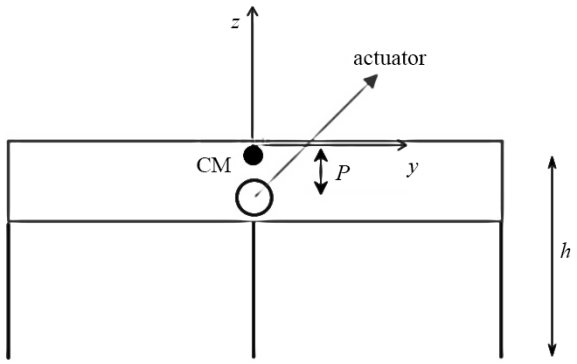

Fig.2 Front view of the micro-robot and the positions of actuators and bases

شکل 2 نمای روبروی میکرو ربات و محل قرارگیری عملگرها و پایه‌ها

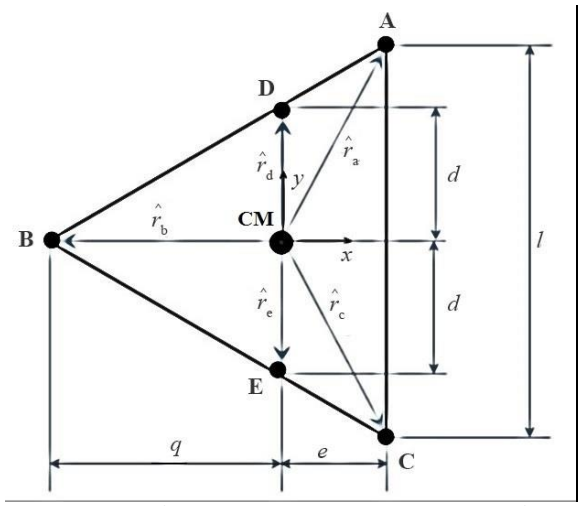

Fig.3 Position vector of bases and actuators towards the center of the mass

شکل 3 بردار موقعیت پایه‌ها و عملگرها نسبت به مرکز جرم

[1] Roll – Pitch – Yaw

$$q = \frac{2}{3}(q+e) = \frac{\sqrt{3}}{3}l \tag{12}$$

$$e = \frac{1}{3}(q+e) = \frac{\sqrt{3}}{6}l \tag{13}$$

$$\hat{r}_a = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}\,l}{6} & \frac{l}{2} & -h \end{bmatrix}^T \tag{14}$$

$$\hat{r}_b = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}\,l}{3} & -\frac{l}{2} & -h \end{bmatrix}^T \tag{15}$$

$$\hat{r}_c = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}l}{6} & -\frac{l}{2} & -h \end{bmatrix}^T \tag{16}$$

$$\hat{r}_d = [0 \quad d \quad -p]^T \tag{17}$$

$$\hat{r}_e = [0 \quad -d \quad -p]^T \tag{18}$$

با توجه به جهت قرارگیری عملگرها، و انتخاب دستگاه مختصات، مؤلفه‌های نیروی تولید شده توسط آن‌ها نسبت به دستگاه مختصات متحرک به صورت زیر به‌دست می‌آیند. قابل ذکر است که جهت نمایش مؤلفه نیروها از دو زیرنویس استفاده شده، که زیرنویس اول مربوط به پایه و یا عملگر مورد نظر و زیرنویس دوم مربوط به جهت اعمال نیرو است.

$$f_{ex} = -m_e r_e \omega_e^2 \sin\theta_e \tag{19}$$

$$f_{ey} = 0 \tag{20}$$

$$f_{ez} = -m_e g - m_e r_e \omega_e^2 \cos\theta_e \tag{21}$$

$$f_{dx} = m_d r_d \omega_d^2 \sin\theta_d \tag{22}$$

$$f_{dy} = 0 \tag{23}$$

$$f_{dz} = -m_d g - m_d r_d \omega_d^2 \cos\theta_d \tag{24}$$

مؤلفه‌های گشتاور هر نیرو در دستگاه مختصات نصب شده بر روی میکرو ربات نیز به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\hat{r}_a \times \hat{f}_a = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}l}{6} \\ \frac{l}{2} \\ -h \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_{ax} \\ f_{ay} \\ f_{az} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{lf_{az}}{2} + hf_{ay} \\ -hf_{ax} - \frac{\sqrt{3}lf_{az}}{6} \\ \frac{\sqrt{3}lf_{ay}}{6} - \frac{lf_{ax}}{2} \end{bmatrix} \tag{25}$$

$$\hat{r}_b \times \hat{f}_b = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}l}{3} \\ 0 \\ -h \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_{bx} \\ f_{by} \\ f_{bz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} hf_{by} \\ -hf_{bx} - \frac{\sqrt{3}lf_{bz}}{3} \\ -\frac{\sqrt{3}lf_{by}}{3} \end{bmatrix} \tag{26}$$

$$\hat{r}_c \times \hat{f}_c = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}l}{6} \\ -\frac{l}{2} \\ -h \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_{cx} \\ f_{cy} \\ f_{cz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{lf_{cz}}{2} + hf_{cy} \\ -hf_{cx} - \frac{\sqrt{3}lf_{cz}}{6} \\ \frac{\sqrt{3}lf_{cy}}{6} + \frac{lf_{cx}}{2} \end{bmatrix} \tag{27}$$

$$\hat{r}_d \times \hat{f}_d = \begin{bmatrix} 0 \\ d \\ -p \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_{dx} \\ f_{dy} \\ f_{dz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{df_{dz}}{2} + pf_{dy} \\ -pf_{dx} \\ -df_{dx} \end{bmatrix} \tag{28}$$

$$\hat{r}_e \times \hat{f}_e = \begin{bmatrix} 0 \\ -d \\ -p \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_{ex} \\ f_{ey} \\ f_{ez} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{df_{ez}}{2} + pf_{ey} \\ -pf_{ex} \\ df_{ex} \end{bmatrix} \tag{29}$$

با جایگذاری معادلات (19) الی (24) در معادلات (9) و (10)، معادلات دینامیکی میکرو ربات به صورت زیر حاصل می‌گردند:

$$M\ddot{X} = \left(-m_e r_e \omega_e^2 \sin\theta_e + m_d r_d \omega_d^2 \sin\theta_d + f_{ax} + f_{bx} + f_{cx}\right)\cos\varphi - \left(f_{ay} + f_{by} + f_{cy}\right)\sin\varphi \tag{30}$$

$$M\ddot{Y} = \left(-m_e r_e \omega_e^2 \sin\theta_e + m_d r_d \omega_d^2 \sin\theta_d + f_{ax} + f_{bx} + f_{cx}\right)\sin\varphi - \left(f_{ay} + f_{by} + f_{cy}\right)\cos\varphi \tag{31}$$

$$I_{zz}\ddot{\varphi} = \frac{\sqrt{3}l}{6} f_{ay} - \frac{l}{2} f_{ax} - \frac{\sqrt{3}l}{3} f_{by} + \frac{\sqrt{3}l}{6} f_{cy} + \frac{l}{2} f_{cx} - dm_e r_e \omega_e^2 \sin\theta_e + dm_d r_d \omega_d^2 \sin\theta_d \tag{32}$$

در معادلات به دست آمده تمامی پارامترهای جرم کل میکرو ربات، جرم وزنه‌های خارج از مرکز و فاصله آن‌ها از محور دوران پارامترهای معلوم می‌باشند. با به‌دست آوردن مدل مناسب جهت عملگر نیز سرعت دورانی موتورها و زاویه محور آن‌ها مشخص می‌شوند. بنابراین جهت حل سه معادله کوپل فوق و مشخص کردن رفتار میکرو ربات در هر سه درجه آزادی، مجهولات این معادلات مقادیر نیروی اصطکاک می‌باشند. در ادامه نیروهای اصطکاک محاسبه خواهند شد.

حرکت میکرو ربات زمانی به‌صورت مستقیم خواهد بود که جهت قرارگیری دو عملگر، برخلاف جهت یکدیگر بوده و با سرعت دورانی یکسان عمل کنند. اگر هر دو عملگر با سرعت برابر در یک جهت دوران کنند، برآیند نیروهای ایجاد شده باعث چرخش میکرو ربات حول محور عمودی خواهد شد. همان‌طور که در معادلات (19) الی (24) نشان داده شد، میزان نیروی تولید شده توسط عملگرها وابسته به میزان سرعت دورانی آن‌ها است. بنابراین می‌توان یک سرعت دورانی ω_s تعریف کرد، که با رسیدن به این سرعت دورانی، نیروی ایجاد شده بر نیروی اصطکاک غلبه خواهد کرد و موجب حرکت میکرو ربات می‌شود. بنابراین عملکرد عملگرها در سرعت‌های دورانی پایین‌تر از ω_s موجب حرکت میکرو ربات نخواهد شد. برای به دست آوردن این سرعت دورانی فرض می‌کنیم در حالت حرکت رو به جلو موتورها در خلاف جهت یکدیگر و با سرعت دورانی یکسان ω دوران می‌کنند. در این حالت با مساوی قرار دادن برآیند نیروها در جهت افقی با حد اصطکاک کولمب می‌توانیم ω_s را بیابیم.

$$\sum F_x = -\mu \sum F_z \tag{33}$$

$$m_e r_e \omega_e^2 \sin\theta_e + m_d r_d \omega_d^2 \sin\theta_d = \mu\left(Mg + m_e g + m_d g + m_e r_e \omega_e^2 \cos\theta_e + m_d r_d \omega_d^2 \cos\theta_d\right) \tag{34}$$

در صورتی که هردو عملگر یکسان باشند، معادله (34) به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$2mr\omega_s^2 \sin\theta = \mu(Mg + 2mg + 2mr\omega^2 \cos\theta) \tag{35}$$

$$\omega_s = \sqrt{\frac{\mu g(M+m)}{2mr(\sin\theta - \mu\cos\theta)}} \tag{36}$$

همان‌طورکه مشخص است ω_s برای زوایای مختلف تغییر می‌کند. بنابراین برای به دست آوردن کمترین مقدار ω_s از معادله (36) نسبت به θ مشتق می‌گیریم و برابر صفر قرار می‌دهیم. سپس θ به دست آمده را در معادله (36) قرار می‌دهیم.

$$\frac{d}{d\theta}\omega_s = \frac{d}{d\theta}\sqrt{\frac{\mu g(M+m)}{2mr(\sin\theta - \mu\cos\theta)}} = 0 \tag{37}$$

$$\frac{d}{d\theta}\omega_s = \frac{\frac{-2\mu g(M+2m)mr(\cos\theta + \mu\sin\theta)}{(2mr(\sin\theta - \mu\cos\theta))^2}}{2\sqrt{\frac{\mu g(M+m)}{2mr(\sin\theta - \mu\cos\theta)}}} = 0 \tag{38}$$

$$\frac{-2\mu g(M+2m)mr(\cos\theta + \mu\sin\theta)}{(2mr(\sin\theta - \mu\cos\theta))^2} = 0 \tag{39}$$

$$-2\mu g(M+2m)mr(\cos\theta + \mu\sin\theta) = 0 \tag{40}$$

$$\cos\theta + \mu\sin\theta = 0 \tag{41}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{-1}{\mu}\right) \tag{42}$$

با جایگذاری مقدار به دست آمده از معادله (42) در معادله (36) خواهیم داشت:

$$\omega_s = \left(\frac{\mu g(M+2m)}{2mr\sqrt{1+\mu^2}}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{43}$$

در مقابل این‌که اگر سرعت دورانی موتورها از یک حد مشخص کم‌تر باشد میکرو ربات حرکت نمی‌کند، این قضیه نیز وجود دارد که اگر سرعت دورانی از یک حد مشخص بیشتر باشد، نیروهای تولید شده بر وزن میکرو ربات غلبه می‌کنند و در حین حرکت باعث جدا شدن پایه‌ها از سطح حرکت می‌شوند. که این حالت در طراحی مناسب نبوده و باعث ایجاد ناپایداری در

حرکت می‌شود. بنابراین با برابر قرار دادن برآیند نیروی عملگرها در جهت عمودی و وزن میکرو ربات، حداکثر سرعت دورانی که جهت عملکرد موتورها مورد قبول می‌باشد را به دست می‌آوریم. در این حالت نیز سرعت دورانی عملگرها برابر در نظر گرفته شده است.

$$2mr\omega_{\text{tip}}^2\cos\theta = Mg + 2mg \tag{44}$$

$$\omega_{\text{tip}} = \sqrt{\frac{Mg+2mg}{2mr\cos\theta}} \tag{45}$$

مشاهده می‌شود که در این حالت نیز سرعت دورانی به دست آمده تابعی از زاویه دوران می‌باشد. مانند حالت قبل با مشتق‌گیری و برابر صفر قرار دادن معادله (45)، زاویه برابر با صفر به دست می‌آید که با جایگذاری در این معادله حداکثر سرعت دورانی مجاز را به دست می‌آوریم.

$$\theta = 0 \Rightarrow \omega_{\text{tip}} = \sqrt{\frac{Mg+2mg}{2mr}} \tag{46}$$

3- نیروهای اصطکاک

هنگامی که نیروهای وارد شده به میکرو ربات توسط عملگرها به میزان کافی نباشد ، برآیند نیروها توانایی غلبه بر نیروی اصطکاک را نداشته و حرکت میکرو ربات اتفاق نمی‌افتد. بنابراین محاسبه دقیق نیروی اصطکاک در هر پایه از اهمیت ویژه ای برخوردار است. با افزایش نیروهای عملگر، نیروهای توزیع شده روی پایه‌های میکرو ربات به حد اصطکاک کولمب می‌رسند و حرکت شروع می‌شود. برای درک اینکه چگونه میکرو ربات پس از تعادل استاتیکی شروع به حرکت خواهد کرد، نیاز است که تعیین شود کدام پایه سریع‌تر تعادل استاتیکی‌اش را از دست می‌دهد. ممکن است ابتدا یک پایه یا دو پایه تعادل استاتیکی خود را از دست بدهند. در واقع برای محاسبه نیروی اصطکاک دو حالت وجود دارد. حالتی که سرعت مرکز جرم میکرو ربات برابر با صفر یا مخالف صفر باشد. زمانی که سرعت مرکز جرم برابر صفر است حداقل یک پایه در حالت تعادل استاتیکی قرار دارد و در این حالت برای به دست آودن اصطکاک از مدل جرم و فنر که در ادامه توضیح داده خواهد شد کمک می‌گیریم. با توجه به این هدف نیاز است که اطلاعاتی راجع به توزیع نیرو روی سه پایه میکرو ربات داشته باشیم. با وجود 9 مجهول (سه نیروی مجهول در هر پایه در جهات (x ، y و z) و 6 معادله تعادل، مسئله در حالت نامعین استاتیکی قرار داشته و نمی‌توان از روش‌های معمول نیروی اصطکاک را محاسبه کرد. با فرض تغییر فرم کوچک در پایه‌های میکرو ربات، می‌توان نیروی اصطکاک را محاسبه نمود. برای این منظور، میکرو ربات را به صورت سیستم فشرده، شامل 3 جرم که با فنرهای سخت به هم وصل شده اند، همانند "شکل 4" مدل‌سازی می‌کنیم.

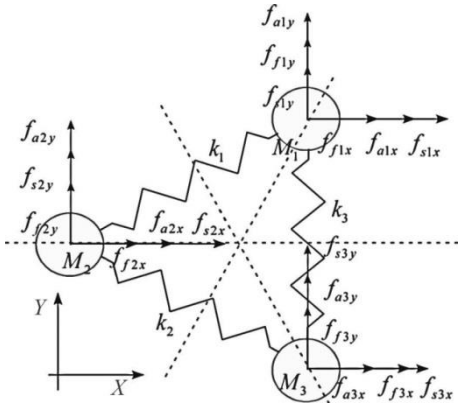

Fig.4 Actuation, friction and spring forces applied to the mass-spring model [12]

شکل 4 نیروهای عملگر، اصطکاک و فنر اعمال شده به مدل جرم و فنر [12]

با حل معادله‌های تعادل استاتیکی، نیروهای عمودی در پایه‌های A و B وC به دست می‌آید و نظیر آن جرم‌های M_1 و M_2 و M_3 محاسبه می‌شود.

k_1، k_2 وk_3 نشان‌دهنده سختی فنر می‌باشد. در واقع پایه ها به صورت تیر یک سرگیردار فرض شده است که با توجه به مدول الاستیسیته و هندسه آن، ضریب فنریتش قابل محاسبه است. تغییر شکل‌های تولید شده به اندازه کافی کوچک هستند، بنابراین می‌توان از تغییر زاویه فنرها صرف نظر کرد. نیروهای f_{aij} و f_{fij} نیروهای عملگر و اصطکاک وارد شده به جرم M_i هستند. $i = \{1,2,3\}$ و $j =\{x ,y\}$ نشان دهنده جهت این نیروها در راستای x و y می‌باشد. معادله دینامیک سیستم جرم و فنر به صورت زیر می‌باشد:

$$M_1\ddot{x}_1 = -\frac{\sqrt{3}}{2}k_1x_1 + \frac{\sqrt{3}}{2}k_1x_2 + f_{f1x} + f_{a1x} \tag{47}$$

$$M_2\ddot{x}_2 = \frac{\sqrt{3}}{2}k_1x_1 - \left(\frac{\sqrt{3}}{2}k_1 + \frac{\sqrt{3}}{2}k_2\right)x_2 + \frac{\sqrt{3}}{2}k_2x_3 + f_{f2x} + f_{a2x} \tag{48}$$

$$M_3\ddot{x}_3 = \frac{\sqrt{3}}{2}k_2x_2 - \frac{\sqrt{3}}{2}k_2x_3 + f_{f3x} + f_{a3x} \tag{49}$$

$$M_1\ddot{y}_1 = \left(-k_3 - \frac{k_1}{2}\right)y_1 + \left(\frac{k_1}{2}\right)y_2 + k_3y_3 + f_{f1y} + f_{a1y} \tag{50}$$

$$M_2\ddot{y}_2 = \left(\frac{k_1}{2}\right)y_1 + \left(-\frac{k_2}{2} - \frac{k_1}{2}\right)y_2 + \frac{k_2}{2}y_3 + f_{f2y} + f_{a2y} \tag{51}$$

$$M_3\ddot{y}_3 = k_3y_1 + \left(\frac{k_2}{2}\right)y_2 + \left(-k_3 - \frac{k_2}{2}\right)y_3 + f_{f3y} + f_{a3y} \tag{52}$$

$x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3$ شامل جابجایی‌های سه جرم در جهت x-y است. زمانی که جرم‌ها در حالت استاتیک هستند، مجهول‌های سیستم شش نیروی اصطکاک می‌باشد که با حل شش معادله تعادل استاتیکی به‌دست می‌آید. وقتی بعضی از جرم‌ها در حال حرکت هستند، در این حالت نیروی اصطکاک، برابر نیروی اصطکاک کولمب می‌شود که جهت نیروی اصطکاک، خلاف جهت سرعت جرم متناظر می‌باشد. زمانی که سرعت مرکز جرم مخالف صفر است، نیروهای عملگر در سه پایه به حد اصطکاک کولمب رسیده و حرکت شروع شده است. واضح است که در این حالت نیروی اصطکاک، برابر نیروی اصطکاک کولمب می باشد.

4- مدل عملگر

همان‌طور که اشاره شد در این میکرو ربات از دو موتور ارتعاشی به عنوان عملگر استفاده شده است. موتور ارتعاشی یک موتور DC است، که بر روی محور آن یک جرم به صورت خارج از مرکز قرار داده شده است. موتورهای DC با اعمال اختلاف پتانسیل کار می‌کنند. دینامیک موتورهای ارتعاشی شامل دو بخش الکتریکی و مکانیکی است، که با ترکیب معادلات این دو بخش، مدل نهایی به دست می‌آید.

معادله بخش مکانیکی موتور به صورت زیر است. در این معادله T گشتاور موتور و θ زاویه چرخش می‌باشند.

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + mgr\theta = T \tag{53}$$

گشتاور ایجاد شده توسط موتور نیز برابر با حاصل ضرب جریان ورودی و ثابت گشتاوری موتور می‌باشد.

$$T = \mathrm{k_t}i \tag{54}$$

رابطه بخش الکتریکی موتور نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$L\frac{di}{dt} + Ri = V - e_{\mathrm{m}} \tag{55}$$

$$e_{\mathrm{m}} = \mathrm{k_b}\dot{\theta} \tag{56}$$

با ترکیب و حل معادلات (53) الی (56) مدل دینامیکی موتور به دست می‌آید. میزان پارامترهای موتورهای استفاده شده با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری مناسب به‌دست آمده‌اند.

5- شبیه‌سازی میکرو ربات

شبیه‌سازی این میکرو ربات در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب انجام شده است. این شبیه‌سازی شامل معادلات دینامیکی میکرو ربات، مدل اصطکاکی و مدل عملگرهای میکرو ربات می‌باشد. روند شبیه سازی در "شکل 5" قابل مشاهده است. ورودی سیستم سرعت موتور یا ولتاژ ورودی می باشد. با استفاده از مدل برگزیده شده برای عملگرها و دینامیک میکرو ربات، سرعت مرکز جرم و سرعت پایه ها به دست می‌آید. با توجه به سرعت مرکز جرم دو حالت برای محاسبه نیروی اصطکاک وجود دارد. اگر سرعت مرکز جرم صفر شود از مدل جرم و فنر استفاده می‌شود و اگر مخالف صفر شود میکرو ربات به‌صورت جسم صلب در نظر گرفته می‌شود. در جدول 2 مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی آورده شده است.

5-1- شبیه‌سازی حلقه باز میکرو ربات در حرکت مستقیم

همان‌طور که بیان شد در صورتی که سرعت دورانی هر دو عملگر برابر و در خلاف جهت یکدیگر باشد، برآیند نیروهای ایجاد شده توسط آن‌ها در یک جهت بوده و حرکت میکرو ربات به صورت مستقیم خواهد بود. با توجه به فرمول‌های 43 و 46 اندازه حداقل و حداکثر سرعت دورانی عملگرها برابر با 701.2 rad/s و 1205 rad/s می‌باشد. "شکل 6" حرکت صفحه‌ای میکرو ربات را با اندازه سرعت دورانی حداکثر عملگرها یعنی 1205 rad/s نشان می‌دهد. محور افقی میزان جابجایی در راستای x و محور عمودی میزان جابجایی در راستای y را نشان می‌دهد.

"شکل 7" میزان حرکت میکرو ربات در جهت x را نسبت به زمان نشان می‌دهد.

در "شکل 8" قسمتی از "شکل 7" بزرگ‌نمایی شده تا حرکت مرحله‌ای میکرو ربات مشخص شود. با توجه به این شکل میزان حرکت میکرو ربات در هر مرحله که برابر با دقت حرکت میکرو ربات است، در حدود 17 μm است.

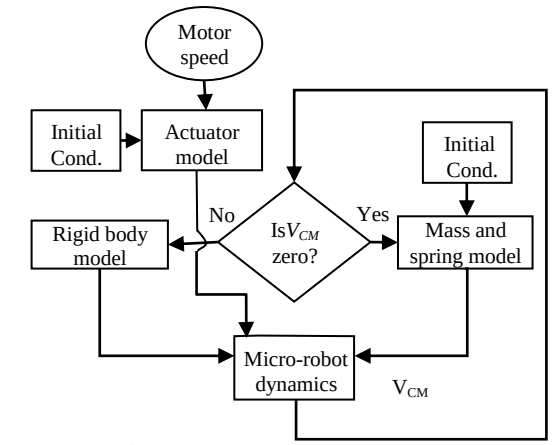

Fig.5 Simulation flowchart

شکل 5 فلوچارت شبیه‌سازی

جدول 2 مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی

Table 2 Values of simulation parameters

پارامترها	مقادیر	پارامترها	مقادیر
m_d	5×10^{-4}(kg)	K	72509.185(Nm^{-1})
m_e	5×10^{-4}(kg)	μ	0.36
r_d	5×10^{-4}(m)	I	2.31×10^{-5}(kgm^2)
r_e	5×10^{-4}(m)	M	7.4×10(kg)
R	11.2(Ω)	l	0.04(m)
L	0.102(mH)	d	0.01(m)

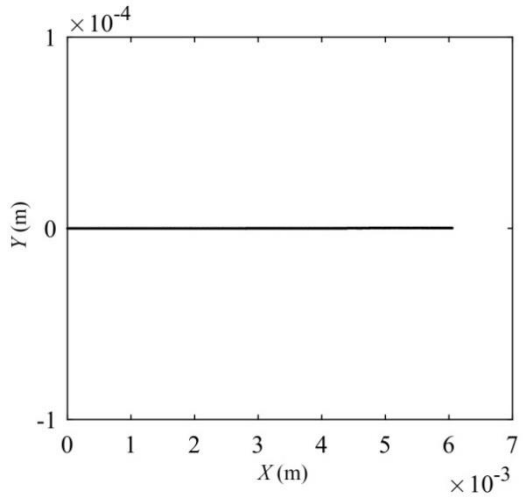

Fig.6 Plane motion of the micro- robot

شکل 6 حرکت صفحه ای میکرو ربات

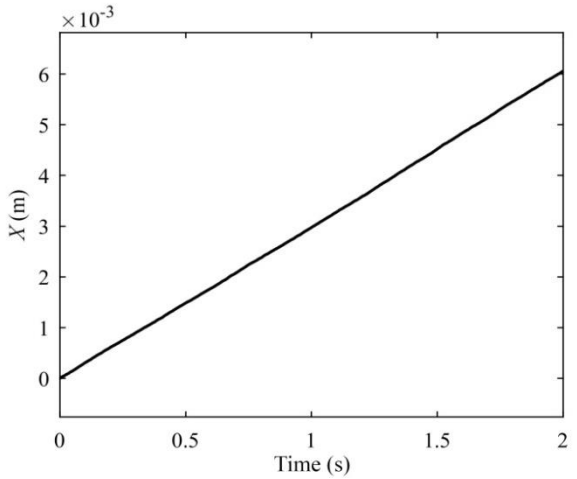

Fig.7 Position of the micro-robot along the *x*-axis as a function of time

شکل 7 موقعیت میکرو ربات در راستای محور x نسبت به زمان

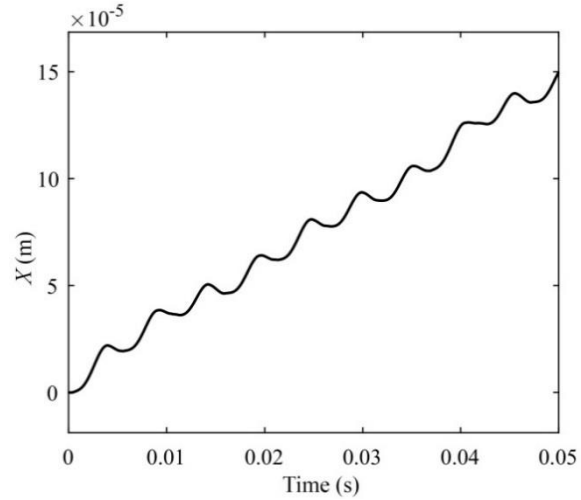

Fig.8 Position of the micro-robot along the *x*-axis as a function of time

شکل 8 موقعیت میکرو ربات در راستای محور x نسبت به زمان

6- بررسی تاثیر ضریب فنریت پایه‌ها و ضریب اصطکاک بر روی حرکت میکرو ربات

در این قسمت تغییرات ضریب فنریت پایه ها و ضریب اصطکاک بر روی حرکت مستقیم میکرو ربات زمانی که اندازه سرعت زاویه‌ای عملگرها 981 rad/s است بررسی می‌شود. همانطور که می دانیم در حرکت مستقیم میکرو ربات در راستای x، جابجایی آن در راستای y و چرخش میکرو ربات حول محور عمود بر صفحه در دستگاه ثابت، در حالت ایده‌آل برابر با صفر می‌باشد. شکل‌های 9 و 10 به ترتیب جابجایی میکرو ربات در راستای x و y و شکل 11 تغییرات زاویه میکرو ربات نسبت به محور عمود بر صفحه را به ازای ضریب فنریت مختلف پایه‌ها نشان می‌دهد. همانطورکه در شکل 9 دیده می‌شود جابجایی میکرو ربات در راستای x به ازای k های مختلف تقریبا ثابت است. با توجه به شکل 10 و 11 با زیاد شدن ضریب فنریت و سخت شدن

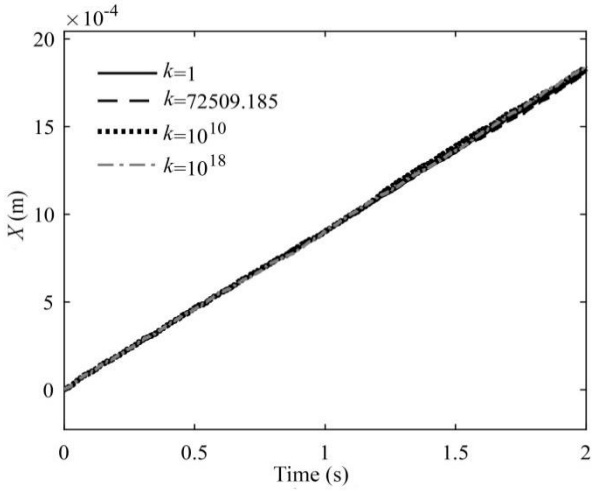

Fig.9 Position of the micro-robot along the *x*-axis as a function of time for different stiffness coefficient of bases

شکل 9 موقعیت میکرو ربات در راستای محور x نسبت به زمان به ازای ضریب فنریت مختلف پایه‌ها

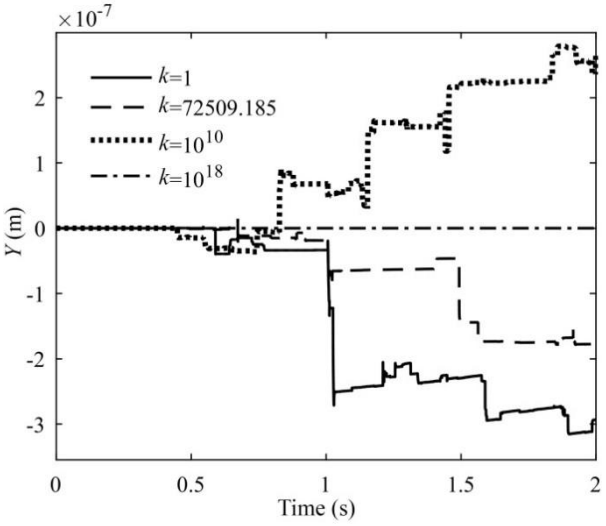

Fig.10 Position of the micro-robot along the *y*-axis as a function of time for different stiffness coefficient of bases

شکل 10 موقعیت میکرو ربات در راستای محور y نسبت به زمان به ازای ضریب فنریت مختلف پایه‌ها

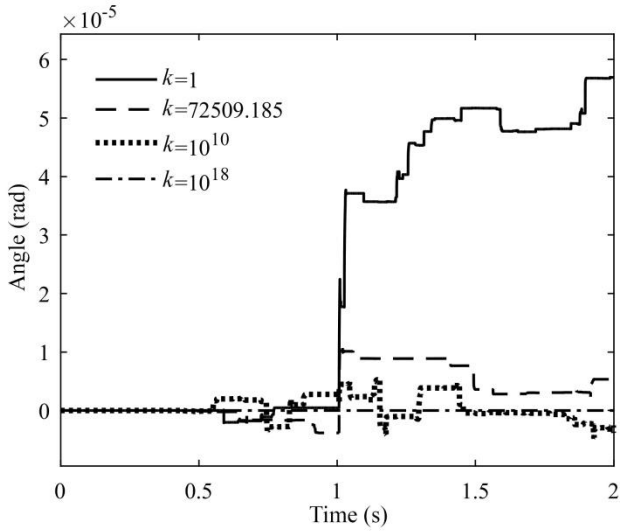

Fig.11 Rotation angle of the micro-robot as a function of time for different stiffness coefficient of bases

شکل 11 زاویه چرخش میکرو ربات نسبت به زمان به ازای ضریب فنریت مختلف پایه‌ها

پایه‌ها، جابجایی در راستای y و چرخش حول محور عمود بر صفحه به حالت ایده‌آل خود یعنی مقدار صفر می‌رسد.

"شکل‌های 12 و 13" به ترتیب جابجایی میکرو ربات در راستای x و y و "شکل 14" تغییرات زاویه آن، نسبت به محور عمود بر صفحه را به ازای ضریب اصطکاک‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در "شکل 12" دیده می‌شود با افزایش ضریب اصطکاک، جابجایی در راستای x کم‌تر می‌شود. با توجه به "شکل‌های 13 و 14" جابجایی در راستای y و چرخش حول محور عمود بر صفحه در حالتμ=0 برابر با صفر می‌باشد، زیرا وقتی سطح هیچ اصطکاکی ندارد فقط نیروی موتورها در راستای x به میکرو ربات وارد می‌شود که باعث جابجایی میکرو ربات در این راستا بدون هیچ انحرافی می‌شود.

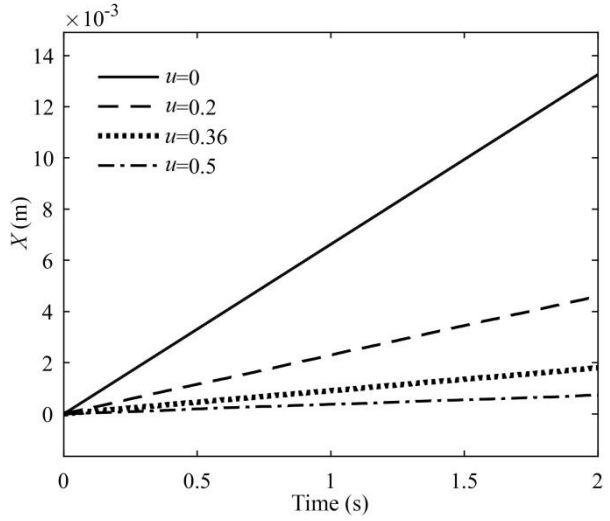

Fig.12 Position of the micro-robot along the *x*-axis as a function of time for different friction coefficient

شکل 12 موقعیت میکرو ربات در راستای محور x نسبت به زمان به ازای ضریب اصطکاک مختلف

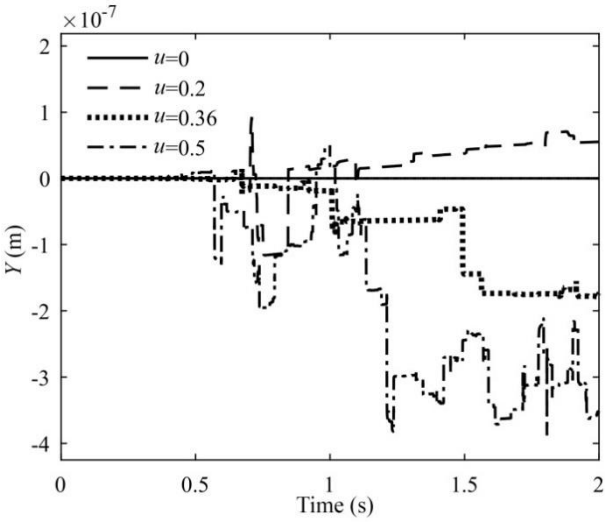

Fig.13 Position of the micro-robot along the *y*-axis as a function of time for different friction coefficient

شکل 13 موقعیت میکرو ربات در راستای محور *y* نسبت به زمان به ازای ضریب اصطکاک مختلف

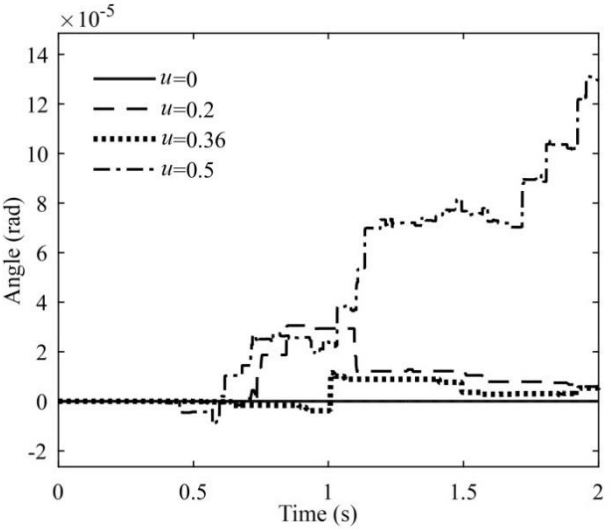

Fig.14 Rotation angle of the micro-robot as a function of time for different friction coefficient

شکل 14 زاویه چرخش میکرو ربات نسبت به زمان به ازای ضریب اصطکاک مختلف

7- کنترل حلقه بسته میکرو ربات با استفاده از روش PID

در این میکرو ربات از کنترلر PID استفاده شده است. روش به دست آوردن پارامترهای کنترلر به‌صورت آزمون و خطا می‌باشد. لازم به ذکر است که به دلیل خطی بودن اجزاء کنترلر PID، این روش یک روش کنترل خطی محسوب می‌شود. اما در برخی شرایط می‌توان در سیستم‌های غیرخطی در صورت ضعیف بودن عوامل غیرخطی، نیز از آن استفاده کرد. همچنین در کاربردهای عملی این کنترلر به علت سهولت در برنامه‌ریزی کنترلر نسبت به سایر روش‌ها، کاربرد بیشتری دارد. با توجه به این که در این میکرو ربات ورودی‌های سیستم ولتاژهای اعمال شده به دو موتور می‌باشند، از دو عدد کنترلر PID جهت تصحیح ولتاژ ورودی به هر موتور استفاده شده است. یک کنترلر جهت تصحیح میزان خطای ایجاد شده در حرکت در جهت مستقیم و یک کنترلر جهت تصحیح خطای ایجاد شده در چرخش میکرو ربات می‌باشد.

حرکت مستقیم کنترل‌شده میکرو ربات به ازای ورودی های زیر در "اشکال15 الی 17" نشان داده شده است.

X_d = 0.002 (m)
φ_d=0.0 (rad)

"شکل15" حرکت میکرو ربات در راستای X و مقایسه آن با حالت مرجع را نشان می‌دهد. "شکل 16" حرکت میکرو ربات در راستای Y و "شکل 17" زاویه چرخش آن می‌باشد، که این شکل‌ها نشان‌دهنده عملکرد خوب کنترلر می‌باشد.

8- ساخت و ارزیابی تجربی میکرو ربات

8-1- فرآیند ساخت میکرو ربات

در این قسمت در رابطه با زیر سیستم‌های این میکرو ربات متحرک توضیح داده خواهد شد .این میکرو ربات با استفاده از دو عدد عملگر ارتعاشی حرکت می‌کند و از طریق بلوتوث و به وسیله تلفن همراه کنترل می‌شود.

ربات‌های متحرک شامل زیر سیستم‌های زیر هستند.

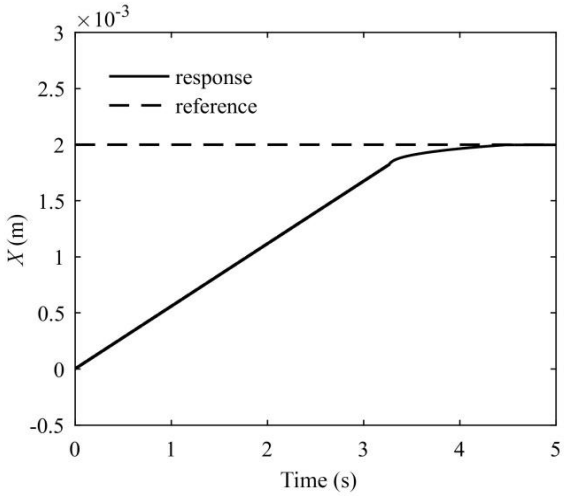

Fig.15 Comparison of the PID control system response with reference

شکل 15 مقایسه پاسخ سیستم کنترلPID با مقدار مرجع

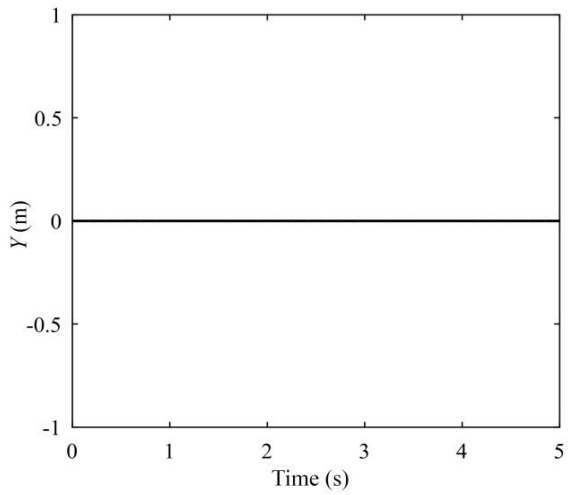

Fig.16 Displacement of the micro-robot along the x-axis as a function of time

شکل 16 میزان جابجایی میکرو ربات در راستای محور x نسبت به زمان

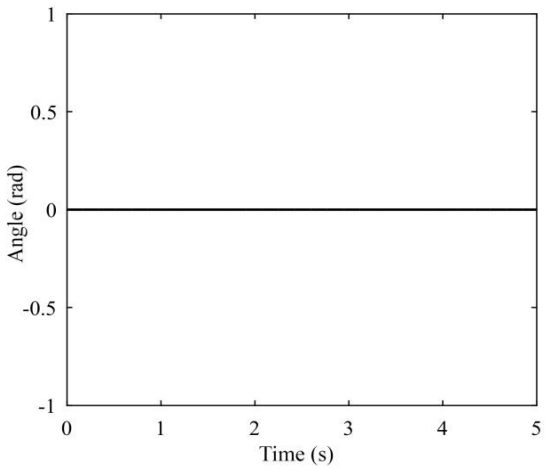

Fig.17 Rotation angle of the micro-robot as a function of time

شکل 17 زاویه چرخش میکرو ربات نسبت به زمان

- سیستم تأمین انرژی
- سیستم ارتباطات
- سیستم الکترونیک
- سیستم حرکتی

میکرو ربات ساخته شده در این پژوهش نیز شامل این چهار قسمت است که در ادامه، هر بخش توضیح داده خواهد شد.

8-1-1- سیستم تأمین انرژی

در این پژوهش از دو عدد باتری لیتیوم-یون که بر روی خود میکرو ربات قرار می‌گیرند، استفاده شده است.

8-1-2- سیستم ارتباطات

در این میکرو ربات از یک ماژول بلوتوث اچ سی صفر پنج[1] استفاده شده است که ارتباط بین میکروکنترلر و تلفن همراه را به وسیله یک نرم‌افزار رابط فراهم می‌کند. از این طریق می‌توانیم میکرو ربات را به وسیله تلفن همراه و به شیوه‌های مختلف کنترل کنیم. ماژول بلوتوث اچ سی صفر پنج در واقع یک مبدل بلوتوث به سریال است. این ماژول در اصل به صورت قطعات نصب شده روی سطح[2] می‌باشد که برای سهولت استفاده، بر روی برد مبدل لحیم شده است.

8-1-3- سیستم الکترونیک

می‌توان گفت مهم‌ترین بخش در یک میکرو ربات سیستم الکترونیک آن است، چرا که عملکرد تمامی تجهیزات وابسته به این قسمت است. قسمت الکترونیکی میکرو ربات شامل کنترلری است که دستورات لازم را با توجه به هدف مورد نظر به عملگرها ارسال می‌کند. همچنین در این قسمت بسته به نوع میکرو ربات سنسورهایی قرار می‌گیرند تا با ارسال اطلاعات به بخش کنترل، حرکت میکرو ربات کاملاً تحت نظر باشد. اجزاء مختلف به کار رفته در بخش الکترونیکی در ادامه شرح داده خواهند شد.

8-1-3-1- بخش کنترل

قسمت اصلی بخش الکترونیکی این میکرو ربات یک میکروکنترلر آردوینو مدل پرو مینی[3] است. هسته مرکزی این برد یک میکروکنترلر ای تی مگا سیصد و بیست و هشت[4] می‌باشد.

این بخش وظیفه دریافت اطلاعات از سنسور و ارسال دستورات مناسب جهت عملکرد عملگرها، مطابق هدف مورد نظر را دارد.

8-1-3-2- بخش تنظیم ولتاژ

از آن‌جایی که ولتاژ عملکرد ماژول استفاده شده جهت ارتباط با تلفن همراه 5V می‌باشد، از یک رگولاتور 5V جهت تنظیم ولتاژ ورودی استفاده شده است. رگولاتور استفاده شده مدل ال سی هفتاد و هشت صفر پنج سی وی[5] می‌باشد که قابلیت عملکرد از دمای 55- تا 150 درجه سانتی‌گراد و تنظیم ولتاژهای تا 24V را دارد.

8-1-3-3- بخش فعال ساز عملگرها

این میکرو ربات از دو عدد موتور ارتعاشی جهت حرکت بهره می‌گیرد. موتورهای الکتریکی قابلیت چرخش در هر دو جهت و با سرعت‌های مختلف را دارند. ایجاد سرعت‌های مختلف گردش موتور، توسط ولتاژ ورودی به موتور از طریق میکروکنترلر امکان‌پذیر است. اما با توجه به این‌که جریان خروجی میکروکنترلرها ناچیز بوده و در صورت عبور جریان‌های بیشتر، آسیب می‌بینند؛ از یک مدار واسط که آمپلی فایر نامیده می‌شود، در راه‌اندازی موتورها استفاده می‌گردد. وظیفه این مدار جدا کردن منبع تغذیه موتورها و میکروکنترلر است. به این ترتیب بدون آسیب رساندن به میکرو کنترلر می‌توانیم با جریان‌های بیشتری موتورهای الکتریکی را راه‌اندازی کنیم. امکان دیگری که این نوع آمپلی فایرها فراهم می‌کنند، تغییر جهت جریان و در نتیجه تغییر جهت گردش موتور است .این آمپلی فایرها از یک مدار به نام پل اچ[6] جهت تغییر جهت جریان استفاده می‌کنند. این مدار یک مدار الکتریکی است که اجازه عبور جریان در دو طرف را می‌دهد.

در این میکرو ربات از مدار مجتمع ال دویست و نود و سه دی[7] استفاده شده است. این مدار مجتمع شامل دو پل اچ درون خود می‌باشد. این مدار مجتمع قابلیت عملکرد در دماهای 40- تا 150 درجه سانتی‌گراد را دارد. حداکثر جریان خروجی مجاز نیز 1/5 A می‌باشد.

8-1-3-4- حسگرها[8]

یکی دیگر از قسمت‌های مهم بخش الکترونیک هر میکرو ربات حسگرهای قرار گرفته بر روی آن می‌باشند. سنسور استفاده شده در این میکرو ربات مدل ام پی یو شصت پنجاه[9] است که توانایی محاسبه شتاب و تغییر زاویه در سه جهت را دارد. قطعات الکترونیکی و ارتباطی در این میکرو ربات بر روی یک برد لحیم‌کاری شده‌اند و بر روی بدنه اصلی میکرو ربات قرار می‌گیرند. سنسور مورد استفاده در قسمت زیرین آن، قرار می‌گیرد. "شکل 18" نحوه طراحی محل قرارگیری اجزاء الکترونیکی و ارتباطی را نشان می‌دهد.

8-1-4- سیستم حرکتی

همان‌طور که مشخص است این قسمت، حرکت میکرو ربات را فراهم می‌کند و شامل بخش‌های مکانیکی میکرو ربات و عملگرهای آن می‌باشد. این میکرو ربات به وسیله سه پایه نازک فلزی با سطح حرکت در تماس است و شامل دو

[1] HC05
[2] smd

[3] Pro-min
[4] Atmega328
[5] LC7805CV
[4] H-Bridge
[7] L293d
[8] Sensor
[9] MPU6050

موتور ارتعاشی کوچک جهت تولید نیرو و حرکت می‌باشد. "شکل 19" میکرو ربات ساخته شده را نشان می‌دهد.

8-2- ارزیابی تجربی اولیه

"شکل 20" حرکت میکرو ربات بر روی مسیر مستقیم بـه ازای ولتـاژ 1V در مدت زمان 25 ثانیه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در "شکل 20" نشان داده شده است، این میکرو ربات در این مدت زمان به اندازه 0.102 متـر، حرکـت کرده است. سرعت متوسط این میکرو ربـات در ایـن حالـت حـدود 4 mm/s می‌باشد.

9- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مـدل‌سـازی، سـاخت، و کنتـرل یـک میکـرو ربـات مجهـز بـه عملگرهای ارتعاشی بررسی شـده اسـت. از دو عـدد موتـور ارتعاشـی کوچـک جهت راه‌اندازی میکرو ربات استفاده شده است. معادلات دینامیکی حـاکم بـر میکرو ربات بـا اسـتفاده از روش نیـوتن-اویلـر اسـتخراج شـد. نکتـه مهـم در استخراج معادلات دینامیکی این میکـرو ربـات، محاسـبه نیروهـای اصـطکاک می‌باشـد. یکـی از مزیـت‌هـای اسـتفاده از مـدل جـرم و فنـر بـرای محاسـبه اصطکاک، امکان بررسی تاثیر سختی پایه های میکرو ربـات بـر روی حرکـت، می‌باشد. در این پژوهش به تـاثیر سـختی پایـه هـای میکـرو ربـات و ضـریب اصطکاک بـر روی حرکـت میکـرو ربـات پرداختـه شـده اسـت. بـا توجـه بـه فرمول‌های استخراج شده، حداقل و حداکثر سرعت دورانی عملگرهـا برابـر بـا 701.2 rad/s و 1205 rad/s محاسبه شده است. شبیه‌سازی‌های انجـام شـده نشان می‌دهد که دقت حرکتی میکرو ربـات در بیشـترین سـرعت، حـدود 17

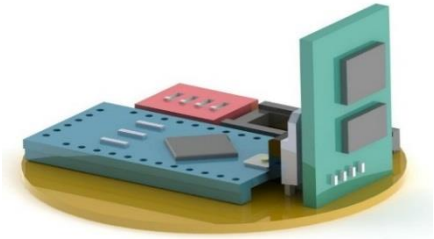

Fig.18 Designing the position of the electrical and communication part

شکل 18 طراحی محل قرارگیری اجزاء بخش الکترونیکی و ارتباطی

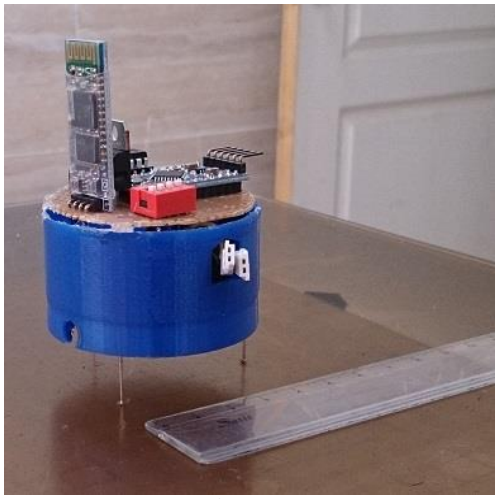

Fig.19 Experimental model of micro-robot

شکل 19 مدل آزمایشگاهی میکرو ربات

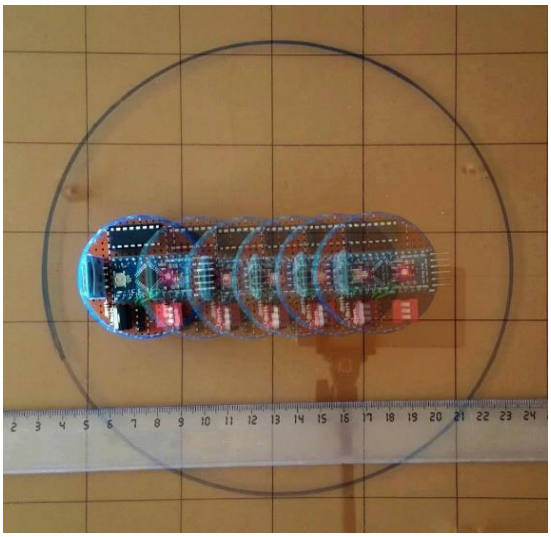

Fig.20 Pure translational motion of the micro-robot

شکل 20 حرکت مستقیم میکرو ربات

میکرومتر به ازای هر دور چرخش عملگر می‌باشـد. کنتـرل‌کننـده PID بـرای این کار در نظر گرفته شد. با توجه به انـدازه‌گیـری تجربـی، سـرعت مسـتقیم ربات حدود 4mm/s، به ازای ولتاژ مرجع 1V، محاسبه شد. تحقیقـات بعـدی به کنترل بهینه این میکرو ربات با استفاده از الگوریتم‌هـای بهینه‌سـازی بـرای افزایش دقت حرکت ربات اختصاص خواهد یافت.

10- مراجع

[1] T. Ebefors, G. Stemme, *Microrobotics*, *The MEMS Handbook*, pp. 28.1-28.42, Boca Raton, FL: CRC Press, M. Gad-el Hak, ed, 2005.

[2] G. Caprari, *Autonomous micro-robots: Applications and limitations*, Thesis, École Polytechnique Fédérale De Lausanne, 2003.

[3] H. Suzuki, N. Ohya, N. Kawahara, M. Yokoi, S. Ohyanagi, T. Kurahashi, T. Hattori, Shell-body fabrication for micromachines, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 36-40, 1995.

[4] T. Yasuda, I. Shimoyama, H. Miura, Microrobot locomotion in a mechanical vibration field, *Advanced Robotics*, Vol. 9, No. 2, pp. 165-176, 1994.

[5] K. B. Yesin, K. Vollmers, B. J. Nelson, Modeling and control of untethered biomicrorobots in a fluidic environment using electromagnetic fields, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 25, No. 5-6, pp. 527-536, 2006.

[6] T. Akiyama, K. Shono, Controlled stepwise motion in polysilicon microstructures, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 2, No. 3, pp. 106-110, 1993.

[7] B. R. Donald, C. G. Levey, C. D. McGray, I. Paprotny, D. Rus, An untethered, electrostatic, globally controllable MEMS micro-robot, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 15, No. 1, pp. 1-15, 2006.

[8] W. Driesen, *Concept, Modeling and Experimental Characterization of the Modulated Friction Inertial Drive (MFID) Locomotion Principle: Application to Mobile Microrobots*, Thesis, Citeseer, 2008.

[9] M. Mohammadi-Moghaddam, M. Moradi-Dalvand, Design construct and control of a stair climber smart mobile robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 13-30, 2006. (in Persian فارسی)

[10] P. Vartholomeos, E. Papadopoulos, Analysis and design of a novel mini-platform employing vibration micro-motors, in *Proceedings 2005 IEEE International Conference on*, pp. 3627-3632, April 18-22, 2005.

[11] P. Vartholomeos, E. Papadopoulos, Dynamic analysis and speed control of a novel micro-platform driven by vibrating motors, *International Conference on Robotics and Applications*, October 31- November 2, 2005.

[12] P. Vartholomeos, E. Papadopoulos, Dynamics, design and simulation of a novel microrobotic platform employing vibration microactuators, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 128, No. 1, pp. 122-133, 2006.

[13] P. Vartholomeos, E. Papadopoulos, Analysis, design and control of a planar micro-robot driven by two centripetal-force actuators, *Proceedings 2006 IEEE International Conference on*, pp. 649-654, May 15-19, 2006.

[14] M. Rubenstein, C. Ahler, R. Nagpal, Kilobot: A low cost scalable robot system for collective behaviors, *2012 IEEE International Conference on*, pp. 3293-3298, May 14-18, 2012.

[15] I. Spartali, K. Vlachos, E. Papadopoulos, Speed control of vibration micro-motors of a micro-robotic platform, *21st Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, pp. 1-6, June 25-28, 2013.