

الگوریتم جهت‌یابی صفحه‌ای میکروروبات دو قطبی مغناطیسی توسط سه میدان مغناطیسی خارجی

المیرا مجاور زرگر، مجید ساده‌دل*، محمد رضا کرفی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۳۰
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۲۲
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۵/۱۲

کلمات کلیدی:

میکروروبات
تحریک مغناطیسی
میدان مغناطیسی
الگوریتم جهت‌یابی

خلاصه: امروزه استفاده از میکروروبات‌های مغناطیسی به دلیل حداقل تهاجمی بودن آن‌ها، در کاربردهای پزشکی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. یکی از چالش‌های این میکروروبات‌ها، کنترل خودکار آن‌ها در بدن موجود زنده جهت رسیدن به هدفی مشخص می‌باشد. با توجه به کوچک بودن اندازه میکروروبات، موقعیت و جهت آن با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی کنترل می‌شود که این میدان مغناطیسی به وسیله آهنربای دائم و یا آهنربای الکتریکی ایجاد می‌شود. یکی از مزیت‌های استفاده از آهنربای الکتریکی جهت ایجاد میدان مغناطیسی خارجی، امکان کنترل جهت و اندازه میدان مغناطیسی، توسط کنترل جریان الکتریکی است. در این مقاله میکروروبات به صورت یک دو قطبی مغناطیسی نقطه‌ای در نظر گرفته شده است که با استفاده از قوانین ماکسول نیرو و گشتاور وارد بر دو قطبی برحسب جریان هر یک از آهنربای الکتریکی بدست آمده است. همچنین الگوریتمی، جهت مسیریابی ربات در محیطی با موانع نامشخص بدون محاسبه کردن مسیر از پیش تعیین شده، پیشنهاد شده است. علاوه بر این، صحت روابط بدست آمده و الگوریتم طراحی شده از طریق شبیه سازی حرکت ربات در نرم افزار متلب مورد بررسی قرار گرفته شده است که کارایی استفاده از سه آهنربای الکتریکی برای کنترل موقعیت میکروروبات مغناطیسی در حرکت صفحه‌ای را تأیید می‌کند.

۱- مقدمه

امروزه جراحی‌ها به سوی حداقل آسیب پیش می‌رود به همین دلیل استفاده از میکروروبات‌ها به خاطر اندازه بسیار کوچک آن‌ها در علم پزشکی جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. این ربات‌ها با توجه به ابعادشان توانایی حرکت در درون رگ‌های داخل بدن (انسان) را دارند و می‌توانند به نقاطی از بدن دسترسی یابند که حتی در جراحی‌های باز، دسترسی به آن‌ها مشکل است. همچنین با توجه به کنترل موقعیت غیر تماسی این میکروروبات‌ها، استفاده از آن‌ها به عنوان یکی از روش‌های جراحی حداقل آسیب به شمار می‌آید و یکی از مزایای میکروروبات در پزشکی کاهش زمان آماده سازی پیش از جراحی و بهبود سریع‌تر بیمار می‌باشد [۱]. از دیگر کاربردهای مهم میکروروبات‌ها در پزشکی استفاده از آن‌ها جهت ارسال دارو به نقاط خاصی از بدن جهت درمان بیماری‌هایی مانند ایدز و سرطان می‌باشد [۲ و ۳]. علاوه بر توانایی حرکت در مسیرهای باریک، این ربات‌ها قابلیت حرکت

در اعداد رینولدز^۱ پایین (سرعت کم) را دارند که باعث کاهش اغتشاش در سیال اطراف (خون داخل رگ) می‌شود. بر خلاف ماکروروبات‌ها، در میکروروبات‌ها به دلیل ابعاد بسیار کوچک‌شان امکان استفاده از اجزایی مانند پردازنده، منبع نیرو، محرک و حسگر وجود ندارد. بنابراین تحریک اینگونه از ربات‌ها به صورت غیر تماسی و به یکی از روش‌های نوری، شیمیایی، صوتی و مغناطیسی انجام می‌شود [۴-۸]. که در میان این محرک‌ها، محرک مغناطیسی به دلیل توانایی نفوذ بالا در بافت‌های بدن و بی‌ضرر بودن آن برای موجود زنده، جایگاه ویژه‌ای در کاربردهای پزشکی پیدا کرده است [۹]. در کارهای انجام شده میدان مغناطیسی به دو روش آهنربای دائم و آهنربای الکتریکی ایجاد شده است که کنترل موقعیت و جهت‌گیری این ربات به کنترل جهت و اندازه میدان مغناطیسی خارجی آن بستگی دارد [۱۰]. در بعضی از کارها که از آهنربای دائم استفاده شده است، برای کنترل جهت و اندازه میدان مغناطیسی نیاز به کنترل موقعیت و جهت آهنربای دائم توسط بازو رباتیکی می‌باشد؛ به عنوان مثال در سال ۲۰۲۰ کنترل

1 Reynolds number
2 Macro-Robots

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: majid.sadedel@modares.ac.ir



موقعیت قطره مایع، با استفاده از میکروروباتی توسط یک صفحه رباتیکی موقعیت دهی دقیق، انجام شد. همچنین از این ربات جهت ارسال دارو و یا تشخیص بیماری استفاده می‌شود و الگوریتم جهت‌یابی در این سیستم از طریق طراحی مسیر برای صفحه رباتیکی قابل انجام است [۱۱]. دسته دیگر کارها با استفاده از چندین آهنربای الکتریکی و کنترل جریان هر یک از آن‌ها، جهت و اندازه میدان مغناطیسی را تعیین می‌کند. به عنوان مثال در سال ۲۰۱۰ کومر و همکاران [۱۲] توانستند با استفاده از آهنربای الکتریکی میدان مغناطیسی خارجی را ایجاد کنند. از این سیستم برای کنترل موقعیت و جهت یک میکروروبات در داخل چشم استفاده شد. هر یک از این سیم پیچ‌ها حاوی جریان الکتریکی است که اگر اندازه نیرو و گشتاور مشخص باشد با توجه به حل معادلات می‌توان جریان مورد نیاز را بدست آورد. در این کار بر اساس میزان نیرو و گشتاور مورد نیاز تعداد و موقعیت آهنربای الکتریکی مورد بهینه سازی قرار گرفته است. علاوه بر این، در سال ۲۰۲۰ برای کنترل مسیر میکروروبات مغناطیسی ماریپیچی از آهنربای الکتریکی با ساختار سیم پیچ‌های هلمهلتز^۱ استفاده شد. مزیت این ساختار هلمهلتز ایجاد میدان یکنواخت می‌باشد ولی درجه آزادی‌های قابل کنترل سیستم برابر با نصف تعداد سیم پیچ‌ها می‌باشد. علاوه بر این فضای کاری بدست آمده در این ساختار محدود به اندازه سیم پیچ‌ها می‌باشد [۱۳]. در سال ۲۰۲۱، استفاده از تصویر برداری ذرات مغناطیسی^۲ برای ایجاد میدان مغناطیسی دوار و کنترل موقعیت میکروروبات ماریپیچی جهت عبور از رگ‌ها در مغز پیشنهاد شد. در این کار جابجایی میکروروبات بر حسب مقدار دوران آن محاسبه شد. علاوه بر این، مسیر حرکت در داخل رگ به چند خط مستقیم تقسیم می‌شود و سپس میدان مغناطیسی مورد نیاز بر اساس آن محاسبه و اعمال می‌گردد [۱].

با توجه به اینکه برای کنترل جهت و اندازه میدان مغناطیسی در آهنربای الکتریکی فقط نیاز به کنترل جریان الکتریکی در آن می‌باشد و موقعیت آن‌ها می‌تواند ثابت باشد، در این کار برای ایجاد میدان مغناطیسی خارجی از ۳ آهنربای الکتریکی استفاده می‌شود.

اگرچه ساخت و تحریک میکروروبات‌های مغناطیسی پیشرفت قابل توجه‌ای داشته است، اما مسیریابی خودکار میکروروبات‌ها هنوز تحت مطالعه و تحقیق است. در حال حاضر امکان هدایت خودکار اینگونه ربات‌ها در فضای بدون مانع با استفاده از کنترل حلقه بسته در یک مسیر از پیش تعیین شده وجود دارد. با این وجود در محیط‌های پیچیده (با مانع) مانند داخل رگ‌های بدن انسان، با توجه به ثابت نبودن محیط (حرکت اعضای داخلی بدن مانند

1 Helmholtz
2 Magnetic Particle Imaging (MPI)

قلب) هدایت خودکار این ربات‌ها به سمت هدف به علت پیچیدگی در تعیین مسیری بدون برخورد با مانع، کنترل به صورت روش‌های معمول امکان پذیر نمی‌باشد [۹].

به طور معمول برای مسیریابی میکروروبات‌ها مغناطیسی دو محدودیت اصلی وجود دارد: ۱) محدود بودن فضای کاری مجموعه آهنرباهای الکتریکی جهت ایجاد میدان مغناطیسی خارجی (به طور مثال آهنرباهای هلمهلتز) ۲) محدود بودن زاویه دید در عکس برداری (مصالحه بین زاویه دید و دقت تصویر). در اغلب کارهای انجام شده جهت غلبه بر این محدودیت‌ها، ابتدا مسیر کلی برای میکروروبات‌ها تعیین می‌گردد و سپس از کنترل حلقه بسته برای دنباله‌روی مسیر استفاده می‌شود [۱۴]. در این روش به علت ثابت نبودن اعضای داخلی بدن نیاز به به‌روزرسانی مداوم مسیر کلی می‌باشد که باعث افزایش هزینه محاسباتی و در نتیجه کاهش کارایی آن می‌شود.

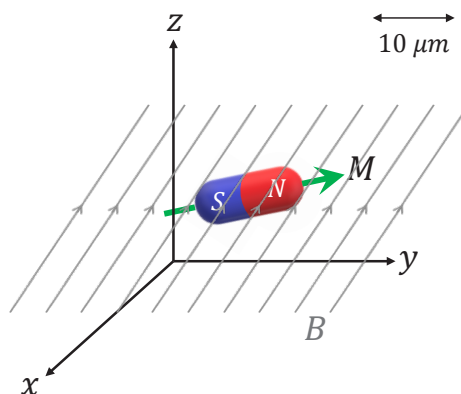
از آنجایی که در تمام روش‌های کنترل میکروروبات نیاز به عکس برداری لحظه‌ای جهت تعیین موقعیت ربات و محیط اطراف آن می‌باشد، در این کار برای کاهش هزینه محاسباتی و ساده‌تر نمودن الگوریتم کنترلی، کنترل موقعیت ربات تنها بر اساس مکان ربات و فاصله آن تا موانع اطراف، بدون تعیین مسیر از پیش تعیین شده برای ربات انجام می‌شود.

برای تعیین موقعیت ربات از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده نمود. به عنوان مثال یکی از این روش‌ها، استفاده از تصویر برداری ذرات مغناطیسی^۳ است. یکی دیگر از روش‌های تعیین موقعیت، عکس برداری به روش تصویر برداری تشدید مغناطیسی^۴ می‌باشد. مزیت استفاده از این دو روش تصویر برداری، بدون ضرر و غیر تهاجمی بودن آن‌ها برای بافت زنده است [۱۵].

نوآوری این کار در دو بخش می‌باشد: ۱) طراحی کنترلر با توانایی رسیدن به هدف در محیط ناشناخته بدون نیاز به مسیر از پیش تعیین شده (کاهش هزینه محاسباتی)، ۲) استفاده از سه آهنربای الکتریکی جهت کنترل صفحه‌ای میکروروبات که موجب افزایش فضای این مجموعه می‌شود.

در این مقاله ابتدا با در نظر گرفتن فرضیات بیان شده مدل ریاضی حاکم بر مساله بر اساس قوانین فیزیک بدست آمده است. به این صورت که با بدست آوردن رابطه حاکم بر میدان مغناطیسی اطراف سیم پیچ حامل جریان بر حسب جریان الکتریکی، روابط نیرو و گشتاور وارد بر میکروروبات به صورت تابعی از جریان الکتریکی هر یک از سیم پیچ‌ها با استفاده از روابط ماکسول محاسبه شده است [۱۰ و ۱۶ و ۱۷]. در قدم بعدی با در نظر گرفتن ربات

3 Magnetic Particle Imaging (MPI)
4 Magnetic Resonance Imaging (MRI)



شکل ۱. تصویر شماتیک میکروروبات تحت میدان مغناطیسی در فضای ۳ بعدی

Fig. 1. Schematic of microrobot inspired by magnetic field in 3D space

بر حسب جریان هر یک از آهنرباها بیان شده است.

۲-۱- معادلات حاکم بر دو قطبی مغناطیسی

گشتاور وارد بر دو قطبی مغناطیسی از حاصلضرب میدان مغناطیسی (B) در گشتاور مغناطیسی دو قطبی (M) بدست می‌آید و در رابطه زیر نشان داده شده است:

$$T = M \times B \quad (1)$$

که B مقدار چگالی شار میدان مغناطیسی اعمالی در محل M که واحد آن T است [۱۰]. گشتاور وارد شده بر دو قطبی در جهت هم راستا نمودن ممان مغناطیسی با میدان مغناطیسی است.

به جای ضرب خارجی و M از فرم ماتریس نامتقارن برداری استفاده می‌شود که در رابطه زیر بیان شده است [۱۰ و ۱۲]:

$$Sk(M) = Sk \begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -m_z & m_y \\ m_z & 0 & -m_x \\ -m_y & m_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

به صورت یک جرم نقطه‌ای^۱، با استفاده از روش مبتنی بر رفتار [۲۰-۱۸]، الگوریتمی برای جهت‌یابی ربات در محیطی با موانع نامشخص به منظور رسیدن به هدف طراحی شده است. این الگوریتم شامل رسیدن به هدف، فرار از مانع و دنبال کردن دیوار می‌باشد. در انتها با شبیه سازی این میکروروبات تحت میدان مغناطیسی خارجی در نرم افزار متلب صحت نتایج بدست آمده مورد بررسی قرار گرفته شده است.

۲-۲ دو قطبی مغناطیسی

میکروروبات به صورت یک دو قطبی مغناطیسی نقطه‌ای در نظر گرفته شده است. علاوه بر این با توجه به کوچک بودن فضای کاری، میدان مغناطیسی در فضای کاری به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است و روابط نیرو و گشتاور بر اساس آن ساده شده است (شکل ۱). همچنین با شرط اینکه جریان الکتریکی در هر سیم پیچ محدود و اندازه میدان مغناطیسی رابطه خطی با آن دارد، روابط نیرو و گشتاور وارد بر میکروروبات بر حسب جریان هریک از سیم پیچ‌ها بیان شده است.

با توجه به ثابت بودن آهنرباهای الکتریکی جهت میدان مغناطیسی در اطراف آن (به طور خاص در فضای کاری مورد نظر) ثابت و مشخص می‌باشد همچنین اندازه آن تابع جریان الکتریکی است. بر این اساس با توجه به تعداد و موقعیت آهنرباهای الکتریکی و جریان آن‌ها جهت و اندازه میدان مغناطیسی در فضای کاری مورد نظر به صورت تابعی از جریان الکتریکی هر یک از آهنرباها بدست آمده است. بنابراین نیرو و گشتاور وارد بر میکروروبات

n ام در نقطه P را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$B_n(P) = \tilde{B}_n(P) i_n \quad (7)$$

با در نظر گرفتن ۳ سیم پیچ به عنوان منبع تولید میدان مغناطیسی، میدان حاصل در نقطه P به صورت زیر قابل بیان است:

$$B(P) = \sum_{n=1}^3 B_n(P) = \sum_{n=1}^3 \tilde{B}_n(P) i_n = \begin{bmatrix} \tilde{B}_1(P) & \tilde{B}_2(P) & \tilde{B}_3(P) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \beta(P) I \quad (8)$$

در نتیجه نیرو و گشتاور وارد بر میکروروبات از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} T \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Sk(M)\beta(P) \\ M \cdot (\nabla \beta_x(P)) \\ M \cdot (\nabla \beta_y(P)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} = A_{T,F}(M,P) I \quad (9)$$

در این رابطه $\beta_x(P)$ و $\beta_y(P)$ به ترتیب سطرهای اول و دوم ماتریس $\beta(P)$ می‌باشند. همچنین $M \cdot (\nabla \beta_x(P))$ به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$M \cdot (\nabla \beta_x(P)) = \begin{bmatrix} m_x \frac{\partial \beta_{11}}{\partial x} + m_y \frac{\partial \beta_{11}}{\partial y} + m_z \frac{\partial \beta_{11}}{\partial z} \\ m_x \frac{\partial \beta_{12}}{\partial x} + m_y \frac{\partial \beta_{12}}{\partial y} + m_z \frac{\partial \beta_{12}}{\partial z} \\ m_x \frac{\partial \beta_{13}}{\partial x} + m_y \frac{\partial \beta_{13}}{\partial y} + m_z \frac{\partial \beta_{13}}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (10)$$

بنابراین می‌توان رابطه نیرو و گشتاور وارد بر دو قطبی را به صورت زیر بر حسب جریان هر یک از سیم پیچ‌ها عنوان کرد:

فقط در راستای z گشتاور وارد شده بر حرکت جسم اثر دارد و در راستای x, y اندازه گشتاور وارد شده اهمیت ندارد (توسط قیود خنثی می‌گردد)، بنابراین [۱۰ و ۱۲]:

$$T_z = \begin{bmatrix} -m_y & m_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

نیروی وارد دو قطبی مغناطیسی از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۰ و ۱۲]:

$$F = (M \cdot \nabla) B \quad (4)$$

با توجه به قوانین ماکسول و اینکه چگالی شار مغناطیسی در محدوده بسته وجود ندارد $\nabla \times B = 0$ می‌شود و می‌توان معادله نیرو را اینگونه نوشت [۱۰ و ۱۲]:

$$F = \begin{bmatrix} \frac{\partial B}{\partial x} & \frac{\partial B}{\partial y} & \frac{\partial B}{\partial z} \end{bmatrix}^T M \quad (5)$$

با توجه به اینکه حرکت میکروروبات در صفحه xy انجام می‌شود، بنابراین، از نیرو در راستای z صرف نظر شده است و نیروها در راستای x, y به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشند [۱۰].

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_x \frac{\partial B_x}{\partial x} + m_y \frac{\partial B_x}{\partial y} + m_z \frac{\partial B_x}{\partial z} \\ m_x \frac{\partial B_y}{\partial x} + m_y \frac{\partial B_y}{\partial y} + m_z \frac{\partial B_y}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M \cdot (\nabla B_x) \\ M \cdot (\nabla B_y) \end{bmatrix} \quad (6)$$

از آنجایی که میدان مغناطیسی حاصل از یک سیم پیچ حامل جریان به صورت خطی با جریان عبوری از آن تغییر می‌کند، میدان حاصل از سیم پیچ

۳-۱-۱- رسیدن به هدف:

برای این منظور کافی است سرعت ربات در جهت هدف تعیین گردد. با توجه به محدودیت حداکثر سرعت ربات و فاصله آن تا هدف، سرعت ربات به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۲۰ و ۲۱]:

$$e_{GTG} = G - P$$

$$K_{GTG} (\|e_{GTG}\|) = V_{\max} \frac{1 - e^{-\alpha_{GTG} \|e_{GTG}\|}}{\|e_{GTG}\| + \varepsilon} \quad (13)$$

$$u_{GTG} = K_{GTG} (\|e_{GTG}\|) e_{GTG}$$

که در این رابطه P موقعیت ربات، G موقعیت هدف، V_{\max} حداکثر سرعت مجاز ربات، α_{GTG} ضریب تأثیر فاصله ربات تا هدف بر سرعت آن، و ε عددی مثبت و بسیار کوچک جهت رفع خطای احتمالی ناشی از صفر شدن مخرج می‌باشد.

۳-۱-۲- فرار از مانع:

الگوریتم طراحی شده به این صورت است که اگر فاصله ربات از نزدیک‌ترین مانع کمتر از مقدار مشخصی شود ($\alpha_{FW} d_{OA}$) ربات شروع به تغییر مسیر در جهت عمود بر مانع می‌کند. اگر فاصله ربات تا مانع کمتر از حد مشخصی شود (d_{OA})، ربات در جهت دور شدن از مانع تغییر مسیر می‌دهد تا فاصله آن از مانع از حد مشخصی کمتر نشود (با مانع برخورد نکند). روابط (۱۴) برای جلوگیری از برخورد با مانع و حفظ فاصله مشخص از آن ارائه شده است.

$$e_{OA} = P - P_0$$

$$K_{OA} (\|e_{OA}\|) = -V_{\max} \alpha_{OA} \frac{\|e_{OA}\| - d_{OA}}{d_{OA}} \quad (14)$$

$$u_{OA} = K_{OA} (\|e_{OA}\|) e_{OA}$$

در این رابطه P موقعیت نزدیک‌ترین مانع به ربات، $\alpha_{OA} > 1$ ضریب تعیین شدت فرار از مانع و d_{OA} فاصله امن تا مانع است. همان طور که در رابطه (۱۴) نیز مشخص است، با این تعریف، ربات همواره تلاش می‌کند فاصله d_{OA} از مانع را حفظ نماید.

$$\begin{bmatrix} T_z \\ F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [-m_y & m_x & 0] \beta(P) \\ M \cdot (\nabla \beta_x(P)) \\ M \cdot (\nabla \beta_y(P)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \quad (11)$$

$$A_{T,F}(M, P) I$$

در این رابطه $A_{T,F}(M, P)$ یک ماتریس 3×3 می‌باشد. میدان حاصل از یک سیم پیچ حامل جریان را می‌توان به صورت میدان حاصل از یک دوقطبی مغناطیسی در نظر گرفت و با رابطه زیر آن را محاسبه نمود:

$$B_n(M, P) = \frac{\mu_0}{4\pi|P|^3} \left(\frac{3(M \cdot P)P}{|P|^2} - M \right) \quad (12)$$

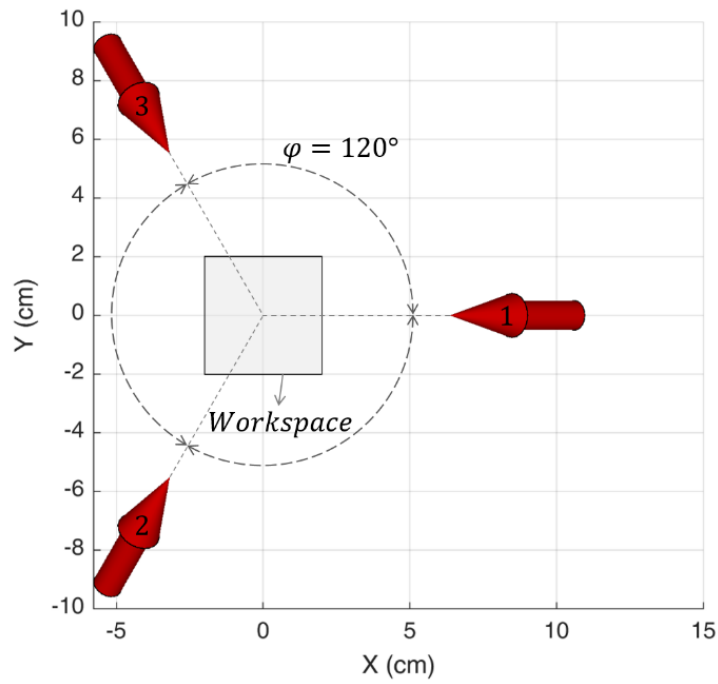
که در این رابطه μ ضریب تراوایی خالص، P بردار موقعیت نقطه نسبت به دوقطبی و M گشتاور دوقطبی مغناطیسی بر حسب $A \cdot m^2$ می‌باشد. در این کار اندازه M برابر با $|M| = \Delta i_n A \cdot m^2$ در نظر گرفته شده است. همچنین فرض می‌شود بردار M هم راستا با محور سیم پیچ می‌باشد. فرض می‌کنیم سه سیم پیچ به صورت متقارن به صورت نشان داده شده در شکل ۲ و شکل ۳ قرار گرفته باشند.

۳- طراحی کنترل کننده

برای کنترل و هدایت دو قطبی مغناطیسی در محیطی با موانع مختلف نامشخص (مانع نقطه‌ای و دیوار)، ابتدا نیاز به طراحی الگوریتمی برای جهت‌یابی ربات در شرایط مختلف می‌باشد. در قدم بعد می‌بایست کنترل کننده ربات توانایی دنبال کردن مسیر طراحی شده در قسمت قبل را داشته باشد. در ادامه به توضیح هر یک از این دو بخش پرداخته شده است.

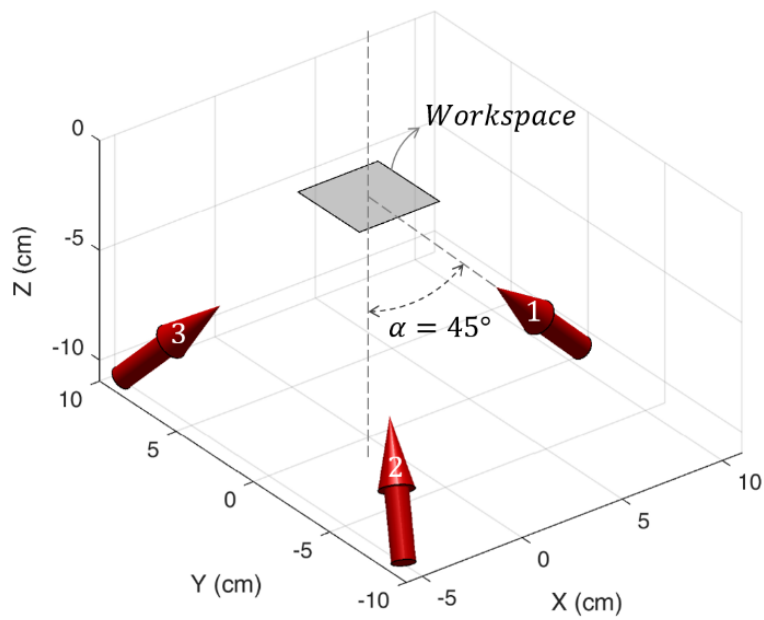
۳-۱- الگوریتم جهت یابی

در این بخش با توجه به موقعیت ربات، هدف، و موانع نزدیک به آن، مسیری جهت عدم برخورد با موانع، عبور از آن‌ها و رسیدن به هدف محاسبه می‌شود.



شکل ۲. موقعیت سیم پیچ‌ها در صفحه xy

Fig. 2. Electromagnets' configuration in xy plane



شکل ۳. زاویه سیم پیچ‌ها نسبت به محور z

Fig. 3. Electromagnets' angle with respect to z direction

۳-۱-۳ دور زدن مانع و دنبال کردن دیوار:

شود، فاصله ربات تا هدف $d\tau$ ذخیره می‌گردد. عمل فرار از مانع تا زمانی انجام می‌شود که فاصله ربات تا هدف کمتر از مقدار $d\tau$ شود و همچنین $e_{GTG} \cdot e_{OA} > 0$ باشد. به عبارت دیگر ربات به هدف نزدیک‌تر شده باشد و با حرکت به سمت هدف از مانع نیز دور گردد.

در رابطه (۱۷) نحوه انجام این مسیریابی آورده شده است.

$$\sigma = \begin{cases} 1 & \alpha_{FW} d_{OA} \leq \|e_{OA}\| \\ \frac{\|e_{OA}\| - \alpha_{\sigma} d_{OA}}{(\alpha_{FW} - 1) d_{OA}} & \alpha_{\sigma} d_{OA} \leq \|e_{OA}\| < \alpha_{FW} d_{OA} \\ 0 & \|e_{OA}\| < \alpha_{\sigma} d_{OA} \end{cases} \quad (17)$$

$$u_{GTG-OA} = \sigma \times u_{GTG} + u_{OA} + u_{FW}$$

توجه شود، در صورتی که ربات در شرایط فرار از مانع و یا دور زدن مانع نباشد، u_{OA} و یا مقدار u_{FW} برابر با صفر خواهد بود. در این رابطه σ جهت کاهش اثر رسیدن به هدف در صورت مشاهده مانع و نزدیک شدن به آن می‌باشد و ضریب $0 < \alpha_{\sigma} < 1$ نیز میزان تأثیر سرعت رسیدن به هدف را در هنگام فرار از مانع و دور زدن آن تعیین می‌کند. همچنین در شکل ۴-الف موقعیت ربات نسبت به مانع و شکل ۴-ب نمودار اندازه σ بر حسب فاصله ربات تا مانع نمایش داده شده است.

با توجه به روابط ارائه شده برای جهت‌یابی ربات که در آن حداکثر سرعت ربات محدود به مقدار V_{max} است (رابطه (۱۳))، در صورت مشاهده مانع سرعت ربات به تدریج کاهش یافته و مسیر آن به تدریج تغییر می‌کند (رابطه (۱۴) تا (۱۷)) و همچنین در صورت نزدیک شدن به هدف سرعت آن کاهش می‌یابد (رابطه (۱۳))، که می‌توان گفت در هر لحظه به نوعی سرعت ایده‌آل ربات به صورت غیرخطی بر اساس موقعیت و سرعت آن کنترل می‌شود.

در این کار، کنترل ربات در دو قسمت انجام می‌شود: (۱) طراحی (تعیین) مسیر حرکت، (۲) محاسبه نیروها و گشتاور لازم وارد بر ربات جهت حرکت در مسیر طراحی شده. از آنجایی که طراحی مسیر در هر لحظه و بر اساس موقعیت و سرعت ربات انجام می‌شود و از تغییر سرعت ناگهانی جلوگیری شده است (روابط (۱۳) تا (۱۷))، نیرو و گشتاور لازم برای حرکت میکروروبات در این مسیر، با استفاده از قوانین نیوتن، متناسب با شتاب حرکت میکروروبات بدست خواهد آمد.

جهت دور زدن مانع، در اولین لحظه مشاهده مانع توسط ربات، ربات بر اساس موقعیت هدف تصمیم می‌گیرد مانع را در کدام جهت (ساعت گرد یا پاد ساعت گرد) دور بزند. این تصمیم‌گیری توسط رابطه (۱۵) انجام می‌شود [۲۰ و ۲۱].

$$\begin{aligned} e_{FW}^c &= R_z(-90^\circ) \times e_{OA} \\ e_{FW}^{cc} &= R_z(+90^\circ) \times e_{OA} \\ e_{FW} &= \begin{cases} e_{FW}^c & e_{GTG} \cdot e_{FW}^c \geq 0 \\ e_{FW}^{cc} & e_{GTG} \cdot e_{FW}^{cc} > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

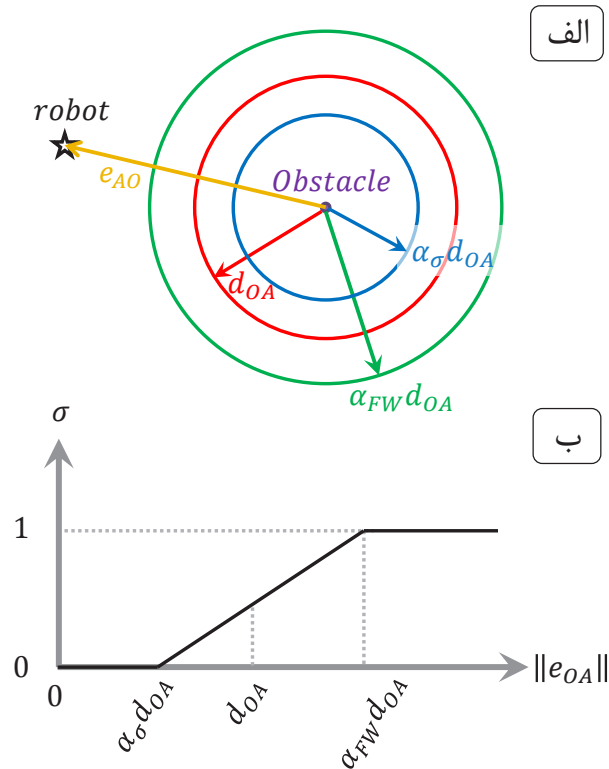
در این رابطه $R_z(\lambda)$ ماتریس دوران حول محور z به میزان زاویه λ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ربات در جهتی شروع به دور زدن مانع می‌کند که باعث نزدیک‌تر شدن به هدف شود. سرعت دور زدن مانع نیز توسط رابطه (۱۶) تعریف شده است.

$$\begin{aligned} K_{FW}(\|e_{FW}\|) &= V_{max} \frac{\alpha_{FW} d_{OA} - \|e_{FW}\|}{(\alpha_{FW} - 1) d_{OA} \|e_{FW}\|} \\ u_{FW} &= K_{FW}(\|e_{FW}\|) e_{FW} \end{aligned} \quad (16)$$

در این رابطه $\alpha_{FW} > 1$ می‌باشد و تعیین می‌کند عمل دور زدن مانع چه مقدار زودتر از عمل فرار از مانع آغاز شود. به عبارت دیگر ربات سعی می‌کند ابتدا با دور زدن مانع تغییر مسیر دهد و در صورتی که مانع بزرگ باشد عمل فرار از مانع نیز صورت می‌گیرد.

۳-۱-۴ رابطه کلی برای تعیین مسیر ربات:

در این بخش نحوه استفاده از سرعت‌های رسیدن به هدف، فرار از مانع و دور زدن آن توضیح داده می‌شود. در صورتی که فاصله نزدیک‌ترین مانع تا ربات بیشتر از مقدار $\alpha_{FW} d_{OA}$ باشد، ربات بدون توجه به موانع به سمت هدف حرکت می‌کند. زمانی که فاصله آن تا نزدیک‌ترین مانع کمتر از مقدار $\alpha_{FW} d_{OA}$ شود، ربات علاوه بر حرکت به سمت هدف سعی می‌کند با حرکت عمود بر مانع آن را دور بزند. ولی اگر فاصله آن تا نزدیک‌ترین مانع کمتر از مقدار d_{OA} شود، ربات عمل فرار از مانع به همراه دور زدن آن را انجام می‌دهد. در اولین زمانی که فاصله ربات تا مانع کمتر از مقدار d_{OA}



شکل ۴. موقعیت ربات نسبت به مانع (الف) نمودار اندازه برحسب فاصله ربات تا مانع (ب)

Fig. 4. (a) Robot's position with respect to obstacle (b) Magnitude of σ as a function of the distance between the robot and the obstacle

$$T_z = K_{P2}(\theta_G - \theta)$$

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \left[K_{P1}(u_{GTG-OA} - V) \right]_{2 \times 1} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} T_z \\ F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{P2}(\theta_G - \theta) \\ \left[K_{P1}(u_{GTG-OA} - V) \right]_{2 \times 1} \end{bmatrix}$$

با قرار دادن رابطه (۱۹) در رابطه (۱۱) داریم:

$$\left[A_{T,F}(M,P) \right]_{3 \times 3} I_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} K_{P2}(\theta_G - \theta) \\ \left[K_{P1}(u_{GTG-OA} - V) \right]_{2 \times 1} \end{bmatrix} \quad (20)$$

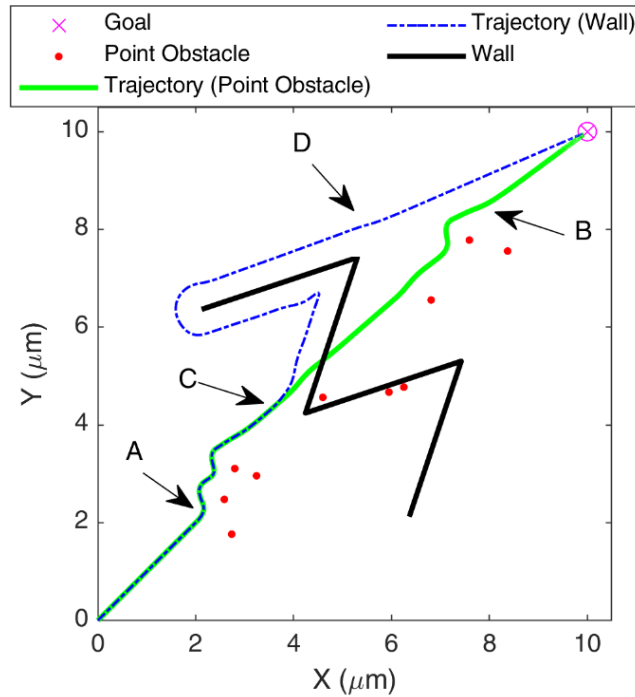
با استفاده از رابطه بالا جریان مورد نیاز هر سیم پیچ در هر لحظه

۳-۲- طراحی کنترل کننده جهت دنباله روی مسیر

میکروروبات مغناطیسی را می‌توان به صورت یک جرم در نظر گرفت که معادله دینامیکی آن به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{cases} m_0 \ddot{x} = F_x \\ m_0 \ddot{y} = F_y \\ I_0 \ddot{\theta} = T_z \end{cases} \quad (18)$$

برای کنترل این سیستم در حالت کلی از کنترلر تناسبی-انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر جهت ایجاد پایداری و حذف اغتشاشات استفاده می‌شود، ولی با توجه به الگوریتم ارائه شده برای طراحی مسیر و عدم وجود نیرو(ها)ی خارجی مزاحم، استفاده از کنترلر تناسبی برای دنبال کردن مسیر و رسیدن به هدف کافی می‌باشد. بنابراین، رابطه کنترلی به صورت زیر بیان می‌شود:



شکل ۵. مسیر حرکت ربات و نحوه عبور از موانع جهت رسیدن به هدف

Fig. 5. Robot's trajectory while passing the obstacles to reach the goal

سازی به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned}
 m_0 &= 10^{-5} \text{ kg}, & m &= 10^{-4} \text{ A.m}^2, \\
 K_{P1} &= \begin{bmatrix} 25 & 0 \\ 0 & 25 \end{bmatrix}, & K_{P2} &= 25, \\
 V_{\max} &= 5 \times 10^{-5} \text{ m/s}, & \varepsilon &= 10^{-15} \text{ m} \\
 \alpha_{GTG} &= 10^{12} \text{ m}^{-2}, & d_{OA} &= 0.5 \times 10^{-6} \text{ m}, \\
 \alpha_{OA} &= 1.5, & \alpha_{FW} &= 1.5, \quad \alpha_{\sigma} = 0.8
 \end{aligned}$$

در شکل ۵ مسیر حرکت ربات از میان موانع مختلف جهت رسیدن به هدف نشان داده شده است. در حالت اول فقط موانع نقطه‌ای (نقاط قرمز در شکل) در مسیر ربات قرار دارند که ربات برای عبور از این موانع و رسیدن به

محاسبه و به آن‌ها اعمال می‌شود.

که در آن K_{P1} (یک ماتریس 2×2) ضریب کنترلر تناسبی سرعت خطی، V (یک بردار 2×1) سرعت خطی ربات در هر لحظه به صورت برداری، K_{P2} (اسکالر) ضریب کنترلر تناسبی سرعت زاویه‌ای، θ_G (اسکالر) زاویه مورد نظر ربات و θ (اسکالر) زاویه ربات در هر لحظه می‌باشند.

۴- نتایج و بحث

در این بخش جهت سنجش صحت الگوریتم ارائه شده، با استفاده از روابط حاکم بر میکروروبات، حرکت یک میکروروبات جهت عبور از موانع نامشخص و رسیدن به هدف مشخص، در دو شرایط مختلف در نرم افزار متلب^۱ شبیه سازی شده است. متغیرهای در نظر گرفته شده در این شبیه

1 MATLAB

می‌زند. در لحظه B ربات از آخرین مانع عبور کرده و به مستقیم به سمت هدف حرکت می‌کند. با توجه به رابطه (۱۲) زمانی که فاصله ربات تا هدف به کمتر از مقدار ϵ برسد، سرعت حرکت ربات تقریباً به صورت خطی کاهش پیدا می‌کند تا به هنگام رسیدن به هدف از آن عبور نکند. همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، در ثانیه ۳ ربات تقریباً به هدف می‌رسد اما از ثانیه ۳ تا ۴/۴ ربات با سرعت بسیار ناچیزی به هدف نزدیک شده تا دقیقاً به آن برسد.

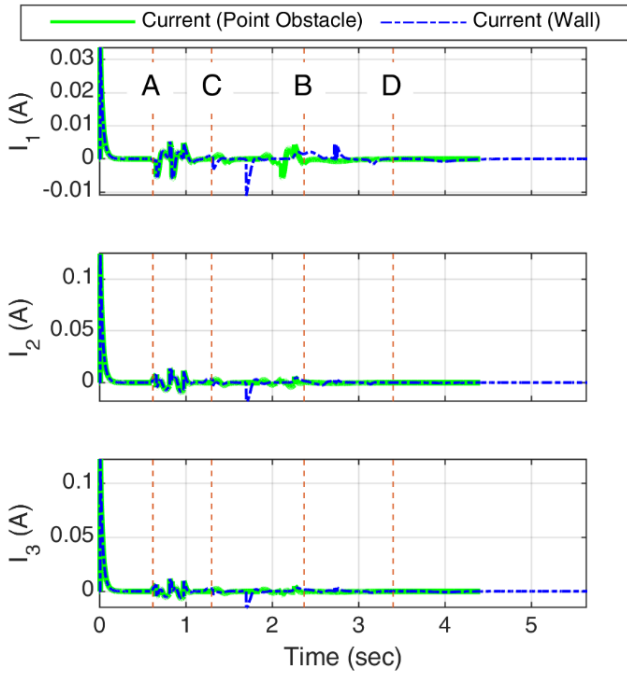
در صورت وجود دیوار در مسیر ربات، ربات در لحظه C برای اولین بار دیوار را تشخیص می‌دهد و موقعیت آن در این لحظه به صورت خطچین آبی رنگ در شکل ۶ نشان داده شده است. از لحظه C تا D ربات بر اساس روابط (۱۴) و (۱۵) دیوار را دنبال می‌کند تا در لحظه D دیگر دیواری در مسیر ربات قرار ندارد و ربات مستقیم به سمت هدف حرکت می‌کند. در این شبیه سازی در ثانیه ۴/۲ ربات به فاصله بسیار کمی تا هدف رسیده است و تا زمان ۵/۶ با سرعت بسیار کمی به سمت هدف حرکت می‌کند تا به آن برسد. در شکل ۷ جریان هریک از سیم پیچ‌ها بر حسب زمان جهت ایجاد میدان مغناطیسی مورد نیاز نمایش داده شده است. باید توجه نمود که جرم میکروروبات در این شبیه سازی برابر با 10^{-5} kg در نظر گرفته شده است. همچنین نیروی خارجی مقاومی نیز بر میکروروبات عمل نمی‌کند. بنابراین، در صورتی که نیروی مغناطیسی وارد بر آن صفر باشد، ربات با سرعت ثابت به مسیر خود ادامه می‌دهد. به همین دلیل در شروع حرکت جریان سیم پیچ‌ها مقدار قابل توجهی می‌باشند که با افزایش سرعت ربات، این جریان کاهش می‌یابد و در زمان تقریبی ۰/۲ ثانیه به مقدار صفر می‌رسد و ربات با سرعت ثابت در مسیر مستقیم به سمت هدف حرکت می‌کند. در لحظه A، ربات به نزدیکی اولین مانع می‌رسد و نیاز به تغییر مسیر پیدا می‌کند. در این زمان جریان سیم پیچ‌ها با توجه به نیاز ربات و الگوریتم کنترلی آن تغییر می‌کند. در ادامه نیز جهت عبور از موانع مختلف تا لحظه B، نیاز به تغییر مسیرهای زیادی دارد که تغییرات زیاد در جریان سیم پیچ‌ها به همین دلیل می‌باشد. کمی قبل از ثانیه ۳ شاهد جریان منفی در سیم پیچ‌ها می‌باشیم (نمودار سبز در شکل ۷) که برای کاهش سرعت ربات برای رسیدن به هدف می‌باشد. بعد از این زمان تا لحظه رسیدن به هدف با توجه به تغییرات بسیار کم سرعت، تغییرات جریان نیز هم

هدف (دایره صورتی) مسیر سبز رنگ را طی می‌کند. در حالت دوم علاوه بر موانع نقطه‌ای، دیواری (خط سیاه) در مسیر ربات قرار گرفته است که ربات برای رسیدن به هدف مسیر خطچین به رنگ آبی را طی می‌کند.

در اینجا ربات از مبدأ مختصات شروع به حرکت می‌کند و با نزدیک شدن به اولین مانع (نقطه A) با توجه به جهت بردار عمود بر مانع و بردار رسیدن به هدف، تصمیم می‌گیرد مانع را در جهت ساعت گرد دور بزند و فاصله خود تا هدف را در این لحظه $d\tau$ ذخیره می‌کند. در ادامه با نزدیک‌تر شدن به مانع سعی بر فرار از مانع می‌کند. در این شرایط ربات فاصله خود تا مانع را به مقدار d_{OA} حفظ می‌کند و آن را دور می‌زند. این عمل تا زمانی که زوایه‌ی بین بردار فرار از مانع و رسیدن به هدف کمتر از 90° شود ($\theta_{GTG} \cdot \theta_{OA} > 0$) و فاصله ربات تا هدف از مقدار $d\tau$ کمتر شود، ادامه دارد. با برقرار شدن این دو شرط، ربات مستقیم به سمت هدف حرکت می‌کند. هرگاه ربات هر مانع نقطه‌ای را در مسیر خود ببیند این عمل تکرار می‌شود. بعد از دور زدن آخرین مانع ربات مستقیم به سمت هدف حرکت می‌کند (نقطه B).

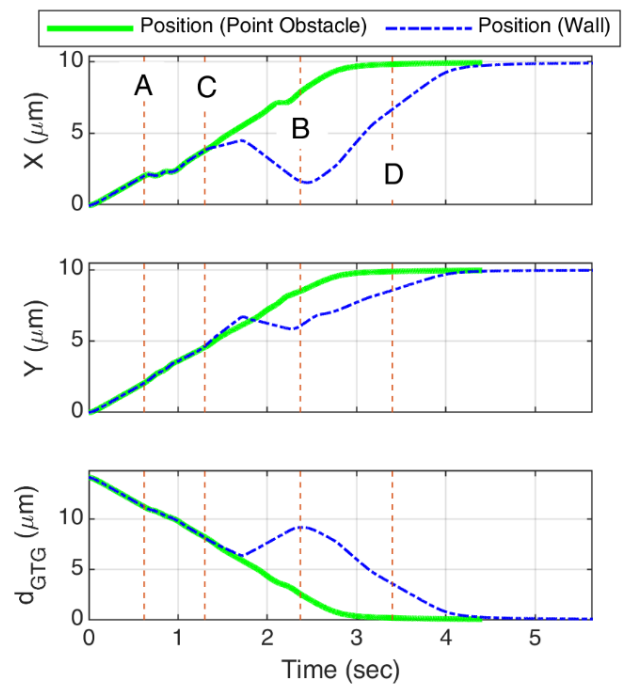
در صورت وجود دیوار در مسیر ربات (نقطه C) مسیر ربات تغییر کرده و شروع به دور زدن آن می‌کند. لازم به ذکر است ربات فقط نزدیک‌ترین نقطه دیوار به خود را مشاهده می‌کند و بر اساس با توجه به الگوریتم جهت‌یابی تعریف شده، مسیر حرکت را مشخص می‌کند. در اولین لحظه مشاهده دیوار، ربات همانند الگوریتم مانع نقطه‌ای، جهت دور زدن مانع را تعیین می‌کند که در این حالت شبیه سازی شده، آن را ساعت گرد دور می‌زند. همچنین در این لحظه فاصله خود تا هدف را در متغیر $d\tau$ ذخیره می‌کند. با توجه به پیوسته بودن دیوار مقدار $d\tau$ در مدت زمان دنبال کردن دیوار تغییر نمی‌کند و ربات تا زمانیکه دو شرط بیان شده ارضاء شود، دیوار را در جهت تعیین شده، دور می‌زند (نقطه D) و بعد از آن ربات مستقیم به سمت هدف حرکت می‌کند.

مسیر حرکت ربات و فاصله آن تا هدف بر حسب زمان در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در ابتدای حرکت شیب تغییر فاصله ربات تا هدف (d_{GTG}) ثابت و برابر با مقدار V_{max} می‌باشد. در لحظه A ربات اولین مانع را در مسیر خود می‌بیند و شروع به دور زدن آن می‌کند. در صورتی که موانع به صورت نقطه‌ای باشد، نمودار موقعیت ربات بر حسب زمان در شکل ۶ به رنگ سبز نشان داده شده است. در زمان A تا B ربات موانع نقطه‌ای مختلف را در مسیر خود تشخیص داده و آن‌ها را دور



شکل ۷. نمودار جریان لازم هر یک از سیم پیچ‌ها بر حسب زمان

Fig. 7. Each electromagnets required current



شکل ۶. مختصات و فاصله ربات تا هدف بر حسب زمان

Fig. 6. Robot's position and distance to the goal

هر یک از سیم پیچ‌ها بدست آورده شده است و سپس الگوریتم جهت‌یابی ربات جهت رسیدن به هدف مشخص و عبور از موانع نامشخص ارائه شده است. با انجام شبیه سازی و بررسی نمودارهای موقعیت ربات و جریان سیم پیچ‌ها بر حسب زمان، برای دو حالت مختلف: وجود موانع نقطه‌ای و وجود دیوار، صحت و کارایی الگوریتم جهت‌یابی ارائه شده، مورد بررسی قرار گرفته شده است. در انتها می‌توان نتیجه گرفت با استفاده از سه آهنربای الکتریکی و الگوریتم جهت‌یابی پیشنهاد شده در این کار، بدون نیاز به تعیین مسیر از پیش تعیین شده، مسیر یک میکروروبات مغناطیسی را در صفحه جهت عبور از موانع نامشخص برای رسیدن به هدف مشخص، تعیین و کنترل نمود. از روش ارائه شده در این مقاله می‌توان برای هدایت میکروروبات‌های حامل دارو جهت ارسال دارو به قسمت مشخصی از بدن بیمار استفاده نمود. در ادامه این پژوهش می‌توان به ارائه الگوریتم جهت‌یابی و روش کنترلی ربات در حالت سه بعدی پرداخته شود. علاوه بر این، می‌توان با استفاده از روابط مغناطیسی ارائه شده در این پژوهش، به طراحی میکروروباتی جهت هدایت گایدوایر در درون بدن پرداخته شود.

ناچیز می‌باشد.

در صورت وجود دیوار، از لحظه C تا D جریان‌ها به نحوی تغییر می‌کنند که ربات دیوار را دور بزند (خط چین آبی در شکل ۷). در اینجا نیز در ثانیه ۴ تغییرات جریان جهت کاهش سرعت ربات در زمان نزدیک شدن به هدف قابل مشاهده است.

۵- نتیجه گیری

با توجه به حرکت میکروروبات درون بدن و تغییر دائم محیط و موانع اطراف میکروروبات، در این مقاله به منظور کاهش هزینه محاسباتی و افزایش سرعت و در نتیجه دقت کنترل کننده، بر خلاف کارهای انجام شده است، الگوریتمی جهت رسیدن به هدف بدون تعیین مسیر از پیش تعریف شده طراحی شده است. به این منظور الگوریتم جهت‌یابی صفحه‌ای یک میکروروبات مغناطیسی به وسیله کنترل جریان سه آهنربای الکتریکی (سیم پیچ حامل جریان) پیشنهاد شده است. ابتدا بر اساس قوانین ماکسول، روابط حاکم بر دو قطبی مغناطیسی در حرکت صفحه‌ای بر حسب جریان

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

$$A_{T,F}(M,P)$$

ماتریس تبدیل جریان الکتریکی آهنرباهای الکتریکی به گشتاور و نیروی وارد بر دوقطبی مغناطیسی M در نقطه P

$$B$$

بردار میدان مغناطیسی، T

$$B(P)$$

بردار میدان مغناطیسی کل در نقطه T, P

$$B_n(P)$$

بردار میدان مغناطیسی حاصل از یک آهنربای الکتریکی در نقطه P نسبت به مرکز آن، T

$$\tilde{B}_n(P)$$

بردار میدان مغناطیسی حاصل از یک آهنربای الکتریکی در نقطه P نسبت به مرکز آن به ازاء جریان ۱ آمپر،

$$T/A$$

فاصله مجاز ربات از مانع، m

$$d_{OA}$$

بردار موقعیت هدف نسبت به ربات، m

$$e_{GTG}$$

بردار موقعیت ربات نسبت به مانع، m

$$e_{OA}$$

بردار لازم جهت دنبال کردن دیوار در جهت ساعتگرد،

$$e_{FW}^c$$

$$m$$

بردار لازم جهت دنبال کردن دیوار در جهت پادساعتگرد،

$$e_{FW}^{cc}$$

$$m$$

بردار لازم جهت دنبال کردن دیوار، m

$$e_{FW}$$

بردار نیرو، N

$$F$$

اندازه نیرو در راستاهای x, y, z ، N

$$F_x, F_y$$

بردار موقعیت هدف در صفحه، m

$$G$$

بردار جریان الکتریکی آهنرباهای الکتریکی، A

$$I$$

جریان آهنربای الکتریکی n ام، A

$$i_n$$

ممان اینرسی ربات حول محور z ، $kg.m^2$

$$I_0$$

اندازه سرعت ربات جهت دنبال کردن دیوار به ازاء واحد

$$K_{FW}(\|e_{FW}\|)$$

طول فاصله ربات تا مانع، \sqrt{s}

$$K_{GTG}(\|e_{GTG}\|)$$

اندازه سرعت ربات جهت رسیدن به هدف به ازاء واحد

طول فاصله ربات تا هدف، \sqrt{s}

$$K_{OA}(\|e_{OA}\|)$$

اندازه سرعت ربات جهت عدم برخورد با مانع (فرار از مانع)

به ازاء واحد طول فاصله ربات تا مانع، \sqrt{s}

$$K_{P\gamma}$$

ماتریس ضریب کنترل سرعت ربات

$$K_{P\tau}$$

ضریب کنترل زاویه ربات

$$M$$

بردار گشتاور مغناطیسی، $A.m^2$

$$m_x, m_y, m_z$$

اندازه گشتاور مغناطیسی در راستاهای x, y, z ، $A.m^2$

$$A.m^2$$

جرم ربات، kg

$$m$$

بردار موقعیت ربات، m

$$P$$

بردار موقعیت مانع، m

$$P_O$$

ماتریس دوران حول محور z

$$R_z$$

بردار گشتاور، $N.m$

$$T$$

اندازه گشتاور در راستای z ، $N.m$

$$T_z$$

بردار سرعت ربات جهت دنبال کردن دیوار، m/s

$$u_{FW}$$

بردار سرعت ربات جهت رسیدن به هدف، m/s

$$u_{GTG}$$

بردار سرعت ربات جهت عدم برخورد با موانع و

$$u_{GTG-OA}$$

رسیدن به هدف، m/s

بردار سرعت جهت عدم برخورد با مانع، m/s

$$u_{OA}$$

بردار سرعت ربات، m/s

$$V$$

حداکثر سرعت مجاز ربات، m/s

$$V_{max}$$

شتاب خطی ربات در راستای x, y ، m^2/s

$$\ddot{x}, \ddot{y}$$

علائم یونانی

ضریب تأثیر سرعت رسیدن به هدف را در هنگام

$$\alpha_\sigma$$

فرار از مانع ($0 < \alpha_\sigma < 1$)

ضریب بزرگتر از ۱ جهت تعیین شروع دور زدن مانع

$$\alpha_{FW}$$

ضریب تأثیر فاصله ربات تا هدف بر سرعت آن

$$\alpha_{GTG}$$

ضریب تعیین شدت فرار از مانع ($\alpha_{OA} > 1$)

$$\alpha_{OA}$$

ماتریس تبدیل جریان الکتریکی آهنرباهای

$$\beta(P)$$

الکتریکی به میدان مغناطیسی در نقطه P ،

$$T/A$$

سطر اول ماتریس $\beta(P)$ ، T/A

$$\beta_x(P)$$

ضریب کاهش اثر رسیدن به هدف در صورت

$$\sigma$$

مشاهده مانع ($0 < \sigma < 1$)

عملگر دل

$$\nabla$$

عددی مثبت و بسیار کوچک جهت رفع خطای

$$\varepsilon$$

ناشی از صفر شدن مخرج در کنترل سرعت رسیدن

به هدف، m

زاویه ربات، rad

$$\theta$$

شتاب زاویه‌ای ربات، rad/s^2

$$\ddot{\theta}$$

زاویه هدف، rad

$$\theta_G$$

ضریب تراوانی خلأ، H/m

$$\mu$$

منابع

- [1] A.C. Bakenecker, A. von Gladiss, H. Schwenke, A. Behrends, T. Friedrich, K. Lütke-Buzug, A. Neumann, J. Barkhausen, F. Wegner, T.M. Buzug, Navigation of a magnetic micro-robot through a cerebral aneurysm phantom with magnetic particle imaging, Scientific Reports, 11 (2021) 14082.

- A. Sengul, B.J. Nelson, Octomag: An electromagnetic system for 5-DOF wireless micromanipulation, *IEEE Transactions on Robotics*, 26 (2010) 1006-1017.
- [13] H. Zhao, J. Leclerc, M. Feucht, O. Bailey, A.T. Becker, 3D Path-Following Using MRAC on a Millimeter-Scale Spiral-Type Magnetic Robot, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5 (2020) 1564-1571.
- [14] J. Liu, T. Xu, S.X. Yang, X. Wu, Navigation and Visual Feedback Control for Magnetically Driven Helical Miniature Swimmers, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16 (2020) 477-487.
- [15] Z.W. Tay, P. Chandrasekharan, B.D. Fellows, I.R. Arrizabalaga, E. Yu, M. Olivo, S.M. Conolly, Magnetic Particle Imaging: An Emerging Modality with Prospects in Diagnosis, Targeting and Therapy of Cancer, *Cancers* 13 (2021).
- [16] A.W. Mahoney, J.J. Abbott, Generating Rotating Magnetic Fields With a Single Permanent Magnet for Propulsion of Untethered Magnetic Devices in a Lumen, *IEEE Transactions on Robotics*, 30 (2014) 411-420.
- [17] R. Pieters, H. Tung, S. Charreyron, D.F. Sargent, B.J. Nelson, RodBot: A rolling microrobot for micromanipulation, in: 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2015, pp. 4042-4047.
- [18] M. Egerstedt, Behavior Based Robotics Using Hybrid Automata BT - Hybrid Systems: Computation and Control, (2000) 103-116.
- [19] F. Dehkordi, M. Sadedel, Dynamic modeling and decoupled control of linear and angular velocity for robotic fish, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 8 (2021) 35-45.
- [20] M. Khazaei, M. Sadedel, A. Davarpanah, Behavior-Based Navigation of an Autonomous Hexapod Robot Using a Hybrid Automaton, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 102 (2021) 29.
- [21] B. Saeedi, M. Sadedel, Implementation of Behavior-Based Navigation Algorithm on Four-Wheel Steering Mobile Robot, *Journal of Computational Applied Mechanics*, 52 (2021) 619-641.
- [2] M. Nair, R. Guduru, P. Liang, J. Hong, V. Sagar, S. Khizroev, Externally controlled on-demand release of anti-HIV drug using magneto-electric nanoparticles as carriers, *Nature Communications*, 4 (2013) 1707.
- [3] M. Hoop, F. Mushtaq, C. Hurter, X.-Z. Chen, B.J. Nelson, S. Pané, A smart multifunctional drug delivery nanoplatfrom for targeting cancer cells, *Nanoscale*, 8 (2016) 12723-12728.
- [4] F. Qiu, L. Zhang, S. Tottori, K. Marquardt, K. Krawczyk, A. Franco-Obregón, B.J. Nelson, Bio-inspired microrobots, *Materials Today*, 15 (2012) 463.
- [5] W. Wang, S. Li, L. Mair, S. Ahmed, T.J. Huang, T.E. Mallouk, Acoustic Propulsion of Nanorod Motors Inside Living Cells, *Angewandte Chemie International Edition*, 53 (2014) 3201-3204.
- [6] M. Sitti, H. Ceylan, W. Hu, J. Giltinan, M. Turan, S. Yim, E. Diller, Biomedical Applications of Untethered Mobile Milli/Microrobots, *Proceedings of the IEEE. Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 103 (2015) 205-224.
- [7] X.-Z. Chen, M. Hoop, F. Mushtaq, E. Siringil, C. Hu, B.J. Nelson, S. Pané, Recent developments in magnetically driven micro- and nanorobots, *Applied Materials Today*, 9 (2017) 37-48.
- [8] P. Fischer, B.J. Nelson, G.-Z. Yang, F. Peer, N.B. J., Y. Guang-Zhong, New materials for next-generation robots, *Science Robotics*, 3 (2018) eaau0448.
- [9] Z. Yang, L. Yang, L. Zhang, Autonomous Navigation of Magnetic Microrobots in A Large Workspace Using Mobile-Coil System, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, (2021) 1.
- [10] S. Jeon, A.K. Hoshiar, K. Kim, S.S. Lee, E. Kim, S.S. Lee, J.-Y. Kim, B.J. Nelson, H.-J. Cha, B.-J. Yi, H. Choi, A Magnetically Controlled Soft Microrobot Steering a Guidewire in a Three-Dimensional Phantom Vascular Network, *Soft Robotics*, 6 (2018) 54-68.
- [11] L. An, L. Huizeng, L. Zheng, Z. Zhipeng, L. Kaixuan, L. Mingzhu, S. Yanlin, Programmable droplet manipulation by a magnetic-actuated robot, *Science Advances*, 6 (2021) 5808.
- [12] M.P. Kummer, J.J. Abbott, B.E. Kratochvil, R. Borer,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Mojaver Zargar, M. Sadedel, M. R. Karafi, Planar Navigation Algorithm of Magnetic Dipole Microrobot by Three External Electromagnets, Amirkabir J. Mech Eng., 54(8) (2022) 1789-1802.

DOI: [10.22060/mej.2022.20797.7317](https://doi.org/10.22060/mej.2022.20797.7317)

