مجله کنترل
ISSN 2008-8345
جلد ۶، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۱، صفحه ۵۳-۳۹

همکاری انسان و ماشین برای کنترل حرکت پنجه ربات صلب با پایه الاستیک روی مسیر نامعین

علی صالحی[۱]، محمد جعفر صدیق[۲]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، asalehi@me.iut.ac.ir

[۲] استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، jafars@cc.iut.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۱/۱/۳۰، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۱/۴/۲۶)

چکیده: پاره‌ای از کاربردهای رباتیک نظیر جوشکاری و تعمیر شکاف‌های ایجاد شده، نیازمند کنترل حرکت پنجه ربات بر روی مسیری با معادله نامعین است. در اینگونه کاربردها همکاری انسان و ماشین می‌تواند به عنوان یکی از بهترین راه حل‌ها در نظر گرفته شود. معمولا در این نوع کاربردها از یک ابزار راهبر به شکل ربات اصلی و با مقیاس کوچکتر استفاده می‌شود. از سوی دیگر، امکان استفاده از ابزار راهبر با شکل شبیه ربات اصلی برای ربات‌های الاستیک و یا دارای هندسه پیچیده وجود ندارد و لذا لازم است شکل خاصی از ابزار راهبر با توجه به شرایط محیطی و توانایی انسان طراحی شده و الگوریتم هدایت برمبنای آن توسعه داده شود. در این تحقیق حل چنین مساله‌ای موردنظر بوده و به این منظور الگوریتم مناسبی برای هدایت پنجه با توجه به قابلیت‌های انسان و ابزار راهبر مناسب پیشنهاد شده است. فرمان صادره بر مبنای این الگوریتم هدایت از طریق یک کنترل‌کننده شبه‌گشتاور محاسبه شده به ربات اعمال شده تا تعقیب مسیر را در حضور اغتشاشات ناشی از حرکت پایه ربات تضمین نماید. با توجه به عدم توانایی کاربر در اندازه‌گیری دقیق خطای پنجه از مسیر و نیز خطای سرعت پنجه، مقاومت کنترل‌کننده نسبت به خطاهای مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. توانایی الگوریتم پیشنهادی برای حرکت پنجه بر روی مسیر مطلوب از طریق شبیه‌سازی عددی بررسی و تایید شده است.

کلمات کلیدی: همکاری انسان و ماشین، هدایت، معادله مسیر نامعین، ربات پایه متحرک.

Control of a Manipulator with Elastic Base Moving on Unknown Path

Ali Salehi, Mohammad Jafar Sadigh

Abstract: Cooperation of man and machine is one of the best solutions for moving the end-effector of a manipulator on a specific path with unknown relation. In such a solution deviation from the path is assessed by operator and necessary correcting command is generated by him based on that. This navigation command is, then, used by control algorithm of manipulator to move the end-effector on the desired path. This problem gets more difficult if the base of manipulator is moving on a platform such as a cart or a large manipulator, with inherent flexibility, to achieve a large workspace. In such cases it is impossible to use a master similar to the manipulator itself. This paper presents a fuzzy navigation algorithm for moving end-effector of a manipulator mounted on a moving base. The algorithm which is based on estimation of cross track error of end-effector, generates necessary command which is used by a proposed computed-torque method algorithm to move the end-effector on the desired path. Simulation results shows versatility of the proposed methods for navigation and control of the system even in presence of disturbances due to flexibility of base.

Keywords: Man and Machine Cooperation, Navigation, Unknown Path, Flexible Base Robot.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1391.6.2.4.8]

۱- مقدمه

ربات‌های صلب با پایه متحرک را با توجه به وجود عدم دقت ناشی از حرکت پایه می‌توان یک ربات صلب متصل به پایه الاستیک تقریب زد. یکی از ویژگی‌های اینگونه ربات‌ها، امکان کنترل حرکت پنجه آنها در فضای کار وسیع است. این رباتها در بازرسی، تعمیرات، جوشکاری، رنگ آمیزی و تمیز کردن پلها، کشتی‌ها، مخازن بزرگ، هواپیماها و تاسیسات زیرآبی و هسته‌ای کاربرد دارند. به خاطر وجود انعطاف پذیری این سیستم‌ها کم-عملگراند و به همین دلیل کنترل این ربات‌ها علیرغم دارابودن ویژگیهای منحصربه‌فرد کاربردی و حرکتی نسبت به رباتهای معمولی پیچیدگی‌های بیشتری دارد. با این حال مزایای این رباتها باعث کاربرد روزافزون آنها شده و محققان را برآن داشته‌است تا به بررسی مسایل و حل مشکلات مربوط به استفاده از آنها بپردازند.

مشکل اصلی کنترل موقعیت رباتهای انعطاف‌پذیر غلبه بر ارتعاشات و رفع خطای ناشی از آن است. در مقابل، مزیت ربات‌های صلب با پایه انعطاف‌پذیر این است که می‌توان با استفاده از حرکت پایه، ربات صلب و دقیق را به نقطه دلخواه نزدیک کرد و با کنترل دقیق ربات صلب، بدون احتیاج به جلوگیری از ارتعاشات پایه و غلبه بر آن، خطای بوجود آمده را جبران کرد. کاربردهای ویژه این سیستم‌ها در محیط‌های ناشناخته درطی عملیات پیچیده نظیر جوشکاری یک شکاف با معادله نامعلوم، عرصه‌های جدیدی از تحقیقات را می‌گشاید. در این کاربردها انعطاف‌پذیری پایه و نامعینی معادله مسیر از یک سو و لزوم کنترل سرعت در امتداد مسیر مورد نظر از سوی دیگر بکارگیری ابزار و الگوریتمی کارآمد برای «دیدن» و تعیین خطا را الزامی می‌نماید که یک راه‌حل آن، استفاده از الگوریتم‌های همکاری انسان و ماشین جهت هدایت حرکت ربات است. این راه‌حل مبتنی بر استفاده از متد راهبر-رهرو بوده و عملا انسان با حرکت دادن یک ابزار راهبر ربات اصلی را هدایت می‌نماید.

مهم‌ترین مزیت روش راهبر-رهرو استفاده از تواناییهای انسان در مشاهده و تشخیص مسیر حرکت، درک خطا از مسیر، تحلیل شرایط حرکت، پیش‌بینی حرکت لازم برای جبران خطا و توانایی در تولید دستورات اصلاحی لازم است. هرچند این راه‌حل به‌نوبه خود مشکلات جدیدی را مطرح خواهد کردکه عمدتا ناشی از نوع رفتار فازی انسان در تشخیص خطا و تولید دستورات کنترلی است. همچنین در این روش - همکاری انسان و ماشین- انعطاف‌پذیری پایه مشکلات جدیدی را ایجاد می‌نماید.

از سوی دیگر وسعت فضای کار باعث ناممکن شدن استفاده از یک ابزار راهبر با هندسه مشابه سیستم اصلی می‌گردد و در نتیجه تناظر یک به یک بین فرمان‌های صادره از سوی انسان و فرمان‌های مورد نیاز ربات نیز ناممکن می‌گردد. در اثر این مشکل طراحی ابزار مناسب راهبر که بتواند فرمان‌های موردنظر را از انسان دریافت نموده و همچنین طراحی الگوریتمی که بتواند این دستورات را به دستورات مورد نیاز ربات ترجمه نماید به نحوی که ربات عملیات موردنظر را به صورت مناسب اجرا نماید، یک چالش جدی به شمار می‌آید.

طراحی الگوریتم کنترلی مناسب اولین قدم در تحقیق حاضر به حساب می‌آید. بسیاری از الگوریتم‌های کنترلی تعقیب مسیر دارای دو قسمت کنترل‌کننده مدار پیشرو و حلقه‌بسته هستند. کنترل‌کننده مدار پیشرو براساس مدل دینامیکی ربات و معادله مسیر مطلوب و کنترل‌کننده حلقه‌بسته براساس خطای موقعیت و سرعت طراحی می‌شوند. بنابراین نوع مسیر مطلوب، معلوم بودن یا نبودن معادله آن و قابل اندازه‌گیری بودن یا نبودن خطا بر طراحی کنترل‌کننده تاثیرگذاراند. به همین دلیل کنترل‌کننده باید به‌گونه‌ای طراحی شود که نه تنها توانایی حذف خطاهای ایجادشده در مدل ناشی از نامعین بودن مسیر را داشته باشد، بلکه نسبت به عدم دقت در اندازه‌گیری خطا مقاوم باشد. نامعین بودن معادله مسیر، امکان محاسبه خطا حتی در صورت دانستن مکان و سرعت پنجه را از میان می‌برد و استفاده از توانایی انسان در برآورد خطا جهت رفع این مساله، منشاء عدم دقت مقادیر خطا است.

انتخاب ساختار مکانیکی مناسب راهبر یکی از مسایل مهم در کنترل ربات‌ها با استفاده از روش راهبر-رهرو است. در صورتی که ربات تحت کنترل ساده باشد و تعداد بازوهای آن کم باشد می‌توان راهبری عینا مشابه ربات – از نظر سینماتیکی- ولی با ابعاد کوچک ساخت که انسان با متصل‌کردن آن به دست خود به راحتی بتواند همه اعضای آنرا حرکت دهد و ربات نیز عینا همان حرکات را برای تمام اجزا خود دنبال کند و یک تناظر یک به یک بین حرکت راهبر و رهرو بوجود آورد. ولی اگر ربات پیچیده باشد و تعداد اعضای آن زیاد باشد، راهبر نیز پیچیده می‌شود و انسان با دست خود به سادگی نمی‌تواند همه حرکات موردنظر خود را روی راهبر اعمال کند تا ربات آنها را دنبال کند و این باعث سردرگم‌شدن کاربر خواهدشد. علاوه بر این وجود انعطاف‌پذیری باعث می‌شود که حتی اگر کاربر بتواند اعضای راهبر انعطاف‌پذیر را حرکت دهد، ربات به خاطر کم‌عملگر بودن نمی‌تواند همه حرکات و تغییرشکل‌های اعمالی از طرف کاربر را دنبال کند و تناظر یک به یکی بین حرکت راهبر و رهرو بوجود نخواهد آمد که این عامل خود باعث ایجاد خطاهای جدید می‌شود. بنابراین در رباتهای پیچیده و انعطاف‌پذیر باید از راهبر پنجه استفاده‌کرد. راهبر پنجه فقط حرکت پنجه را - مستقل از حرکت بقیه اجزاء سیستم - تعیین می‌کند و چگونگی حرکت بازوها برای حصول حرکت تعیین شده پنجه، بوسیله الگوریتم‌های کمکی نظیر الگوریتم‌های تقسیم‌کار به طرز مناسب تعیین می‌شود.

در زمینه کنترل ربات‌های با پایه انعطاف‌پذیر و همچنین سیستمهای کم-عملگر پژوهشهای گسترده‌ای انجام شده است. در برخی از این تحقیقات روش‌هایی برای کنترل حرکت پنجه ربات براساس اندازه‌گیری ارتعاشات پایه و غلبه بر آنها ارایه شده‌اند [۵-۱]. کنترل امپدانس [۶، ۷] و طراحی براساس مدل سختی [۸] نیز بررسی شده‌اند. Hishinuma و همکارانش به صورت عملی یک ربات افزونه روی یک پایه انعطاف‌پذیر

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1391.6.2.4.8]

را از دور کنترل کردند [۹]. صدیق و Misra روشی را برای استخراج معادلات حرکت حداقل-مرتبه سیستم‌های دینامیکی تحت قیدهای مجازی ارایه کردند [۱۰]. این روش بعدا توسط صدیق و زمانی‌فکری جهت طراحی کنترل‌کننده مدار باز بر اساس مفهوم حرکت مقید با اعمال قیود مصنوعی به سیستم برای رباتهای کم-عملگر نظیر رباتهای پایه متحرک و رباتهای الاستیک به کار گرفته شد [۱۱]. این کنترل‌کننده توسط صدیق و صالحی با افزودن یک حلقه خارجی برای جبران خطای پنجه از مسیر، بسط یافته و برای کنترل میکرو-ماکرو ربات‌ها استفاده شد [۱۲]. آنها همچنین روش راهبر-رهرو را برای کنترل میکرو-ماکرو ربات‌ها بکار بردند که در آن ماکرو بوسیله راهبر حرکت می‌کند و میکرو به گونه‌ای کنترل می‌شود که خطای حرکت پنجه حذف شود [۱۳].

امروزه سیستم‌های تله‌اپریشن دوسویه به ابزاری بسیار موثر برای انجام کارهای پیچیده در محیط‌های دور از دسترس و خطرناک و نیز انجام عمل جراحی بدل شده‌اند [۱۴] و تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه [۱۵-۲۵] و نیز استفاده از روش راهبر-رهرو و مسایل مرتبط با آن صورت گرفته است [۲۶-۳۰]. اکثر تحقیقات در زمینه وجود تاخیر زمانی ثابت یا متغیر و معلوم یا نامعین در کانال ارتباطی و اثرات آن بر کارایی و پایداری سیستم‌های تله‌اپریشن انجام شده است [۳۱-۳۷].

در عمده تحقیقات انجام‌شده در زمینه تله‌اپریشن و کنترل به روش راهبر-رهرو، از راهبر بازو استفاده شده است و به مسایلی چون تاخیر زمانی سیستم ارتباطی، گم‌شدن اطلاعات و پایداری سیستم پرداخته‌اند [۳۸] ولی مساله رهرو انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرارنگرفته است. همچنین تحقیقات قبلی نشان می‌دهدکه استفاده از روش راهبر- رهرو برای کنترل رباتهای پیچیده در ماموریت‌های پیچیده نیازمند طراحی سخت‌افزار خاص و روش‌های کنترلی متناسب با آنهاست. تفاوت اصلی تحقیق حاضر با تحقیقات قبلی در این زمینه را می‌توان در استفاده از راهبر پنجه دانست که ضمن ایجاد سهولت در کاربری و رفع محدودیت فضای کار و حل مشکل پیچیدگی ربات راهبر، مشکلات جدی را در زمینه الگوریتم هدایت و الگوریتم کنترلی لازم برای هدایت دقیق پنجه در عین قبول حرکت نادقیق پایه بوجود می‌آورد. حل این مسایل محور اصلی تحقیق حاضر را تشکیل می‌دهد.

در مقاله حاضر در ادامه تحقیقات قبلی با بسط روش ارایه شده در مراجع [۱۲،۱۳]، برای کنترل ربات‌های با پایه انعطاف‌پذیر روشی مبتنی بر اعمال معادلات مسیر مطلوب به عنوان قیدهای مصنوعی حرکت ارایه و تاثیر نامعلوم بودن معادله مسیر مطلوب و عدم امکان محاسبه خطا از مسیر مطلوب بر کارایی آن بررسی شده است. همچنین این تحقیق با ارایه یک روش هدایت پنجه توسط کاربر امکان تعیین خطای پنجه از مسیر به‌عنوان ورودی الگوریتم کنترل را فراهم نموده است.

کنترل‌کننده پیشنهادی در واقع کنترل‌کننده‌ای شبه CTM است با این تفاوت که خطای مورد استفاده در حلقه بسته آن خطای پنجه از مسیر مطلوب در فضای کار است در حالیکه در روش‌های مشابه از خطای متغیرهای مفاصل استفاده شده است. باتوجه به اینکه برآورد دقیق خطای سرعت نسبت به خطای موقعیت برای انسان مشکل‌تر است، پایداری سیستم در حالتی که فقط خطای موقعیت با دقت قابل قبول و علامت خطای سرعت به درستی برآورد می‌شود بررسی شده و شروط لازم برای پایداری معادله خطا مشخص شده است. صحت و کارآیی روش پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی عددی نیز مورد بررسی قرارگرفته است.

در این مقاله ابتدا دینامیک مساله و چگونگی دسته‌بندی معادلات آن بررسی و پس از آن روش کنترلی پیشنهادی و روابط مربوطه ارایه شده اند. سپس اثر نامعین بودن معادله مسیر مطلوب بر معادلات کنترل‌کننده و دینامیک خطا تبیین و در ادامه نیز پایداری سیستم با وجود خطا در برآورد خطای سرعت حرکت پنجه اثبات شده است. پس از آن الگوریتم هدایت و چگونگی مدل‌سازی فازی کاربر-راهبر توضیح داده شده و در انتها نیز نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری آمده است.

۲- دینامیک

رباتی با پایه انعطاف‌پذیر دارای n درجه آزادی و m عملگر $(m<n)$ در نظر گرفته‌شده است. معادلات حرکت سیستم با استفاده از روش لاگرانژ به‌صورت زیر بدست می‌آید

$$\mathbf{M}_{n\times n}(\mathbf{q},t)\ddot{\mathbf{q}}_n+\mathbf{h}_n(\dot{\mathbf{q}},\mathbf{q},t)=\mathbf{B}_{n\times m}(\mathbf{q},t)\boldsymbol{\tau}_m \qquad (۱)$$

که در آن $\mathbf{M}\in\Re^{n\times n}$ ماتریس ضرایب جرمی، $\mathbf{h}\in\Re^n$ بردار بخش غیرخطی دینامیک شامل اثرات کریولیس و گرانش، $\mathbf{B}\in\Re^{n\times m}$ماتریس ضرایب عملگرها، $\boldsymbol{\tau}\in\Re^m$ بردار گشتاور عملگرها، $\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}\in\Re^n$ متغیرهای حالت سیستم و t زمان هستند. اگر مسیر مطلوب حرکت پنجه به‌صورت p معادله

$$g_i(\mathbf{q},t)=0 \qquad i=1,2,...,p\ ,\ p<m \qquad (۲)$$

نوشته شود، می‌توان سیستم را تحت p قید مصنوعی حرکت به‌صورت معادله (۲) درنظر گرفت. برآورده شدن این قیدها به معنی حرکت پنجه روی مسیر مطلوب بوده و برای این کار به p عملگر نیاز است. بدون ایجاد محدودیت در کلیت روش، p عملگر آخر بردار گشتاور $\boldsymbol{\tau}$ به‌عنوان گشتاورهای قیدی $\mathbf{C}$ انتخاب می‌شوند و وظیفه برآورده کردن قیدها را بر عهده دارند. بنابراین می‌توان معادلات حرکت را به‌صورت زیر تقسیم کرد

$$\begin{bmatrix}\mathbf{M}_1\\ \mathbf{M}_2\end{bmatrix}\ddot{\mathbf{q}}+\begin{bmatrix}\mathbf{h}_1\\ \mathbf{h}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathbf{B}_{11} & \mathbf{B}_{12}\\ \mathbf{B}_{21} & \mathbf{B}_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{U}\\ \mathbf{C}\end{bmatrix} \qquad (۳)$$

که در آن $\mathbf{M}_1\in\Re^{(n-p)\times n}$، $\mathbf{M}_2\in\Re^{p\times n}$، $\mathbf{h}_1\in\Re^{n-p}$، $\mathbf{h}_2\in\Re^p$، $\mathbf{B}_{11}\in\Re^{(n-p)\times(m-p)}$، $\mathbf{B}_{12}\in\Re^{(n-p)\times p}$،

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1391.6.2.4.8]

$\mathbf{B}_{21} \in \Re^{p\times(m-p)}$، $\mathbf{B}_{22} \in \Re^{p\times p}$، $\mathbf{U} \in \Re^{m-p}$ و $\mathbf{C} \in \Re^{p}$. با پیش ضرب $[\mathbf{I} \quad -\mathbf{B}_{12}(\mathbf{B}_{22})^{-1}]$ در معادله (۳)، این معادله به دو دسته معادله زیر تقسیم می‌شود [۱۲]

$$\overline{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}} + \overline{\mathbf{h}} = \overline{\mathbf{B}}\mathbf{U} \qquad (۴)$$

$$\mathbf{C} = (\mathbf{B}_{22})^{-1}(\mathbf{M}_2\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}_2 - \mathbf{B}_{21}\mathbf{U}) \qquad (۵)$$

که در آن

$$\begin{aligned} \overline{\mathbf{M}}_{(n-p)\times n} &= \mathbf{M}_1 - \mathbf{B}_{12}(\mathbf{B}_{22})^{-1}\mathbf{M}_2 \\ \overline{\mathbf{h}}_{n-p} &= \mathbf{h}_1 - \mathbf{B}_{12}(\mathbf{B}_{22})^{-1}\mathbf{h}_2 \\ \overline{\mathbf{B}}_{(n-p)\times(m-p)} &= \mathbf{B}_{11} - \mathbf{B}_{12}(\mathbf{B}_{22})^{-1}\mathbf{B}_{21} \end{aligned} \qquad (۶)$$

رابطه (۴) معادلات حداقل مرتبه سیستم مقید است. این معادله به‌همراه مشتق دوم معادله قیدها، رابطه (۲)، n معادله بدست می‌دهد که مستقل از گشتاورهای $\mathbf{U}$ و $\mathbf{C}$ بوده و همواره قیدها را برآورده می‌کند. از معادله (۵) نیز می‌توان گشتاورهای قیدی لازم برای اعمال قیدها را محاسبه کرد.

۳- کنترل

اگر ربات به اندازه کافی درجه آزادی برای اعمال قیدها داشته باشد، مقدار گشتاور $\mathbf{U}$ می‌تواند بر اساس هر روشی – مثلا کنترل‌کننده PD – که باعث حرکت پایه در نزدیکی مسیر مطلوب شود، تعیین گردد. البته این روش باعث کنترل دقیق حرکت پایه ربات نخواهد شد ولی با اعمال گشتاورهای $\mathbf{C}$ از رابطه (۵)، حتما قیدها برآورده شده و پنجه ربات روی مسیر مطلوب حرکت می‌کند [۱۲]. برای محاسبه $\mathbf{C}$ ابتدا مشتق دوم معادلات قید یعنی رابطه (۲) به صورت

$$\mathbf{A}(\mathbf{q},t)_{p\times n}\ddot{\mathbf{q}}_n + \dot{\mathbf{A}}(\mathbf{q},t)_{p\times n}\dot{\mathbf{q}}_n = \dot{\mathbf{E}}(\mathbf{q},t)_p \qquad (۷)$$

بدست می‌آید که در آن $\mathbf{A} \in \Re^{p\times n}$ ماتریس ژاکوبین سیستم و $\dot{\mathbf{E}} \in \Re^{p}$ بردار شتاب حرکت پنجه روی مسیر مطلوب است. با افزودن معادله (۷) به معادله (۴) دسته معادلات زیر را بدست می‌دهد

$$\begin{cases} \overline{\mathbf{M}}_{(n-p)\times n}\ddot{\mathbf{q}}_n + \overline{\mathbf{h}}_{n-p} = \overline{\mathbf{B}}_{(n-p)\times(m-p)}\mathbf{U}_{m-p} \\ \mathbf{A}(\mathbf{q},t)_{p\times n}\ddot{\mathbf{q}}_n + \dot{\mathbf{A}}(\mathbf{q},t)_{p\times n}\dot{\mathbf{q}}_n = \dot{\mathbf{E}}(\mathbf{q},t)_p \end{cases} \qquad (۸)$$

که می‌تواند به فرم بسته زیر بازنویسی شود

$$\widetilde{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}} + \widetilde{\mathbf{h}} = \widetilde{\mathbf{B}}\mathbf{U} \qquad (۹)$$

که در آن

$$\widetilde{\mathbf{M}}_{n\times n} = \begin{bmatrix} \overline{\mathbf{M}} \\ \mathbf{A} \end{bmatrix}, \widetilde{\mathbf{h}}_n = \begin{bmatrix} \overline{\mathbf{h}} \\ \dot{\mathbf{A}}\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{E}} \end{bmatrix}, \widetilde{\mathbf{B}}_{n\times(m-p)} = \begin{bmatrix} \overline{\mathbf{B}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \qquad (۱۰)$$

با محاسبه $\ddot{\mathbf{q}}$ از رابطه (۹) و جایگذاری آن در رابطه (۵)، مقدار $\mathbf{C}$ به صورت زیر بدست می‌آید

$$\mathbf{C} = (\mathbf{B}_{22})^{-1}(\mathbf{M}_2\widetilde{\mathbf{M}}^{-1}(\widetilde{\mathbf{B}}\mathbf{U} - \widetilde{\mathbf{h}}) + \mathbf{h}_2 - \mathbf{B}_{21}\mathbf{U}) \qquad (۱۱)$$

اما اگر به هر دلیل خطایی در تعقیب مسیر بوجود آید این کنترل‌کننده مدارباز قادر به جبران آن نیست و باید بازخورد مناسبی به این کنترل‌کننده اضافه شود و با تنظیم گشتاورهای قیدی $\mathbf{C}$، خطاها جبران و حذف شوند. برای این منظور، با لحاظ کردن خطا از مسیر و بازنویسی رابطه (۲)، معادله

$$\mathbf{g}(\mathbf{q},t) = \boldsymbol{\delta}(t) \qquad (۱۲)$$

حاصل می‌شود که در آن $\boldsymbol{\delta}$ بردار خطا از مسیر پنجه ربات است. در شرایطی که معادله مسیر مطلوب معلوم باشد و حرکت پنجه با استفاده از سینماتیک ربات و با اندازه‌گیری متغیرهای مفاصل تعیین شود، مقدار بردار خطای حرکت پنجه و نرخ تغییرات آن قابل محاسبه است. در حالتی که معادله مسیر مطلوب نامعین و امکان محاسبه وجود نداشته باشد، اندازه‌گیری این خطا تنها با استفاده از روش های بینایی و پردازش تصویر میسر می‌گردد. این روش می‌تواند بسیار گران و به لحاظ عملیاتی پیچیده باشد. از سوی دیگر، انسان با نگاه کردن به حرکت ربات و فضای کار، توانایی برآورد کردن این کمیت ها را دارد که رویکرد تحقیق حاضر استفاده از این قابلیت جهت تعیین خطا است. به هر حال با فرض در دسترس بودن بردار خطا، مشتق دوم رابطه (۱۲) برابراست با

$$\mathbf{A}_{p\times n}(\mathbf{q},t)\ddot{\mathbf{q}}_n + \dot{\mathbf{A}}_{p\times n}(\mathbf{q},t)\dot{\mathbf{q}}_n = \dot{\mathbf{E}}_p(\mathbf{q},t) + \ddot{\boldsymbol{\delta}}_p(t) \qquad (۱۳)$$

که با ترکیب معادلات (۴) و (۱۳) بدست می‌آید

$$\widetilde{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}} + \widetilde{\mathbf{h}} = \widetilde{\mathbf{B}}\mathbf{U} + \mathbf{D}\ddot{\boldsymbol{\delta}} \qquad (۱۴)$$

که در آن

$$\begin{aligned} \widetilde{\mathbf{M}}_{n\times n} &= \begin{bmatrix} \overline{\mathbf{M}} \\ \mathbf{A} \end{bmatrix} \quad , \quad \widetilde{\mathbf{h}}_n = \begin{bmatrix} \overline{\mathbf{h}} \\ \dot{\mathbf{A}}\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{E}} \end{bmatrix} \\ \widetilde{\mathbf{B}}_{n\times(n-p)} &= \begin{bmatrix} \overline{\mathbf{B}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{D}_{n\times p} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(n-p)\times p} \\ \mathbf{I}_{p\times p} \end{bmatrix} \end{aligned} \qquad (۱۵)$$

است. با محاسبه $\ddot{\mathbf{q}}$ از رابطه (۱۴) و جایگذاری آن در رابطه (۴) بدست می‌آید

$$\mathbf{M}'\ddot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{h}' = \mathbf{B}_{22}\mathbf{C} \qquad (۱۶)$$

که در آن

$$\begin{aligned} \mathbf{M}' &= \mathbf{M}_2\widetilde{\mathbf{M}}^{-1}\mathbf{D} \\ \mathbf{h}' &= \mathbf{M}_2\widetilde{\mathbf{M}}^{-1}(\widetilde{\mathbf{B}}\mathbf{U} - \widetilde{\mathbf{h}}) + \mathbf{h}_2 - \mathbf{B}_{21}\mathbf{U} \end{aligned} \qquad (۱۷)$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1391.6.2.4.8]

است. این معادله دیفرانسیل نشان دهنده رفتار خطای پنجه از مسیر است. با انتخاب گشتاورهای قیدی به‌صورت

$$\mathbf{C}=\mathbf{B}_{22}^{-1}(-\mathbf{M}'(\mathbf{k}_v\dot{\boldsymbol{\delta}}+\mathbf{k}_p\boldsymbol{\delta})+\mathbf{h}') \qquad (۱۸)$$

و جایگذاری آن در رابطه (۱۶)، معادله زیر بدست می‌آید

$$\ddot{\boldsymbol{\delta}}+\mathbf{k}_v\dot{\boldsymbol{\delta}}+\mathbf{k}_p\boldsymbol{\delta}=\mathbf{0} \qquad (۱۹)$$

که همگرایی مجانبی خطا به صفر را نشان می‌دهد.

۴- معادله مسیر نامشخص

حال اگر معادله مسیر معلوم نباشد و متغیر تخمینی $\hat{\dot{\mathbf{E}}}$ به جای $\dot{\mathbf{E}}$ قرار گیرد، رابطه (۱۸) به صورت زیر در می‌آید

$$\begin{aligned}\mathbf{C}=\mathbf{B}_{22}^{-1}\big(&\mathbf{M}_2\mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{U}+\mathbf{h}_2-\mathbf{B}_{21}\mathbf{U})\\&-\mathbf{M}_2\tilde{\mathbf{M}}^{-1}\begin{bmatrix}\bar{\mathbf{h}}\\ \dot{\mathbf{A}}\dot{\mathbf{q}}+\hat{\dot{\mathbf{E}}}\end{bmatrix}-\mathbf{M}'\big(\mathbf{K}_v\dot{\boldsymbol{\delta}}+\mathbf{K}_p\boldsymbol{\delta}\big)\Big)\end{aligned} \qquad (۲۰)$$

که با قرار دادن آن در رابطه (۱۶)، بدست می‌آید

$$\ddot{\boldsymbol{\delta}}+\mathbf{K}_v\dot{\boldsymbol{\delta}}+\mathbf{K}_p\boldsymbol{\delta}=\mathbf{M}'^{-1}\mathbf{M}_2\tilde{\mathbf{M}}^{-1}\begin{bmatrix}\mathbf{0}\\ \dot{\mathbf{E}}-\hat{\dot{\mathbf{E}}}\end{bmatrix} \qquad (۲۱)$$

در این معادله جمله سمت راست به عنوان یک نیروی محرک عمل می‌کند، اما چون $\dot{\mathbf{E}}$ در انتهای مسیر صفر می‌شود (حالت سکون)، کافی است $\hat{\dot{\mathbf{E}}}$ هم به گونه‌ای انتخاب شود که در انتها صفر شود تا نیروی محرک صفر شده و متعاقبا خطا به صفر میل کند. البته مشخص است که با انتخاب $\hat{\dot{\mathbf{E}}}=\mathbf{0}$ هم همین نتیجه حاصل می‌شود. البته در طول حرکت پنجه بر روی مسیر به خاطر صفر نبودن $\dot{\mathbf{E}}-\hat{\dot{\mathbf{E}}}$، مقداری خطا در تعقیب مسیر ایجاد می‌شود ولی به دلیل شتاب کم حرکت جهت جلوگیری از تحریک مودهای انعطاف‌پذیری سیستم، این مقدار اختلاف کوچک و محدود مانده و بنابراین خطا نیز محدود باقی می‌ماند.

۵- عدم دقت در اندازه‌گیری خطای سرعت

با داشتن مقادیر دقیق خطای موقعیت و سرعت پنجه معادله خطا به صورت رابطه (۱۹) بدست می‌آید، اما اگر فرض شود در اندازه‌گیری خطای سرعت پنجه دقت کافی وجود ندارد و مقدار این خطا دقیق اندازه‌گیری نمی‌شود و فقط جهت آن همیشه درست است یعنی به جای $\dot{\boldsymbol{\delta}}$ مقدار $\hat{\dot{\boldsymbol{\delta}}}$ اندازه‌گیری شود که به صورت

$$\hat{\dot{\boldsymbol{\delta}}}=\mathbf{f}(t)\dot{\boldsymbol{\delta}},\quad \begin{cases} f_{ij}(t)=0 \ \ if\ i\neq j\\ 0<f_{ii}(t)\le F_{ii}\end{cases} \qquad (۲۲)$$

تعریف می‌شود و در آن هر $f_{ii}(t)$ یک تابع مثبت نامعلوم و تابع زمان است که حد بالای محدودی نیز دارد. با توجه به اینکه انسان توانایی خوبی در تشخیص جهت حرکت دارد، این فرض برای سیستم‌های کنترل راهبر-رهرو معقول و قابل دست‌یابی است. حال اگر از این فیدبک خطای سرعت استفاده شود، قانون کنترل به صورت زیر در می‌آید

$$\mathbf{C}=\mathbf{B}_{22}^{-1}\big(\mathbf{h}'+\mathbf{M}'\big(\mathbf{K}_v\mathbf{f}(t)\dot{\boldsymbol{\delta}}+\mathbf{K}_p\boldsymbol{\delta}\big)\big) \qquad (۲۳)$$

که با قرار دادن آن در رابطه (۱۶)، بدست می‌آید

$$\ddot{\boldsymbol{\delta}}+\mathbf{K}_v\mathbf{f}(t)\dot{\boldsymbol{\delta}}+\mathbf{K}_p\boldsymbol{\delta}=\mathbf{0} \qquad (۲۴)$$

که با فرض قطری بودن $\mathbf{K}_p$ و $\mathbf{K}_v$، می‌توان آن را به صورت زیر نوشت

$$\ddot{\delta}_i+K_{v_i}f_{ii}(t)\dot{\delta}_i+K_{p_i}\delta_i=0 \quad i=1,\ldots,p \qquad (۲۵)$$

و با صرف نظر کردن از ذکر اندیس i جهت ساده‌نویسی، هر یک از این p معادله به شکل زیر در می‌آید

$$\ddot{\delta}+K_v f(t)\dot{\delta}+K_p\delta=0 \qquad (۲۶)$$

جهت بررسی پایداری سیستم و همگرایی مجانبی آن با استفاده از تئوری لیاپانوف، تابع لیاپانوفی به صورت زیر فرض می‌شود

$$\begin{aligned}V&=\frac{1}{2}\left(\dot{\delta}+\alpha\delta\right)^2+\frac{1}{2}b(t)\delta^2\\ b(t)&=K_p-\alpha^2+\alpha K_v f(t)\end{aligned} \qquad (۲۷)$$

که با فرض

$$0<\alpha<\sqrt{K_p} \qquad (۲۸)$$

تابع لیاپانوف V مثبت معین می‌شود. البته باتوجه به رفتار انسان، در شرایط معمولی برآورد کاربر از خطا پیوسته و هموار است و پس از آموزش و تمرین کافی، راهبر را بصورت پیوسته و نرم - همانند هنگام رانندگی خودرو- حرکت خواهد داد. نتیجتا تابع f پیوسته بوده و بنابراین شرط پیوستگی تابع لیاپانوف V برقرار است. مشتق این تابع برابر است با

$$\dot{V}=\left[\alpha-K_v f(t)\right]\dot{\delta}^2+\frac{\alpha}{2}\left[K_v\dot{f}(t)-2K_p\right]\delta^2 \qquad (۲۹)$$

واضح است که با فرض دو شرط زیر، $\dot{V}$ منفی معین خواهد شد

$$\begin{aligned}\frac{\alpha}{K_v}&<f(t)\\ \dot{f}(t)&<\frac{2K_p}{K_v}\end{aligned} \qquad (۳۰)$$

مجددا باتوجه به چگونگی رفتار انسان، مشخص است که $\dot{f}$ نیز هموار و پیوسته خواهد بود و با توجه به اینکه حداکثر سرعت پاسخ کاربر و اعمال تغییرات بوسیله راهبر به توانایی‌های انسان محدود است، بنابراین

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1391.6.2.4.8]

$\dot{f}$ نیز محدود است. نتیجتا جهت ارضاء شروط (۲۸) و (۳۰) باید K_p به اندازه کافی بزرگ، α تا حد ممکن کوچک و K_v نیز به تناسب شرایط حرکتی و جهت تنظیم و تعدیل کارایی و پایداری سیستم، انتخاب شوند.

از طرف دیگر چون $f \le F$ و حد بالا دارد، تابع لیاپانوف انتخابی از تابع مستقل از زمان مثبت معینی به شکل

$$V = \frac{1}{2}\left(\dot{\delta} + \alpha\delta\right)^2 + \frac{1}{2}b(t)\delta^2 \le \frac{1}{2}\left(\dot{\delta} + \alpha\delta\right)^2 + \frac{1}{2}\left(K_p - \alpha^2 + \alpha K_v F\right)\delta^2 \quad (۳۱)$$

کوچک‌تر است و نتیجتا تابع لیاپانوف مفروض کاهنده (Decrescent) است. بنابراین با این شرایط مبداء به صورت یکنواخت پایدار مجانبی است و خطا به صفر میل می‌کند [۳۹]. البته می‌توان نشان داد که شرط دارا بودن حد بالا برای f ضروری نیست و با این وجود سیستم پایدار مجانبی خواهد بود [۴۰].

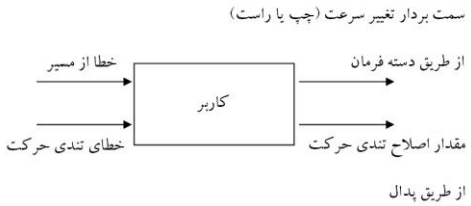
۶- الگوریتم هدایت

ورودی روش کنترلی تبیین شده در حل مساله اول ترکیبی از خطای موقعیت و سرعت پنجه در فضای کار است. با توجه به معلوم‌نبودن معادله مسیر و مشکل‌بودن اندازه‌گیری این خطاها، نیاز به راهکاری برای حذف این اندازه‌گیری‌ها و جایگزینی آن با روشی است که اساس آن بر استفاده از توانایی انسان در تشخیص خطای حرکت پنجه و تصحیح آن باشد. با توجه به ماهیت کنترل‌کننده پیشنهادی و لزوم استفاده از روش راهبر-رهرو، راه‌حل پیشنهادی ارایه الگوریتم هدایت است. الگوریتم هدایت باید به‌گونه‌ای طراحی شود که خروجی آن تابعی از میزان خطای موقعیت و سرعت پنجه در امتداد مسیر باشد. همچنین این الگوریتم باید ورودی‌های لازم برای کنترل‌کننده را تولید کند.

انسان با نگاه کردن به پنجه ربات و مسیر، می‌تواند فاصله پنجه از مسیر مطلوب و همچنین خطای تندی حرکت پنجه را تشخیص دهد اما نمی‌تواند مقدار همه مولفه‌های خطا را تعیین کند. بنابراین الگوریتم هدایت باید براساس تخمین کاربر از دو کمیت فاصله پنجه از مسیر و خطای تندی حرکت پنجه توسعه یابد و ترکیبی از مقادیر خطا (و یا تخمین آنها) به عنوان خروجی الگوریتم محاسبه گردد. البته حتی اگر انسان قادر به تشخیص هر چهار مولفه خطای حرکت پنجه باشد، تولید همزمان چهار ورودی جهت تصحیح این خطاها از طریق ابزار راهبر به سادگی امکان‌پذیر نبوده و باعث سردرگمی کاربر و ناکارآیی روش می‌شود. علاوه بر این ابزار راهبری با چهار ورودی به مراتب پیچیده‌تر از راهبری است که دو ورودی دارد و نتیجتا کارکردن با آن نیز به مراتب مشکل‌تر است.

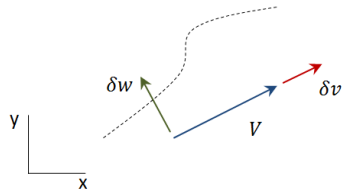
اساس الگوریتم هدایت توجه به این واقعیت است که با تغییر دادن مناسب جهت و اندازه بردار سرعت یک ذره می‌توان مسیر طی شده توسط ذره و تندی حرکت را کنترل کرد. بنابراین بر همین اساس می‌توان خطای حرکت پنجه را نیز اصلاح کرده و آنرا روی مسیر مطلوب و با تندی مطلوب حرکت داد. در این روش به جای چهار ورودی (دو مولفه خطای موقعیت و دو مولفه خطای سرعت) فقط دو ورودی یعنی جهت و اندازه یک بردار برای تصحیح حرکت پنجه توسط کاربر و از طریق ابزار راهبر تولید می‌شود. کاربر برای اصلاح جهت حرکت می‌تواند زاویه اصلاح را توسط راهبر تولید کند و تندی حرکت را نیز بوسیله یک پدال تنظیم کند. این الگوریتم به جهاتی شبیه روشی است که انسان در رانندگی خودرو استفاده می‌کند بدین صورت که جهت حرکت را با چرخاندن فرمان و تندی حرکت را با فشردن پدال تنظیم می‌کند. در اینجا نیز کاربر میزان خروج از مسیر را توسط اهرم دستی و میزان سرعت در امتداد مسیر را توسط پدال کنترل می‌کند.

الگوریتم هدایت به این صورت است که کاربر با توجه به خطای پنجه از مسیر و سمت انحراف آن (چپ یا راست مسیر) و مقدار خطای اندازه سرعت، جهت بردار تغییر سرعت لازم در جهت عمود بر سرعت فعلی به منظور جبران خطای موقعیت را از طریق راهبر و بوسیله پدال مقدار اصلاح تندی حرکت را تولید می‌کند. بنابراین در اینجا ورودی‌ها خطای پنجه از مسیر و خطای تندی حرکت هستند که کاربر با توجه به آنها دو خروجی جهت بردار تغییر سرعت (چپ یا راست بردار سرعت و عمود بر آن) و مقدار اصلاح تندی حرکت را به ترتیب توسط دسته‌فرمان و پدال تولید می‌کند (شکل (۱)).



شکل ۱. نمودار ورودی‌ها و خروجی‌های الگوریتم هدایت

این خروجی‌ها در واقع مقدار اصلاح سرعت در امتداد بردار سرعت و مقدار اصلاح سرعت در امتداد عمود بر مسیر حرکت را معین می‌کند. با توجه به اینکه امتداد سرعت پنجه براساس اندازه‌گیری مختصات تعمیم‌یافته سیستم و با استفاده از سینماتیک مستقیم قابل محاسبه است بردار تغییر سرعت را می‌توان به مولفه‌های خود در جهت x و y تجزیه نمود. هرچند امتداد عمود بر مسیر نامعلوم است و لذا نمی‌توان مولفه‌های بردار اصلاح سرعت در جهت عمود بر مسیر را به مولفه‌های آن در جهت x و y تجزیه کرد. برای رفع این مشکل فرض می‌شود که امتداد بردار سرعت موازی مسیر مطلوب باشد در این صورت با توجه به شکل (۲)، رابطه (۳۲) بدست می‌آید.



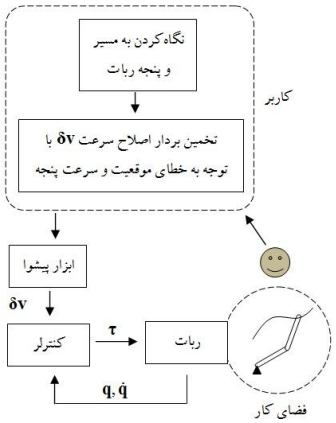
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1391.6.2.4.8]

شکل ۲. بردار سرعت و بردارهای اصلاح سرعت

$$\begin{cases}\delta x = \delta v \cdot n_1 + \delta w \cdot n_2 \\ \delta y = \delta v \cdot n_2 + \delta w \cdot n_1\end{cases} \quad (۳۲)$$

که در آن n_1 و n_2 کسینوس هادی‌های بردار سرعت در دستگاه x,y و δv و δw مقدار بردار اصلاح سرعت تعیین شده توسط پدال و اهرم دستی هستند. مزیت این روش در سهولت یادگیری و انجام آن به علت شباهت به رانندگی است هنگام هدایت پنجه با این الگوریتم تا زمانی که مسیر به‌گونه‌ای است که پنجه از کاربر دور می‌شود سمت چپ و راست مسیر معنی درستی دارد. اما زمانی که در طی مسیر پنجه به سمت کاربر بیاید (و یا به طرفین حرکت کند)، تشخیص سمت چپ و راست مسیر مشکل شده و حتی بالعکس می‌شود. این مساله در رانندگی اتومبیل با دنده عقب نیز اتفاق می‌افتد و رانندگان مبتدی عموما برعکس فرمان می‌دهند. این مشکل را می‌توان با استفاده از سیستم‌های تصویربرداری و پردازش تصویر برطرف نمود. به این صورت که با استفاده از روش‌های پردازش تصویر همیشه قسمتی از مسیر که نزدیک پنجه قرار دارد را در جهتی خاص – مثلا جهت عمودی - روی صفحه نمایش برای کاربر نشان داد تا کاربر به راحتی بتواند سمت چپ و راست مسیر را که در الگوریتم هدایت لازم است (مستقل از جهت واقعی حرکت پنجه)، تشخیص دهد و حرکت پنجه را با استفاده از راهبر کنترل کند. با توجه به اینکه مسیر مطلوب ممکن است پیچیده و طولانی باشد و یا نور و شرایط محیط کار برای انسان مناسب نباشد، مزیت دیگر استفاده از ابزارهای بینایی و پردازش تصویر، امکان بزرگ‌نمایی پنجه و مسیر نزدیک آن و نیز تنظیم و فیلترکردن نور جهت دیده‌شدن بهتر مسیر و حرکت و خطای پنجه است. مثلا در کاربرد جوشکاری با حذف پرتو شدید ناشی از جوشکاری، محل جوشکاری و جوش بسیار بهتر دیده می‌شود و پرتوها نیز برای کاربر ضرری نخواهد داشت.

بطور کلی در این روش هدایت کاربر براساس مشاهده و تخمین فاصله پنجه از مسیر، جهت سرعت پنجه و خطای تندی حرکت آن، جهت و مقدار تغییرات لازم جهت تصحیح حرکت را برآورد کرده و آنها را از طریق راهبر به‌عنوان ورودی به کنترل‌کننده می‌دهد. با توجه به ماهیت تفکر و منطق انسان، کاربر نمی تواند خروجی‌های دقیق و عددی برای خطاها تولید کند و فقط مقادیر زبانی و خروجی‌های فازی تولید می کند. مثلا اگر پنجه از مسیر منحرف شده باشد، کاربر با نگاه کردن به پنجه و مسیر، برای خطای موقعیت و جهت آن خروجی‌های فازی نظیر انحراف کم به سمت چپ و یا انحراف زیاد به سمت راست را تولید می کند.البته انسان با تمرین و یادگیری به طور ناخودآگاه، این مقادیر فازی را با استفاده از ابزار راهبر به مقادیر عددی تبدیل می کند. در این الگوریتم باید مقدار و جهت سرعت فعلی معلوم باشد تا با استفاده از ورودی‌های تولید شده توسط کاربر مولفه‌های خطا محاسبه گردد.بلوک دیاگرام روش کنترل و هدایت حرکت پنجه ربات در شکل (۳) نشان داده شده است. ابتدا کاربر با نگاه‌کردن به فضای کار و چگونگی حرکت پنجه ربات و میزان خطای آن از مسیر مطلوب، بر اساس الگوریتم هدایت کمیت‌های لازم برای اصلاح جهت و اندازه حرکت پنجه را از طریق راهبر تولید می‌کند. سپس این کمیت‌ها به مقادیر خطا تبدیل شده و به‌عنوان ورودی به کنترل‌کننده داده می‌شوند. کنترل‌کننده نیز با توجه به مقادیر خطا و وضعیت سیستم، گشتاورهای لازم برای جبران خطاها را تعیین کرده و به ربات اعمال می‌کند. این چرخه مجددا توسط کاربر با توجه به خطاهای جدید تکرار می‌شود.



شکل ۳. بلوک دیاگرام روش کنترل و هدایت حرکت پنجه ربات

برای شبیه‌سازی و بررسی کارایی الگوریتم هدایت باید کل سیستم مدل شود و بنابراین به مدل رفتار کاربر–راهبر نیاز است. مناسب‌ترین ابزار برای مدل‌سازی رفتار انسان، منطق و روش فازی است. قسمت اول مدل‌سازی کاربر–راهبر مربوط به زمانی است که انسان به حرکت پنجه و مسیر نگاه می‌کند و میزان انحراف پنجه از مسیر و خطای تندی حرکت آن را بر اساس متغییرهای زبانی تخمین زده و برآورد می‌کند. این قسمت را می‌توان با یک فازی‌ساز مدل کرد که مقادیر خطای موقعیت و سرعت را به عنوان ورودی می‌گیرد و برآوردهای خطا را به عنوان خروجی براساس متغییرهای زبانی تولید می‌کند.

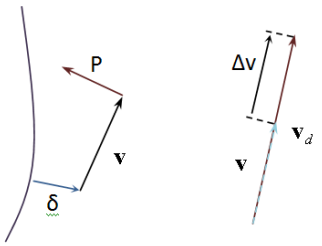
قسمت بعد مدل‌سازی کاربر مربوط به بخش بررسی برآوردهای خطا، استنتاج و استدلال ذهنی و نهایتا نتیجه‌گیری درباره چگونگی، مقدار و جهت تصحیحات لازم برای جبران خطاها برحسب متغییرهای زبانی است. این مرحله باید شامل دو قسمت پایگاه قواعد فازی و موتور استنتاج فازی باشد تا امکان تصمیم‌گیری فراهم شود. ورودی این بخش برآوردهای خطا برحسب متغییرهای زبانی مربوط به بخش اول و خروجی آن برآورد اصلاحات لازم (برآورد چگونگی حرکت راهبر و یا پدال) براساس متغیرهای زبانی است.

قسمت آخر مدل‌سازی کاربر مربوط به فرآیند تولید دستورات از طریق ابزار راهبر با حرکت دادن آن با توجه به استدلال و برآوردهای اصلاحات لازم در مرحله قبل است. این قسمت معادل یک غیرفازی‌ساز است که به‌عنوان ورودی، برآوردهای اصلاحات لازم را به‌صورت متغیرهای زبانی گرفته و مقدار و جهت حرکت راهبر و پدال را به‌صورت عدد در خروجی تولید می‌کند.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1391.6.2.4.8]

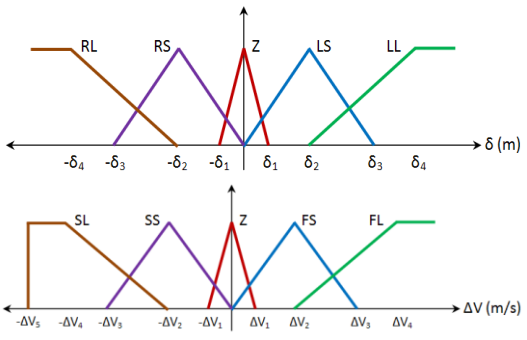
۶-۱ مدل فازی کاربر-راهبر برای الگوریتم هدایت

کاربر در این الگوریتم باید به تناسب میزان خطای موقعیت δ و سمت آن – چپ یا راست مسیر- اندازه و سمت بردار تغییر سرعت لازم در جهت عمود بر بردار سرعت فعلی یعنی بردار P و میزان تغییرات تندی حرکت R که متناسب با اختلاف اندازه بردار سرعت فعلی و بردار سرعت مطلوب Δv است را تعیین کند (شکل (۴)). یادآوری این نکته لازم است که در بکارگیری این الگوریتم هدایت فرض بر آن است که کاربر مسیر را از طریق یک صفحه نمایش به نحوی می‌بیند که امتداد مسیر قائم بوده و جهت حرکت از پایین صفحه به بالای آن است و لذا خطا از مسیر همواره به صورت انحراف به راست یا چپ دیده می‌شود.



شکل ۴. پارامترهای مدل فازی کاربر-راهبر برای الگوریتم هدایت

اولین بخش مدل فازی کاربر-راهبر بخش فازی‌ساز و مهمترین مساله در فازی‌ساز انتخاب توابع عضویت است. در اینجا ورودی‌های فازی‌ساز خطای موقعیت پنجه δ و خطای تندی حرکت Δv هستند که توابع عضویت آن‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است. خطای موقعیت پنجه بیان کننده فاصله پنجه از مسیر است که مثبت و منفی بودن آن قرارگرفتن پنجه به‌ترتیب در سمت چپ و راست مسیر (نسبت به ناظر همراه پنجه) را نشان می‌دهد. مقادیر مثبت و منفی خطای تندی نیز به‌ترتیب بیانگر تند و کند بودن حرکت است. البته مقدار منفی خطای تندی نمی‌تواند از مقدار مشخصی کمتر شود و بنابراین تابع عضویت سمت چپ آن محدود شده است.



شکل ۵. توابع عضویت ورودی‌ها

در جدول (۱) معادل هریک از نمادهای بکار رفته در تعریف توابع عضویت آورده‌شده است.

جدول ۱. نمادهای بکار رفته در تعریف توابع عضویت ورودی‌ها

خطای موقعیت پنجه δ		خطای تندی حرکت ΔV	
معنی	نماد	معنی	نماد
انحراف زیاد به سمت راست مسیر	RL	بسیار آهسته	SL
انحراف کم به سمت راست مسیر	RS	کمی آهسته	SS
روی مسیر	Z	با تندی مناسب	Z
انحراف کم به سمت چپ مسیر	LS	کمی تند	FS
انحراف زیاد به سمت چپ مسیر	LL	بسیار تند	FL

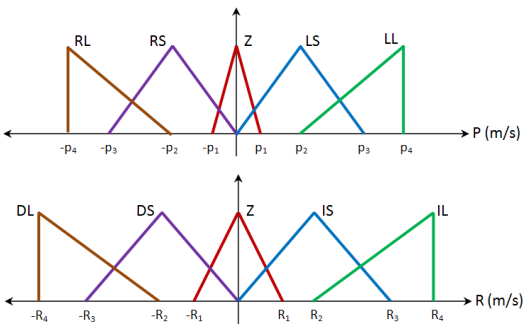
مقادیر محورهای افقی به میزان مهارت و تجربه کاربر بستگی دارد و در شبیه‌سازی‌ها مقادیر مفروض برای آنها بیان می‌شوند.

بخش دوم مدل فازی شامل پایگاه قواعد فازی و موتور استنتاج فازی است. پایگاه قواعد فازی با این فرض نوشته شده‌است که کاربر با توجه به خطای موقعیت پنجه، اندازه و سمت (چپ یا راست بردار سرعت) بردار تغییر سرعت و براساس خطای تندی حرکت، مقدار کاهش و یا افزایش سرعت را برآورد می‌کند. بنابراین پایگاه قواعد فازی به صورت جدول (۲) خواهد بود.

جدول ۲. پایگاه قواعد فازی

۱. برآورد اندازه و سمت بردار تغییر سرعت	۲. برآورد مقدار تغییر تندی حرکت
If **δ** is **RL** then **P** is **LL**	If **ΔV** is **SL** then **R** is **IL**
If **δ** is **RS** then **P** is **LS**	If **ΔV** is **SS** then **R** is **IS**
If **δ** is **Z** then **P** is **Z**	If **ΔV** is **Z** then **R** is **Z**
If **δ** is **LS** then **P** is **RS**	If **ΔV** is **FS** then **R** is **DS**
If **δ** is **LL** then **P** is **RL**	If **ΔV** is **FL** then **R** is **DL**

در شکل (۶) توابع عضویت خروجی‌های اندازه و سمت بردار تغییر سرعت و مقدار اصلاح تندی که پایگاه قواعد فازی براساس آنها نوشته شده، نشان داده‌شده اند.



شکل ۶. توابع عضویت خروجی‌ها

در جدول (۳) معادل هریک از نمادهای بکار رفته در تعریف توابع عضویت آورده‌شده است.

جدول ۳. نمادهای بکار رفته در تعریف توابع عضویت خروجی‌ها

مقدار اصلاح تندی R		اندازه و سمت بردار تغییر سرعت P	
معنی	نماد	معنی	نماد
کاهش زیاد تندی	DL	تغییر سرعت زیاد به سمت راست	RL

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1391.6.2.4.8]

کاهش کم تندی	DS	تغییر سرعت کم به سمت راست	RS
بی‌نیاز از اصلاح تندی	Z	بی‌نیاز از تغییر سرعت	Z
افزایش کم تندی	IS	تغییر سرعت کم به سمت چپ	LS
افزایش زیاد تندی	IL	تغییر سرعت زیاد به سمت چپ	LL

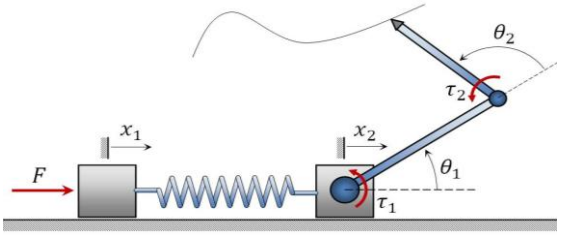
مقادیر محورهای افقی به میزان مهارت و تجربه کاربر بستگی دارد و در شبیه‌سازی‌ها مقادیر مفروض برای آنها بیان می‌شوند. برای موتور استنتاج فازی نیز می‌توان از موتور استنتاج حاصل‌ضرب و یا موتور استنتاج مینیمم استفاده کرد که در شبیه‌سازی‌های ارایه شده در این مقاله از موتور استنتاج حاصل‌ضرب استفاده شده است.

آخرین بخش مدل فازی، غیرفازی‌ساز است که در آن می‌توان از روش‌های مرکز ثقل و یا میانگین مراکز استفاده کرد که در نتایج نشان داده شده از روش میانگین مراکز استفاده شده است.

۷- نتایج شبیه‌سازی

برای نشان دادن کارایی روش ارایه شده، شبیه‌سازی‌هایی انجام شده که در آنها رباتی با چهار درجه آزادی، سه عملگر و دو بازوی صلب مطابق شکل (۷) درنظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی‌ها معادله مسیر مطلوب پنجه به صورت معادله (۳۳) با $\omega = \pi/50$ فرض شده است که مسیر مطلوب به همراه ربات در شکل (۸) نشان داده شده است.

$$x_d = \begin{cases} 0.5+0.75(1-\cos(\omega t)) & t \le \dfrac{\pi}{\omega} \\ 2 & t > \dfrac{\pi}{\omega} \end{cases}$$
$$y_d = \begin{cases} 0.5-0.15\sin(3\omega t)^2 & t \le \dfrac{\pi}{\omega} \\ 0.5 & t > \dfrac{\pi}{\omega} \end{cases} \qquad (۳۳)$$

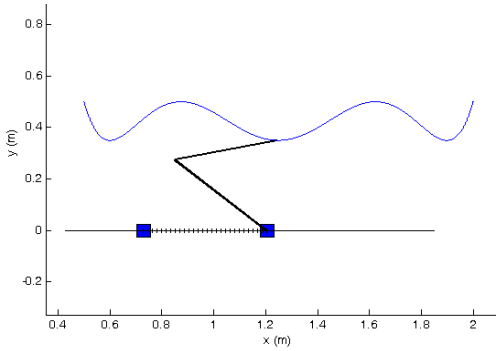


شکل ۷. ربات دو بازویی با پایه انعطاف‌پذیر

ابعاد و پارامترهای فیزیکی مفروض برای ربات در جدول (۴) آمده است.

جدول ۴. مقادیر پارامترهای فیزیکی ربات مفروض در شبیه‌سازی‌ها

Links		
	Mass (kg)	Length (m)
Link 1	0.5	0.45
Link 2	0.1	0.4
Spring		
	Constant (N/m)	Initial Length (m)
Spring	0.5	0.5
Motors, Sliders, Payload		
	Mass (kg)	
Motor 1	1.5	
Motor 2	1	
Slider 1	0.5	
Slider 2	0.5	
Payload	0.1	



شکل ۸ ربات و مسیر مطلوب در فضای کار

معادله مسیر مطلوب حرکت پایه به صورت رابطه (۳۴) است و یک کنترل‌کننده ساده PD برای حرکت دادن پایه در نظر گرفته شده است. این حرکت پایه جهت شبیه‌سازی حرکات پایه متحرک و یا ماکرو رباتی است که ربات بر روی آن نصب شده و با آن جابجا می‌شود و تغییرشکل و نوسانات فنر نیز نشان دهنده اثرات انعطاف‌پذیری پایه‌ای نظیر ماکرو ربات است.

$$\begin{cases} x_{Bd} = \begin{cases} 0.75(1-\cos(\omega t)) & t \le \dfrac{\pi}{\omega} \\ 1.5 & t > \dfrac{\pi}{\omega} \end{cases} \\ y_{Bd} = 0 \end{cases} \qquad (۳۴)$$

گشتاورهای τ_1 و τ_2 به عنوان گشتاورهای قیدی درنظر گرفته شده‌اند یعنی $\mathbf{C} = [\tau_1 \quad \tau_2]^T$. مقادیر خطا از مسیر مطلوب توسط کاربر بوسیله یک راهبر پنجه تعیین می‌شود. در شبیه‌سازی‌های انجام شده حالت‌های مختلف معلوم بودن و یا نبودن معادله مسیر و نیز وجود خطا در خطای سرعت پنجه از مسیر مطلوب بررسی شده است.

اولین شبیه‌سازی با فرض معلوم‌بودن معادله مسیر و اندازه‌گیری دقیق خطا انجام شده و نتایج آن در شکل (۹) نشان داده شده است. در همه نتایج نشان داده شده پارامتر Δ نشان دهنده میزان تغییرشکل فنر و δ_x و δ_y نشان دهنده مقدار خطای پنجه از مسیر مطلوب است. دقت شود که براساس رابطه (۳۳)، در زمان ۵۰ ثانیه یعنی انتهای مسیر مطلوب، پنجه باید بایستد و شتاب حرکتش ناگهان صفر شود که باعث ایجاد تغییرات ناگهانی، پرش و نوسانات در نمودارها می‌شود.

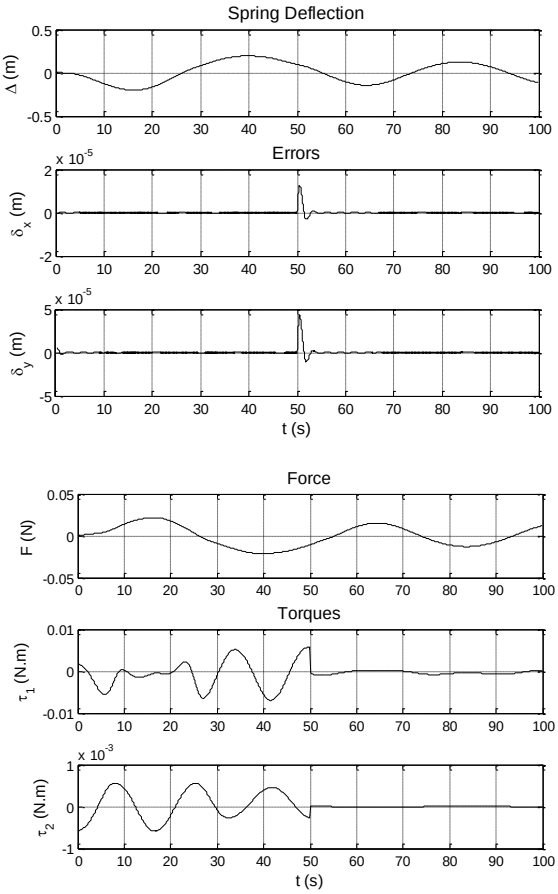
در شکل (۱۰) نتایج شبیه‌سازی با فرض نامعلوم بودن معادله مسیر مطلوب و اندازه‌گیری دقیق مقادیر خطای پنجه آمده است. در این شبیه‌سازی‌ها مقدار متغیر تخمینی $\hat{\mathbf{E}} = \mathbf{0}$ فرض شده است. از مقایسه شکل‌های (۹) و (۱۰) مشخص است که نامعلوم بودن معادله مسیر مطلوب

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1391.6.2.4.8]

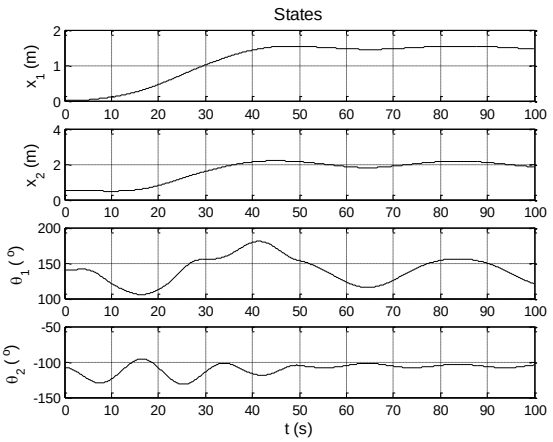
باعث افزایش خطا در طی مسیر شده ولی مقدار آن در حد قابل قبول باقی می‌ماند و در انتهای مسیر نیز خطا نهایتا صفر می‌شود.

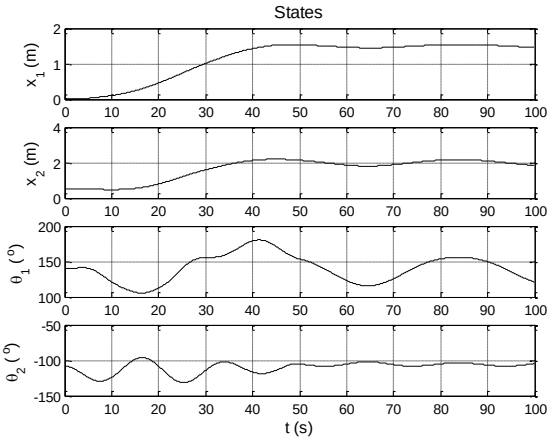
در شبیه‌سازی بعدی فرض بر معلوم‌بودن معادله مسیر و وجود خطا در اندازه‌گیری خطای سرعت پنجه است که نتایج آن در شکل (۱۱) آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که مقدار خطا نسبت به حالت اول افزایش یافته ولی میزان آن نسبت به حالت دوم که معادله مسیر نامشخص است، کمتر است. این شبیه‌سازی با هدف تعیین مقاومت کنترل‌کننده به وجود خطا در اندازه‌گیری سرعت پنجه توسط کاربر صورت گرفته که نتایج نشان‌دهنده کارآیی کنترل‌کننده در این شرایط است. در این شبیه‌سازی مقدار خطای تخمینی بصورت نوسانی با دامنه متغیر از ۱۰ تا ۱۲۰ درصد مقدار خطای واقعی با رعایت شرط (۲۲) درنظر گرفته شده است که برای نمونه مقدار واقعی و تخمینی مولفه y خطای سرعت در شکل (۱۲) آمده است.

جهت بررسی فرضیات تحلیل پایداری بخش ۵، به عنوان مثال مقدار f_{22} و مشتق آن مربوط به مولفه y خطای سرعت شبیه سازی سوم در شکل (۱۳) نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها مشخص است که با انتخاب $k_p = 6$ و $\alpha = 0.1$ ، جهت پایداری سیستم براساس شروط پایداری استخراج شده، کافی است مقدار k_v در بازه $1 < k_v < 6$ باشد که در این شبیه‌سازی $k_v = 2$ انتخاب شده است.

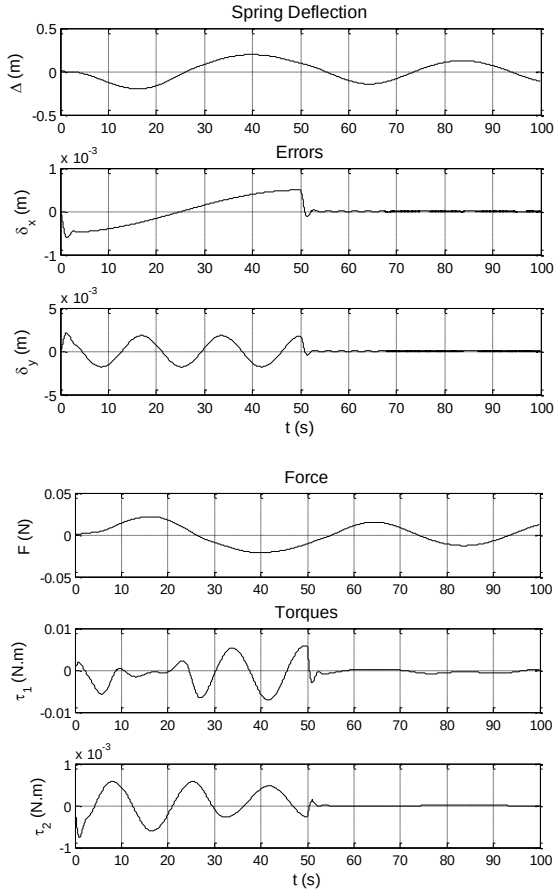


شکل ۹. نتایج شبیه‌سازی با معادله مسیر معلوم و اندازه گیری دقیق خطای پنجه

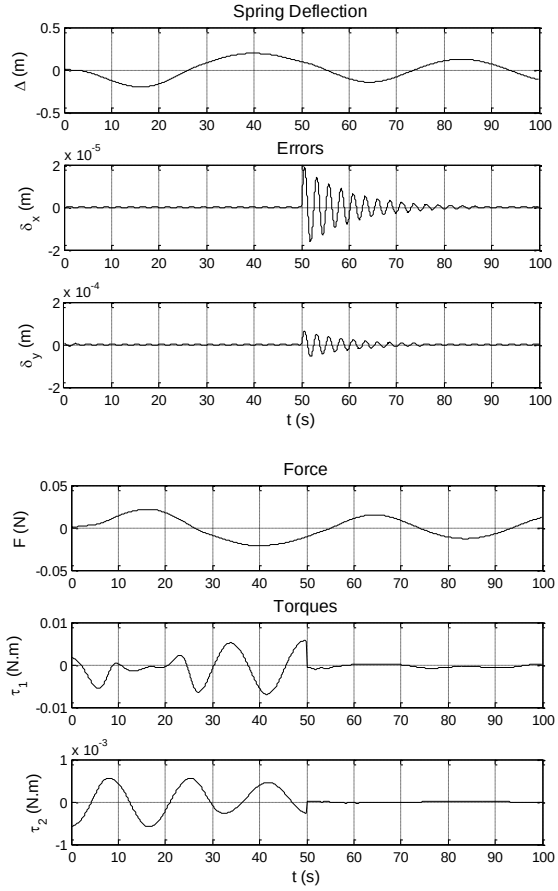




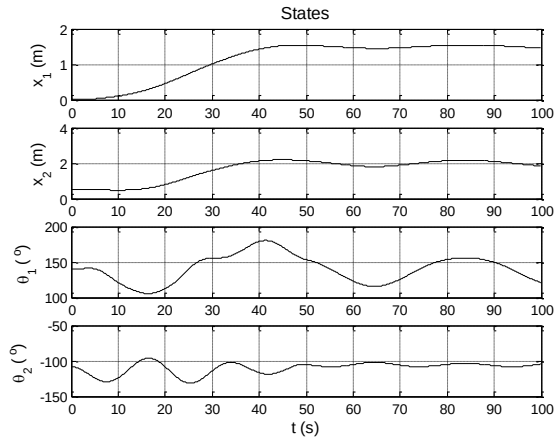
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1391.6.2.4.8]

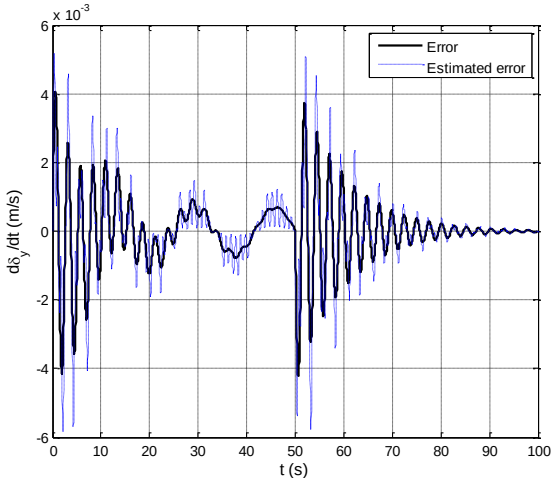


شکل ۱۰. نتایج شبیه‌سازی با فرض نامعلوم بودن معادله مسیر مطلوب و $\dot{\hat{\mathbf{E}}}=\mathbf{0}$ و اندازه‌گیری دقیق مقادیر خطای پنجه



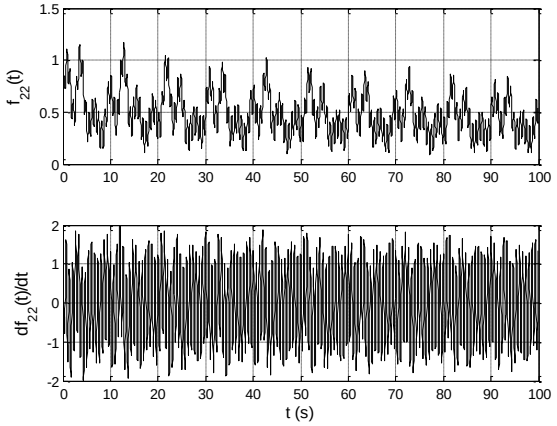
شکل ۱۱. نتایج شبیه‌سازی با معادله مسیر معلوم و وجود خطا در اندازه‌گیری خطای سرعت پنجه





شکل ۱۲. مقایسه مقدار واقعی و تخمینی مولفه ۷ خطای سرعت شبیه‌سازی سوم

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1391.6.2.4.8]

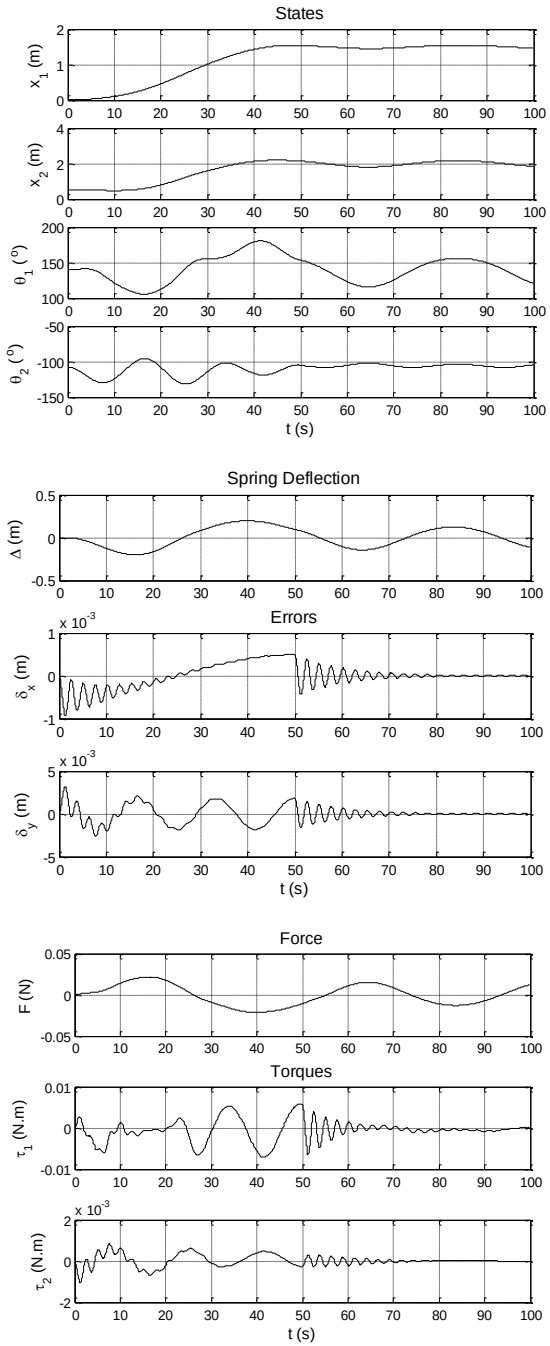


شکل ۱۳. مقدار f_{22} و مشتق آن مربوط به مولفه y خطای سرعت شبیه‌سازی سوم

نتایج شبیه‌سازی در حالت نامعلوم بودن معادله مسیر و همچنین وجود خطا در اندازه‌گیری خطای سرعت پنجه در شکل (۱۴) آورده شده است. در این شبیه‌سازی‌ها نیز مقدار متغیر تخمینی $\hat{\mathbf{E}} = \mathbf{0}$ فرض شده و همانند شبیه‌سازی قبل، مقداری خطا به خطای سرعت اضافه شده است. در شکل (۱۵) نتایج خطای این شبیه‌سازی به همراه خطای شبیه‌سازی دوم که فقط معادله مسیر نامعلوم بود، رسم شده است که مطابق انتظار، خطاهای بوجودآمده بیشتر شده است. در شکل (۱۶) نیز نتایج خطای این شبیه‌سازی با شبیه‌سازی سوم که معادله مسیر معلوم بود، مقایسه شده‌اند که نشان دهنده افزایش خطا است. نتایج این شبیه‌سازی موید این نکته است که الگوریتم کنترل‌کننده پیشنهادی را می‌توان به همراه الگوریتم پیشنهادی هدایت برای تعقیب یک مسیر نامعین توسط پنجه بکار برد. نتایج شبیه‌سازی این حالت که با فرض امکان اندازه‌گیری خطا به صورت فازی توسط کاربر استوار بوده در شکل (۱۷) ارایه شده است. پارامترهای مفروض در شبیه‌سازی الگوریتم هدایت در جدول (۵) ارایه شده‌اند.

جدول ۵. پارامترهای توابع عضویت مفروض در شبیه‌سازی الگوریتم هدایت

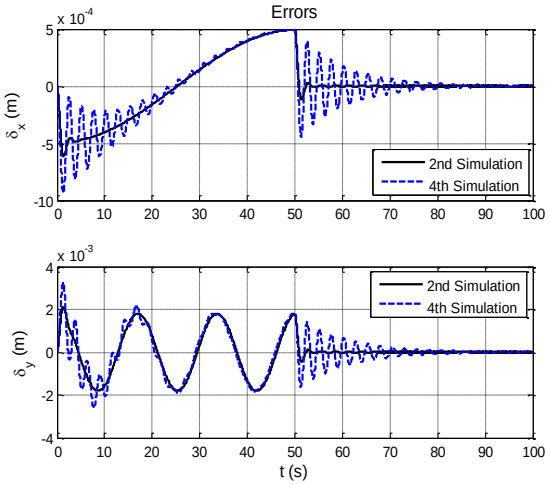
δ (m)	$\delta_1 = \delta_2 = 0.005$	$\delta_3 = \delta_4 = 0.01$	-
ΔV (m/s)	$\Delta V_1 = \Delta V_2 = 0.005$	$\Delta V_3 = \Delta V_4 = 0.01$	$\Delta V_5 = 1$
P (m/s)	$P_1 = P_2 = 0.007$	$P_3 = P_4 = 0.018$	-
R (m/s)	$R_1 = R_2 = 0.006$	$R_3 = R_4 = 0.015$	-



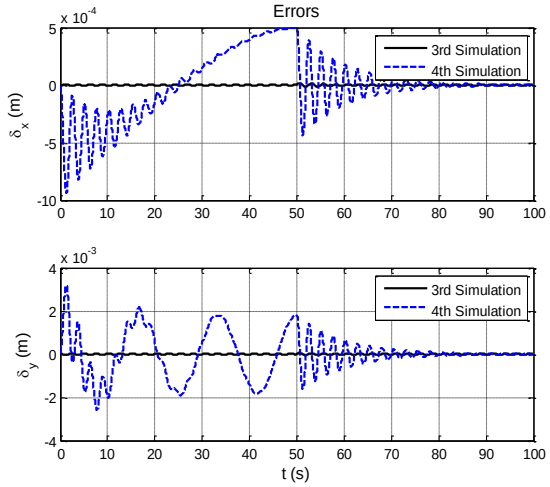
شکل ۱۴. نتایج شبیه‌سازی با معادله مسیر نامعلوم و $\hat{\mathbf{E}} = \mathbf{0}$ و وجود خطا در اندازه‌گیری خطای سرعت پنجه

همانگونه که از نتایج مشخص است با وجود حرکت های پایه، پنجه با دقت نسبتا مناسبی مسیر را دنبال کرده است ولی با توجه به ماهیت الگوریتم هدایت و عدم امکان تصحیح جهت بردار سرعت، همانطور که پیش‌بینی می‌شد پنجه حول مسیر مطلوب دارای نوسانات کم دامنه است که با توجه به نوع کاربرد موردنظر و افزایش مهارت کاربر دامنه آنها قابل کاهش می‌باشد.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1391.6.2.4.8]



شکل ۱۵. مقایسه خطای حرکت پنجه در شبیه‌سازی‌های دوم و چهارم

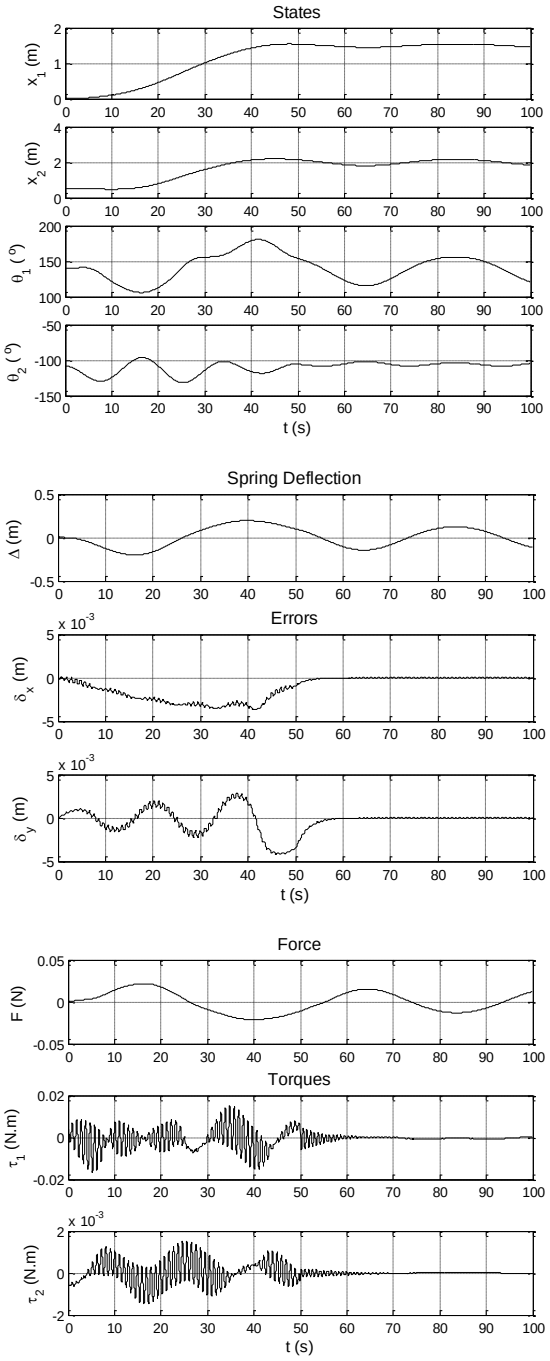


شکل ۱۶. مقایسه خطای حرکت پنجه در شبیه‌سازی‌های سوم و چهارم

مقادیر ماکزیمم خطای پنجه از مسیر در دو جهت x و y طی شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، جهت مقایسه کمی در جدول (۶) آمده است. در حالت‌های مختلف بررسی شده خطای پنجه در نقطه انتهای مسیر صفر می‌شود و حتی در شرایط نامعلوم بودن معادله خطا و وجود خطا در اندازه‌گیری خطای سرعت پنجه نیز مقادیر خطا محدود و قابل قبول هستند که نشان‌دهنده کارآیی مناسب کنترل‌کننده است.

جدول ۶. مقایسه کمی مقادیر خطا در شبیه‌سازی‌های مختلف (برحسب متر)

شبیه‌سازی	بیشترین خطا در راستای x	بیشترین خطا در راستای y
اول	1×10^{-5}	5×10^{-5}
دوم	5×10^{-4}	2×10^{-3}
سوم	2×10^{-5}	1×10^{-4}
چهارم	1×10^{-3}	3×10^{-3}
پنجم	4×10^{-3}	4×10^{-3}



شکل ۱۷. نتایج شبیه‌سازی با معادله مسیر نامعلوم و $\hat{\mathbf{E}}=\mathbf{0}$ و استفاده از الگوریتم هدایت پنجه

۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله کنترل‌کننده‌ای برای حرکت‌دادن پنجه یک ربات با پایه الاستیک بر روی مسیری در فضای کار ارایه شد. در این روش مساله به دو قسمت تقسیم می‌شود. ابتدا پایه ربات به کمک یک کنترل‌کننده ساده در نزدیکی مسیر مطلوب حرکت می‌کند تا مسیر در فضای دسترس ربات باقی بماند. سپس کنترل‌کننده طراحی شده بر مبنای قیود مصنوعی با تنظیم حرکت ربات خطای پنجه از مسیر را جبران کرده و آنرا صفر

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1391.6.2.4.8]

می‌کند. در این مقاله فرض بر نامعلوم بودن معادله مسیر است و خطای پنجه از مسیر نیز توسط کاربر و از طریق یک الگوریتم هدایت و با استفاده از راهبر پنجه تعیین می‌شود. پایداری روش در حالتی که در اندازه‌گیری خطای سرعت پنجه خطا وجود داشته باشد، اثبات شد و کارآیی روش با مدل‌سازی فازی رفتار کاربر و باوجود نامعلوم بودن معادله مسیر مطلوب توسط شبیه‌سازی نشان داده شد. نتایج بدست آمده عدم نیاز کنترل‌کننده به مشخص بودن معادله مسیر مطلوب و اندازه‌گیری دقیق خطای سرعت پنجه را نشان می‌دهد.

مراجع

[1] Nenchev D.N., Yoshida K., Vichitkulsawat P., Uchiyama M., "Reaction Null-Space Control of Flexible Structure Mounted Manipulator Systems", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol.15, no.6, pp.1011-1023, Dec 1999.

[2] George L.E., Book W.J., "Inertial Vibration Damping Control of a Flexible Base Manipulator", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.8, no.2, pp.268-271, June 2003.

[3] Bassan H., Talebi H.A., Patel R.V., Moallem M., "Real-time Vibration Control of an Industrial Manipulator Mounted on a Compliant Base", Proceedings of the American Control Conference, vol.6, pp. 5766- 5771, July 2004.

[4] Ueda J., Yoshikawa T., "Robust Arm Configuration of Manipulator Mounted on Flexible Base", IEEE Transactions on Robotics, vol.20, no.4, pp. 781- 789, August 2004.

[5] Mavroidis C., Dubowsky S., Raju V., "End-Point Control of Long-Reach Manipulator Systems", Proceedings of the Ninth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Milan, Italy, pp 1740-1744, 1995.

[6] Salehi M., Vossoughi G.R., Vajedi M., Brooshaki M., "Impedance Control and Gain Tuning of Flexible Base Moving Manipulators using PSO method", International Conference on Information and Automation, pp.458-463, June 2008.

[7] Wongratanaphisan T., Cole M., "Robust Impedance Control of a Flexible Structure Mounted Manipulator Performing Contact Tasks", IEEE Transactions on Robotics, vol.25, no.2, pp.445-451, April 2009.

[8] Ott C., Albu-Schaffer A.; Hirzinger G., "A Cartesian Compliance Controller for a Manipulator Mounted on a Flexible Structure", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.4502-4508, October 2006.

[9] Hishinuma T., Nenchev D.N., "Singularity-Consistent Vibration Suppression Control With a Redundant Manipulator Mounted on a Flexible Base", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3237-3242, October 2006.

[10] Sadigh, M. J., Misra, A. K., "A Direct Method to Generate the Minimum-Order Equation of Motion for System with Artificially Imposed Constraints", Proceeding of the AIAA/AAS conferences, Scotsdale, AZ, paper 94-3737, 1994.

[11] Sadigh M. J., Zamani Fekri M., "A New Approach Based On Constrained Motion to Control of A Moving Base Manipulator", International Astronautical Federation or International Academy of Astronautics, 2001.

[12] Sadigh M. J., Salehi A., "A Robust Closed Loop Control for Fast Maneuvers of Micro-Macro Manipulators", Proceeding of International Astronautical Conference, Vancouver, Canada, Paper no. IAC-04-IAF-A.5.04, 2004.

[13] Sadigh M. J., Salehi A., Keshmiri M., "A Semi-Manual Master-Slave Algorithm for Control of Flexible Micro-Macro Manipulators", 13th IEEE IFAC Int. Conf. on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR, Poland, pp. 991-996, 2007.

[14] Passenberg, C., Peer, A., and Buss, M.,"A survey of environment-, operator-, and task-adapted controllers for teleoperation systems", Mechatronics, Vol. 20(7), pp. 787-801, 2010.

[15] Hirabayashi T., Akizono J., Yamamoto T., Sakai H., Yano H., "Teleoperation of Construction Machines with Haptic Information for Underwater Applications", Automation in Construction, Vol. 15 (5), pp 563-570, 2006.

[16] Sadeghi M. S., Momeni H. R., Amirifar R., "H∞ and L1 Control of a Teleoperation System via LMIs", Applied Mathematics and Computation, Vol. 206 (2), pp 669-677, 2008.

[17] Shim H., Jun B., Lee P., Baek H., Lee J.,"Workspace control system of underwater tele-operated manipulators on an ROV", Ocean Engineering, pp. 1036–1047, 2010.

[18] Arata J, Kozuka H, Kim HW, Takesue N, Vladimirov B, Sakaguchi M, Tokuda J, Hata N, Chinzei K, Fujimoto H., "Open core control software for surgical robots", Int J Comput Assist Radiol Surg, Vol. 5(3), pp. 211-220, 2010.

[19] Haddadi A., Hashtrudi-Zaad K., "Bounded-Impedance Absolute Stability of Bilateral Tele operation Control Systems", IEEE Transactions on Haptics, Vol. 3(1), pp. 15-27, 2010.

[20] Botturi D., Vicentini M., Righele M., Secchi C., "Perception-centric Force Scaling in Bilateral Teleoperation", Mechatronics, Vol.20, pp. 802-811, 2010.

[21] Mohammadi A., Tavakoli M., Marquez H. J., "Disturbance observer based control of nonlinear haptic teleoperation systems ", IET Control Theory & Applications, Vol. 5(17), pp. 2063-2074, 2011.

[22] Janabi-Sharifi F., Hassanzadeh I., "Experimental Analysis of Mobile-Robot Teleoperation via Shared Impedance Control", IEEE Transactions on Systems,

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1391.6.2.4.8]

[31] Shahdi A., Sirouspour S., "Adaptive/robust control for time-delay teleoperation", IEEE Transactions on Robotics, Vol. 25(1), pp. 196-205, 2009.

[32] Ryu, J.-H., Artigas, J., Preusche, C., "A passive bilateral control scheme for a teleoperator with time-varying communication delay", Mechatronics, Vol. 20, pp. 812-823, 2010.

[33] Ganjefar S., Najibi S., Momeni H., "A novel structure for the optimal control of bilateral teleoperation systems with variable time delay", Journal of the Franklin Institute, Vol. 348(7), pp. 1537-1555, 2011.

[34] Slawiñski E., Mut V., Fiorini P., Salinas L., "Quantitative Absolute Transparency for Bilateral Teleoperation of Mobile Robots", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and humans, Vol. 42(2), pp. 430-442, 2012.

[35] Hosseini-Sunny K., Momeni H., and Janabi-Sharifi F., "A modified adaptive controller design for teleoperation systems," J. Robotics and Autonomous Systems, vol. 58(5), pp. 676–683, 2010.

[36] Forouzantabar A., Talebi H. A., Sedigh A. K., "Bilateral control of master-slave manipulators with constant time delay", ISA Transactions, Vol. 51(1), pp. 74-80, 2011.

[37] Forouzantabar A., Talebi H. A., Sedigh A. K., "Adaptive neural network control of bilateral teleoperation with constant time delay", Nonlinear Dynamics, Vol. 67(2), pp. 1123-1134, 2012.

[38] Hokayem P., Spong M. W., "Bilateral teleoperation: An historical survey", Automatica, vol. 42(12), pp. 2035-2057, 2006.

[39] Slotine J. J. E., Li W., Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall, 1991.

[40] Rouche N., Habets P., Laloy M., Stability Theory by Liapunov's Direct Method, Springer-Verlag, 1977.

Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, pp.591-606, 2011.

[23] Veras E., Khokar K., Alqasemi R., Dubey R., "Scaled telerobotic control of a manipulator in real time with laser assistance for ADL tasks", Journal of the Franklin Institute, Vol. 349, pp. 2268–2280, 2012.

[24] Horise Y., Nishikawa A., Sekimoto M., Kitanaka Y., Miyoshi N., Takiguchi S., Doki Y., Mori M., Miyazaki F., "Development and evaluation of a master-slave robot system for single-incision laparoscopic surgery", Int. J.of CARS, Vol. 7(2), pp. 289-296, 2012.

[25] Hirche S., Buss M., "Human-Oriented Control for Haptic Teleoperation", Proceedings of the IEEE, Vol. 100(3), pp. 623 – 647, 2012.

[26] Noguchi N., Will J., Reid J., Zhang Q, "Development of a master-slave robot system for farm operations", Computers and Electronics in agriculture, vol. 44, pp. 1-19, 2004.

[27] Wojtara, T., Nonami, K., Shao, H., Yuasa, R., Amano, S., Waterman, D., Nobumoto, Y., "Hydraulic master-slave land mine clearance robot hand controlled by pulse modulation", Mechatronics, Vol. 15(5), pp. 589-609, 2005.

[28] Tavakoli M., Aziminejad A., Patel R., Moallem M., "Discrete-time bilateral teleoperation: modelling and stability analysis", IET Control Theory & Applications, Vol. 2(6), pp. 496-512, 2008.

[29] Malysz P., Sirouspour S., "A Kinematic Control Framework for Single-Slave Asymmetric Teleoperation Systems", IEEE Transactions on Robotics, Vol. 27(5), pp. 901-917, 2011.

[30] Khademian B., Hashtrudi-Zaad K., "Dual-User Teleoperation Systems: New Multilateral Shared Control Architecture and Kinesthetic Performance Measures", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 17(5), pp. 895 – 906, 2012.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1391.6.2.4.8]