

ساختاری جدید از ربات سیار چرخ‌دار چندحالتی با کنترل ارتفاع در سطوح ناهموار*

(یادداشت پژوهشی)

مهدی بامداد^(۱)آرمان مردانی^(۲)

چکیده در این مقاله، توانایی حرکتی ربات سیار چرخ‌دار با فراهم آوردن ساختاری نوین افزایش می‌یابد. ساختار چندحالتی پیشنهادی با توجه به طراحی خاص، توانایی تبدیل ربات دوچرخ به چهارچرخ را دارد. این طراحی توانایی حرکت هم‌زمان بدنه ربات و جابه‌جایی بازو را هنگام حرکت در سطح ناهموار دارد. برخلاف اغلب ربات‌های سیار، ربات بدون استفاده از بازوان مدولار متصل به بدنه، قابلیت یک بازوی رباتیکی را در محور میانی دارد. این نقطه به‌عنوان مجری نهایی در محل یک مفصل غیرفعال است. از این رو می‌تواند حامل تجهیزات هدایت و بینایی ربات سیار باشد و بدون موتور محرکه جدید از فرمان‌های کنترل ارتفاع پیروی کند. این طراحی خلاقانه و ساده می‌تواند عملکرد قابل قبولی را تضمین کند. در پایان، ویژگی حرکتی ربات در مسیرهای مختلف برای پنجه، روی سطوح ناهموار شبیه‌سازی می‌گردد.

واژه‌های کلیدی ربات سیار چرخ‌دار، چندحالتی، طراحی حرکت، کنترل ارتفاع.

Multimode Wheeled Mobile Robot with Height Control on Uneven Surfaces

M. bamdad A. Mardani

Abstract In this paper, the motion capability of wheeled mobile robot is increased by providing a new structure. Due to the special design, converting a two-wheeled robot to a four-wheeled robot is possible in the proposed multi-mode robot. This design has the ability to simultaneously and interchangeably provide locomotion and manipulation capability in motion on uneven terrain. Unlike most other mobile robot designs that have a separate manipulator arm module attached on top of the mobile platform, the central axis in this design can manipulate like a robotic arm. The robot midpoint as an end-effector is a passive joint. The part which could carry the guidance and visual equipments follows the height control, easily and without a new actuator. The basic requirement of stability and acceptable performance could be guaranteed through this simple, novel design. Finally, the simulation is used to study the robot's enhanced mobility characteristics through animations of different trajectories for end-effector on uneven terrain.

Key Words Mobile Robot, Multimode, Locomotion, Height control.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۲/۶ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۲/۱۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود. Bamdad@shahroodut.ac.ir

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

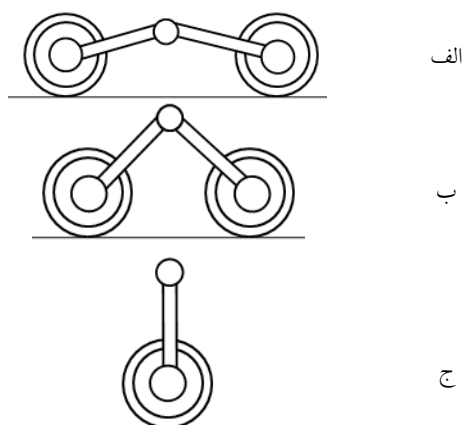
مقدمه

امروزه حوزه‌ی مربوط به کاوش‌گرهای فضایی به دلیل نیاز به بررسی سطح سیارات و اقمار، رو به گسترش است و در این میان ربات‌ها توانسته‌اند نقش مهمی ایفا نمایند [1]. ربات‌های کاوشگر تنها در کاربردهای فضایی استفاده نمی‌شوند بلکه برای جستجو در نقاطی که برای انسان پرخطر است؛ نیز به کار گرفته می‌شوند نظیر ربات‌های کف‌نورد نظامی [2]، ربات‌های کاوشگر در معادن زیرزمینی [3]. در این میان ربات‌های چرخ‌دار از اهمیت بیشتری برخوردارند و در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرند.

حرکت روی سطوح ناهموار چالش پیش روی ربات‌های سیار است. ربات‌های کاوشگر به دلیل تأمین پایداری بیشتر، از تعداد چرخ‌های بیشتری بهره می‌گیرند. در این میان ربات‌های چهارچرخ با محرک دیفرانسیلی مورد توجه بوده‌اند [4]. از طرفی، ربات‌های دوچرخ قابلیت پیمایش سریع و دور زدن در جا را دارند [5] و ربات‌های تک‌چرخ ساختاری ناپایدار دارند [6]. برای فهم حرکت روبات باید از محدودیت‌هایی که چرخ‌ها بر سر راه حرکت ایجاد می‌کنند شروع نمود. به همین دلیل در کاوش‌ها، بیشتر از ربات‌هایی با چهارچرخ و یا بیشتر استفاده می‌شود. سوال اصلی این‌جا است که آیا راهی وجود دارد که در هر یک از شرایط کاری و محیطی متفاوت از مزایای یک ساختار خاص رباتیکی بهره‌برد؟ پژوهشگران ساختارهای رباتیکی چندحالتی را پیشنهاد داده‌اند. در یک نمونه ساده، ربات‌های کوچک مدولار در قالب یک واحد هوشمند، توان اتصال به دیگر واحدها را دارند و می‌توانند ساختارهای کلی متفاوت با کارکرد متنوع را ایجاد کنند [7]. برای مثال اجزای ربات با قابلیت شکل‌گیری مجدد می‌توانند به یک چرخ تبدیل شوند [8]؛ و یا در نمونه‌ای دیگر، می‌توان به ربات‌هایی با قابلیت گام‌زنی و پیمایش چرخ‌دار اشاره داشت [9]. Rhex رباتی است که گام‌های آن هم‌زمان قابلیت پیمایش بر روی پا و نیم‌چرخ را دارا است [10-12].

ربات‌های چندحالتی می‌توانند برای کاربردهای خاص نظیر پیمایش سطوح پله‌ای طراحی گردند [13]. این طراحی می‌تواند روی ساختار ترکیبی چرخ‌ها باشد [14]. عملکرد درخشان ربات‌های شنی چند کارکرد در کاوش، ثابت کرده است که آنها می‌توانند موانع را به خوبی پشت سرگذارند [15]. عموماً به منظور افزایش قابلیت‌های حرکتی ربات‌های سیار از ترکیبی از بازوان رباتیکی موازی و سری متصل به بدنه بهره‌برده می‌شود. بر خلاف این طرح‌ها که بازوی مدولار جداگانه دارند، حرکت هم‌زمان بدنه ربات و جابه‌جایی بازوان در قالب یک ساختار یکپارچه، شدنی است. این ایده با طراحی مکانیکی خلاقانه در راستای افزایش توانایی ربات میسر می‌شود [16]. الگوبرداری از طبیعت در خلق طراحی‌های جدید انکار نشدنی است. چرخش بدن حلقه شده یک جانور خزنده، در مواردی می‌تواند ساختار چند کارکردی بدهد. با همین رویکرد، اخیراً ساختارهایی با قابلیت حلقه شدن در رباتیک نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند [17]. حتی در مواردی ربات‌هایی با ساختار گسسته عملکردهای متنوعی را فراهم می‌کنند [18]. چندین ربات سیار خودمختار کوچک در قالب یک همکاری رباتیکی، ساختارهای ترکیبی متفاوت با کارکرد متنوع ایجاد می‌کنند.

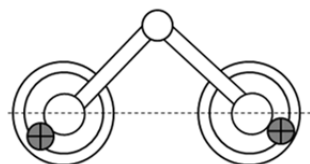
در این پژوهش، رباتی با قابلیت استفاده از دو شکل کاری دوچرخ و چهارچرخ پیشنهاد شده است. اغلب ربات‌های دو و چهارچرخ طراحی شده، تنها از دستورات پیمایش سطح پیروی می‌کنند و توانایی پیروی از دستورات ناوبری ارتفاع را ندارند [19, 20]. این امر در مورد ربات‌های تک‌چرخ و یا کره نیز واضح‌تر است [21, 22]. در این طراحی، علاوه بر حرکت چندحالتی، قابلیت پیمایش ارتفاع نیز فراهم می‌گردد. قابل ذکر است که این امر با تغییر ساختار، بدون به‌کارگیری موتور اضافی برای ربات ایجاد می‌شود. به صورت خلاصه نوآوری‌های این طراحی به شرح ذیل است:



شکل ۲. نمای دوبعدی در مدهای حرکتی (الف) چهارچرخ (ب) گذرا (ج) دوچرخ

موقعیت مراکز جرم. در این طراحی، باتری و سایر تجهیزات سنگین ربات در دو قسمت جلو و عقب ربات در امتداد هم جانمایی شده‌اند. در حالتی که دوچرخ ربات به هم نزدیک و یا هم‌محور می‌گردند؛ ربات به ساختار دوچرخ میل می‌کند. به‌طور کلی، ربات‌های دوچرخ به دلیل موقعیت مرکز جرم ناپایدار هستند.

در ساختار دوچرخ، جابه‌جایی به‌گونه‌ای است که مرکز جرم به زیر محور چرخ‌ها منتقل شود. راستای مراکز چرخ در شکل (۳) نشان داده شده است مرکز جرم تجهیزات جلو و عقب نیز با دایره خاکستری مشخص شده است.



شکل ۳. نمایش محور میانی و مراکز جرم

ناوبری ربات سیار و شناسایی سطح زمین

در ربات‌هایی که با سطوح ناشناخته دست و پنجه نرم می‌کنند، امکان تصور یک سطح کاری مشخص وجود ندارد. حس‌گرهای متنوعی برای هدایت ربات سیار

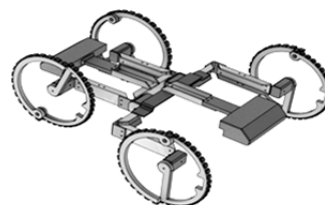
- ۱- فراهم شدن ساختار دوحالتی با حفظ برتری‌های هر یک از ساختارها.
- ۲- افزودن قابلیت پیمایش ارتفاع.
- ۳- به‌سازی طراحی مراکز جرم ربات.
- ۴- کاستن اثر سطح در نوسانات ساختار.

در ادامه این مقاله، در قسمت دوم به اصول طراحی ربات سیار شامل طراحی حرکت و چیدمان اجزا پرداخته می‌شود. ناوبری ربات سیار خودمختار با روش شناسایی سطح زمین در بخش سوم معرفی می‌شود. روابط سینماتیک ساختار در بخش چهارم استخراج می‌شود.

طراحی ساختار ربات سیار با مفصل غیرفعال

ربات‌های چرخ‌دار، دو نمونه متداول دوچرخ و چهارچرخ محرک دارند. در ساختار پیشنهادی، با اضافه کردن یک مفصل غیرفعال به میانه بدنه ربات، تنظیم فاصله محور عقب و جلو و در نتیجه تبدیل ربات چهارچرخ و دوچرخ امکان‌پذیر می‌گردد.

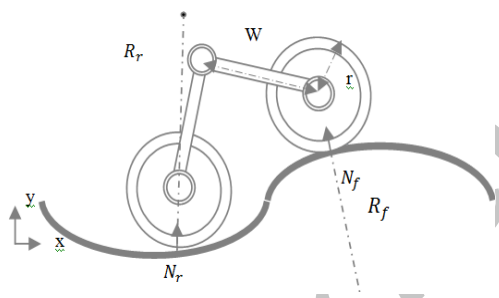
مودهای حرکتی. ساختار پیشنهاد شده که در شکل (۱) در نمای سه‌بعدی تصویر شده است، می‌تواند بدون هیچ تداخل هندسی با نزدیک شدن محورها به ربات دوچرخ بدل شود. این امر نه به دلیل موتور اضافه دیگر، بلکه با کنترل سرعت چرخ‌های فعال عقب و جلو مطابق شکل (۲) صورت می‌گیرد. از سویی دیگر با انتقال مناسب مرکز جرم ربات، عدم واژگونی ربات تضمین می‌شود و ربات دوچرخ واژگون نمی‌شود. در ادامه به تحلیل موارد فوق پرداخته می‌شود.



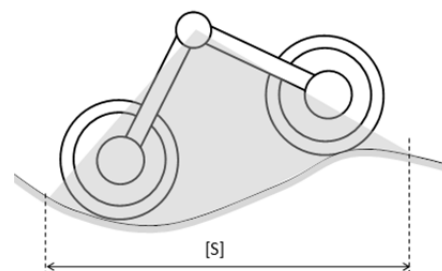
شکل ۱. نمای سه‌بعدی ربات

مورد نیاز کنترلر سینماتیکی را در بازه زمانی فراهم کند. نمای کلی از مسأله سینماتیک به‌همراه پارامترها در شکل (۵) نمایش داده شده و در جدول (۱) شرح داده شده است.

برای توصیف حرکت ربات بر روی مسیر ناهموار، محدودیت‌هایی را که هر چرخ بر حرکت اعمال می‌کند باید در نظر گرفت: ۱- صفحه چرخ‌ها همیشه عمودی باقی خواهد ماند. ۲- در هر حالتی فقط یک نقطه برخورد بین چرخ و زمین وجود دارد. ۳- چرخ‌ها در نقطه تماس سر نمی‌خورند و فقط حرکت چرخشی دارند [23]. با توجه به فرض عدم لغزش، میزان دوران چرخ‌ها ارتباط مستقیمی با مسافت طی شده دارد و می‌توان مقادیر شعاع انحنا و بردار نرمال سطح را یافت. بردار نرمال سطح منجر به یافتن مرکز چرخ می‌شود.



شکل ۵ نمایش پارامترهای هندسی



شکل ۴ نمایش پوشش سطح

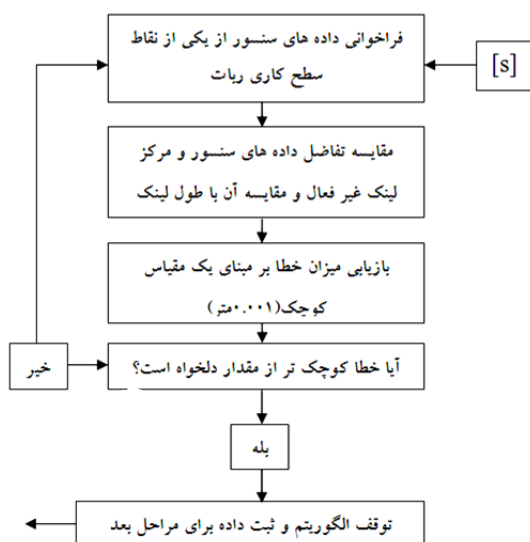
جدول ۱ شرح پارامترهای سینماتیک

پارامتر	توضیحات
R_r	شعاع انحنا چرخ عقب
R_f	شعاع انحنا چرخ جلو
x_r	مؤلفه افقی مرکز چرخ عقب
x_f	مؤلفه افقی مرکز چرخ جلو
y_r	مؤلفه عمودی مرکز چرخ عقب
y_f	مؤلفه عمودی مرکز چرخ جلو
N_{xr}	مؤلفه افقی بردار نرمال چرخ عقب
N_{yr}	مؤلفه عمودی بردار نرمال چرخ عقب
N_{xf}	مؤلفه افقی بردار نرمال چرخ جلو
N_{yf}	مؤلفه عمودی بردار نرمال چرخ جلو

می‌توانند به‌کار گرفته شوند. اگرچه جای‌گزین کردن دوربین با حسگرهای شتاب چرخ‌ها برای یافتن مشخصات حرکتی نظیر موقعیت ربات سیار امکان‌پذیر است، لیکن دریافت اطلاعات سطح با شتاب‌سنج میسر نیست. سامانه بینایی در این پژوهش برای ربات سیار پیشنهاد شده است. دلیل اصلی استفاده از پوشش سطح، این است که ربات در الگوریتم حرکتی به شعاع انحنا و نرمال سطح نیز نیاز دارد. یک دوربین جفت شده (دو دوربین در کنار هم با فاصله‌ای معین) با قانون اختلاف‌منظر به راحتی تمام داده‌های سطح را استخراج می‌کند. هدایت نقطه میانی در مسیر دل‌خواه نیز نیازمند شناسایی سطح است. در مدل‌سازی انجام شده، داده‌های سطح در یک ماتریس به نام ماتریس پوشش (اسکن) [S] ذخیره می‌گردد؛ که در محاسبات به‌کار گرفته می‌شود.

الگوریتم شناسایی سطح. تحلیل حرکت ربات‌های سیار در یک محیط هموار و با فرض عدم لغزش چرخ‌ها، حتی در فضای سه‌بعدی دشوار نیست. در این مقاله، سطح حرکت ناشناخته و ناهموار است و هم‌چنین حرکت مفصل غیرفعال متأثر از دیگر مفاصل فعال تحلیل می‌شود. بسیاری از کنترل‌های ربات‌های سیار در سطح سینماتیک طرح‌ریزی شده‌اند و سرعت‌های ربات ورودی‌های کنترلی هستند. با چشم‌پوشی از نامعینی پارامتری سیستم دینامیکی ربات، فرض می‌گردد که مدل دینامیکی می‌تواند سرعت‌های

مدل‌سازی برابر ۰,۰۰۴ ثانیه در نظر گرفته می‌شود و هر داده جدید هم در این فاصله زمانی برداشت می‌گردد. از جایی که ربات در الگوریتم حرکتی به شعاع انحنا و نرمال سطح هم نیاز دارد، دریافت اطلاعات سطح با شتاب‌سنج میسر نیست. تمام داده‌های سطح توسط یک جفت دوربین با فاصله‌ای معین، با قانون اختلاف منظر به راحتی استخراج می‌شود. در گام سوم سرعت مرکز چرخ‌ها به وسیله مشتق در فضای گسسته به دست می‌آیند. در گام چهارم سرعت مرکز چرخ‌ها بنا بر شعاع انحنا به سرعت دورانی چرخ نسبت به موتورها تبدیل می‌شود.



شکل ۶ الگوریتم یافتن نقطه مرکز چرخ‌ها

در این الگوریتم منظور از توقف در انتهای مراحل، توقف دائمی حرکت نبوده و در واقع الگوریتم در هر بازه کوتاه زمانی و در هر دوره زمانی که ربات در حال پیمایش می‌باشد فعال است. توقف الگوریتم به معنای برآورده شدن قیود و آمادگی برای اخذ ورودی جدید و کاهش خطا است. از آنجا که چرخ‌های ربات در فضای ناهموار و بر روی سطوحی با شعاع‌های انحنای گوناگون حرکت می‌کنند؛ سرعت دورانی مرکز چرخ علاوه بر شعاع چرخ و سرعت خطی مرکز به مشتق

داده‌های حسگر (ماتریس [S]) به دو دسته داده‌های برداشته شده و داده‌های محاسبه شده تقسیم می‌شوند. داده‌های برداشته شده شامل مکان، طول و عرض نقاط یک محدوده از سطح زیر ربات در مکان پیمایش و داده‌های محاسبه شده شامل شعاع انحنا و بردار نرمال سطوح است.

$$s = [R_r \ R_f \ x_r \ x_f \ y_r \ y_f \ N_{xr} \ N_{yr} \ N_{xf} \ N_{yf}] \quad (1)$$

در گام اول، بنا بر موقعیت دلخواه نقطه میانی، مکانی برای مرکز هر کدام از چرخ‌ها یافت می‌شود؛ که این کار با جستجو در درایه‌های بردار حسگر انجام می‌پذیرد؛ به گونه‌ای که قیود هندسی شامل طول میله‌بندی را برآورده کند. شعاع انحنا و نرمال مسیر در هر لحظه با Δ اپراتور مشتق‌گیر در فضای گسسته، قابل محاسبه است.

$$\left\{ \begin{aligned} R_r &\approx \frac{\sqrt{\left(\frac{\Delta y_r}{\Delta x_r} + 1\right)^3}}{\frac{\Delta^2 y_r}{\Delta x_r^2}} \\ R_f &\approx \frac{\sqrt{\left(\frac{\Delta y_f}{\Delta x_f} + 1\right)^3}}{\frac{\Delta^2 y_f}{\Delta x_f^2}} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} N_r &\approx \frac{\left[\frac{-\Delta y_r}{\Delta x_r}, 1\right]^T}{\left|\left[\frac{-\Delta y_r}{\Delta x_r}, 1\right]\right|} \\ N_f &\approx \frac{\left[\frac{-\Delta y_f}{\Delta x_f}, 1\right]^T}{\left|\left[\frac{-\Delta y_f}{\Delta x_f}, 1\right]\right|} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

سپس با استفاده از الگوریتم کلی شکل (۶) نقاط مرکز چرخ‌ها محاسبه می‌شود. این روند در هر فرمان کنترل صورت می‌پذیرد. به دلیل انتقال این داده‌ها از حسگر و وجود یک حلقه داخلی، برای حقیقی ساختن مدل مکترونیک به یک تأخیر زمانی نیاز است که در

دوم سطح (کوژی سطح) و مشتق اول و شعاع انحنای آن نیز وابسته است.

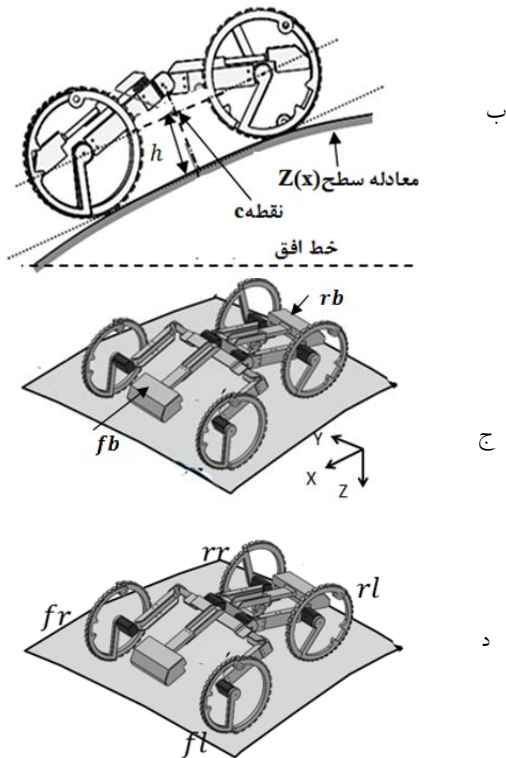
$$\begin{cases} \dot{\alpha} = \frac{R-r}{R} \dot{\theta} & \text{if } \frac{\Delta^2 y}{\Delta x^2} > 0 \\ \dot{\alpha} = \frac{R+r}{R} \dot{\theta} & \text{if } \frac{\Delta^2 y}{\Delta x^2} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

مدل‌سازی سینماتیک ربات سیار. به منظور تحلیل حرکت طرح پیشنهادی ربات سیار، پارامترهای نمایش داده شده در شکل (۷)، در پیوست-الف بیان شده است. مرکز مستطیل بین مراکز چهارچرخ، مبدأ محاسبات قرار گرفته است؛ و تمامی اجزای ربات نسبت به این مبدأ سنجیده می‌شوند. به دلیل موقعیت‌دهی نقطه میانی به عنوان مؤثرترین مکان ربات سیار در عملیاتی نظیر کاوش، سینماتیک معکوس ربات بررسی می‌شود.

سرعت مرکز هندسی چرخ‌ها بر اساس سرعت بردار عمود سطح و سرعت چرخ‌ها با ماتریس ژاکوبین بیان می‌شود.

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{U}_r \\ \dot{U}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_w \\ \dot{N}_s \end{bmatrix} \\ J_{11} \in R^{4 \times 4}, J_{22} \in R^{3 \times 4}, J_{12} \in R^{4 \times 4}, J_{21} \in R^{3 \times 4} \\ \dot{U}_r \in R^{4 \times 1}, \dot{U}_f \in R^{3 \times 1}, \dot{\phi}_w \in R^{4 \times 4}, \dot{N}_s \in R^{4 \times 4} \end{cases}$$

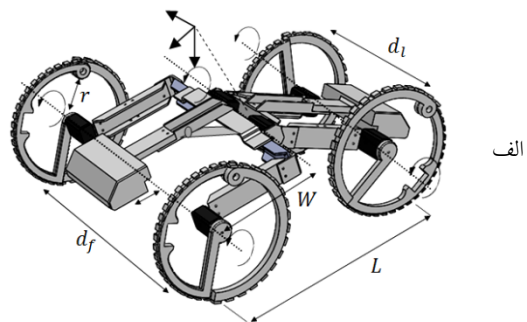
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{U}_r \end{bmatrix} &= [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{\theta}_z \quad \dot{h}]^T \\ \begin{bmatrix} \dot{U}_f \end{bmatrix} &= [\dot{z} \quad \dot{\theta}_x \quad \dot{\theta}_y]^T \\ \dot{\phi}_w &= [\dot{\theta}_{rl} \quad \dot{\theta}_{rl} \quad \dot{\theta}_{fr} \quad \dot{\theta}_{fl}]^T \\ \dot{N}_s &= [\dot{N}_x \quad \dot{N}_y \quad \dot{N}_z \quad \dot{G}_1]^T \end{aligned}$$



شکل ۷ نمایش پارامترهای سینماتیک، (الف) ابعاد محورها، (ب) نمای جانبی صفحه‌ای، (ج) موقعیت پل عقب و جلو، (د) اندیس چهارچرخ

که $\dot{\phi}_w$ بردار سرعت دورانی چرخ‌ها، \dot{N}_s بردار سرعت مشخصات سطح در تماس با چرخ است. \dot{U}_r شامل سرعت‌های مرکز چهار چرخ \dot{x} ، \dot{y} و $\dot{\theta}_z$ سرعت دورانی حول محور z ، به همراه سرعت عمودی نقطه میانی \dot{h} است. \dot{U}_f بردار مشخصات سینماتیک ربات شامل \dot{z} سرعت عمودی سطح گذرنده از مرکز چهارچرخ، دوران حول محور x و دوران حول محور y است. جزئیات درایه‌های ماتریس‌ها در پیوست آورده شده است. در پایان بردار سرعت شش درجه آزادی هر بخش \dot{X}_{T_i} با تلفیق ماتریس‌های ژاکوبین حاصل می‌شود.

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{X}_{T_i} \end{bmatrix} = [J_c + J_{in_i}] \begin{bmatrix} \dot{\phi}_w \\ \dot{N}_s \end{bmatrix} \\ J_c \in R^{6 \times 8}, J_{in_i} \in R^{6 \times 8}, \dot{\phi}_w \in R^{4 \times 1}, \dot{N}_s \in R^{4 \times 1}, \dot{X}_{T_i} \in R^{6 \times 1} \end{cases} \quad (5)$$



کنترل

کنترل‌کننده مختصات مکان هندسی مرکز چرخ‌ها را دریافت می‌کند و با مقادیر لحظه‌ای که از حل سینماتیک به دست می‌آید، مقایسه می‌کند و در نتیجه پیروی از مسیر مناسب حاصل می‌شود. در این مقاله از کنترلر خطی ساز پس‌خورده استفاده می‌شود. ورودی آن، خطای مکان مسیر ردگیری در لحظه با مقدار دریافت‌شده از مدل سینماتیک می‌باشد؛ و خروجی آن سرعت زاویه‌ای چرخ‌های جلو و عقب است. الگوریتم نرم‌افزار واسط در شکل (۸) با شبیه‌سازی محیط حقیقی تبیین شده است. کنترل‌کننده PID سرعت را بر روی چرخ‌ها کنترل می‌کند. درحالی که سرعت به عنوان سیگنال کنترلی به چرخ‌ها اعمال می‌گردد، حسگرها داده‌های موقعیت را برای کنترل‌کننده به عنوان پس‌خورده می‌فرستند. هم‌چنین در این مقاله، تأخیر مجموعه سخت‌افزار (دوربین) و نرم‌افزار پردازش (الگوریتم) در نظر گرفته شده است.

شبیه‌سازی حرکت ربات

هدف از این طرح، کنترل موقعیت مفصل میانی در فضای کاری ربات سیار است. با کنترل سینماتیک ربات سیار تأثیر ناهمواری سطح، با تنظیم ارتفاع نقطه میانی ربات حذف می‌شود. کنترل ردگیری این نقطه، با هدف موقعیت‌دهی این نقطه مرجع ربات است.

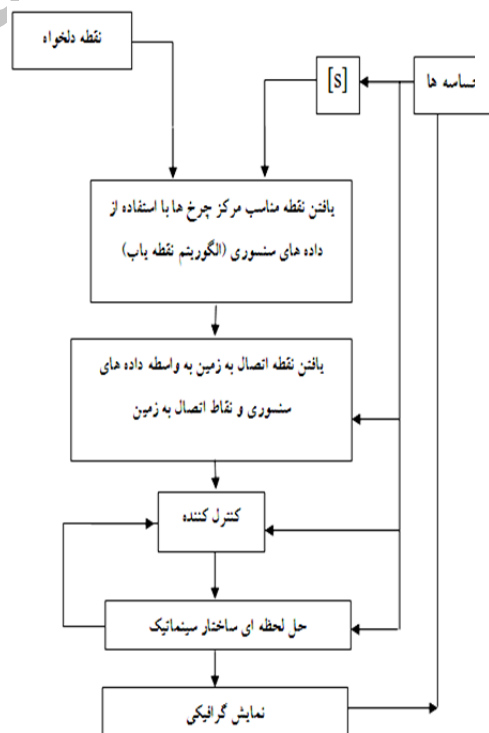
معرفی نمونه مورد بررسی و طرح مسأله. مقادیر عددی متغیرهای سینماتیکی و جرم ربات در شبیه‌سازی در جدول (۲) آورده شده‌است. مطابق الگوریتم، ابتدا محیط اطراف ربات کاوش می‌شود و پس از استخراج داده‌های سطح و محاسبات تکمیلی، در یک ماتریس ذخیره می‌گردد. نقطه میانی حامل دوربین و محل استقرار مرکز چرخ‌ها شناسایی می‌شود و در ادامه سرعت‌های زاویه محاسبه و به موتورهای ربات تحت کنترل PID اعمال می‌شود.

جدول ۲ مقادیر عددی پارامترهای ربات

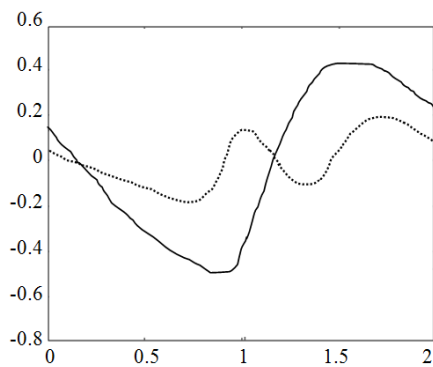
در شبیه‌سازی	
پارامتر	مقدار
شعاع چرخ‌های ربات	۱۰ سانتی متر
طول بازوی عقب و جلو	۵۰ سانتی متر
فاصله چرخ‌های جلو	۶۰ سانتی متر
فاصله چرخ‌های عقب	۳۰ سانتی متر
جرم چرخ‌ها	۰/۵ کیلوگرم
جرم بازوها	۳ کیلوگرم

رفع اثر اغتشاش سطح و پیروی از مسیر هم‌زمان. در آزمون پیش رو سعی شده است تا با در نظر گرفتن مسیر مطلوب مستقیم نشان داده‌شده در شکل (۱۰) تأثیرات سطح محو شود. معادله سطح ناهموار به صورت سینوسی در نظر گرفته می‌شود:

$$Z = 0.05\sin(2x) \quad (1)$$



شکل ۸ برنامه شبیه‌ساز کارکرد ربات



شکل ۱۲ سرعت خطی چرخ عقب

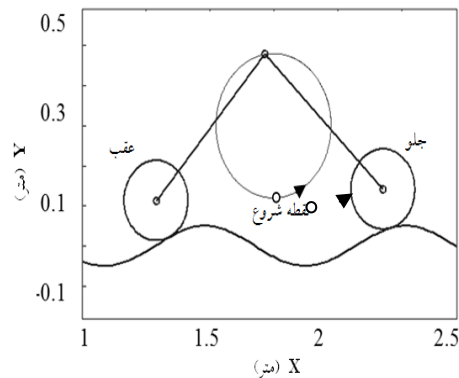
نتیجه‌گیری

به منظور افزایش قابلیت‌های حرکتی ربات سیار، استفاده از بازوان مدولار موازی و سری متصل به بدنه رایج است. در این مقاله حرکت هم‌زمان بدنه ربات و جابه‌جایی بازوان در قالب یک ساختار یک‌پارچه پیشنهاد شد. در این طراحی، محور میانی با قابلیت یک بازوی رباتیکی به عنوان مجری نهایی مطرح است. نقطه میانی در محل یک مفصل غیرفعال است و می‌تواند حامل تجهیزات هدایت و بینایی ربات سیار باشد. این ربات با تعویض مودهای حرکتی خود توانسته است علاوه بر پیروی از فرمان‌های سطحی از فرمان‌های ارتفاع نیز پیروی کند؛ و دو درجه آزادی را بدون افزایش تعداد موتورها برآورده سازد. نکته دیگر توان غلبه بر ناهمواری‌های دامنه بالای سطح است.

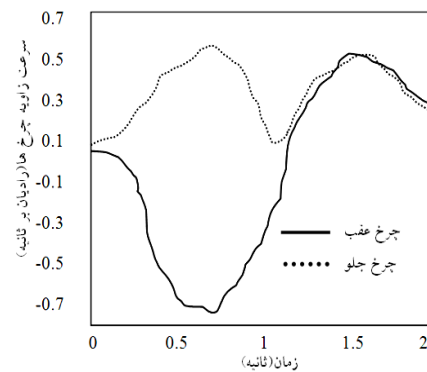
فهرست علائم

- r شعاع چرخ‌های ربات
- R ماتریس دوران کل ربات حول محورهای موازی محور مختصات اصلی در نقطه c
- L فاصله محور چرخ‌های عقب و جلو
- W طول بازوی عقب و جلو (با هم برابر)
- $Z(x)$ تابع ارتفاع سطح در هر نقطه بر مبنای مختصات x
- J_c ماتریس ژاکوبین مرکز چهار چرخ نسبت

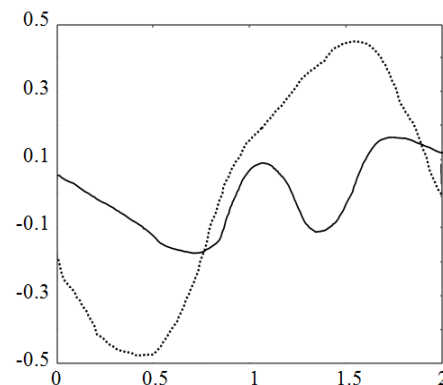
مسیر دایره‌ای به شعاع ۰/۱ متر برای نقطه میانی طراحی شده است که در شکل (۹) به نمایش در آمده است. سرعت دورانی چرخ‌ها در شکل (۱۰) و هم‌چنین سرعت خطی چرخ عقب و جلو به ترتیب در شکل‌های (۱۱ و ۱۲) نشان داده می‌شود.



شکل ۹ مسیر دایره‌ای نقطه میانی



شکل ۱۰ سرعت دورانی چرخ‌ها



شکل ۱۱ سرعت خطی چرخ جلو

زاویه دوران مرکز چرخ‌های ربات حول محور z متصل به ربات	θ_z	به مرجع ثابت	
جابجایی مرکز چهار چرخ ربات نسبت به مرجع لخت در جهت x	x	ماتریس ژاکوبین مرکز جرم پل عقب نسبت به مرکز چهار چرخ	J_{inrb}
جابجایی مرکز چهار چرخ ربات نسبت به مرجع لخت در جهت y	y	ماتریس ژاکوبین مرکز جرم پل جلو نسبت به مرکز چهار چرخ	J_{infb}
جابجایی مرکز چهار چرخ ربات نسبت به مرجع لخت در جهت z	z	ماتریس ژاکوبین مرکز جرم چرخ عقب-راست نسبت به مرکز چهار چرخ	J_{inrr}
ماتریس دوران ربات حول x متصل به ربات موازی محور x	R_x	ماتریس ژاکوبین مرکز جرم چرخ جلو-راست نسبت به مرکز چهار چرخ	J_{infr}
ماتریس دوران ربات حول y متصل به ربات موازی محور y	R_y	ماتریس ژاکوبین مرکز جرم چرخ عقب-چپ نسبت به مرکز چهار چرخ	J_{inrl}
ماتریس دوران ربات حول z متصل به ربات موازی محور z	R_z	ماتریس ژاکوبین مرکز جرم چرخ جلو-چپ نسبت به مرکز چهار چرخ	J_{infl}
ارتفاع مفصل تقاطع دو پل نسبت به مراکز چرخ	H	زاویه دوران مرکز چرخ‌های ربات حول محور x متصل به ربات	θ_x
بردار عمود بر سطح در هر لحظه	N	زاویه دوران مرکز چرخ‌های ربات حول محور y متصل به ربات	θ_y

مراجع

1. Bares, J. and Whittaker, W., "Configuration of an autonomous robot for mars exploration", 1988 Year End Report Autonomous Planetary Rover at Carnegie Mellon, No. 43, (1988).
2. Sharkey, N., "Cassandra or false prophet of doom: AI robots and war", *Intelligent Systems*, IEEE, Vol. 23, No. 4, pp. 14-17, (2008).
3. Corke, P.I., Winstanley, G.J. and Roberts, J.M., "*Modeling and Control of a 3500 tonne Mining Robot*", In *Experimental Robotics*, pp. 262-274, Springer Berlin Heidelberg, (1998).
4. Yi, Y., Mengyin, F., Hao, Z. and Guangming, X., "Control laws design and validation of autonomous mobile robot off-road trajectory tracking based on ADAMS and MATLAB co-simulation platform", *Applications of MATLAB in Science and Engineering*, pp. 353-370. (2011).
5. Kim, Y., Kim, S.H., and Kwak, Y.K., "Dynamic analysis of a nonholonomic two-wheeled inverted pendulum robot", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 44, No. 1, pp. 25-46. (2005).
6. Halme, A., Schonberg, T. and Wang, Y., "Motion control of a spherical mobile robot", *Advanced Motion Control, AMC'96-MIE. IEEE Proceedings, 1996 4th International Workshop*, Vol. 1, pp. 259-264, (1996).
7. Cohen, R., Lipton, M. G., Dai, M. Q. and Benhabib, B., "Conceptual design of a modular robot", *Journal of Mechanical Design*, pp. 117-125, (1992).
8. Shen, W.M., Krivokon, M., Chiu, H., Everist, J., Rubenstein, M. and Venkatesh, J., "Multimode locomotion via Super Bot reconfigurable robots", *Autonomous Robots*, Vol. 20, pp. 165-177. (2006).

9. Endo, G. and Hirose, S., "Study on roller-walker-energy efficiency of roller-walk", *In Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference*, pp. 5050-5055, (2011).
10. Saranli, U., Buehler, M. and Koditschek, D.E., "RHex: A simple and highly mobile hexapod robot", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 20, No. 7, pp. 616-631, (2001).
11. Altendorfer, R., Moore, N., Komsuoglu, H., Buehler, M., Brown Jr, H.B., McMordie, D., ...and Koditschek, D.E., "RHex: a biologically inspired hexapod runner", *Autonomous Robots*, Vol. 11, No. 3, pp. 3207-213, (2001).
12. Moore, E.Z., Campbell, D., Grimminger, F. and Buehler, M., "Reliable stair climbing in the simple hexapod'RHex", *In Robotics and Automation, Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference*, Vol. 3, pp. 2222-2227, (2002).
13. Vadakkepat, P., Peng, X., Quek, B.K. and Lee, T.H., "Evolution of fuzzy behaviors for multi-robotic system. Robotics and Autonomous Systems", Vol. 55, pp. 146-161, (2007).
14. Gaston, J., Raahemifar, K. and Hiscocks, P.A., "Cooperative network of reconfigurable stair-climbing robots", *In Circuits and Systems, ISCAS 2006. Proceedings. IEEE International Symposium*, p. 4, (2006)
15. Dalvand, M.M. and Moghadam, M.M., "Stair climber smart mobile robot (MSRox)", *Autonomous robots*, Vol. 20, No. 1, pp. 3-14, (2006).
16. Ben-Tzvi, P., Goldenberg, A.A. and Zu, J.W., "Design and analysis of a hybrid mobile robot mechanism with compounded locomotion and manipulation capability", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 130, 072302, (2008).
17. Armour, R.H. and Vincent, J.F., "Rolling in nature and robotics", *A review Journal of Bionic Engineering*, Vol. 3, No. 4, pp. 195-208, (2006).
18. O'Grady, R., Groß, R., Christensen, A.L. and Dorigo, M., "Self-assembly strategies in a group of autonomous mobile robots", *Autonomous Robots*, Vol. 28, No. 4, pp. 439-455. (2010).
19. Klancar, G., Matko, D. and Blazic, S., "Mobile robot control on a reference path", *In Intelligent Control, Mediterrean Conference, Proceedings of the IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation*, pp. 1343-1348, (2005).
20. Martins, F.N., Celeste, W.C., Carelli, R., Sarcinelli-Filho, M. and Bastos-Filho, T.F., "An adaptive dynamic controller for autonomous mobile robot trajectory tracking", *Control Engineering Practice*, Vol. 16, pp. 1354-1363, (2008).
21. Zhang, S., Fang, X., Zhou, S. and Du, K. Kinetic, "Model for a Spherical Rolling Robot with Soft Shell in a Beeline Motion", *Journal of Multimedia*, Vol. 9, No.4, pp. 223-229, (2014).
22. Suomela, J. and Ylikorpi, T., "Ball-shaped robots an historical overview and recent developments at TKK", *In Field and service robotics*, pp. 343-354, Springer Berlin Heidelberg, (2006).
23. Murray, D. and Little, J.J., "Using real-time stereo vision for mobile robot navigation", *Autonomous Robots*, Vol. 8, No. 2, pp. 161-171, (2000).

پیوست

$$J_{11} = \begin{bmatrix} r \frac{R_{13}}{4} & r \frac{R_{13}}{4} & r \frac{R_{13}}{4} & r \frac{R_{13}}{4} \\ r \frac{R_{23}}{4} & r \frac{R_{23}}{4} & r \frac{R_{23}}{4} & r \frac{R_{23}}{4} \\ \frac{r}{d_r} & -\frac{r}{d_r} & \frac{r}{d_f} & -\frac{r}{d_f} \\ -rG_3 & -rG_3 & rG_3 & rG_3 \end{bmatrix}$$

که ماتریس ژاکوبین سرعت زاویه‌ای چرخ‌ها $(\dot{\theta}_{rr} \ \dot{\theta}_{r1} \ \dot{\theta}_{fr} \ \dot{\theta}_{\Pi})^T$ و سرعت پارامترهای ربات $(\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta}_z \ \dot{h})^T$ است.

$$J_{12} = \text{zero}(4,4)$$

$$J_{21} = \text{zero}(3,4)$$

$$J_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{\partial G_4}{\partial N_x} & \frac{\partial G_4}{\partial N_y} & \frac{\partial G_4}{\partial N_z} & 0 \\ \frac{\partial G_5}{\partial N_x} & \frac{\partial G_5}{\partial N_y} & \frac{\partial G_5}{\partial N_z} & 0 \end{bmatrix}$$

که ماتریس ژاکوبین سرعت مشخصات نقطه اتصال به سطح $(\dot{N}_x \ \dot{N}_y \ \dot{N}_z \ \dot{G}_1)^T$ و سرعت مشخصات سینماتیک ربات $(\dot{z} \ \dot{\theta}_x \ \dot{\theta}_y)^T$ است.

$$R = R_z \times R_y \times R_x = \begin{bmatrix} c_y c_z & c_z s_y s_x - c_x s_z & c_z s_y c_x + s_x s_z \\ c_y s_z & s_x s_y s_z + c_x c_z & c_x s_y s_z - c_z s_x \\ s_y & c_y s_x & c_y c_x \end{bmatrix}$$

$$c_x = \cos \theta_x, \quad s_x = \sin \theta_x$$

$$\vec{N} = [N_x \ N_y \ N_z]^T$$

که نشانگر بردار نرمال سطح است.

$$\vec{N} = \frac{(\frac{\partial G_6}{\partial x}, \frac{\partial G_6}{\partial y}, \frac{\partial G_6}{\partial z})}{|(\frac{\partial G_6}{\partial x}, \frac{\partial G_6}{\partial y}, \frac{\partial G_6}{\partial z})|}$$

$$J_c = \begin{bmatrix} \frac{R_{13}}{4} & \frac{R_{13}}{4} & \frac{R_{13}}{4} & \frac{R_{13}}{4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{R_{23}}{4} & \frac{R_{23}}{4} & \frac{R_{23}}{4} & \frac{R_{23}}{4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{r}{d_r} & -\frac{r}{d_r} & \frac{r}{d_f} & -\frac{r}{d_f} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 & 0 & 1 \\ & & & & \frac{\partial G_4}{\partial N_x} & \frac{\partial G_4}{\partial N_y} & \frac{\partial G_4}{\partial N_z} & 0 \\ & & & & \frac{\partial G_5}{\partial N_x} & \frac{\partial G_5}{\partial N_y} & \frac{\partial G_5}{\partial N_z} & 0 \end{bmatrix}$$

ژاکوبین مشخصات مرکز ربات نسبت به مشخصات سطح و سرعت های دورانی.

$$J_{in_{r1}} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{2} & -\frac{r}{2} & \frac{r}{2} & \frac{r}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{rr}} & -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{r1}} & -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{fr}} & -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{\Pi}} + 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ژاکوبین چرخ جلو-چپ نسبت به نقطه میانی چرخ‌ها.

$$J_{in_{fr}} = \begin{bmatrix} \frac{-r}{2} & \frac{-r}{2} & r & r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{rr}} & -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{rl}} & -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{fr}} + 1 & -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{fl}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ژاکوبین چرخ جلو-راست نسبت به نقطه میانی چرخ‌ها

$$J_{in_{rr}} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} & -r & -r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{rr}} + 1 & -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{rl}} & -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{fr}} & -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{fl}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ژاکوبین چرخ عقب-راست نسبت به نقطه میانی چرخ

$$J_{in_{rl}} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} & -r & -r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{rr}} & -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{rl}} + 1 & -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{fr}} & -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{fl}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ژاکوبین چرخ عقب-چپ نسبت به نقطه میانی چرخ‌ها

$$J_{in_{fb}} = \begin{bmatrix} \frac{-r}{4} & \frac{-r}{4} & r & r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ r \frac{\partial G_2}{\partial \theta_{rr}} & r \frac{\partial G_2}{\partial \theta_{rl}} & r \frac{\partial G_2}{\partial \theta_{fr}} & r \frac{\partial G_2}{\partial \theta_{fl}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{rr}} & -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{rl}} & -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{fr}} & -\frac{\partial G_1}{\partial \theta_{fl}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{in_{rb}} = \begin{bmatrix} \frac{r}{4} & \frac{r}{4} & -r & -r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ r \frac{\partial G_2}{\partial \theta_{rr}} & r \frac{\partial G_2}{\partial \theta_{rl}} & r \frac{\partial G_2}{\partial \theta_{fr}} & r \frac{\partial G_2}{\partial \theta_{fl}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ r \frac{\partial G_1}{\partial \theta_{rr}} & r \frac{\partial G_1}{\partial \theta_{rl}} & r \frac{\partial G_1}{\partial \theta_{fr}} & r \frac{\partial G_1}{\partial \theta_{fl}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G_1 = \cos^{-1}\left(\frac{L}{2W}\right)$$

$$G_2 = \sqrt{1 - \frac{L^2}{4W^2}}$$

$$G_3 = \frac{L}{4\sqrt{W^2 - \frac{L^2}{4}}}$$

$$G_4 = \cos^{-1}\left(\frac{N_z}{\cos(G_5)}\right)$$

$$G_5 = \tan^{-1}\left(\frac{\sin(\theta_y)N(2) + \cos(\theta_y)N(1)}{N(3)}\right)$$

$$G_6 = Z(x)$$