مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹۴، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ۴۸۱-۴۸۴

مجموعه مقالات کنفرانس ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳ و ۱۴ آبان ۱۳۹۴

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تحلیل پایداری مانیپولاتور راه رونده هگزاپاد روی مسیرهای ناهموار

محمد مهدی عاقلی

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، agheli@modares.ac.ir

چکیده

محیط‌های زیادی وجود دارند که برای انسان غیرقابل دسترس، خطرناک، و یا به سختی قابل دسترس هستند درحالی‌که در آن‌ها نیاز به نوعی مانیپولاسیون از جمله عملیات جستجو و نجات، معاینه، تعمیرات، نگهداری، ماشین‌کاری و غیره وجود دارد. نمونه‌ای از این‌گونه محیط‌ها شامل آوار باقیمانده بعد از زمین لرزه و آتش‌سوزی، بدنه کشتی، تأسیسات پل‌ها، و سکوهای نفتی می‌باشند. به‌طورکلی، این‌گونه مکان‌ها دچار کمبود دید کافی، مشکلات تنفسی، و مسائل ایمنی برای کارگرانی هستند که در این‌گونه عملیات فعالیت می‌کنند. بنابراین استفاده از مانیپولاتورهای متحرک به جای انسان در این‌گونه محیط‌ها مناسب‌تر می باشد. یک ربات برای این‌که بتواند در چنین محیط‌هایی مورد استفاده قرار گیرد باید قابلیت تحرک بالا، مانیپولاسیون بالا، و مهم‌تر از همه قابلیت حفظ تعادل خود تحت شرایط کاری مختلف را داشته باشد. در این مقاله یک ربات راه رونده هگزاپاد بعنوان یک مانیپولاتور متحرک که می‌تواند در این‌گونه محیط‌ها به‌کار گرفته شود معرفی شده و موضوع پایداری آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا معیار پایداری ربات به نام "معیار پایداری نیروی پا" معرفی و سپس صحت و سقم آن در مسیرهای ناهموار مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، معیار معرفی شده با "معیار پایداری نیرو- زاویه" که یکی از معیارهای پایداری شناخته شده است مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که "معیار پایداری نیروی پا" برای سطوح ناهموار قابل استفاده و قابل اطمینان می‌باشد.

کلید واژگان: معیار پایداری نیروی پا، معیار پایداری نیرو- زاویه، ربات راه رونده هگزاپاد

Stability Analysis of a Hexapod Walking Manipulator over Uneven Terrain

Mahdi Agheli

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, nategh@modares.ac.ir

ABSTRACT

Many environments are inaccessible or hazardous for humans in which some sort of manipulation such as search and rescue operations, inspection, repair, maintenance, machining, etc. needs to be done. Examples of such environments include remaining debris after earthquake and fire, ship hulls, bridge installations and oil rigs. Generally, these locations suffer from lack of appropriate visual, respiratory and safety conditions for human workers attempting search and rescue, inspection, repair and maintenance. Therefore, it is more appropriate to use mobile manipulators instead of humans in these environments. The main requirements for a robot to be used in such environments are having high mobility, high manipulability and more importantly having the capability of maintaining its own balance under different working conditions. In this paper, a hexapod walking robot, which can be utilized in such environments, is introduced as a mobile manipulator and investigated in terms of stability. First, a stability criterion called "Foot Force Stability Margin" is introduced and then verified over uneven terrain. To do so, the introduced criterion was compared with the well-known "Force Angle Stability Margin". Results showed that "Foot Force Stability Margin" is applicable and reliable over uneven terrain.

Keywords: Hexapod walking robot, Foot Force Stability Margin, Force Angle Stability Margin.

۱- مقدمه

محیط‌های زیادی وجود دارند که در آن‌ها نیاز به نوعی مانیپولاسیون وجود دارد اما برای انسان غیرقابل دسترس، خطرناک، و یا به سختی قابل دسترس هستند. نمونه ای از این‌گونه محیط‌ها شامل آوار باقی‌مانده بعد از زمین لرزه و آتش‌سوزی، بدنه کشتی، تأسیسات پل‌ها، و سکوهای نفتی می‌باشند. به‌طورکلی، این‌گونه مکان‌ها دچار کمبود دید کافی، مشکلات تنفسی و مسائل ایمنی برای کارگرانی هستند که در عملیاتی مانند جستجو و نجات، تعمیرات، بازبینی و نگهداری فعالیت می‌کنند. به‌عنوان مثال، نمونه‌ای از جوش‌کاری داخل یک لوله نازک دراز در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است. بنابراین استفاده از ربات‌ها به جای انسان در این‌گونه محیط‌ها مناسب تر می‌باشد.

تابه‌حال راه‌حل‌های زیادی برای این امر ارائه شده است که می‌تواند برای محیط‌های خیلی محدود مورد استفاده قرار بگیرد. از جمله این راه‌حل‌ها می‌توان به استفاده از ربات در زدایش بدنه [۱]، معاینه و بررسی پل‌ها [۲]، معاینه و عیب‌یابی لوله‌ها [۳]، مخازن [۴]، و مجاری فاضلاب [۵] نام برد. همچنین تلاش‌هایی در راستای معاینه، تعمیرات و نگهداری اتوماتیک در اروپا انجام شده است [۶،۷]. با این وجود این سیستم‌ها هنوز محدود هستند و به درجات آزادی بیشتری نیاز دارند و قادر نیستند تا مسیرهای خیلی ناهموار را طی کنند. در برخی از عملیات خودکار، از ریل‌هایی برای حرکت ربات استفاده می‌کنند. از این‌رو، نیروی انسانی مجبور است ابتدا به داخل محیطی تاریک و غیر قابل تحمل برود تا ریل‌ها را برای ربات روی مسیر نصب و آماده‌سازی کند. بنابراین، این نوع تکنولوژی نمی‌تواند برای محیط‌های ناهموار، غیرقابل‌دسترس، و تنگ مورد استفاده قرار بگیرد. برای این‌که به‌معنای واقعی کلمه مانیپولاسیون در محیط‌های غیرقابل دسترس و تنگ به‌صورت خودکار انجام شود، نیاز به سیستم‌های متحرکی می‌باشد که علاوه بر حفظ ۶ درجه

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

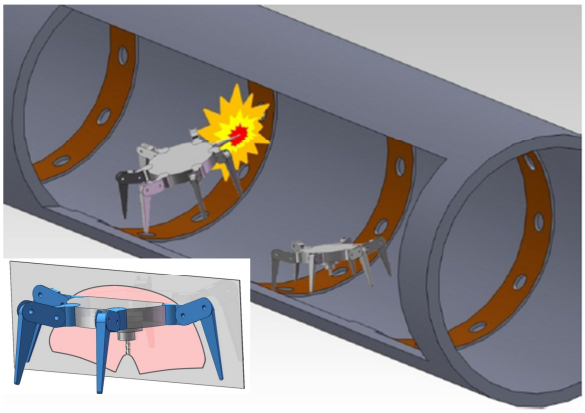
Please cite this article using:

M.M. Agheli, Stability Analysis of a Hexapod Walking Manipulator over Uneven Terrain, *Modares Mechanical Engineering*, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 481-484, 2015 (in Persian فارسی)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.80.0]

شکل ۱ جوش‌کاری داخل یک لوله نازک [۹،۸]



شکل ۲ کاربرد مفهومی هگزاپاد راه‌رونده در جوش‌کاری و تعمیر لوله

آزادی برای انجام عملیات موردنظر قادر باشند از محیط‌های غیرهموار نیز عبور کنند.

با هدف حرکت در محیط‌های ناهموار و عبور از مسیرهای پرمانع، ربات‌های پادار یا راه‌رونده به‌عنوان یک راه‌حل کارامد پدیدار شدند. انواع مختلفی از این ربات‌ها نظیر ربات‌های دوپا، چهارپا، شش‌پا یا همان هگزاپاد، هشت‌پا و غیره ارائه شده‌اند. دراین‌میان، ربات‌های هگزاپاد راه‌رونده با پیکره‌های مختلف و طراحی‌های مختلف برای پا می‌توانند گزینه مناسبی برای استفاده در عملیات نگهداری، تعمیرات، و ماشین‌کاری باشند. ربات‌های هگزاپاد راه‌رونده سادگی و تعادل استاتیکی ذاتی خوبی دارند و همین امر باعث شده است که در عمل این ربات‌ها به‌طور گسترده‌ای در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار بگیرند. از حیث تحرک، در مقایسه با ربات‌های چرخ‌دار، ربات‌های هگزاپاد راه‌رونده بهترند و برای محیط‌های ناهموار و غیرمسطح با چاله‌ها و شیارها و موانع گوناگون عملی‌ترند [۱۰-۱۴]. این تحرک افزوده، ربات‌های هگزاپاد را برای عملیات گوناگونی از جمله جستجو و نجات [۱۶،۱۵]، اکتشافات سیاره‌ای [۱۷]، و بالارفتن از دیوار [۱۸] مناسب می‌کند. ربات‌های هگزاپاد می‌توانند برای کاربردهایی که نیاز به یک سیستم با قابلیت تحرک بالا، مانیپولاسیون در یک فضای کاری بزرگ، انعطاف در پیکره، عبور از محیط‌های ناهموار، و همچنین برای کاربردهایی که نیاز به کار در محیط‌های محدود وجود دارد، مورد استفاده قرار گیرند.

استفاده از ربات هگزاپاد برای عملیات معاینه، تعمیرات، نگهداری و ماشین‌کاری قبلا توسط نویسنده این مقاله ارائه و به چاپ رسیده است [۱۹]. همان‌طور که در طرح مفهومی و شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است، در طول عملیات مانیپولاسیون توسط ربات هگزاپاد راه‌رونده در محیط غیرمسطح و ناهموار، ممکن است لازم باشد که جهت ربات در طول یک مسیر حرکت فضایی خاص نگه‌داشته شود. بدیهی است یکی از ملزومات ربات برای ادامه کار در چنین شرایطی این است که ربات بتواند در طول کار، پایداری خود را نیز حفظ کند. در همین راستا نیاز به یک معیار پایداری برای ربات غیرقابل اجتناب است. معیار پایداری براساس نیروی پا برای اولین بار در سال ۲۰۱۲ توسط نویسنده ارائه شده است [۲۱،۲۰]، اما تابحال صحت و سقم این معیار در مسیرهای غیرهموار و غیرمسطح بررسی نشده است. در این مقاله طی یک فرایند شبیه‌سازی ربات بر روی یک سطح شیب‌دار قرار گرفته و نتایج ارائه شده توسط معیار پایداری نیروی پا با یکی از معروف‌ترین معیارهای پایداری به نام معیار پایداری نیرو- زاویه مقایسه شده است.

در ادامه مقاله و در بخش ۲، مقدمه‌ای بر معیار پایداری نیروی پا آورده شده و در بخش ۳، پایداری ربات روی یک سطح ناهموار با شیب قابل تغییر، بررسی و نتایج شبیه‌سازی جهت صحت‌سنجی با معیار پایداری نیرو- زاویه مقایسه شده است. در بخش ۴، از مقاله نتیجه‌گیری شده است و نهایتا مراجع در بخش ۵ ارائه شده‌اند.

۲- معیار پایداری نیروی پا

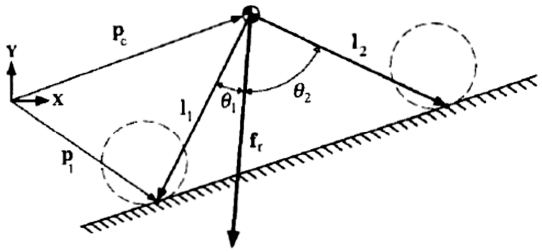
معیار پایداری نیروی پا یک معیار برای سنجش پایداری ربات‌های پادار و چرخ‌دار است که براساس نیروی عمود بر سطح پاها و یا چرخ‌ها کار می‌کند. اساس کار این معیار بر اصل یکنواختی نیرو در پاهای ربات استوار است. به‌عنوان مثال یک ربات چهارپا و یا یک خودرو چهارچرخ زمانی حداکثر پایداری را دارد که نیروی وارد از طرف زمین به پاها و بالعکس برای همه پاها کاملا یکسان باشد، یعنی نیروی کل تکیه‌گاهی ربات به‌طور یکنواخت بین همه پاها تقسیم شده باشد. هرچه این یکنواختی کمتر شود پایداری ربات نیز کمتر می‌شود تا آن‌جا که تنها دو نقطه تکیه‌گاهی یا به‌عبارتی دوپا بیشتر روی زمین نباشد و آن هنگامی است که ربات درحال افتادن و یا به اصطلاح در شرایط ناپایداری است. از این‌رو معیار پایداری نیروی پا بصورت رابطه (۱) تعریف می شود:

$$FFSM = \prod_{i=1}^{n} \frac{f_i}{\overline{f}} \qquad (۱)$$

به‌طوری‌که i تعداد پاهای ربات دارای تماس با زمین، f_i نیروی عمود بر سطح هر پا ، و $\overline{f}$ میانگین کلیه نیروهای عمود بر سطح برای همه پاها می‌باشد. از معادله فوق چنین برمی‌آید که معیار پایداری نیروی پا همواره عددی بین صفر و یک را برمی‌گرداند به‌طوری‌که عدد صفر به‌معنای جدا شدن یک پا یا بیشتر از زمین و عدد ۱ نشان‌دهنده بیشترین پایداری ربات می‌باشد. لازم به ذکر است که عدد صفر تنها در صورتی منجر به ناپایداری ربات می شود که تعداد پاهای دارای تماس با زمین به ۲ و یا کمتر کاهش پیدا کرده باشد.

علاوه‌بر معیار پایداری نیرو، معیارهای متعدد دیگری نیز وجود دارند. دلیل استفاده از معیار نیروی پا به‌جای دیگر معیارهای موجود سادگی استفاده از آن می‌باشد به‌طوری‌که تنها با نیروی پا کار می‌کند درحالی‌که معیارهای دیگر به هندسه ربات نیز مربوط می‌شوند و اندازه‌گیری پایداری را به‌صورت آنلاین دشوار می‌کند. معیار پایداری نیروی پا در سطوح هموار و مسطح ارزیابی شده است اما صحت و سقم آن در سطوح غیرهموار و غیرمسطح بررسی نشده است. برای بررسی این موضوع، معیار پایداری نیروی پا ارائه شده در این مقاله با یکی از معیارهای پایداری شناخته شده موجود به نام

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.80.0]



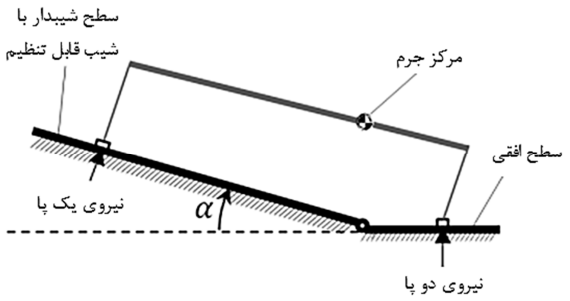
شکل ۳ شماتیکی از معیار پایداری نیرو- زاویه در حالت دوبعدی [۲۲]

معیار پایداری نیرو- زاویه [۲۲] مقایسه شده است.

اساس معیار پایداری نیرو- زاویه که در شکل ۳ نشان داده شده است بدین ترتیب است: ابتدا بردار برایند نیروهای وارده بر مرکز جرم ربات محاسبه می‌شود. سپس با اتصال هر دو پای مجاور به هم محورهای چرخش ربات تعریف می‌شوند به این معنی که مرکز جرم ربات هنگام افتادن حول یکی از این محورها می‌چرخد. بدیهی است که در حالت دوبعدی، به جای محورچرخش، نقطه چرخش وجود دارد که این نقطه چرخش همان نقطه تماس پا با زمین است (شکل ۳). سپس برداری از مرکز جرم و عمود بر این محورها (در حالت دوبعدی به سمت نقطه تماس) منظور می گردد. نهایتا کوچکترین زاویه بین بردار برایند نیروی اولیه با زاویه بردار عمود بر محورها (نقاط در حالت دو بعدی) به‌عنوان معیاری جهت سنجش پایداری ربات در نظر گرفته می شود. برای پایداری ربات این زاویه باید همواره مثبت باشد. زاویه صفر مرز ناپایداری و زاویه منفی ناپایداری را نشان می دهد.

۳- صحت سنجی معیار پایداری نیروی پا روی سطح ناهموار

در این بخش هردو معیار پایداری نیروی پا و معیار پایداری نیرو- زاویه برای ربات شش‌پای ماشین‌کار روی یک سطح ناهموار در فضای نرم افزار متلب شبیه‌سازی شده است. سطح نشان داده شده در شکل ۴ مثالی از سطح غیرمسطح یا ناهموار است که شبیه‌سازی براساس آن صورت می‌گیرد. در این شبیه‌سازی، یک ربات سه‌پا در نظر گرفته شده است که دو پای آن روی سطح افقی و یک پای آن روی سطح شیب‌داری است که شیب آن قابل تنظیم است. شماتیک این ربات سه‌پا در شکل ۴ به‌صورت دوبعدی و از نمای پهلو نشان داده شده است. دلیل در نظر گرفتن سه‌پا به جای شش‌پا بر این فرض استوار است که سه‌پای دیگر ربات در حال حرکت روبه جلو برای قدم زدن فرض شده‌اند. طبق معیار پایداری نیروی پا، ماکزیمم پایداری ربات در شرایطی رخ می دهد که نیروی تمامی پاها همگی با هم برابر باشند. برای این‌که ربات در چنین شرایطی قرار بگیرد باید شیب سطح شیبدار روی صفر درجه تنظیم شود به‌طوری‌که ربات بدون حضور نیرو و گشتاور خارجی روی یک سطح کاملا افقی قرار گرفته باشد. این نقطه شروع شبیه‌سازی است. وقتی زاویه شیب صفحه شیب دار یعنی α مطابق شکل ۴ از صفر افزایش می‌یابد، مرکز جرم ربات جابجا می شود و نیروی بیشتری توسط پاهایی که روی سطح افقی هستند تحمل می‌شود. همزمان با افزایش شیب سطح شیب‌دار پایداری سیستم کاهش یافته تا این‌که نهایتا ربات تعادل یا پایداری خود را از دست می‌دهد. این ناپایداری هنگامی رخ می دهد که نیروی تماس‌پایی که روی سطح شیب‌دار قرار گرفته به صفر می رسد و به عبارتی دیگر همه وزن ربات توسط دوپایی که روی سطح افقی قرار دارند تحمل می شود. در این حالت ربات حول محور چرخشی که دو پای ربات روی سطح افقی را به هم وصل می‌کند دوران می‌کند و به اصطلاح می‌افتد. اگر پاهای ربات طوری قرار

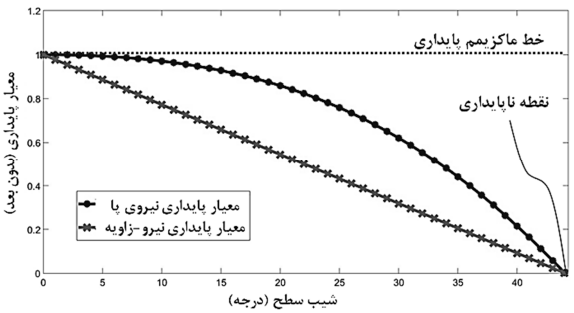


شکل ۴ شماتیک ربات بر روی یک سطح ناصاف

بگیرند که دوپا روی سطح شیب‌دار و یک‌پا روی سطح افقی قرار بگیرد، سناریوی مشابهی اتفاق می افتد با این تفاوت که هنگام ناپایداری، دو پای ربات که روی سطح شیب‌دار قرار دارند از سطح جدا می‌شوند و بعبارتی نیروی تماسی آن‌ها صفر می‌شود و ربات حول نقطه تماس پای‌سوم که روی سطح افقی قرار دارد دوران می‌کند و می‌افتد. شکل ۵ نتایج شبیه‌سازی را برای هر دو معیار پایداری به‌صورت تئوری برای سناریوی ارائه شده نشان می‌دهد. این نتایج از موقعی که سطح شیب دار زاویه صفر دارد ($\alpha = 0$ یعنی ماکزیمم پایداری ربات تا موقعی که زاویه سطح شیب‌دار به‌حدی برسد که ربات بیفتد یعنی مرز ناپایداری نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که معیار پایداری نیرو- زاویه محتاطانه‌تر پایداری ربات را پیش‌بینی می‌کند اما هر دو نمودار با افزایش شیب سطح شیب‌دار روند نزولی یعنی کاهش پایداری را نشان می‌دهند و مهم‌تر این‌که هر دو معیار، نقطه ناپایداری را دقیقا مشابه به هم پیش‌بینی می‌کنند به‌طوری‌که همزمان به نقطه ناپایداری یا همان مرز ناپایداری می‌رسند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ربات هگزاپاد راه‌رونده به‌عنوان یک مانیپولاتور قابل استفاده در عملیاتی از قبیل ماشین‌کاری متحرک در محیط غیرقابل دسترس و خطرناک معرفی شد و معیار پایداری نیروی پا به‌عنوان معیاری برای حفظ پایداری ربات در حین انجام عملیات معرفی و تشریح شد. این معیار جهت صحت‌سنجی با معیار شناخته شده پایداری نیرو- زاویه برای رباتی که روی یک سطح ناهموار قرار دارد به‌صورت تئوری مقایسه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که هر دو معیار روند تغییرات پایداری را یکسان پیش‌بینی می‌کنند ولی معیار پایداری نیرو- زاویه محتاطانه‌تر پایداری ربات را پیش‌بینی می‌کند. همچنین نشان داده شد که هر دو معیار لحظه ناپایداری را کاملا یکسان پیش‌بینی می‌کنند که این صحت عملکرد معیار پایداری نیروی پا را نشان



شکل ۵ مقایسه معیار پایداری نیروی پا با معیار پایداری نیرو- زاویه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.80.0]

می‌دهد. سادگی معیار نیروی پاکار با آن را آسان می‌کند چرا که در عمل تنها با اندازه‌گیری نیروی پای ربات می توان به معیاری برای سنجش پایداری ربات دست یافت و دیگر نیازی به اندازه‌گیری و محاسبه لحظه‌ای هندسه ربات وجود ندارد.

۵- مراجع

[1] A. Iborra, B. Alvarez, F. Ortiz, F. Marin, C. Fernandez, and J. Fernandez-Merono, Service robot for hull-blasting, *in The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON*, Vol. 3, pp. 2178-2183, 2001.

[2] J.-K. Oh, A.-Y. Lee, S. M. Oh, Y. Choi, B.-J. Yi, and H. W. Yang, Design and control of bridge inspection robot system, *in International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 3634-3639, 2007.

[3] C. Choi, B. Park, and S. Jung, \The design and analysis of a feeder pipe inspection robot with an automatic pipe tracking system, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 15, No. 5, pp. 736-745, 2010.

[4] H. Schempf, Neptune: above-ground storage tank inspection robot system, *in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1403{1408, 1994.

[5] A. Nassiraei, Y. Kawamura, A. Ahrary, Y. Mikuriya, and K. Ishii, "Concept and design of a fully autonomous sewer pipe inspection mobile robot "kantaro", *in IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 136-143, 2007.

[6] http://inrotech.com

[7] http://kemppi.com.

[8] http://www.bitterrootirrigationdistrict.net/media-gallery.

[9] http://joyce-road.blogspot.com.

[10] Y. Go, X. Yin, and A. Bowling, A navigable six-legged robot platform, *in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automatio*n, Vol. 5, pp. 5105-5110, 2004.

[11] X. Duan, W. Chen, S. Yu, and J. Liu, Tripod gaits planning and kinematics analysis of a hexapod robot, *in Proceedings of the IEEE International Conference on Control and Automation*, pp. 1850-1855, 2009.

[12] S. Netto, A. Evsuko, and M. S. Dutra, Fuzzy systems to solve inverse kinematics problem in robots control: Application to an hexapod robots' leg, *in Proceedings of the IEEE 6th Brazilian Symposium on Neural Networks*, pp. 150-155, 2000.

[13] G. Jianhua, Design and kinematic simulation for six-dof leg mechanism of hexapod robot, *in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Vol. 2, pp. 625-629, 2006.

[14] S. Fujii, K. Inoue, T. takubo, and T. Arai, Climbing up onto steps for limb mechanism robot asterisk, *in 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, pp. 225-230, 2006.

[15] M. M. Billah, M. Ahmed, and S. Farhana, Walking hexapod robot in disaster recovery : Developing algorithm for terrain negotiation and navigation, *in Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 42, pp. 328-333, 2008.

[16] E. Karalarli, A. Erkmen, and I. Erkmen, Intelligent gait synthesizer for hexapod walking rescue robots, *in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2177-2182, 2004.

[17] M. Massari, P. Massioni, S. Nebuloni, G. Sangiovanni, and F. Bernelli-Zazzera, Realization and control of a prototype of legged rover for planetary exploration, *in Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 863-868, 2005.

[18] S. Wu, L. Wu, and T. Liu, Design of a sliding wall climbing robot with a novel negative adsorption device, *in The 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI),* pp. 97-100, 2011.

[19] Agheli, Mahdi, Long Qu, and Stephen S. Nestinger. SHeRo: Scalable hexapod robot for maintenance, repair, and operations. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,* 30 (5), pp. 478-488, 2014.

[20] Agheli, Mahdi, and Stephen S. Nestinger. Study of the foot force stability margin for multi-legged/wheeled robots under dynamic situations. *IEEE/ASME International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications (MESA),* 2012.

[21] Agheli, M. A. H. D. I., and STEPHEN S. Nestinger. Foot force criterion for robot stability. *Proceedings of the 15th international conference on climbing and walking robots and the support technologies for mobile machines.* Vol. 23. 2012.

[22] Papadopoulos, E. G., and Daniel A. Rey. A new measure of tipover stability margin for mobile manipulators. *In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, 1996.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.80.0]