



مقایسه دو الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط برای بازوهای پایه متحرک

آرمان حسن پور¹، خلیل عالی پور^{2*}، پریسا دائمی³، بهرام تارویردی‌زاده⁴

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، قزوین

2- استادیار، گروه مهندسی سیستم و مکترونیک، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، قزوین

4- استادیار، گروه مهندسی سیستم و مکترونیک، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

*تهران، صندوق پستی 143951374، k.alipour@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 28 خرداد 1393

پذیرش: 04 مرداد 1393

ارائه در سایت: 23 مهر 1393

کلید واژگان:

اجتناب از واژگونی برخط

پایداری بازوی پایه متحرک

معیار پایداری گشتاور-ارتفاع

منطق فازی

معیار نیرو-زاویه

در این مقاله، جهت اجتناب از واژگونی برخط بازوی پایه متحرک، الگوریتمی هوشمند و نوین با در نظر گرفتن تعاملات بین بازو و پایه متحرک ارائه شده است. در این راستا از معیار پایداری گشتاور-ارتفاع به عنوان سنج پایداری سیستم و یک تابع نمو معیار پایداری به منظور یافتن مشخصه‌های حرکتی موثر در وقوع ناپایداری در هر لحظه، استفاده شده است. سپس جهت بهبود مناسب پایداری سیستم از منطق فازی بهره برده شده است. الگوریتم پیشنهادی با یک الگوریتم پیشین، که جهت اجتناب از واژگونی برخط بازوی پایه متحرک به کمک معیار پایداری نیرو-زاویه ارائه شده، تحلیل و مقایسه شده است. هر دو الگوریتم بر روی یک سیستم یکسان از لحاظ ابعاد و شرایط فیزیکی، شبیه‌سازی و عملکرد آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در شبیه‌سازی ابتدا سینماتیک و دینامیک حرکت برای بازوی پایه متحرک مورد نظر، با استفاده از روش نیوتن-اولی در نرم‌افزار میپل 16 استخراج شده سپس مدل استخراج شده برای سیستم، توسط جعبه‌ابزار سیم‌مکانیک نرم‌افزار متلب صحنه‌گذاری می‌شود. سپس در یک مانور که قسمتی از مسیر ناپایدار است، میزان کارایی الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط پیشنهادی تحلیل و با الگوریتم پیشین مقایسه شده است. همچنین، عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حضور برخی اغتشاشات محیطی مورد بررسی قرار گرفته است.

A Comparison of Two Online Tip-over Prevention Algorithms for Wheeled Mobile Manipulators

Arman Hasanpour¹, Khalil Alipour^{2*}, Parisa Daemy³, Bahram Tarverdizadeh⁴

1- Department of Mechatronics Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

2- Department of Mechatronics, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Department of Mechatronics, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

4- Department of Mechatronics Engineering, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

*P.O.B. 143951374 Tehran, Iran. k.alipour@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 18 June 2014
Accepted 26 July 2014
Available Online 15 October 2014

Keywords:

Online Tip-Over Prevention
Wheeled Mobile Manipulator Stability
Moment-Height Stability
Fuzzy Logic
Forces-Angle Measure

ABSTRACT

In this article, a novel intelligent online tip-over avoidance algorithm is presented considering the interactions between the mobile base and manipulator arm. To this end, the newly suggested dynamic stability margin measure named Moment-Height-Stability (MHS) is adopted. Additionally, a function representing the increment of postural stability margin metric is defined based on MHS. The system dynamic equilibrium is then enhanced using a fuzzy logic approach. The response of the suggested method of this paper is compared with that of a previously Force-Angle based proposed method considering a planar mobile manipulator. First, the dynamics of the robot is derived using Newton-Euler method via MAPLE 16 and is verified through the model provided in SimMechanics toolbox of Simulink. The efficiency of the suggested method is illustrated in comparison to the previous one on a destabilizing robot path. Besides, the performance of the proposed method of the present study is investigated in the presence of external disturbances. The obtained simulation results reveal the effectiveness of the performance of the suggested technique for stability improvement of wheeled mobile manipulators, once unexpected disturbing situations are encountered.

1- مقدمه

این سیستم‌ها مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [1-3]. متحرک بودن پایه ربات باعث شده تا ربات‌های پایه متحرک نسبت به ربات‌های پایه ثابت دارای محدوده عملکرد وسیع‌تری باشند. این ربات‌ها در محیط‌های

یک گروه مهم از ربات‌ها، بازوهای پایه متحرک هستند که دربردارنده یک یا چند بازوی نصب شده بر روی خودروی متحرک هستند و مدل‌سازی و کنترل

شبهه‌سازی‌های انجام شده بر روی ربات متحرک JPL SRR در یک زمین ناهموار پیاده‌سازی شده است. مقداری و همکاری با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با به‌کار بردن معیار نیروی عمودی وارد بر تایر⁴ و مسیر حرکتی از پیش تعیین شده برای خودرو و مجری نهایی، اقدام به پایدارسازی ربات متحرک نموده‌اند. در این پژوهش، شتاب زاویه‌ای میله‌ی افزونه توسط الگوریتم ژنتیک مشخص شده است [13]. نادری و غفوری با استفاده از شتاب زاویه‌ای بهینه بازوها و به کمک شبکه عصبی، پایداری بازوی متحرک در حال واژگونی را جبران‌سازی کرده‌اند و در اجرای این روند از معیار پایداری نیروی عمودی تکیه‌گاه‌ها بهره برده‌اند [14]. موسویان و حسینی روشی برای پایدارسازی حرکت ربات درحالی که مسیر مجری نهایی مشخص است ارائه کرده‌اند که جهت حفظ پایداری از سیستم ترکیبی جدیدی که از افزودن یک مکانیزم موازی فضایی بین پایه متحرک و بازوی فعال ربات بهره جسته‌اند [16, 15]. لیانگ هی، الگوریتمی جهت اجتناب از واژگونی یک بازوی پایه متحرک ماژولار⁵ ارائه کرد که برای این منظور از گشتاورهای ایجاد شده توسط مرکز جرم بازوی پایه متحرک استفاده نمود. همچنین، در هر لحظه با بررسی اینکه نیروهای عکس‌العمل چرخ‌ها به زمین، درون چندضلعی استقرار قرار دارند، با متعادل نمودن این نیروهای عکس‌العمل، پایدارسازی بازوی متحرک را تضمین نمود [17].

در این مقاله، راه کار جدیدی به منظور اجتناب برخط از وقوع ناپایداری بازوی پایه متحرک ارائه شده است که برای تمامی ربات‌های پایه متحرک قابل تمهید می‌دهد. از سویی در الگوریتم پیشنهادی نیاز به اضافه نمودن سخت‌افزار اضافی یا تغییر در ساختار مکانیزم ربات نیست. همچنین، این الگوریتم برای مسیری خاص و از پیش تعریف شده نیست، بلکه طراحی مسیر بین دو نقطه دلخواه ارائه شده است. در الگوریتم پیشنهادی، میزان تاثیر تغییرات تک تک درجات آزادی سیستم و مشتقات آن‌ها بر پایداری بازوی پایه متحرک به‌وسیله یک تابع نمو معیار پایداری بررسی می‌شود. سپس، توسط منطق فازی اندازه و جهت مناسب تغییرات این مشخصه‌های حرکتی درجات آزادی در جهت بهبود پایداری سیستم تعیین می‌شود. از سویی عملکرد الگوریتم پیشنهادی با یک الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط ارائه شده توسط ری و پادوپولوس [4] مقایسه و تحلیل می‌شود. در این راستا، پس از بررسی اجمالی دو معیار پایداری گشتاور-ارتفاع و نیرو-زاویه، الگوریتم اجتناب از واژگونی ارائه شده و الگوریتم پیشین به‌طور کامل توضیح داده شده‌اند. سپس، در بخش شبهه‌سازی ابتدا معادلات دینامیکی یک بازوی پایه متحرک سه میله‌ای صلب استخراج شده و به منظور صحت‌گذاری مدل ریاضی استخراج شده، مدل دینامیکی بازوی پایه متحرک به کمک جعبه‌ابزار سیم‌مکانیک⁶ نرم‌افزار متلب شبهه‌سازی شده است. الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم پیشین بر روی سیستم مورد نظر شبهه‌سازی و کارایی الگوریتم پیشنهادی اثبات شده است.

2- پیش‌بینی واژگونی

از دست دادن تعادل دینامیکی ربات پایه متحرک از اهمیت فراوانی برخوردار است. بنابراین، پیش‌بینی ناپایداری و اجتناب از واژگونی در ربات‌های پایه متحرک و پایدارسازی آن‌ها بسیار مهم است. تلاش‌های مختلفی در این زمینه صورت گرفته و معیارهای دینامیکی مختلفی در خصوص ارزیابی

زیرآب، روی زمین و در هوا کاربردهای متفاوتی دارند و می‌توانند در محیط‌های سخت و خطرناک جهت اکتشاف، جابه‌جایی بار و دستکاری در کاربردهایی مانند جنگل‌داری، آتش‌نشانی، بهره‌برداری معادن و کاربری‌های نظامی استفاده شوند. واژگونی در بازوهای متحرک که به‌علت عوارض زمین یا حرکت بر روی سطوح شیب‌دار یا به‌علت تحمیل نیروهای بزرگ ناخواسته رخ می‌دهد، باعث افتادن بازوی متحرک و آسیب دیدن آن یا بار مورد حمل و همچنین از دست دادن مسیر مورد پیمایش می‌شود. بنابراین، از دست دادن تعادل دینامیکی ربات پایه متحرک از اهمیت فراوانی برخوردار است. از این رو پیش‌بینی ناپایداری و اجتناب از واژگونی در ربات‌های پایه متحرک و پایدارسازی آن‌ها بسیار مهم است.

تلاش‌های مختلفی در این زمینه صورت گرفته است و معیارهای دینامیکی مختلفی در خصوص ارزیابی پایداری دینامیکی ربات‌ها ارائه شده است [4-6]. معیار پایداری نقطه‌ممان صفر¹، برای اولین بار توسط هوانگ و سوگنو برای اجتناب از واژگونی بازوی متحرک به‌کار برده شده است [7]. محدوده پایدار معتبر برای بازوی متحرک براساس معیار نقطه‌ممان صفر استخراج شده است. البته شایان ذکر است که در بازوهای متحرک مخصوصاً در جابه‌جایی اشیاء سنگین، مرکز جرم قابل تغییر است، اما معیار نقطه‌ممان صفر به ارتفاع مرکز جرم حساس نیست. معیار دیگری به‌نام معیار نیرو-زاویه² توسط ری و پادوپولوس ارائه شده است [5] که در این معیار از کمترین زاویه بین بردارهای عمود بر محورهای واژگونی و تصویر بردار نیروی برآیند در صفحه عمود بر محورهای واژگونی با فرض سرعت‌های کم استفاده شده است. اخیراً، یک سنجه موثر توسط موسویان و عالی‌پور به‌نام معیار پایداری گشتاور-ارتفاع³ پیشنهاد شده است [8]. این معیار بر پایه گشتاورهای پایداری و ناپایداری وارد شده به پایه متحرکی که باعث جابه‌جایی سیستم می‌شود است. همچنین، این معیار با معیارهای دیگری از قبیل صفحه تعادل-انرژی، نیرو-زاویه [9] و نقطه‌ممان صفر مقایسه شده است و کارایی معیار گشتاور-ارتفاع براساس شبهه‌سازی‌های کامپیوتری نشان داده شده است. بر این مبنای، در این مقاله از این معیار، به‌عنوان معیار پایداری بازوی پایه متحرک بهره برده‌ایم.

اگرچه تاکنون پژوهش‌های مختلفی در خصوص ارائه معیارهای پایداری انجام شده است، ولی پژوهش‌های بسیار کمی بر روی مساله اجتناب به‌هنگام از وقوع ناپایداری صورت گرفته است. به‌عنوان نمونه، ری و پادوپولوس با استفاده از معیار نیرو-زاویه، استراتژی جهت اجتناب بلادرنگ از واژگونی پیشنهاد نموده‌اند [4]. آن‌ها با برگرداندن بازو به وضعیت اولیه و استفاده از عملگرهای خودروی متحرک بهبود پایداری دینامیکی را تامین نموده و همچنین روشی جهت تخمین زمان باقی‌مانده تا واژگونی نیز ارائه کرده‌اند. لی و لیو با بهره‌گیری از یک منطق فازی برخط و یک کنترلر تطبیقی پایدار، الگوریتمی جهت ممانعت از واژگونی ربات متحرک، با تضمین عدم تاثیرگذاری روی مسیر حرکت مجری نهایی را مورد بررسی قرار دادند [10]. غفاری، مقداری و همکاران، جهت اجتناب بلادرنگ از واژگونی و کنترل مسیر حرکت از پیش تعیین شده، الگوریتمی مبتنی بر منطق فازی و کنترلر عصبی-فازی تطبیقی پیشنهاد نمودند [11]. ایگنما و همکارانش یک روش بر پایه کنترل تعلق فعال ارائه کرده‌اند [12]. در این مطالعه از روابط سینماتیکی با تغییر در هندسه ربات جهت پایداری خودرو استفاده شده است. سپس، نتایج

4- Zero tire upward force
5- Modular
6- SimhMechanics

1- Zero-moment point
2- Force-angle
3- Moment-height stability

$$\lambda = \begin{cases} -1 & \text{اگر } \min(\alpha_i) > 0 \\ +1 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}, i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (5)$$

معیار پایداری α به صورت رابطه (6) می‌تواند نرمالایز شود:

$$\hat{\alpha} = \frac{(h_{CM})^\lambda \cdot \min(\alpha_i)}{(h_{CM})^\lambda_{nom} \cdot \min(\alpha_i)_{nom}}, i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (6)$$

که $\hat{\alpha}$ نشان‌دهنده حاشیه پایداری دینامیکی نرمالایز شده و زیرنویس nom به مقدار اسمی متناظر ارجاع می‌شود. در این مقاله مقدار اسمی $\hat{\alpha}$ برابر با مقدار آن در پایدارترین وضعیت سیستم در نظر گرفته می‌شود.

2-2- معیار پایداری نیرو-زاویه

معیار پایداری نیرو-زاویه از هندسه کامل ربات و محورهای واژگونی حاصل از نقاط اتکای بازوی پایه متحرک بر روی زمین (چندضلعی استقرار) بهره کامل می‌برد و حالت سه‌بعدی آن در شکل 2 نشان داده شده است [5,4].

این معیار کلیه نیروها و گشتاورهای وارده به پایه متحرک از جمله اینرسی، گرانشی، نیروی مبادله شده بین بازو و پایه متحرک و اغتشاشات خارجی را به صورت یک بردار نیروی \vec{F}_R روی مرکز ثقل پایه متحرک مدل می‌کند. مولفه‌های این نیرو در صفحات عمود بر محور واژگونی (\vec{f}_i^*) با بردارهای که بر محور واژگونی عمودند و از مرکز ثقل می‌گذرند (\vec{a}_i) زوایای λ_i را تشکیل می‌دهند. حال این معیار را برای هر لبه واژگونی می‌توان به صورت رابطه (7) تعریف کرد.

$$\beta_i = \lambda_i \|\vec{f}_R^*\| \quad (7)$$

در شکل 2 \vec{p}_i بردار موقعیت نقاط تماس و \vec{p}_c بردار موقعیت مرکز جرم سیستم است. از رابطه (8) بردار محورهای واژگونی (\vec{a}_i) به دست می‌آید.

$$\vec{a}_i = \frac{\vec{p}_{i+1} - \vec{p}_i}{|\vec{p}_{i+1} - \vec{p}_i|}, i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (8)$$

و بردار گذرنده از مرکز جرم و عمود بر محور واژگونی (\vec{a}_i) به صورت رابطه (9) تعریف می‌شود.

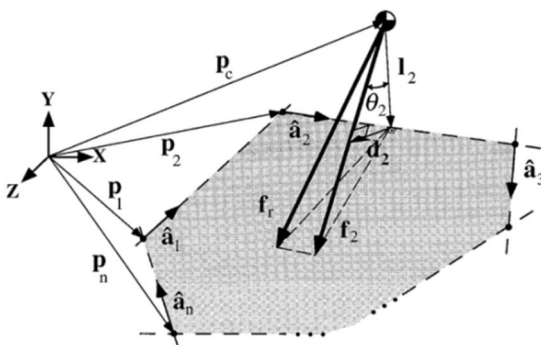
$$l_i = (1 - \vec{a}_i \vec{a}_i^T) (\vec{p}_{i+1} - \vec{p}_c) \quad (9)$$

که در آن \vec{a}_i بردار یکه محورهای واژگونی است. نیروها و ممان‌های عمل‌کننده روی پایه متحرک به صورت رابطه (10) است.

$$\vec{f}_R = \sum (\vec{f}_{grav} + \vec{f}_{manip} + \vec{f}_{dist} - \vec{f}_{inertial}) = -\vec{f}_{external}$$

$$\vec{n}_R = \sum (\vec{n}_{grav} + \vec{n}_{manip} + \vec{n}_{dist} - \vec{n}_{inertial}) = -\vec{n}_{external} \quad (10)$$

در رابطه (10) $\vec{f}_{inertial}$ و $\vec{n}_{inertial}$ به ترتیب نیروها و ممان‌های اینرسی، \vec{f}_{grav} و \vec{n}_{grav} نیرو و ممان‌های ثقلی، \vec{f}_{manip} و \vec{n}_{manip} نیروها و ممان‌های منتقل شده از طرف بازو و \vec{f}_{dist} و \vec{n}_{dist} نیروها و ممان‌های اغتشاشات



شکل 2 حالت سه‌بعدی معیار نیرو-زاویه [4]

پایداری دینامیکی ربات‌ها ارائه شده است. در الگوریتم اجتناب برخط از واژگونی پیشنهادی [18] از معیار پایداری گشتاور-ارتفاع برای بررسی وضعیت پایداری بازوی پایه متحرک استفاده شده در صورتی که در الگوریتم اجتناب برخط از واژگونی پیشین [4] از معیار پایداری نیرو-زاویه بهره برده شده است.

1-2- معیار پایداری گشتاور-ارتفاع

در این تحقیق جهت بررسی پایداری سیستم از معیار پایداری گشتاور-ارتفاع برای بازوی پایه متحرک استفاده شده است. توضیحات مبسوط در خصوص این معیار در مرجع [6] به طور کامل آمده است. در این مقاله به صورت فشرده نحوه محاسبه این معیار بررسی خواهد شد. اولین قدم در خصوص محاسبه این معیار تشکیل چندضلعی استقرار است. چندضلعی استقرار از اتصال دورترین نقاط تماس چرخ با زمین ایجاد می‌شود که در شکل 1 نشان داده شده است.

سپس، نیروها و کوپل‌های وارده به پایه متحرک را محاسبه کرده آنگاه با استفاده از رابطه (1) معیار گشتاور-ارتفاع که با α تعریف شده است، محاسبه می‌شود. این گشتاورها حول لبه‌های $1, 2, \dots, n$ چندضلعی استقرار به ترتیب با نام‌های M_1, M_2, \dots, M_n مشخص شده است.

$$\alpha = \min(\alpha_i), i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

که α_i نشان‌دهنده حاشیه پایداری دینامیکی حول i امین لبه مرزی است که به صورت رابطه (2) محاسبه می‌شود:

$$\alpha_i = (I_{\theta_i}) \sigma_i \cdot (M_i \cdot \vec{a}_i), i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

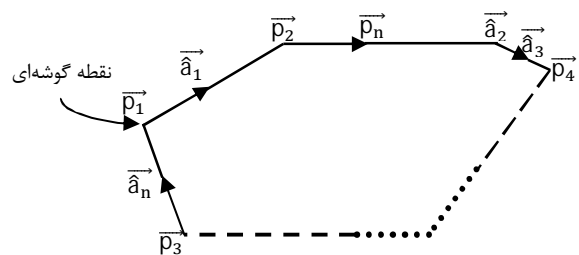
در رابطه (2)، \vec{a}_i بردار واحد برای هر لبه چندضلعی استقرار و I_{θ_i} مشخص‌کننده ممان اینرسی پایه حول i امین لبه مستطیل مرزی است و σ_i به صورت رابطه (3) است:

$$\sigma_i = \begin{cases} +1 & \text{اگر } (M_i \cdot \vec{a}_i) > 0 \\ -1 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}, i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (3)$$

وقتی α مثبت شود سیستم پایدار است و بالعکس مقادیر منفی α نشان‌دهنده این است که ناپایداری واژگونی در حال پیشرفت است. همچنین، پایداری واژگونی بحرانی زمانی اتفاق می‌افتد که α برابر صفر شود. برای بازوی پایه متحرک که ارتفاع مرکز ثقلش می‌تواند با حرکت بازو یا حمل یک بار متغیر، تغییر کند، ناحیه پایداری واژگونی نیز می‌بایست حساس به کاهش پایداری مربوط به افزایش ارتفاع مرکز ثقلش باشد. بدین منظور در معیار گشتاور-ارتفاع جمله ارتفاع مرکز ثقل به روابط اضافه می‌شود که معیار پایداری سیستم به صورت رابطه (4) خواهد بود:

$$\alpha = (h_{CM})^\lambda \cdot \min(\alpha_i), i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (4)$$

که h_{CM} نشان‌دهنده ارتفاع مرکز جرم آنی بازوی پایه متحرک است و λ به صورت رابطه (5) خواهد بود.



شکل 1 چندضلعی استقرار و بردارهای واحد متناظرش

در رابطه (16)، $\hat{\alpha}$ مبین میزان پایداری بازوی پایه متحرک و $\hat{\alpha}$ مبین نرخ تغییرات آن نسبت به زمان است که این سنجه آنی در هر گام زمانی با $\hat{\alpha}$ و $\hat{\alpha}$ تغییر می‌کند [4]. هنگامی که زمان مانده به واژگونی (t_{tip}) کمتر از حد آستانه می‌شود، الگوریتم برخط اجتناب از واژگونی اجرا می‌شود.

3- ممانعت از واژگونی

به منظور ممانعت از واژگونی بازوی پایه متحرک می‌بایست اطلاعات دقیق و جامعی از وضعیت سیستم در هر لحظه در دست باشد در این راستا پیش‌بینی زمان مانده به واژگونی فرصتی جهت اجتناب از واژگونی و پایدارسازی سیستم را می‌دهد.

3-1- الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط ارائه شده

مشخصه‌های حرکتی سیستم مانند موقعیت، سرعت و شتاب بر روی پایداری بازوی پایه متحرک تاثیر بسزایی دارند. از این رو، جهت اجتناب برخط از واژگونی، باید بتوان این مشخصه‌ها را به نحوی تنظیم کرد که باعث بهبود پایداری شوند. ضمناً، میزان تاثیرات این مشخصه‌ها در زمان‌های مختلف بر پایدارسازی سیستم متفاوت است و مشخص کردن مشخصه حرکتی موثرتر بر پایداری سیستم در هر لحظه و اندازه تغییرات آن جهت بهبود بخشیدن پایداری، کار سخت و پیچیده‌ای است.

در رابطه (17) بردار متغیرهای تعمیم یافته سیستم است که n تعداد درجات آزادی بازوی پایه متحرک است.

$$\vec{q} = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T \quad (17)$$

در الگوریتم اجتناب از واژگونی پیشنهادی تلاش شده است تا بتوان میزان تاثیر هر یک از درجات آزادی بازوی پایه متحرک بر پایداری آن را در هر گام زمانی برآورد نمود. به منظور نیل به این هدف، از یک تابع نمو معیار پایداری استفاده شده است. با بهره‌گیری از این تابع می‌توان میزان تاثیرگذاری تغییرات هر یک از درجات آزادی سیستم و مشتقات آن‌ها را بر پایداری سیستم تخمین زد که به صورت رابطه (18) و (19) ارائه می‌شود [18].

$$\Delta \hat{\alpha} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \hat{\alpha}}{\partial q_i} (\Delta q_i) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \hat{\alpha}}{\partial \dot{q}_i} (\Delta \dot{q}_i) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \hat{\alpha}}{\partial \ddot{q}_i} (\Delta \ddot{q}_i) \quad (18)$$

$$\begin{cases} k_{q_i} = \frac{\partial \hat{\alpha}}{\partial q_i} \\ k_{\dot{q}_i} = \frac{\partial \hat{\alpha}}{\partial \dot{q}_i} \\ k_{\ddot{q}_i} = \frac{\partial \hat{\alpha}}{\partial \ddot{q}_i} \end{cases}, \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (19)$$

حال طبق رابطه (19) می‌توان گفت در هر لحظه ضریب هر یک از کمیت‌های حرکتی که بزرگ‌تر باشد، تاثیر آن کمیت در تغییرات $\hat{\alpha}$ بیشتر است و با تغییر دادن آن در جهتی مناسب می‌توان پایداری بازوی پایه متحرک را بهبود بخشید. به عبارتی دیگر، می‌توان میزان حساسیت $\hat{\alpha}$ به تغییرات تک تک مشخصه‌های حرکتی سیستم را تخمین زد.

بنابراین، هنگامی که بازوی پایه متحرک در آستانه واژگونی قرار گیرد، یعنی مقدار عددی $\hat{\alpha}$ کم و به صفر نزدیک شود، با استفاده از تابع نمو معیار پایداری می‌توان مشخصه حرکتی که بیشترین تاثیر در تغییرات $\hat{\alpha}$ را دارد مشخص نمود و آن را به‌گونه‌ای تغییر داد که باعث افزایش $\hat{\alpha}$ و در نتیجه بهبود پایداری سیستم شود. اکنون پس از تشخیص موثرترین مشخصه، می‌بایست میزان افزایش یا کاهش آن در جهتی مناسب به منظور بهبود پایداری سیستم تعیین شود که این عمل توسط منطق فازی انجام شده است.

خارجی عمل‌کننده روی سیستم هستند. از مقادیر \vec{f}_r و \vec{n}_r نیرو و ممان‌های عمل‌کننده بر روی هر محور واژگونی به صورت رابطه (11) به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} \vec{f}_i &= (1 - \hat{\alpha}_i \hat{\alpha}_i^T) \vec{f}_r \\ \vec{n}_i &= (\hat{\alpha}_i \hat{\alpha}_i^T) \vec{n}_r \end{aligned} \quad (11)$$

از آنجا که معیار نیرو-زاویه فقط شامل نیرو است، به جای \vec{n}_i وارده به مرکز جرم یک جفت کوپل نیرو قرار داده می‌شود. مطابق شکل 3 یکی از نیروها از مرکز ثقل سیستم و دیگری از محور واژگونی \vec{a}_i می‌گذرد و اثر نیروی کوپل به صورت رابطه (12) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} \vec{f}_{n_i} &= \frac{\vec{l}_i \times \vec{n}_i}{\|\vec{l}_i\|} \\ \vec{f}_i^* &= \vec{f}_i + \vec{f}_{n_i} \end{aligned} \quad (12)$$

\vec{l}_i بردار یک بردار \vec{a}_i است.

حال اگر \vec{f}_i^* بردار یک نیروی کلی وارده باشد می‌توان زاویه بین \vec{f}_i^* و \vec{a}_i را مطابق رابطه (13) محاسبه نمود.

$$\lambda_i = \sigma_i \cos^{-1}(\vec{f}_i^* \cdot \vec{a}_i), \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (13)$$

که $-\pi \leq \lambda_i \leq \pi$ بوده و علامت آن توسط ضریب σ_i به دست می‌آید (رابطه (14)).

$$\sigma_i = \begin{cases} +1 & (\vec{l}_i \times \vec{f}_i^*) \cdot \vec{a}_i < 0 \\ -1 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (14)$$

اکنون معیار نیرو-زاویه به صورت کلی طبق رابطه (15) به دست می‌آید.

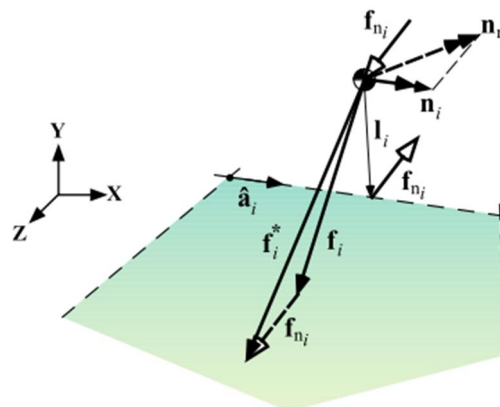
$$\beta = \min(\lambda_i) \|\vec{f}_r\|, \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (15)$$

β حاشیه پایداری است که مقدار مثبت β پایداری و مقدار منفی آن عدم پایداری و در نتیجه واژگونی را نشان می‌دهد. واژگونی زمانی رخ می‌دهد که β برابر صفر شود [4]. β حاشیه پایداری دینامیکی نرمالایز شده توسط مقدار اسمی آن است.

2-3- زمان مانده به واژگونی

به منظور شروع خودکار اجرای الگوریتم برخط اجتناب از واژگونی بازوی پایه متحرک ابتدا باید مدت زمان مانده تا آستانه واژگونی تخمین زده شود. این امر نیازمند داشتن اطلاعات کافی از سیستم است که در این تحقیق از رابطه (16) محاسبه می‌شود.

$$t_{tip} = -\frac{\hat{\alpha}}{\dot{\hat{\alpha}}} \quad (16)$$



شکل 3 نیروی معادل کوپلی، جایگزین ممان \vec{n}_i [4]

3-1-1- سیستم منطق فازی

می‌شود. با توجه به شناخت رفتار پیچیده سیستم از قوانین فازی مختصری بهره برده شده است. در صورت افزایش یا کاهش ورودی‌ها، خروجی‌های منطق فازی نیز به همان مقدار در جهت افزایش یا کاهش تغییر خواهند کرد. در منطق فازی جهت افزایش $\Delta\hat{\alpha}$ بدین گونه عمل شده است که اگر یک ورودی مانند k_{qi} بزرگ و مثبت باشد با ضرب آن در یک عدد بزرگ و مثبت می‌توان به سرعت باعث افزایش $\Delta\hat{\alpha}$ شد (طبق رابطه 18) یا اگر یک ورودی مانند k_{qi} کوچک و منفی باشد، تغییرات شدید آن، مقدار $\Delta\hat{\alpha}$ را سرعت تغییر نمی‌دهد، زیرا میزان اثر آن پارامتر حرکتی در این لحظه بر تغییرات پایداری سیستم اندک است. در نتیجه با ضرب آن در یک عدد منفی و کوچک هم می‌توان باعث افزایش $\Delta\hat{\alpha}$ شده و هم از تغییر ناگهانی این پارامتر که تاثیر چندانی بر پایداری سیستم در این لحظه ندارد، جلوگیری می‌شود.

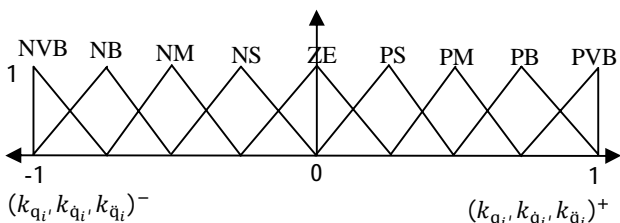
در شکل 5 روند کلی الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط ارائه شده نشان داده شده است.

3-1-2- طراحی مسیر حرکتی بازوی پایه متحرک

سیستم‌های پایه متحرک به ویژه زمانی سودمند است که کار درخواست شده از ربات به گونه‌ای باشد که خارج از فضای کاری بازوی پایه ثابت واقع شود. طراحی مسیر حرکت در ربات‌های پایه متحرک شامل طراحی مسیر حرکت پایه و بازو است که این امر در این تحقیق به صورت جداگانه انجام می‌شود و به موجب اینکه با اجرای الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط باید مکان، سرعت و شتاب در ابتدا و انتهای قطعه‌ای از مسیر مشخص شود، به یک چندجمله‌ای حداقل درجه پنجم به صورت رابطه (20) نیاز است [19].

$$\vec{q}(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (20)$$

استراتژی طراحی مسیر حرکت به این صورت است که در ابتدا موقعیت اولیه و موقعیت هدف مطلوب مشخص است و یک مسیر از ابتدا به انتها برای بازوی پایه متحرک طراحی می‌شود. در حین حرکت، پایداری بازوی پایه متحرک به صورت برخط بررسی می‌شود و در صورتی که در طی مسیر بازوی پایه متحرک در آستانه واژگونی قرار گیرد، الگوریتم اجرا شده و آن را به یک وضعیت جدید و پایدار می‌رساند. سپس، از موقعیت جدید با همان سرعت و شتاب گام حرکتی قبلی، که به منظور پایدار نمودن بازوی پایه متحرک توسط منطق فازی ایجاد شده بود، مسیری جدید به نقطه هدف طراحی می‌شود. آنگاه بازوی پایه متحرک با استفاده از کنترلر مبتنی بر مدل چنان کنترل می‌شود تا مسیر جدید طراحی شده را طی نموده و به نقطه هدف



شکل 4 توابع عضویت مثلثی متغیرهای ورودی

جدول 1 قوانین فازی

مقادیر									ورودی / خروجی
NV	N	N	N	Z	P	P	P	PV	k_{qi}, k_{qi}, k_{qi}
B	B	M	S	E	S	M	B	B	$\Delta q_i, \Delta \dot{q}_i, \Delta \ddot{q}_i$
NV	N	N	N	Z	P	P	P	PV	
B	B	M	S	E	S	M	B	B	

تصمیم‌گیری‌های لازم در خصوص پایداری سیستم مبتنی بر منطق فازی صورت می‌گیرد. با توجه به مطالب بیان شده با استفاده از یک تابع نمو معیار پایداری، میزان تاثیر مشخصه‌های حرکتی سیستم بر تغییرات $\hat{\alpha}$ در هر گام زمانی به صورت یک ضریب محاسبه شده و این ضرایب به عنوان ورودی به منطق فازی فرستاده می‌شوند. خروجی منطق فازی، حرکت گام زمانی بعدی بازوی پایه متحرک را مشخص می‌کند. در سیستم فازی به ازای هر درجه آزادی بازوی پایه متحرک 3 بلوک فازی طراحی شده است که هر کدام تغییرات یکی از مشخصه‌های حرکتی (موقعیت، سرعت و شتاب مفاصل ربات) را تعیین می‌کند. هنگامی که الگوریتم اجرا می‌شود در هر گام زمانی یکی از این 3 بلوک فازی توسط یک انتخابگر، برگزیده می‌شود. سپس، تغییرات گام بعدی مشخصه حرکتی انتخاب شده به وسیله منطق فازی تعیین می‌شود. نحوه عملکرد این انتخابگر به گونه‌ای است که 3 ضریب k_{qi}, k_{qi}, k_{qi} مربوط به هر درجه آزادی سیستم را دریافت می‌کند و هر کدام از ضرایب که بزرگ‌تر باشد (بدون در نظر گرفتن علامت آن) منطق فازی مربوط به آن مشخصه حرکتی فعال می‌شود.

از آنجایی که بازه تغییرات k_{qi}, k_{qi}, k_{qi} نامشخص است و به راحتی نمی‌توان حد بالا و پایین آن را تعیین نمود، به همین دلیل در هر گام زمانی از اجرای الگوریتم این ضرایب با بیشینه مقدار متناظر خودشان نرمالایز شده و به عنوان ورودی به منطق فازی فرستاده می‌شوند. به طور مثال، جهت نرمالایز نمودن ضرایب مشخصه حرکتی موقعیت (k_{qi})، می‌بایست این ضرایب بر بیشینه ضریب از مشخصه‌های حرکتی موقعیت سایر درجات آزادی سیستم تقسیم شود. خروجی منطق فازی تغییرات گام بعدی مشخصه حرکتی انتخاب شده ($\Delta q_{i+1}, \Delta \dot{q}_{i+1}, \Delta \ddot{q}_{i+1}$) را در جهت بهبود پایداری تعیین می‌کند. سپس، با استفاده از انتگرال‌گیری و مشتق‌گیری تغییرات گام بعدی سایر مشخصه‌های حرکتی آن درجه آزادی محاسبه می‌شود. در نهایت با افزودن خروجی منطق فازی به مشخصه‌های حرکتی کنونی بازوی پایه متحرک وضعیت مطلوب بعدی تعیین شده و به کنترلر بر مبنای مدل¹ سیستم فرستاده می‌شود. این روند، تا زمانی که بازوی پایه متحرک در یک ناحیه پایدار قرار گیرد، ادامه می‌یابد. در صورت افزایش $\hat{\alpha}$ و رسیدن آن به آستانه پایداری، اجرای الگوریتم متوقف شده و از وضعیت کنونی بازوی پایه متحرک، مسیر جدیدی به سوی نقطه هدف طراحی می‌شود و بازوی پایه متحرک در مسیر جدید با سرعت و شتاب قبلی شروع به حرکت می‌کند.

در این تحقیق برای سیستم فازی از استلزام ممدانی و توابع عضویت مثلثی استفاده شده است. خروجی‌های سیستم منطق فازی، تغییرات مشخصه‌های حرکتی بازوی پایه متحرک هستند. مطابق شکل 4، برای ورودی و خروجی‌های مجموعه فازی 9 مرکز فازی تعریف شده است. به عنوان مثال منفی خیلی بزرگ (NVB)، منفی بزرگ (NB)، منفی متوسط (NM)، منفی کوچک (NS)، صفر (ZE)، مثبت کوچک (PS)، مثبت متوسط (PM)، مثبت بزرگ (PB) و مثبت خیلی بزرگ (PVB). برای پیاده‌سازی منطق فازی از قانون 9 استفاده شده که قوانین فازی در جدول 1 آمده است. ورودی‌های سیستم فازی k_{qi}, k_{qi}, k_{qi} و خروجی‌های تولید شده توسط سیستم منطق فازی $\Delta q_i, \Delta \dot{q}_i, \Delta \ddot{q}_i$ است. ایده اصلی واسط منطق فازی بسیار ساده است. به طوری که برای افزایش $\Delta\hat{\alpha}$ در رابطه (18) با تنظیم تغییرات مشخصه‌های بازوی پایه متحرک و ایجاد حرکت‌های خودکار، موجب پایداری برخط آن

1- Model-based algorithm

بر مدل برای حل مساله کنترل سیستم پیچیده‌ای چون رابطه (21) حل شده است. این قانون، براساس نگرش خطی‌سازی پسخوراند، گشتاور کنترلی $\vec{\tau}$ را به صورت رابطه (22) ارائه می‌کند:

$$\vec{\tau} = \underline{\zeta} \vec{\tau}' + \vec{\gamma} \quad (22)$$

و به صورت روابط (23) تا (26) در نظر گرفته شده است:

$$\underline{\zeta} = \underline{M}(\vec{q}) \quad (23)$$

$$\vec{\gamma} = \vec{V}(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) + \vec{G}(\vec{q}) \quad (24)$$

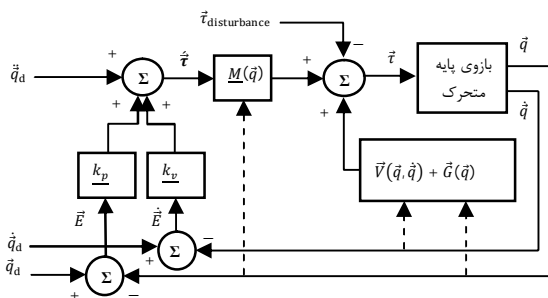
$$\vec{\tau}' = \ddot{\vec{q}}_{\text{desire}} + k_v \dot{\vec{E}} + k_p \vec{E} \quad (25)$$

$$\vec{E} = \vec{q}_{\text{desire}} - \vec{q} \quad (26)$$

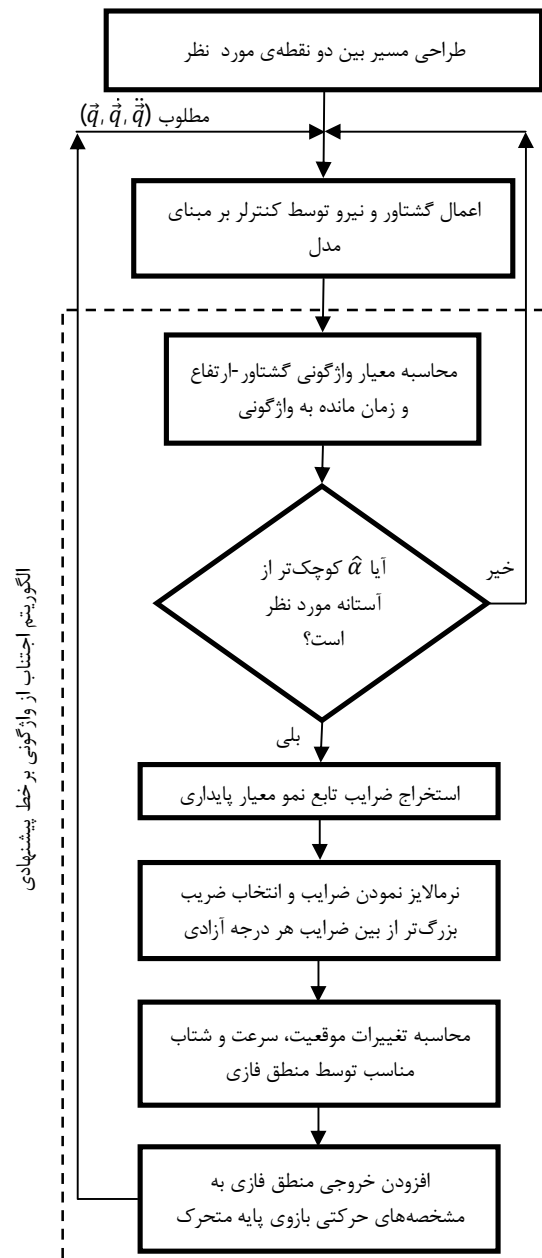
با انتخاب قطری ماتریس‌های k_p و k_v معادلات خطا (\vec{E}) دیکوپله شده و می‌توان خطای مربوط به هر یک از متغیرها را به طور مستقل به دست آورد [20]. نمای کلی از کنترلر مبتنی بر مدل در شکل 6 آورده شده است.

3-2- الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط پیشین

در زمینه پایداری‌سازی برخط بازوهای پایه متحرک کارهای اندکی انجام شده است. یکی از این کارها الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط ری و پاپادوپولوس [4] است که به منظور اجتناب از واژگونی برخط از یک استراتژی دو مرحله‌ای بهره جسته است. این الگوریتم با در نظر گرفتن زمان مانده به واژگونی و به کمک معیار پایداری نیرو-زاویه طی دو مرحله از واژگونی بازوی پایه متحرک جلوگیری کرده و آن را به سمت پایداری سوق می‌دهد. مراحل اجرای این الگوریتم بدین ترتیب است که هنگامی که بازوی پایه متحرک در آستانه واژگونی قرار می‌گیرد، ابتدا با بازگشت بازو به پیکربندی اولیه (وضعیتی است که در آن، یک گشتاور ناچیز از بازو به پایه متحرک اعمال می‌شود) و سپس به وسیله عملگرهای حرکتی پایه متحرک هر گشتاور ناپایدار ساز دینامیکی وارده به آن را به آرامی جبران می‌کند. عمل اول برآیند نیروها را از محور واژگونی دور و به سمت داخل چندضلعی استقرار هدایت می‌کند. در حالی که عمل دوم به وسیله عملگرهای حرکتی پایه متحرک، پایداری را بهبود می‌بخشد. در حقیقت، عمل دوم می‌تواند به عنوان یک قانون بازخورد در نظر گرفته شده و پیاده‌سازی شود. بدین منظور گشتاور ناپایدار ساز اعمال شده از سوی بازو به پایه متحرک در هنگام بازگرداندن بازو به پیکربندی اولیه محاسبه شده و از آن برای استخراج دستورات عملگر حرکتی پایه متحرک استفاده می‌شود. اگر چرخ‌های پایه متحرک، پاها یا شنی‌ها قادر به اعمال بارهای جبرانی لازم در دو جهت و اندازه باشند، اجرای این مانور می‌تواند پایداری را به طور کامل تضمین کند [4]. در شکل 7 روند کلی اجرای الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط پیشین نشان داده شده است.



شکل 6 سیستم کنترل وابسته به مدل برای بازوی پایه متحرک [19]



شکل 5 فلوجارت استراتژی الگوریتم پیشنهادی ممانعت از واژگونی بازوی متحرک

برسد. بنابراین، الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط ارائه شده نه تنها باعث پایداری بازوی پایه متحرک در طی مسیر می‌شود، بلکه در نهایت آن را به نقطه هدف مد نظر یا نزدیکی‌های آن (اگر بازوی پایه متحرک در نقطه هدف دارای وضعیت ناپایدار باشد) می‌رساند.

3-1-1-3- قانون کنترلی مبتنی بر مدل

پس از استخراج معادلات بازو، معادله‌های دینامیکی سیستم به صورت رابطه (21) به دست می‌آید:

$$\vec{\tau} = \underline{M}(\vec{q}) \ddot{\vec{q}} + \vec{V}(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) + \vec{G}(\vec{q}) \quad (21)$$

که در آن $\underline{M}(\vec{q})$ ماتریس لختی 4×4 بازوی پایه متحرک، $\vec{V}(\vec{q}, \dot{\vec{q}})$ برداری 4×1 متشکل از نیروهای گریز از مرکز و کوریولیس، $\vec{G}(\vec{q})$ برداری 4×1 متشکل از جمله‌های مربوط به گرانش است. اکنون قانون کنترلی مبتنی

روی یک بازوی پایه متحرک سه میله‌ای شبیه‌سازی شده، که مشخصات آن در جدول 2 آورده شده است و از آنجایی که ربات صفحه‌ای است. بنابراین، فقط حول لبه‌های جلو و عقب پایه متحرک امکان واژگونی وجود دارد.

4-1- مدل‌سازی دینامیکی ربات

بازوی پایه متحرک از یک پایه متحرک با قابلیت حرکت در راستای محور طولی و یک بازوی رباتیکی سری با سه درجه آزادی، که بر روی پایه متحرک نصب شده، تشکیل شده است. ساختار بازوی پایه متحرک به‌گونه‌ای است که تمام اجزای آن صلب و مرکز جرم تمام اجزا در وسط آن‌ها متمرکز فرض شده است. نمای کلی بازوی پایه متحرک در شکل 8 نشان داده شده است.

مختصات تممیم یافته سیستم در رابطه (29) آورده شده که یکی از متغیرها مختصات موقعیت اینرسی پایه متحرک (به‌طور مثال موقعیت مرکز جرم پایه متحرک در راستای محور طولی (x)) و سه متغیر دیگر مربوط به زوایای مفاصل بازو است (θ_i) .

$$\vec{q} = [x, \theta_1, \theta_2, \theta_3]^T \quad (29)$$

به منظور به‌دست آوردن دینامیک ربات از روش نیوتن-اولیور بهره برده شده که مطابق مرجع [19] این روش از دو تکرار بیرونی نیوتن-اولیور، مطابق روابط (30) تا (35):

$$(i:0 \rightarrow 2)$$

$${}^{i+1}\vec{\omega} = {}^{i+1}R_i \vec{\omega} + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\vec{Z} \quad (30)$$

$${}^{i+1}\dot{\vec{\omega}} = {}^{i+1}R_i \dot{\vec{\omega}} + {}^{i+1}R_i \vec{\omega} \times \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\vec{Z} + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\vec{Z} \quad (31)$$

$${}^{i+1}\vec{v} = {}^{i+1}R_i (\dot{\vec{\omega}} \times {}^{i+1}\vec{P} + \vec{\omega} \times (\dot{\vec{\omega}} \times {}^{i+1}\vec{P}) + \dot{\vec{v}}) \quad (32)$$

$${}^{i+1}\vec{v}_c = {}^{i+1}\dot{\vec{\omega}} \times {}^{i+1}\vec{P}_c + {}^{i+1}\vec{\omega} \times ({}^{i+1}\dot{\vec{\omega}} \times {}^{i+1}\vec{P}_c) + {}^{i+1}\dot{\vec{v}} \quad (33)$$

$${}^{i+1}\vec{F} = m_{i+1} {}^{i+1}\vec{v}_c \quad (34)$$

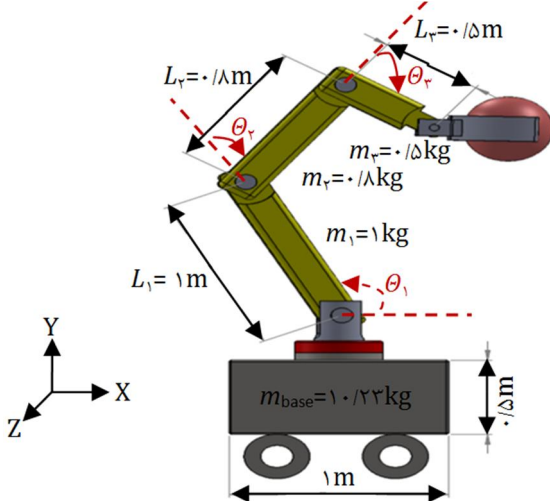
$${}^{i+1}\vec{N} = {}^{i+1}L_i {}^{i+1}\dot{\vec{\omega}} + {}^{i+1}\dot{\vec{\omega}} \times {}^{i+1}L_i {}^{i+1}\vec{\omega} \quad (35)$$

و تکرار درونی نیوتن-اولیور مطابق روابط (36) تا (38): $(i:3 \rightarrow 1)$

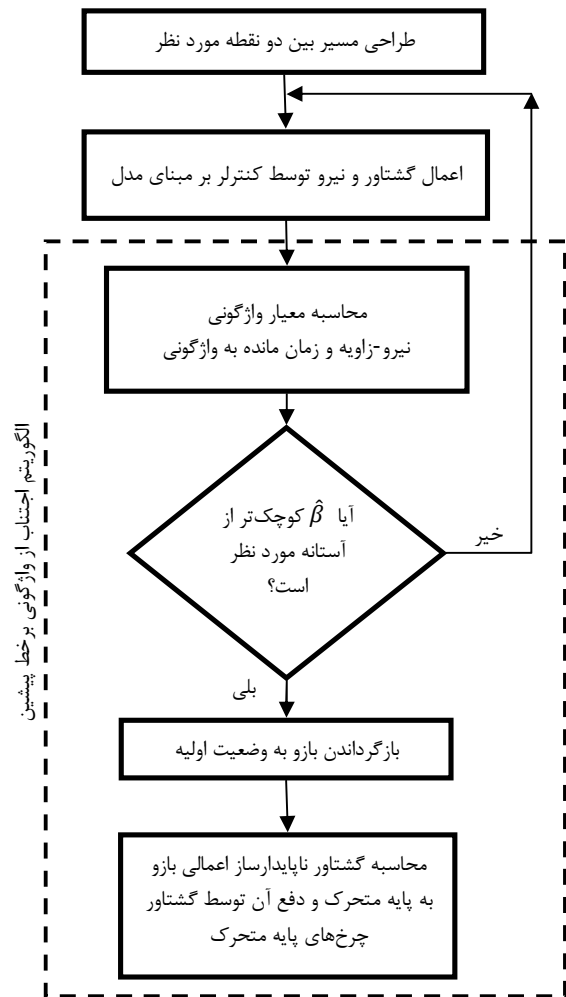
$${}^i\vec{f} = {}^{i+1}R_i {}^{i+1}\vec{F} + {}^i\vec{F} \quad (36)$$

$${}^i\vec{n} = {}^i\vec{N} + {}^{i+1}R_i {}^{i+1}\vec{n} + {}^i\vec{P}_c \times {}^i\vec{F} + {}^{i+1}\vec{P} \times {}^{i+1}R_i {}^{i+1}\vec{F} \quad (37)$$

$$\vec{\tau}_i = {}^i\vec{n}^T {}^i\vec{Z} \quad (38)$$



شکل 8 نمای کلی بازوی پایه متحرک



شکل 7 فلوچارت الگوریتم ممانعت از واژگونی برخط پیشین بازوی پایه متحرک

در این الگوریتم یک زمان مانده به واژگونی (t_{tip}) نیز تخمین زده شده است و هنگامی که آن به حد آستانه می‌رسد، یعنی بازوی پایه متحرک در آستانه‌ی واژگونی قرار می‌گیرد، ابتدا بازو به پیکربندی اولیه بازگردانده می‌شود و سپس کوپلی که بالاتنه در هنگام بازگرداندن بازو به پیکربندی اولیه به پایه متحرک اعمال می‌کند در هر لحظه محاسبه شده و مولفه‌هایی از این کوپل، که شامل شتاب گرانشی زمین است، طبق رابطه (27) حذف می‌شود. کوپل حاصله کوپل ناپایدار ساز است که این کوپل ناپایدار ساز باید توسط گشتاور اعمالی به چرخ‌ها خنثی شود که به‌صورت رابطه (28) به‌دست می‌آید.

$$\vec{n}_b = -(\vec{\tau}_{m_1} - \vec{\tau}_{ff_1}) \quad (27)$$

$$\min \|(\vec{\tau}_w - \vec{n}_b) \cdot \vec{a}_1\| \quad (28)$$

که در رابطه (27) $\vec{\tau}_{ff_1}$ گشتاوری است که در مفصل اول به منظور تحمل نمودن وزن بازوی ربات از طرف پایه متحرک به بازو، اعمال می‌شود و $\vec{\tau}_{m_1}$ کل گشتاوری است که از پایه متحرک به بازو در محل مفصل اول وارد می‌کند. در رابطه (28) \vec{n}_b کوپل ناپایدار ساز، $\vec{\tau}_w$ گشتاور اعمالی به چرخ‌ها و \vec{a}_1 بردار یکه چندضلعی استقرار است.

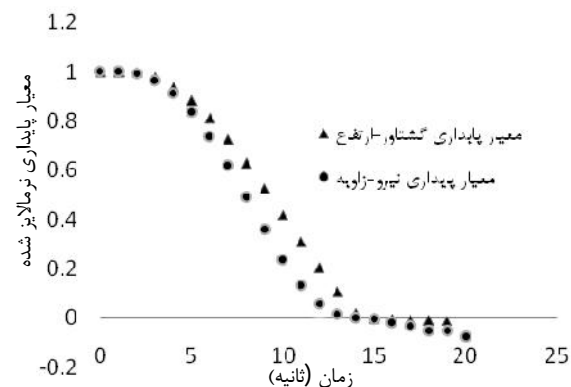
4- شبیه‌سازی

الگوریتم‌های اجتناب از واژگونی برخط معرفی شده در بخش‌های پیشین بر

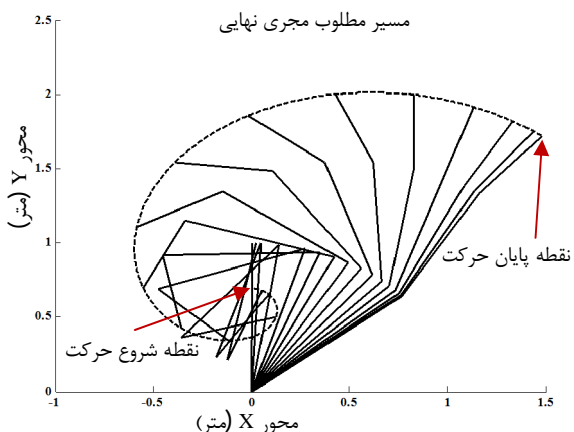
پایه متحرک در یک لحظه، در آستانه واژگونی قرار گرفته و بعد از آن واژگون می‌شود. به طوری که معیار پایداری گشتاور-ارتفاع آستانه واژگونی را در زمان 14/3 ثانیه و معیار پایداری نیرو-زاویه در زمان 14/2 ثانیه نشان می‌دهد.

3-4- شبیه‌سازی و مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها

الگوریتم‌های اجتناب از واژگونی برخط با استفاده از معیار پایداری گشتاور-ارتفاع بر روی بازوی پایه متحرک نشان داده شده در شکل 8، شبیه‌سازی شده است. به منظور شبیه‌سازی یک مانور ناپایدار بازوی پایه متحرک از وضعیت $(\theta_1 = 90^\circ, \theta_2 = 175^\circ, \theta_3 = 175^\circ, x = 0\text{m})$ به وضعیت $(\theta_1 = 40^\circ, \theta_2 = 20^\circ, \theta_3 = -10^\circ, x = 10\text{m})$ حرکت می‌کند و زمان طی مسیر 40 ثانیه با گام زمانی 0/01 ثانیه در نظر گرفته شده است. از سویی سرعت و شتاب مجری نهایی و پایه متحرک در ابتدا و انتهای مسیر صفر و همچنین زمان مانده به واژگونی (t_{tip}) برابر با 0/5 ثانیه است که تقریباً متناظر با $\hat{\alpha}$ آستانه 0/35 است. $\hat{\alpha}$ آستانه با روش آزمون و خطا برای این سیستم محاسبه شده است. مسیر حرکت بازو برای مانور مورد نظر در شکل 11 نشان داده شده است. در صورتی که بازوی پایه متحرک مسیر مورد نظر را بدون اجرای هیچ یک از الگوریتم‌های اجتناب از واژگونی طی کند دچار واژگونی می‌شود، اما اگر مسیر را در حضور هر کدام از الگوریتم‌های اجتناب از واژگونی ببیماید، از ناپایداری دور شده و به سمت بهبود پایداری حرکت می‌کند. مسیر حرکت بازوی متحرک در حضور هر دو الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط در شکل‌های 12 و 13 آورده شده است.

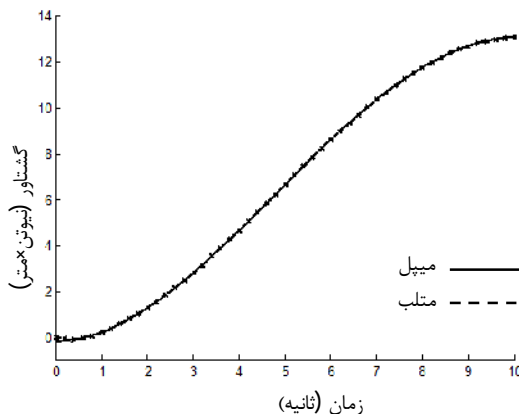


شکل 10 مقایسه معیار پایداری گشتاور-ارتفاع و معیار پایداری نیرو-زاویه برای یک مسیر مشخص بازوی پایه متحرک



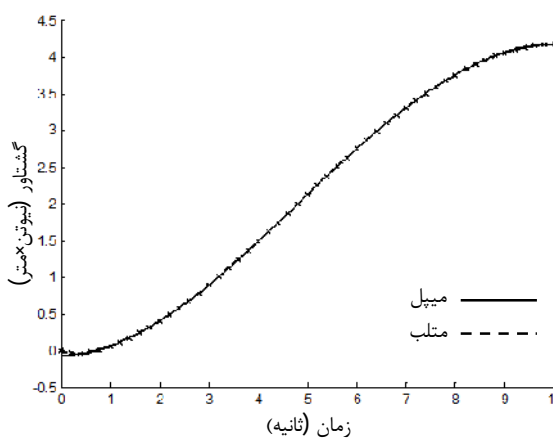
شکل 11 مسیر حرکت بازوی متحرک بدون اجرای الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط

گشتاور میله اول



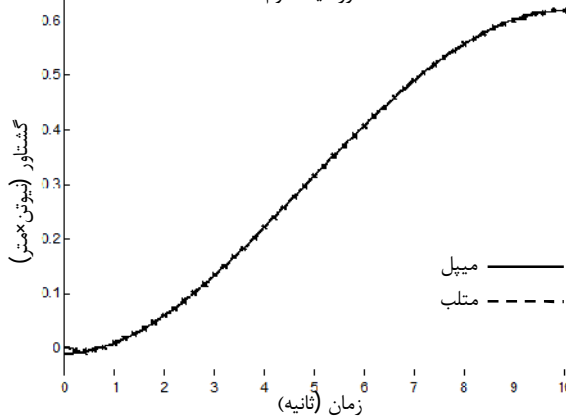
شکل 9 (الف) صحت‌سنجی مدل دینامیکی

گشتاور میله دوم



شکل 9 (ب) صحت‌سنجی مدل دینامیکی

گشتاور میله سوم



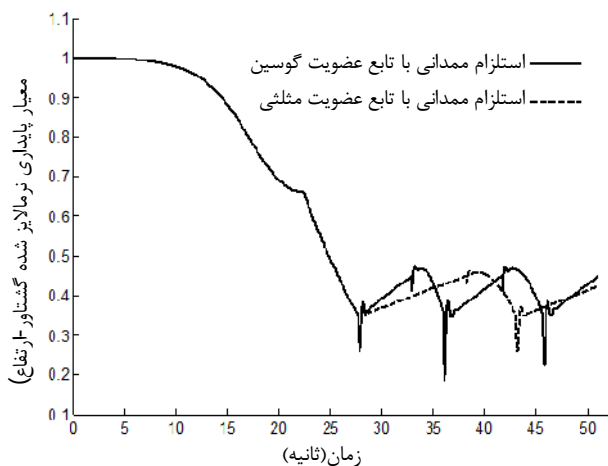
شکل 9 (ج) صحت‌سنجی مدل دینامیکی

صحت‌سنجی آن‌ها برای یک مسیر مشخص و با شرایط یکسان انجام شده است. بازوی پایه متحرک مورد نظر، از وضعیت $(\theta_1 = 90^\circ, \theta_2 = 0^\circ, \theta_3 = 0^\circ, x = 0\text{m})$ به وضعیت $(\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = 0^\circ, \theta_3 = 0^\circ, x = 4\text{m})$ در مدت زمان 20 ثانیه حرکت می‌کند و جرمی به جرم 3 کیلوگرم را حمل می‌کند. معیارهای پایداری گشتاور-ارتفاع و نیرو-زاویه در نرم‌افزار میپل محاسبه شده‌اند. نتایج به دست آمده از این دو معیار در شکل 10 آورده شده است که این نتایج گویای آن است که هر دو معیار پایداری، نشان می‌دهند که بازوی

بازوی پایه متحرک در حضور الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط پیشنهادی، با اجرای الگوریتم از وضعیت ناپایدار دور شده و به وضعیتی پایدار در اطراف موقعیت فعلی‌اش می‌رود که باعث افزایش $\hat{\alpha}$ می‌شود، زمانی که $\hat{\alpha}$ به یک آستانه پایدار می‌رسد اجرای الگوریتم متوقف شده و از موقعیت فعلی، که مجری نهایی و پایه متحرک در آن قرار دارند طراحی مسیر جدیدی به سمت هدف انجام می‌شود. این روند تا رسیدن بازوی پایه متحرک تا هدف یا وضعیتی پایدار نزدیک آن ادامه می‌یابد. از سوی دیگر در الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط پیشین زمانی که بازوی پایه متحرک در آستانه واژگونی قرار می‌گیرد با اجرای الگوریتم از ناپایداری بازو جلوگیری شده و آن را به سمت پیکربندی اولیه ($\theta_1 = 90^\circ, \theta_2 = 175^\circ, \theta_3 = 175^\circ$) هدایت می‌کند. با وجود اینکه الگوریتم پیشین باعث بهبود پایداری بازوی پایه متحرک شده است، اما دارای ایراداتی است که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ◀ در هنگام رخداد ناپایداری بازو به پیکربندی اولیه بازگردانده می‌شود در نتیجه مجری نهایی به نقطه هدف نمی‌رسد.
- ◀ تاثیر نیروی ناپایداریساز ایجاد شده روی پایه متحرک به علت حرکت بالاتنه در نظر گرفته نشده است.
- ◀ حرکت پایه متحرک در هنگام بازگرداندن بازو به پیکربندی اولیه مشخص نشده است.
- ◀ روند سیستماتیک برای زمان لازم جهت برگشتن بازو به پیکربندی اولیه توصیف نشده است.

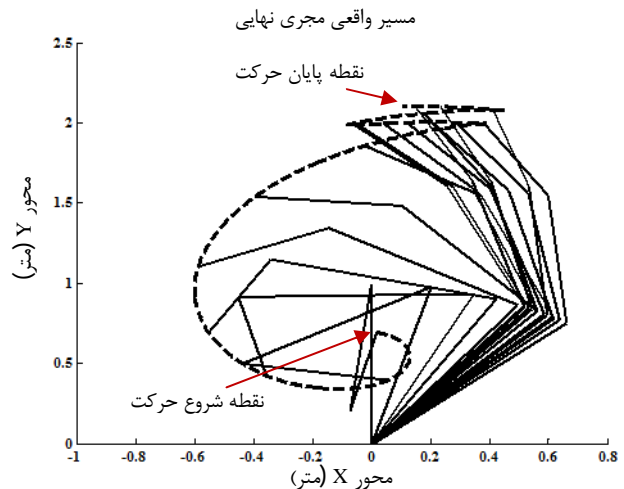
در الگوریتم اجتناب از واژگونی پیشنهاد شده از منطق فازی بهره برده شده که در آن از استلزام ممدانی و توابع عضویت مثلثی استفاده شده است. به منظور بهبود کارایی الگوریتم تغییراتی در منطق فازی آن داده شده است. بدین ترتیب که از تابع عضویت گوسین¹ به جای تابع عضویت مثلثی بهره برده شده است. نتایج به دست آمده در شکل 15 مشخص می‌کند که تابع عضویت گوسین سریع‌تر بازوی پایه متحرک را به یک وضعیت پایدار در نزدیکی وضعیت فعلی می‌رساند. یعنی سیستم را سریع‌تر از ناپایداری نجات می‌دهد. در نتیجه کارایی الگوریتم را بهبود می‌بخشد. دلیلی که برای این امر می‌توان بیان نمود این است که چون تابع عضویت گوسین نرم‌تر حرکت می‌کند تغییرات نرم‌تری نیز ایجاد می‌کند و جواب‌های مناسب‌تری برای



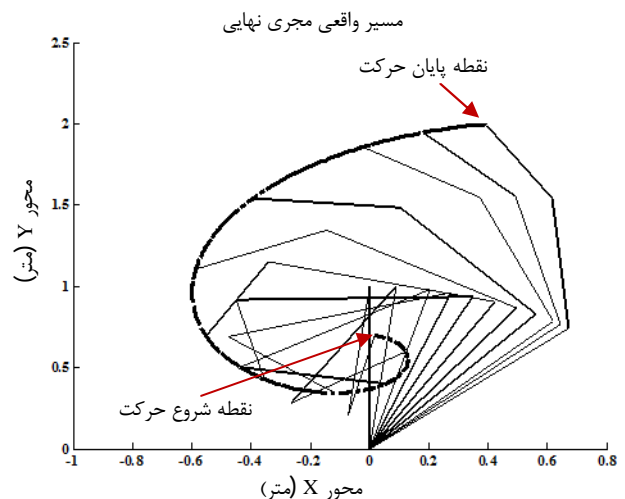
شکل 15 مقایسه کارایی الگوریتم پیشنهادی در حضور دو تابع عضویت مثلثی و گوسین

1- Gaussian membership function

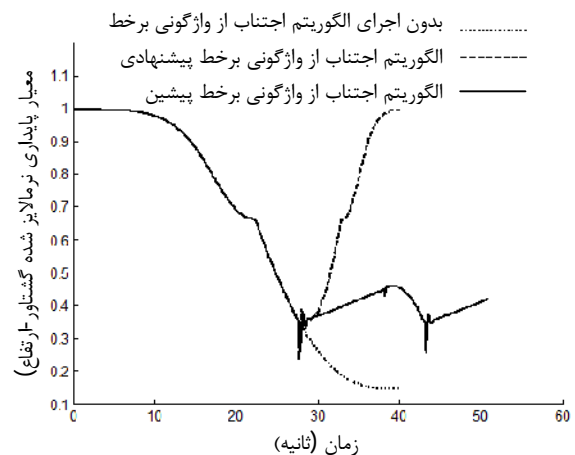
همان‌طور که در شکل 14 نشان داده شده است، هنگامی که بازوی پایه متحرک در آستانه واژگونی قرار می‌گیرد، یا به عبارتی دیگر $\hat{\alpha}$ به مقدار آستانه نزدیک می‌شود، هر دو الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط اجرا می‌شوند.



شکل 12 مسیر حرکت بازوی متحرک در حضور اجرای الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط پیشنهادی



شکل 13 مسیر حرکت بازوی متحرک در حضور اجرای الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط پیشین



شکل 14 تغییرات پایداری بازوی پایه متحرک

می‌شود. همچنین، به منظور پایدار نمودن بازوی پایه متحرک به کمک منطق فازی آن را به وضعیتی پایدار نزدیک به نقطه هدف می‌رساند.

6- مراجع

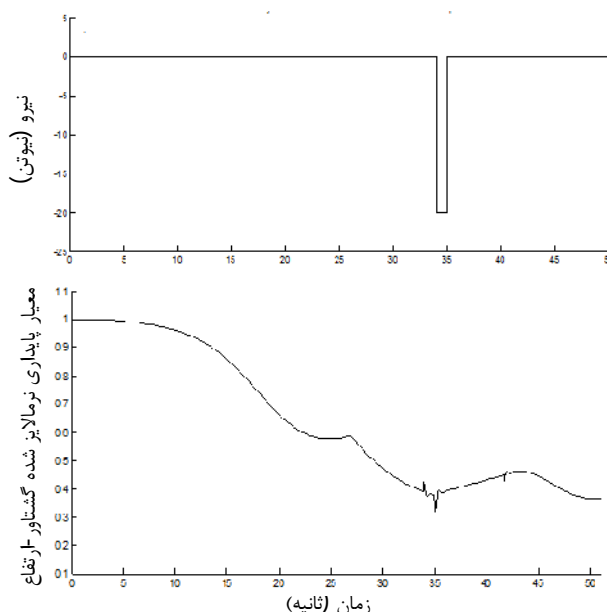
- [1] S. A. A. Moosavian, A. Daneshvar, M. Moradi, Reactionless path planning for mobile robots, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 43-51, 2011. (In Persian)
- [2] S. R. Larimi, S. A. A. Moosavian, Dynamic balancing of an under-actuated differential two wheeled manipulator by a reaction wheel, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 8, pp. 79-92, 2013. (In Persian)
- [3] P. Zarafshan, S. A. A. Moosavian, Adaptive hybrid suppression control of a wheeled mobile robot with flexible solar panels, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 5, pp. 130-143, 2013. (In Persian)
- [4] D. A. Rey, E. G. Papadopoulos, Online automatic tipover prevention for mobile manipulators, in *Intelligent Robots and Systems, IROS'97., Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 1273-1278, Grenoble, France, 1997.
- [5] E. Papadopoulos, D. A. Rey, The Force-angle measure of tipover stability margin for mobile manipulators, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 33, No. 1, pp. 29-48, 2000.
- [6] S. A. A. Moosavian, K. Alipour, Moment-height tip-over measure for stability analysis of mobile robotic systems, in *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5546-5551, Beijing, China, 2006.
- [7] H. Qiang, S. Sugano, K. Tanie, Stability compensation of a mobile manipulator by manipulator motion: feasibility and planning, *IROS '97., Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 1285-1292, Grenoble, France, 1997.
- [8] S. A. A. Moosavian, K. Alipour, Stability evaluation of mobile robotic systems using moment-height measure, in *Robotics, Automation and Mechatronics, 2006 IEEE Conference on*, pp. 1-6, Bangkok, 2006.
- [9] P. R. Roan, A. Burmeister, A. Rahimi, K. Holz, D. Hooper, Real-world validation of three tipover algorithms for mobile robots, in *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pp. 4431-4436, Anchorage, Alaska, 2010.
- [10] Y. Li, Y. Liu, Real-time tip-over prevention and path following control for redundant nonholonomic mobile modular manipulators via fuzzy and neural-fuzzy approaches, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Transactions of ASME*, Vol. 128, No. 4, pp. 753-764, 2006.
- [11] A. Ghaffari, A. Meghdari, D. Naderi, S. Eslami, Tipover stability enhancement of wheeled mobile manipulators using an adaptive neurofuzzy inference controller system, *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 45, pp. 241-247, 2008.
- [12] K. Iagnemma, A. Rzepniewski, S. Dubowsky, P. Schenker, Control of robotic vehicles with actively articulated suspensions in rough terrain, *Autonomous Robots*, Vol. 14, No. 1, pp. 5-16, 2003.
- [13] A. Meghdari, D. Naderi, S. Eslami, Optimal stability of a redundant mobile manipulator via genetic algorithm, *Robotica*, Vol. 24, No. 6, pp. 739-743, 2006.
- [14] A. Ghafouri, D. Naderi, Dynamic compensation of overturning mobile mechanical arm's stability by the optimal arms' angular momentum using neural networks, in *13th Conference of Mechanical Engineering*, Isfahan, Iran, 2005. (In Persian)
- [15] S. A. A. Moosavian, S. S. Hoseyni, Dynamics modeling and tipover stability of a hybrid serial-parallel mobile robot, in *Control, Instrumentation and Automation (ICCIA), 2nd International Conference on*, pp. 1024-1029, IEEE, Shiraz, 2011.
- [16] S. A. A. Moosavian, S. S. Hoseyni, MOST stable motion design of the mobile robot in the specified path, *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 11, No. 33, pp. 1-14, 2013. (In Persian)
- [17] He, Liang, Tip-over avoidance algorithm for modular mobile manipulator, in *Innovative Engineering Systems (ICIES), First International Conference on*, pp. 115-120, IEEE, 2012.
- [18] A. Hasanpour, K. Alipour, Real-time automatic tip-over avoidance algorithm for mobile manipulator using fuzzy logic, in *13th Iranian Conference on Fuzzy Systems (IFSC2013)*, Qazvin, Iran, 2013. (In Persian)
- [19] J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 3rd ed, Pearson Prentice Hall, 2005.
- [20] S. A. A. Moosavian, A. Mirani, Dynamics and Motion Control of Wheeled Robotic Systems, *Esteghlal Journal of Engineering, Isfahan University of Technology*, Vol. 24, No. 2, pp. 193-214, 2006. (In Persian)
- [21] L. Yu, Q. Cao, C. Li, C. Qiu, On-line planning of nonholonomic mobile manipulators based on stability twist constraint, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 32, pp. 165-170, 2010.
- [22] www.bostondynamics.com/robot_bigdog.html, 2013.

تغییرات پارامترها تولید می‌شود درحالی که تابع عضویت مثلثی همواره با شیب یکنواختی تغییر می‌کند.

به منظور نشان دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی در حضور برخی اغتشاشات محیطی، عملکرد آن در حضور یک نمونه اغتشاش پالسی مورد بررسی قرار گرفته شده است. همان‌طور که در شکل 16 نشان داده شده برای یک مانور ناپایدار، بازوی پایه متحرک از وضعیت $(\theta_1 = 90^\circ, \theta_2 = 0^\circ, \theta_3 = 0^\circ, x = 0m)$ به وضعیت $(\theta_1 = 60^\circ, \theta_2 = 30^\circ, \theta_3 = 175^\circ, x = 10m)$ حرکت می‌کند. همچنین، در زمان 34 تا 35 ثانیه نیرویی معادل 20 نیوتن در راستای محور طولی به وسط میله دوم وارد می‌شود که به مثابه یک لگد وارده به ربات سگ بزرگ^[22] است. همان‌طور که در مشاهده می‌شود، در اثر اغتشاش وارده الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط پیشنهادی بر اثر این اغتشاش وارده و در نتیجه کاهش پایداری، اجرا شده و بازوی پایه متحرک را به نحوی مطلوب پایدار می‌سازد. بنابراین، الگوریتم پیشنهادی نه تنها مانع از واژگونی بازوی پایه متحرک شده بلکه اغتشاش وارده را نیز دفع نموده است.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش جدیدی جهت اجتناب از واژگونی برخط بازوی پایه متحرک مبتنی بر منطق فازی پیشنهاد شده است. الگوریتم پیشنهادی با یک الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط پیشین مقایسه و عملکرد آن در حضور اغتشاشات محیطی بررسی شده است. هردو الگوریتم بر روی یک بازوی پایه متحرک که مدل دینامیکی آن استخراج شده، شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. از مزایای الگوریتم پیشنهادی این است که توسط تابع نمو معیار پایداری میزان حساسیت پایداری سیستم به هر یک از مشخصه‌های حرکتی آن تعیین



شکل 16 تغییرات معیار پایداری گشتاور-ارتفاع در هنگام اجرای الگوریتم پیشنهادی در حضور اغتشاش پالسی