

مقایسه دو الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط بازوی پایه متحرک

آرمان حسن پور^۱، خلیل عالی پور^{۲*}، پریسا دائمی^۳، بهرام تارویردیزاده^۴

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، قزوین

۲- استادیار، گروه مهندسی سیستم و مکاترونیک، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، قزوین

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، قزوین

۴- استادیار، گروه مهندسی سیستم و مکاترونیک، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

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

چکیده

در این مقاله، جهت اجتناب از واژگونی برخط بازوی پایه متحرک، الگوریتمی هوشمند و نوین با درنظر گرفتن تعاملات بین بازو و پایه متحرک ارائه شده است. در این راستا از معیار پایداری گشتاور-ارتفاع به عنوان سنجه پایداری سیستم و یکتابع نمو معیار پایداری به منظور یافتن مشخصه‌های حرکتی موثر در موقع نایپایداری در هر لحظه، استفاده شده است. سپس جهت بهبود مناسب پایداری سیستم از مطلق فازی بهره برده شده است. الگوریتم پیشنهادی با یک الگوریتم پیشین، که جهت اجتناب از واژگونی برخط بازوی پایه سیستم از مطلق فازی بهره برده 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-اویلر در نرم‌افزار مدل 16 استخراج شده سپس مدل استخراج شده برای سیستم، توسط جعبه‌افزار سیم‌مکانیک نرم‌افزار متلب صحه‌گذاری می‌شود. سپس در یک مانور که قسمتی از مسیر نایپایدار است، میزان کارایی الگوریتم اجتناب از واژگونی بر خط پیشنهادی تحلیل و با الگوریتم پیشین مقایسه شده است. همچنین، عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حضور برخی اختشاشات محیطی مورد بررسی قرار گرفته است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دربافت: 28 خرداد ۱۳۹۳

پذیرش: ۰۴ مرداد ۱۳۹۳

ارائه در سایت: ۲۳ مهر ۱۳۹۳

کلید واژگان:

اجتناب از واژگونی برخط

پایداری بازوی پایه متحرک

معیار پایداری گشتاور-ارتفاع

مطلق فازی

معیار نیوتن-اویلر

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.

این سیستم‌ها مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۳-۱]. متحرک

بودن پایه ربات باعث شده تا ربات‌های پایه متحرک نسبت به ربات‌های پایه

ثابت دارای محدوده عملکرد وسیع تری باشند. این ربات‌ها در محیط‌های

یک گروه مهم از ربات‌ها، بازوی پایه متحرک هستند که دربردارنده یک یا

چند بازوی نصب شده بر روی خودروی متحرک هستند و مدل‌سازی و کنترل

۱- مقدمه

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Hasanpour, Kh. Alipour, P. Daemy, B. Tarverdizadeh, A Comparison of Two Online Tip-over Prevention Algorithms for Wheeled Mobile Manipulators, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 271-281, 2015 (In Persian)

شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی ربات متحرک SRR در یک زمین ناهموار پیاده‌سازی شده است. مقداری و همکارانش با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با به کار 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 میله 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 جسته-اند[15,16]. لیانگ هی، الگوریتمی جهت اجتناب از واژگونی یک بازوی پایه متحرک مازولار⁵ ارائه کرد که برای این منظور از گشتوارهای 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 تعمیم‌دهی است. 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 تعريف شده نیست، بلکه طراحی مسیر بین دو نقطه دلخواه ارائه شده است. در الگوریتم پیشنهادی، میزان تاثیر تغییرات تک تک در درجات آزادی سیستم و مشتقات آن‌ها بر پایداری بازوی پایه متحرک به‌وسیله یکتابع 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 پایپادوپولوس[4] مقایسه و تحلیل می‌شود. در این راستا، پس از بررسی اجمالی دو معیار پایداری گشتوار-ارتفاع و نیرو-زاویه، الگوریتم اجتناب از واژگونی ارائه شده و الگوریتم پیشین به‌طور کامل توضیح داده شده‌اند. سپس، در بخش شبیه‌سازی ابتدا معادلات دینامیکی یک بازوی پایه متحرک سه میله‌ای صلب استخراج شده و به منظور صحه‌گذاری مدل ریاضی استخراج شده، مدل دینامیکی بازوی پایه متحرک به کمک جعبه‌ابزار سیم‌مکانیک⁶ نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است. الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم پیشین بر روی سیستم مورد نظر شبیه‌سازی 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 زمینه دینامیکی مختصه را برای این اهداف ارائه داده اند.

زیرآب، روی زمین و در هوای کاربردهای متفاوتی دارند و می‌توانند در محیط‌های سخت و خطرناک جهت اکتشاف، جابه‌جایی بار و دستکاری در کاربردهای مانند جنگل‌داری، آتش‌نشانی، بهره‌برداری معدن و کاربری‌های نظامی استفاده شوند. واژگونی در برازوهای متحرک که به علت عوارض زمین یا حرکت بر روی سطوح شبیه‌دار یا به علت 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[6-4]. معیار پایداری نقطه‌ممان صفر¹، برای اولین بار توسط هوانگ و سوگنو برای اجتناب از واژگونی بازوی متحرک به کار برده شده است[7]. محدوده پایدار معتبر برای بازوی متحرک براساس معیار نقطه‌ممان صفر استخراج شده است. البته شایان ذکر است که در برازوهای متحرک مخصوصاً در جابه‌جایی اشیاء سنگین، مرکز جرم قابل تغییر است، اما معیار نقطه‌ممان صفر به ارتفاع مرکز جرم حساس نیست. معیار دیگری به نام معیار نیرو-زاویه² توسط ری و پایپادوپولوس ارائه شده است[5] که در این معیار از کمترین زاویه بین بردارهای عمود بر محورهای واژگونی و تصویربردار نیروی برآیند در صفحه عمود بر محورهای واژگونی با فرض سرعت‌های کم استفاده شده است. اخیراً یک سنجه موثر توسط موسویان و عالی‌پور به نام معیار پایداری گشتوار-ارتفاع³ پیشنهاد شده است[8]. این معیار بر پایه گشتوارهای پایدارساز و ناپایدارساز وارده 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 گشتوار-ارتفاع براساس شبیه‌سازی‌های کامپیوتري نشان داده شده است. بر این مبنای، در این مقاله از این معیار، به عنوان 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. به عنوان نمونه، ری و پایپادوپولوس با استفاده از معیار نیرو-زاویه، استراتژی جهت اجتناب بلاذرنگ 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 مانع 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 بلاذرنگ 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 تعليق فعال ارائه کرده‌اند[12]. در این مطالعه از روابط سینماتیکی با تغییر در هندسه ربات جهت پایداری خودرو استفاده شده است. سپس، نتایج

1- Zero-moment point

2- Force-angle

3- Moment-height stability

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

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

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

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

2- معیار پایداری نیرو-زاویه

معیار پایداری نیرو-زاویه از هندسه کامل ریات 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 واردہ به پایه متحرک از جمله اینرسی، گرانشی، نیروی مبادله شده بین بازو و پایه متحرک و اغتشاشات خارجی را به صورت یک بردار نیروی \bar{a}_i روی مرکز ثقل پایه متحرک مدل می‌کند. مولفه‌های این نیرو در صفحات عمود بر محور واژگونی (\bar{f}_i) با بردارهای که بر محور واژگونی عمودند و از مرکز ثقل می‌گذرند (\bar{l}_i) زوایای λ_i را تشکیل می‌دهند. حال این معیار را برای هر لبه واژگونی می‌توان به صورت رابطه (7) تعریف کرد.

$$\beta_i = \lambda_i \|\bar{f}_i\| \quad (7)$$

در شکل 2، \bar{p}_i ها بردار موقعیت نقاط تماس و $\bar{p}_{\bar{c}}$ بردار موقعیت مرکز جرم سیستم است. از رابطه (8) بردار محورهای واژگونی (\bar{a}_i) به دست می‌آید.

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

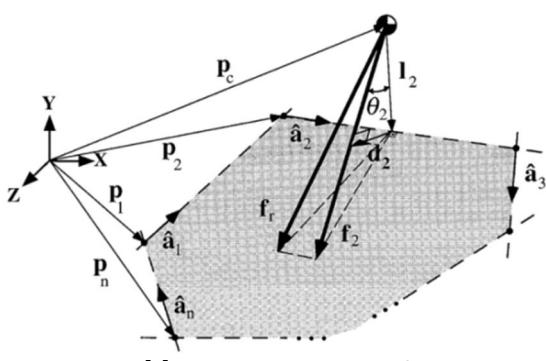
و بردار گذرنده از مرکز جرم و عمود بر محور واژگونی (\bar{a}_i) به صورت رابطه (9) تعریف می‌شود.

$$\bar{a}_i = \left(1 - \bar{\hat{a}}_i \bar{\hat{a}}_i^T\right) (\bar{p}_{i+1} - \bar{p}_c) \quad (9)$$

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

$$\begin{aligned} \bar{f}_r &= \sum (\bar{f}_{grav} + \bar{f}_{manip} + \bar{f}_{dist} - \bar{f}_{inertial}) = -\bar{f}_{external} \\ \bar{n}_r &= \sum (\bar{n}_{grav} + \bar{n}_{manip} + \bar{n}_{dist} - \bar{n}_{inertial}) = -\bar{n}_{external} \end{aligned} \quad (10)$$

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



شکل 2 حالت سه‌بعدی معیار نیرو-زاویه [4]

پایداری دینامیکی ریات‌ها 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.

2-1- 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 تشكیل 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 واردہ 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 $n, 2, 1, 0$ چندضلعی استقرار به ترتیب با نام‌های M_1, M_2, \dots, M_n مشخص شده است.

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

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

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

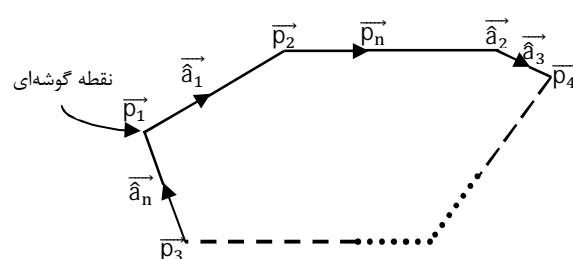
در رابطه (2)، \bar{a}_i بردار واحد برای هر لبه چندضلعی استقرار و I_{g_i} مشخص کننده ممان اینرسی پایه حول i این لبه مستطیل مرزی است و σ_i به صورت رابطه (3) است:

$$\sigma_i = \begin{cases} +1(M_i \cdot \bar{a}_i) > 0 \\ -1(M_i \cdot \bar{a}_i) \leq 0 \end{cases}, \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (3)$$

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 بار متغیر، تعییر کند، ناحیه پایداری واژگونی نیز می‌باشد حساس به کاهش پایداری مربوط به افزایش ارتفاع مرکز ثقل به روایت اضافه می‌شود که معیار گشتاور-ارتفاع جمله ارتفاع مرکز ثقل به روایت اضافه (4) خواهد بود:

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

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 متناظر

در رابطه (16)، $\hat{\alpha}$ میزان میزان پایداری بازوی پایه متحرک و $\hat{\alpha}$ میزان 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 فرستی 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) \vec{q} بردار متغیرهای تعیین یافته سیستم است که n تعداد درجهات 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 هریک از درجهات آزادی بازوی پایه متحرک بر پایداری آن را در هر گام زمانی برآورد نمود. به منظور نیل به این هدف، از یکتابع نمو معیار پایداری استفاده شده است. با بهره‌گیری از این تابع می‌توان میزان تاثیرگذاری تغییرات هریک از درجهات 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 عمل کننده روی سیستم هستند. از مقادیر \vec{f}_r و \vec{n}_r نیرو و ممان‌های عمل کننده بر روی هر محور واژگونی به صورت رابطه (11) به دست می‌آید.

$$\vec{f}_i = \left(1 - \hat{\alpha}_i \hat{\alpha}_i^T \right) \vec{f}_r \quad (11)$$

$$\vec{n}_i = \left(\hat{\alpha}_i \hat{\alpha}_i^T \right) \vec{n}_r$$

از آنجا که معیار نیرو-زاویه فقط شامل نیرو است، به جای \vec{n}_i وارد 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 $\hat{\alpha}_i$ می‌گذرد و اثر نیروی کوپل به صورت رابطه (12) محاسبه می‌شود.

$$\vec{f}_{n_i} = \frac{\vec{l}_i \times \vec{n}_i}{\|\vec{l}_i\|} \quad (12)$$

$$\vec{f}_i^* = \vec{f}_i + \vec{f}_{n_i}$$

$\hat{\alpha}_i$ بردار یکه بردار آ است.

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

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

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

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

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

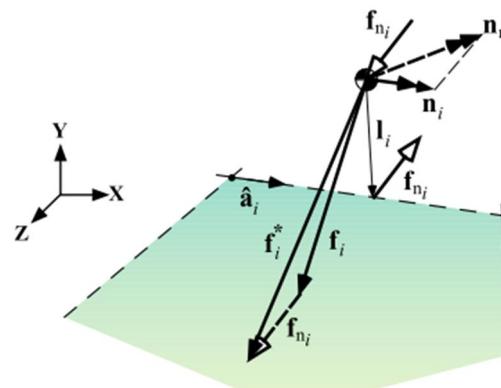
$$\beta = \min(\lambda_i) \|\vec{f}_r\|, \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (15)$$

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]. $\hat{\beta}$ حاشیه پایداری دینامیکی نرمالیز شده توسط مقدار اسمی آن است.

3-2- 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.

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



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

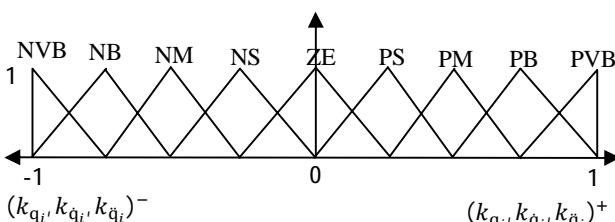
می شود. با توجه به شناخت رفتار پیچیده سیستم از قوانین فازی مختصراً بهره برده شده است. در صورت افزایش یا کاهش ورودی ها، خروجی های منطق فازی نیز به همان مقدار در جهت افزایش یا کاهش تغییر خواهد کرد. در منطق فازی جهت افزایش $\Delta\hat{a}$ بین گونه عمل شده است که اگر یک ورودی مانند k_{q_i} بزرگ و مثبت باشد با ضرب آن در یک عدد بزرگ و مثبت می توان به سرعت باعث افزایش $\Delta\hat{a}$ شد (طبق رابطه 18) یا اگر یک ورودی مانند k_{q_i} کوچک و منفی باشد، تغییرات شدید آن، مقدار $\Delta\hat{a}$ را سرعت تغییر نمی دهد، 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 می توان باعث افزایش $\Delta\hat{a}$ شده و هم از تغییر ناگهانی این پارامتر که تاثیر چندانی بر پایداری سیستم در این لحظه ندارد، جلوگیری می شود. 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

سیستم های پایه متحرک به ویژه زمانی سودمند است که کار در خواست شده از ربات به گونه ای باشد که خارج از فضای کاری بازوی پایه ثابت واقع شود. طراحی مسیر حرکت در ربات های پایه متحرک شامل طراحی مسیر حرکت پایه و بازو است که این امر در این تحقیق به صورت جداگانه انجام می شود و به موجب اینکه با اجرای الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط باید مکان، سرعت و شتاب در ابتداء و انتهای قطعه ای از مسیر مشخص شود، به یک چندجمله ای حداقل درجه پنجم به صورت رابطه (20) نیاز است [19].

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

استراتژی طراحی مسیر حرکت به این صورت است که در ابتداء موقعیت اولیه و موقعیت هدف مطلوب مشخص است و یک مسیر از ابتداء به انتهای برای بازوی پایه متحرک طراحی می شود. در حین حرکت، پایداری بازوی پایه متحرک به صورت برخط برسی می شود و در صورتی که در طی مسیر بازوی پایه متحرک در آستانه واژگونی قرار گیرد، الگوریتم اجتناب شده و آن را به یک وضعیت جدید و پایدار می رساند. 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 می شود. آنگاه بازوی پایه متحرک با استفاده از کنترلر مبتنی بر مدل چنان کنترل می شود 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 N Z P P P PV										$k_{q_i}, k_{\dot{q}_i}, k_{\ddot{q}_i}$
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										$\Delta q_i, \Delta \dot{q}_i, \Delta \ddot{q}_i$
B B M S E S M B B										

3-1-3- سیستم منطق فازی

تصمیم گیری های لازم در خصوص پایدارسازی سیستم مبتنی بر منطق فازی صورت می گیرد. با توجه به مطالب بیان شده با استفاده از یکتابع نمو معیار پایداری، میزان تاثیر مشخصه های حرکتی سیستم بر تغییرات Δ در هر گام زمانی به صورت یک ضرب محاسبه شده و این ضرباب به عنوان ورودی به منطق فازی فرستاده می شوند. خروجی منطق فازی، حرکت گام زمانی بعدی بازوی پایه متحرک را مشخص می کند. در سیستم فازی بازاری هر درجه آزادی بازوی پایه متحرک 3 بلوک فازی طراحی شده است که هر کدام تغییرات یکی از مشخصه های حرکتی (موقعیت، سرعت و شتاب مفاصل ربات) را تعیین می کند. هنگامی که الگوریتم اجرا می شود در هر گام زمانی یکی از این 3 بلوک فازی توسط یک انتخابگر، برگزیده می شود. سپس، تغییرات گام بعدی مشخصه حرکتی انتخاب شده به وسیله منطق فازی تعیین می شود. نحوه عملکرد این انتخابگر به گونه ای است که 3 ضرباب $k_{q_i}, k_{\dot{q}_i}, k_{\ddot{q}_i}$ مربوط به هر درجه آزادی سیستم را دریافت می کند و هر کدام از ضرباب که بزرگ تر باشد (بدون درنظر گرفتن علامت آن) منطق فازی مربوط به آن مشخصه حرکتی فعال می شود.

از آنجایی که بازه تغییرات $\Delta q_i, \Delta \dot{q}_i, \Delta \ddot{q}_i$ نامشخص است و به راحتی نمی توان حد بالا و پایین آن را تعیین نمود، به همین دلیل در هر گام زمانی از اجرای الگوریتم این ضرباب با بیشینه مقدار متناظر خودشان نرم الایز شده و به عنوان ورودی به منطق فازی فرستاده می شوند. به طور مثال، جهت نرم الایز نمودن ضرباب مشخصه حرکتی موقعیت (k_{q_i}) می بایست این ضرباب بر بیشینه ضرباب از مشخصه های حرکتی موقعیت سایر درجات آزادی سیستم تقسیم شود. خروجی منطق فازی تغییرات گام بعدی مشخصه حرکتی انتخاب شده $(\Delta q_{i+1}, \Delta \dot{q}_{i+1})$ را در جهت بهبود پایداری تعیین می کند. سپس، با استفاده از انتگرال گیری و مشتق گیری تغییرات گام بعدی سایر مشخصه های حرکتی آن درجه آزادی محاسبه می شود. در نهایت با افزودن خروجی منطق فازی به مشخصه های حرکتی کنونی بازوی پایه متحرک وضعیت مطلوب بعدی تعیین شده و به کنترلر بر مبنای مدل¹ سیستم فرستاده می شود. این روند، تا زمانی که بازوی پایه متحرک در یک ناحیه پایدار قرار گیرد، ادامه می باید. در صورت افزایش Δ و رسیدن آن به آستانه پایداری، اجرای الگوریتم متوقف شده و از وضعیت کنونی بازوی پایه متحرک، مسیر جدیدی به سوی نقطه هدف طراحی می شود و بازوی پایه متحرک در سرعت جدید با سرعت و شتاب قبلی شروع به حرکت می کند.

در این تحقیق برای سیستم فازی از استلزم ممداوی و توابع عضویت مثلثی استفاده شده است. خروجی های سیستم منطق فازی، تغییرات مشخصه های حرکتی بازوی پایه متحرک هستند. مطابق شکل 4، برای ورودی و خروجی های مجموعه فازی 9 مرکز فازی تعریف شده است. به عنوان مثال منفی خیلی بزرگ (NVB)، منفی بزرگ (NB)، منفی (NM)، منفی کوچک (NS)، صفر (ZE)، مثبت کوچک (PS)، مثبت متوسط (PM)، مثبت بزرگ (PB) و مثبت خیلی بزرگ (PVB). برای پایدارسازی منطق فازی از 9 قانون استفاده شده که قوانین فازی در جدول 1 آمده است. ورودی های سیستم فازی $k_{q_i}, k_{\dot{q}_i}, k_{\ddot{q}_i}$ و خروجی های تولید شده توسط سیستم منطق فازی $\Delta q_i, \Delta \dot{q}_i, \Delta \ddot{q}_i$ است. ایده اصلی واسطه منطق فازی بسیار ساده است. به طوری که برای افزایش Δ در رابطه (18) با تنظیم تغییرات مشخصه های بازوی پایه متحرک و ایجاد حرکت های 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:

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

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

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

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

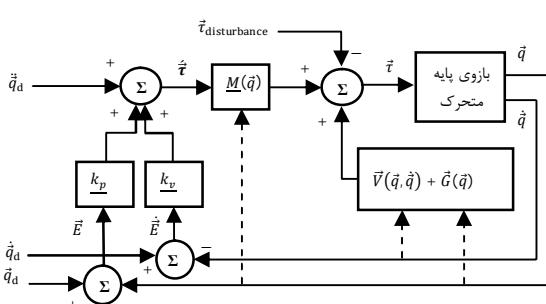
$$\vec{\tau}' = \ddot{\vec{q}}_{\text{desire}} + k_v \vec{E} + k_p \vec{E} \quad (25)$$

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

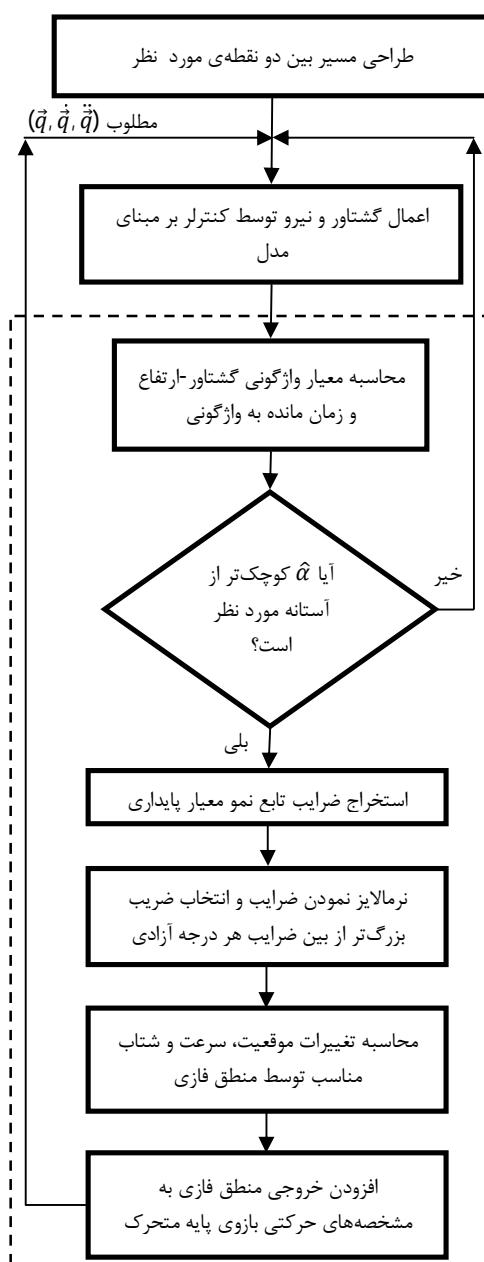
با انتخاب قطری ماتریس‌های k_p و k_v معادلات خطا (\vec{E}) دیکوپله شده و می‌توان خطای مربوط به هر یک از متغیرها را به طور مستقل به دست آورد [20]. نمای کلی از کنترل مبتنی بر مدل در شکل 6 آورده شده است.

3-2- الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط پیشین

در زمینه پایدارسازی برخط بازوهای پایه متحرک کارهای اندکی انجام شده است. یکی از این کارها الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط ری و پایپاروپولوس [4] است که به منظور اجتناب از واژگونی برخط از یک استراتژی دو مرحله‌ای بهره جسته است. این الگوریتم با درنظر 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 نایپایدارساز دینامیکی وارد به آن را به آرامی جبران می‌کند. عمل اول برایند 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 نایپایدارساز 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، پاهای 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 وایسته به مدل برای بازوی پایه متحرک [19]



شکل 5 فلوچارت استراتژی الگوریتم پیشنهادی مانع از واژگونی بازوی متحرک بررسد. 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 مدد نظر یا نزدیکی‌های آن (اگر بازوی پایه متحرک در نقطه هدف دارای وضعیت نایپایدار باشد) می‌رساند.

3-3- قانون کنترلی مبتنی بر مدل پس از استخراج معادلات بازو، معادله‌های دینامیکی سیستم به صورت رابطه (21) به دست می‌آید:

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

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{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، بنا براین، 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 به گونه‌ای 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.

مشخصات تعمیم یافته سیستم در رابطه (29) آورده شده که یکی از متغیرها مشخصات 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 به دست آوردن دینامیک ربات از روش نیوتون-اویلر بهره برده شده که مطابق مرجع [19] این روش از دو تکرار بیرونی نیوتون-اویلر، مطابق روابط (30) تا (35) است:

($i:0 \rightarrow 2$)

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

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

$$\overset{i+1}{\vec{V}} = \overset{i+1}{R} (\overset{i}{\vec{\omega}} \times \overset{i+1}{\vec{P}} + \overset{i}{\vec{\omega}} \times (\overset{i}{\vec{\omega}} \times \overset{i+1}{\vec{P}}) + \overset{i}{\vec{V}}) \quad (32)$$

$$\overset{i+1}{\vec{V}_c} = \overset{i+1}{\vec{\omega}} \times \overset{i+1}{\vec{P}_c} + \overset{i+1}{\vec{\omega}} \times (\overset{i+1}{\vec{\omega}} \times \overset{i+1}{\vec{P}_c}) + \overset{i+1}{\vec{V}} \quad (33)$$

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

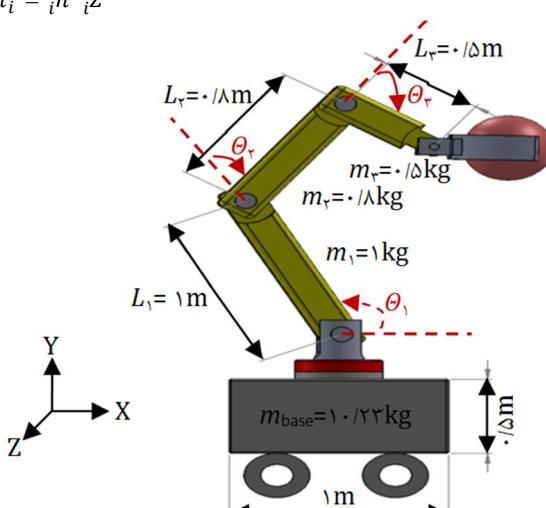
$$\overset{i+1}{\vec{N}} = \overset{i+1}{I} \overset{i+1}{\vec{\omega}} + \overset{i+1}{\vec{\omega}} \times \overset{i+1}{I} \overset{i+1}{\vec{\omega}} \quad (35)$$

و تکرار درونی نیوتون-اویلر مطابق روابط (36) تا (38) است:

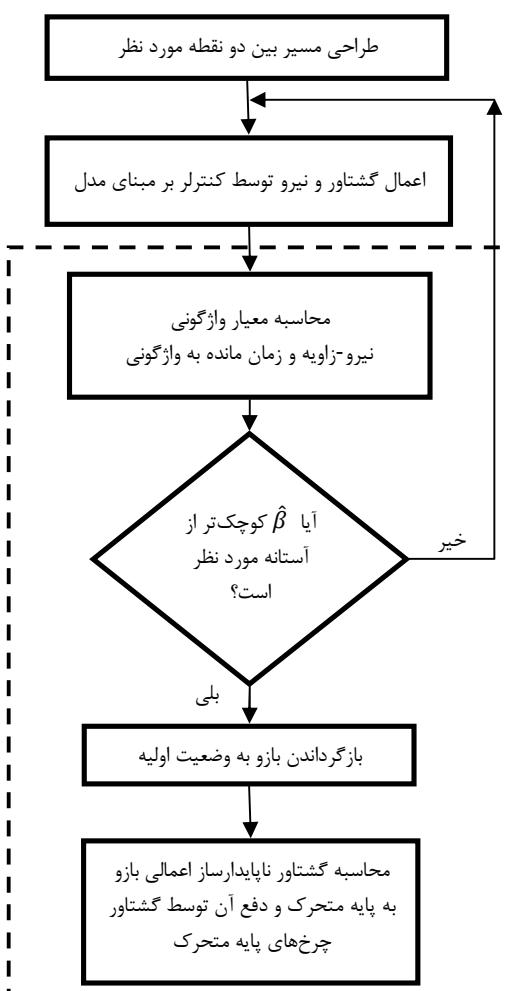
$$\overset{i}{\vec{f}} = \overset{i}{I} \overset{i+1}{\vec{f}} + \overset{i}{\vec{F}} \quad (36)$$

$$\overset{i}{\vec{n}} = \overset{i}{\vec{N}} + \overset{i}{I} \overset{i+1}{\vec{n}} + \overset{i}{\vec{P}_c} \times \overset{i}{\vec{F}} + \overset{i}{\vec{F}} \times \overset{i}{I} \overset{i+1}{\vec{f}} \quad (37)$$

$$\overset{i}{\vec{t}} = \overset{i}{\vec{n}}^T \overset{i}{\vec{f}} \quad (38)$$



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 ناپایدارساز است که این کوپل ناپایدارساز باید توسط گشتاور اعمالی به چرخهای خنثی شود که به صورت رابطه (28) به دست می‌آید.

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

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

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 ناپایدارساز، $\vec{\tau}_w$ گشتاور اعمالی به چرخهای و هم‌زمان بردار یکه چندضلعی استقرار است.

4- شبیه‌سازی

الگوریتم‌های اجتناب از واژگونی برخط معرفی شده در بخش‌های پیشین بر

جدول 2 پارامترهای بازوی پایه متحرک [21]

توضیحات	مقدار (واحد)	پارامترها
جرم میله‌ها	[2/923 .2/15 .2/321] (kg)	m_1, m_2, m_3
طول میله‌ها	[.1/8 .0/5] (m)	L_1, L_2, L_3
جرم پایه	10/23(kg)	m_{base}
ممان اینرسی میله‌ها	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0/1147 & 0 \\ 0 & 0 & 0/1147 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0/0609 & 0 \\ 0 & 0 & 0/0609 \end{bmatrix} (\text{kg.m}^2)$	I_1, I_2, I_3
ممان اینرسی پایه	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0/1925 & 0 \\ 0 & 0 & 0/1925 \end{bmatrix}$	I_{base}
محدوده سرعت مفاصل بازو	$\pm [0/0392 .0/0314 .0/0471] (\text{rad/s})$	\dot{q}
محدوده شتاب مفاصل بازو	$\pm [0/0314 .0/0314 .0/0392] (\text{rad/s}^2)$	\ddot{q}

سایر نیروها شامل اینرسی، گرانشی و نیروی مبادله شده مابین بازو و پایه متحرک هستند. با توجه به مطالب بیان شده نحوه محاسبه این نیروها در رابطه (40) آورده شده است.

$$\sum \vec{F} = m_{base} \ddot{\vec{x}}$$

$$\vec{f}_{ext} + \vec{f}_{manip} = m_{base} \ddot{\vec{x}}$$

$$\vec{f}_{ext} + \vec{f}_{manip} + \vec{f}_{iner} = 0$$

$$\vec{f}_{grav} = m_{base} \vec{g}$$

$$\vec{f}_{manip} = -\frac{0}{1} R_1^1 \vec{f}$$

$$\vec{f}_{iner} = -m_{base} \ddot{\vec{x}}$$

(40)

در رابطه (40) \vec{f}_{manip} نیرویی است که بازو به پایه متحرک اعمال می‌کند. \vec{f}_{iner} نیروی اینرسی وارد به مرکز جرم هر میله است. \vec{f}_{grav} نیروی گرانش وارد به آن است. \vec{f}_i نیرویی که میله 0 (پایه) به میله 1 وارد می‌سازد و \vec{n}_i کوپل وارد بر سیستم میله است. \vec{P}_i گشتاور لختی وارد بر مرکز جرم هر میله است. R_i^{i+1} بردار موقعیت مرکز جرم میله $i+1$ نسبت به دستگاه مختصات i است. R_i^{i-1} ماتریس دوران از دستگاه مختصات i به دستگاه مختصات $i-1$ است. V_i شتاب خطی مرکز جرم میله i است.

تکرار بیرونی از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت اول تکرار بیرونی (معادلات (30) تا (33)) محاسبه سینماتیک لازم به کمک تبدیلات دناویت-هارتبرگ است که برای بازوی پایه متحرک مد نظر در جدول 3 آورده شده است. قسمت دوم تکرار بیرونی (معادلات (34) و (35)) محاسبه نیروها و ممان‌های اینرسی است. بنابراین، قسمت دوم تکرار بیرونی و تماسی تکرار درونی به محاسبه دینامیک ربات مربوط می‌شود.

جهت محاسبه ماتریس دوران از رابطه (39) استفاده می‌شود.

$$R_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} \end{bmatrix} \quad (39)$$

برای استخراج معادلات پایه متحرک ابتدا تمام نیروهای وارد بر آن به دست آمده و سپس در معادله نیوتن قرار داده شده است. یکی از نیروهای اعمالی به پایه متحرک، \vec{f}_{ext} است که در راستای محور طولی بوده و در حقیقت مبنی عکس العمل زمین در پاسخ به گشتاور اعمالی به چرخها است.

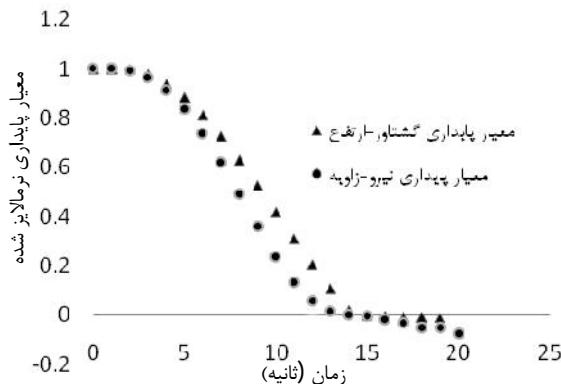
جدول 3 پارامترهای دناویت-هارتبرگ بازوی پایه متحرک

i	a_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	0	L_1	0	θ_2
3	0	L_2	0	θ_3
4	0	L_3	0	0

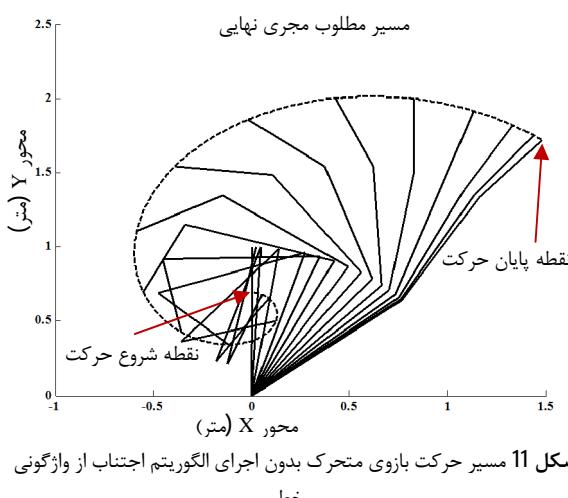
پایه متحرک در یک لحظه، در آستانه واژگونی قرار گرفته و بعد از آن واژگون می‌شود. به طوری که معیار پایداری گشتاور-ارتفاع آستانه واژگونی را در زمان 14/3 ثانیه و معیار پایداری نیرو-زاویه در زمان 14/2 ثانیه نشان می‌دهد.

3-4- شبیه‌سازی و مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها

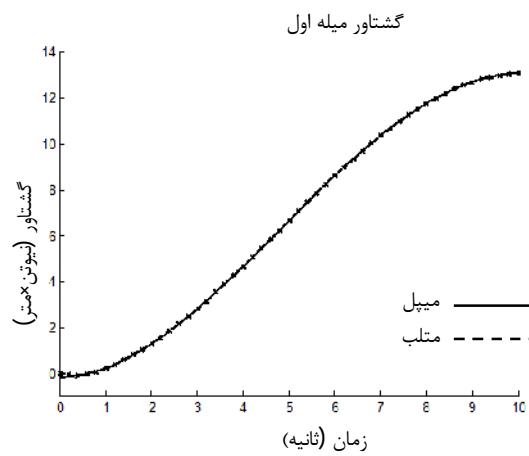
الگوریتم‌های اجتناب از واژگونی برخط با استفاده از معیار پایداری گشتاور-ارتفاع بر روی بازوی پایه متحرک نشان داده شده در شکل 8، شبیه‌سازی شده است. به منظور شبیه‌سازی یک مانور ناپایدار بازوی پایه متحرک از وضعیت $(\theta_1 = 90^\circ, \theta_2 = 175^\circ, \theta_3 = 175^\circ, x = 0m)$ به وضعیت $(\theta_1 = 40^\circ, \theta_2 = 20^\circ, \theta_3 = -10^\circ, x = 10m)$ حرکت می‌کند و زمان طی مسیر 40 ثانیه با گام زمانی 0/01 ثانیه درنظر 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 (tip) برابر با 0/5 ثانیه است که تقریباً متضاظر با آ استانه 0/35 است. 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 موردنظر 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 بپیماید، 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.



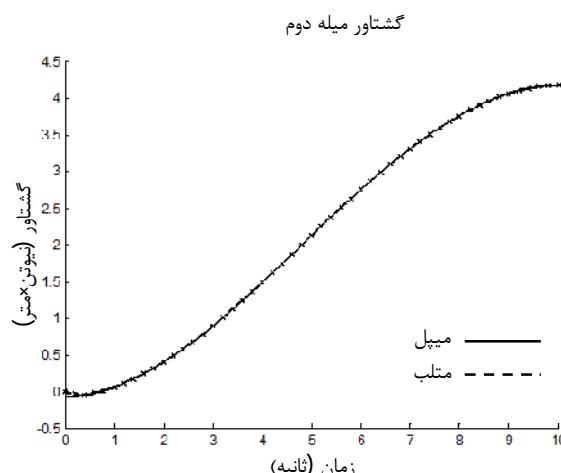
شکل 10 مقایسه معیار پایداری گشتاور-ارتفاع و معیار پایداری نیرو-زاویه برای یک مسیر مشخص بازوی پایه متحرک



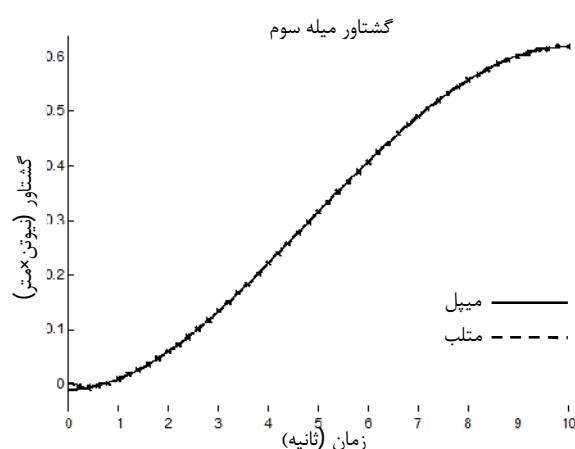
شکل 11 مسیر حرکت بازوی متحرک بدون اجرای الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط



شکل 9 (الف) صحبت‌سنجی مدل دینامیکی



شکل 9 (ب) صحبت‌سنجی مدل دینامیکی



شکل 9 (ج) صحبت‌سنجی مدل دینامیکی

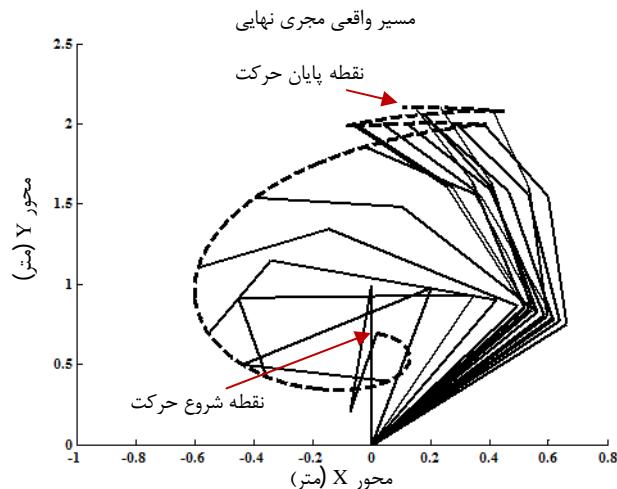
صحبت‌سنجی آن‌ها برای یک مسیر مشخص و با شرایط یکسان انجام شده است. بازوی پایه متحرک مورد نظر، از وضعیت $(\theta_1 = 90^\circ, \theta_2 = 0^\circ, \theta_3 = 0^\circ)$ به وضعیت $(\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = 0^\circ, \theta_3 = 0^\circ, x = 4m)$ در مدت زمان 20 ثانیه حرکت می‌کند و جسمی به جرم 3 کیلوگرم 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 فعلی اش می‌رود که باعث افزایش آن می‌شود، زمانی که آن 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 تزدیک آن ادامه می‌اید. 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:

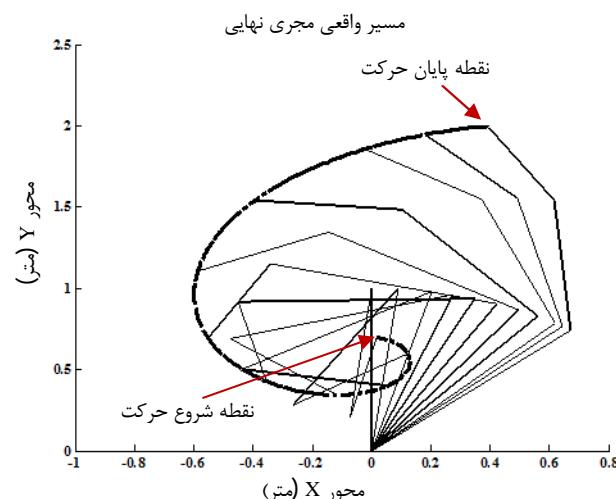
- » در هنگام رخداد ناپایداری بازو به پیکربندی اولیه باز گردانده می‌شود در نتیجه مجری نهایی به نقطه هدف نمی‌رسد.
- » تأثیر نیروی ناپایدارساز ایجاد شده روی پایه متحرک به علت حرکت بالاتنه در نظر گرفته نشده است.
- » حرکت پایه متحرک در هنگام بازگرداندن بازو به پیکربندی اولیه مشخص نشده است.
- » روند سیستماتیکی 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 استلزم 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

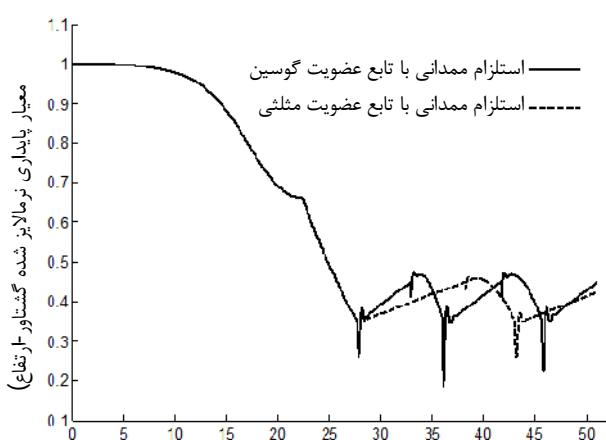
همان طور که در شکل 14 نشان داده شده است، هنگامی که بازوی پایه متحرک در آستانه واژگونی قرار می‌گیرد، یا به عبارتی دیگر آن به مقدار آستانه نزدیک می‌شود، هر دو الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط اجرا می‌شوند.



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

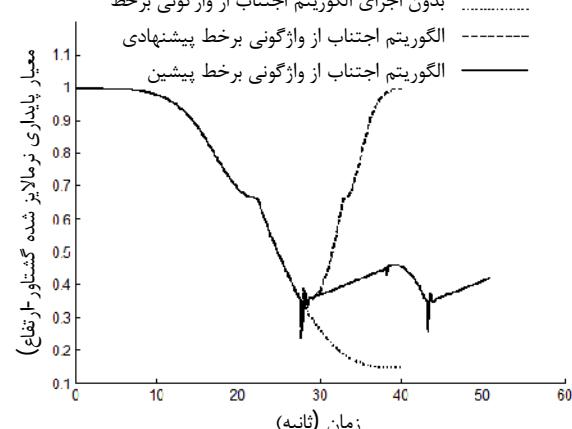


شکل 13 مسیر حرکت بازوی متحرک در حضور اجرای الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط پیشین



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

1- Gaussian membership function



شکل 14 تغییرات پایداری بازوی پایه متحرک

می شود. همچنین، به منظور پایدار نمودن بازوی پایه متحرک به کمک منطق فازی آن را به وضعیتی پایدار نزدیک به نقطه هدف می رسانند.

6- مراجع

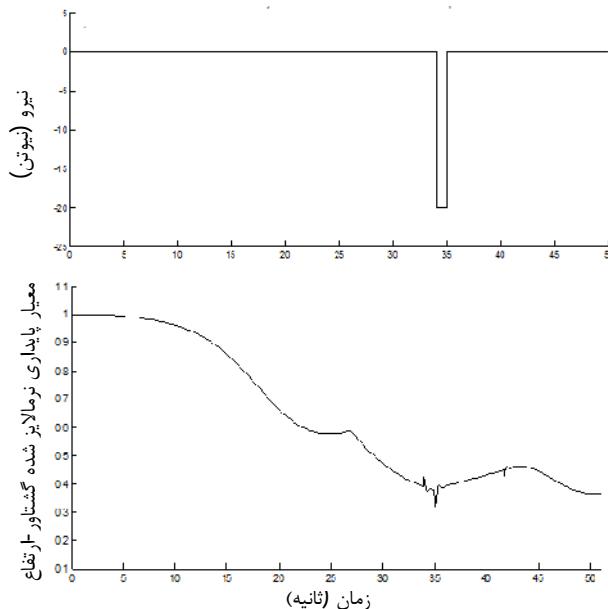
- [1] S. A. A. Moosavian, A. Daneshvar, M. Moradi, Reactionless path planning for mobile robots, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 43-51, 2011. (In Persian)
- [2] S. R. Larimi, S. A. A. Moosavian, Dynamic balancing of an under-actuated differential two wheeled manipulator 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 usingneural networks, in *13th Conference of Mechanical Engineering, Isfahan, Iran, 2005*. (In Persian)
- [15] S. 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. 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 می شود در حالی کهتابع عضویت مثلثی همواره با شبیه یکنواختی تغییر می کند.

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. همان طور که در شکل 16 نشان داده شده برای یک مانور ناپایدار، بازوی پایه متحرک از وضعیت ($\theta_1 = 90^\circ, \theta_2 = 0^\circ$) به وضعیت ($\theta_1 = 60^\circ, \theta_2 = 30^\circ, \theta_3 = 175^\circ, x = 0m$) و ($\theta_1 = 20^\circ, \theta_2 = 20^\circ, x = 10m$) حرکت می کند. همچنین، در زمان 34 تا 35 ثانیه نیرویی معادل 20 نیوتون در راستای محور طولی به وسط میله دوم وارد می شود که به مثابه یک لگد وارد به ربات سگ بزرگ^[22] است. همان طور که در مشاهده می شود، در اثر اغتشاش واردہ الگوریتم اجتناب از واژگونی برخط پیشنهادی بر اثر این اغتشاش واردہ و در نتیجه کاهش پایداری، اجرا شده و بازوی پایه متحرک را به نحوی مطلوب پایدار می سازد. بنابراین، الگوریتم پیشنهادی نه تنها مانع از واژگونی بازوی پایه متحرک شده بلکه اغتشاش واردہ را نیز دفع نموده است.

5- نتیجه گیری

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، شبیه سازی شده اند. نتایج شبیه سازی عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی را نشان می دهد. از مزایای الگوریتم پیشنهادی این است که توسط تابع نمو معیار پایداری میزان حساسیت پایداری سیستم به هر یک از مشخصه های حرکتی آن تعیین



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