



مسیریابی ربات‌های موازی چهار کابلی صفحه‌ای با حضور موانع دینامیکی به روش میدان پتانسیل و کنترل مبتنی بر گشتاور محاسبه شده

علی افلاکیان¹، مهدی طالع ماسوله^{2*}، حسن بیانی¹، رسول صادقیان³

- 1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران
 2- استادیار، آزمایشگاه تعامل انسان و ربات، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران
 3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشکده برق، پزشکی و مکاترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، قزوین
 * تهران، صندوق پستی 14395-1561@ut.ac.ir m.t.masouleh

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 14 بهمن 1394
 پذیرش: 01 فروردین 1395
 ارائه در سایت: 21 فروردین 1395
 کلید واژگان:

چکیده

در این مقاله تحلیل سینماتیکی و دینامیکی ربات‌های موازی کابلی صفحه‌ای در فرم کلی بررسی شده و این معادلات برای یک ربات چهار کابلی صفحه‌ای در محیط شبیه‌سازی مکانیکی متلب صحنه‌گذاری شده‌اند. به منظور دریافت مسیر بدون تداخل ربات در زمان و جلوگیری از برخورد مجری نهایی ربات و کابل‌ها با موانع متحرک، از روش میدان پتانسیل استفاده شده است. در این روش به منظور کاهش مصرف انرژی، قید کششی بودن کابل‌ها نیز در مسیریابی بهینه دخیل شده‌اند. شایان ذکر است که این روش برای اولین بار در ربات‌های کابلی مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به پیچیدگی حل مسأله مسیریابی عاری از برخورد ربات‌های کابلی، موانع به صورت دینامیکی و تصادفی در محیط در نظر گرفته شده‌اند. در همین راستا، قید کششی بودن کابل‌ها به عنوان یکی از مهمترین چالش‌های کنترل ربات‌های کابلی مورد بررسی قرار گرفته و برای تحقق این قید و همچنین محدود بودن کشش کابل‌ها درون فضای کاری مورد نظر از تابع بهینه‌سازی موجود در برنامه متلب استفاده شده است. در نهایت کنترل یک نمونه ربات کابلی صفحه‌ای مقید چهار کابلی، به روش گشتاور محاسبه شده به منظور طی کردن مسیر به دست آمده از میدان پتانسیل انجام شده است. روش کار توضیح داده شده و نتایج به دست آمده حاکی از مؤثر بودن این روش است.

ربات موازی کابلی
 میدان پتانسیل مجازی
 روش گشتاور محاسبه شده
 سینماتیک و دینامیک ربات کابلی
 موانع تصادفی

Path planning of cable driven parallel robots in the presence of dynamic obstacles via potential field using computed torque control method

Ali Aflakiyan¹, Mehdi Tale Masouleh^{1*}, Hassan Bayani¹, Rasoul Sadeghian²

- 1- Human and Robot Interaction Laboratory, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
 2- Department of Electrical, Biomedical and Mechatronics Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran
 * P.O.B. 14395-1561, Tehran, Iran, m.t.masouleh@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 03 February 2016
 Accepted 20 March 2016
 Available Online 09 April 2016

Keywords:

Cable-driven parallel robots
 Artificial potential fields
 Computed torque method control
 Kinematic and dynamic of cable robot
 Random obstacles

ABSTRACT

In this paper, kinematic and dynamic model of planar cable-driven parallel robots are introduced in general form and verified for a constrained cable-driven parallel robot in Sim-mechanics. Path planning based on artificial potential field approach is considered to prevent collision between dynamic obstacle, end-effector and cables in order to achieve collision-free path. As well as to reduce energy consumption, cable tension constraints have been involved in optimization of path planning. This method is proposed to control a cable robot. Therefore, obstacles are distributed randomly in order to have a complex environment. By this way, cable tension constraint is studied as one of the most crucial challenges for cable driven robots. Moreover, Fmincon function of Matlab is applied in order to take into account the required constraints and maintain the limits for cables tension. The latter leads to solve the redundancy resolution which is a definite asset in controlling a cable-driven parallel robot. Finally, a four-cables driven parallel robot is controlled by using the so-called computed torque method for tracking the desired and optimized path. The method is explained and obtained results indicate the efficiency of the proposed approach.

1- مقدمه

صنعت و نیاز به افزایش، دقت، شتاب و توانایی حمل بار و با الهام از طبیعت نیاز به کمک از زنجیره‌های موازی احساس شد. ربات موازی ساز و کاری است که سکوی متحرک را با چند زنجیره سینماتیکی حلقه بسته به پایه‌ها متصل می‌کند [2]. عمدتاً به دلیل ضعف‌های فراوان ربات‌های سری و موازی موجود،

در دهه‌های اخیر استفاده از ربات‌ها در بسیاری از صنایع رشد چشم‌گیری داشته است. ربات‌های سری از بندهای صلب متوالی تشکیل شده‌اند و پنجه از طریق یک زنجیره باز سینماتیکی به پایه متصل شده است [1]. با پیشرفت

Please cite this article using:

A. Aflakiyan, M. Tale Masouleh, H. Bayani, R. Sadeghian, Path planning of cable driven parallel robots in the presence of dynamic obstacles via potential field using computed torque control method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 109-118, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مهم‌ترین مقالات در این زمینه می‌توان به مقاله [18] اشاره نمود که مسأله مسیریابی را به کمک کنترل بهینه، بدون در نظر گرفتن موانع، پیاده‌سازی نموده است.

روش میدان پتانسیل در دهه‌های گذشته، محبوبیت زیادی در بین تحقیقات رباتیکی به دست آورده است [20,19]. یکی از دلایل عمده این محبوبیت پیاده‌سازی سریع این روش و استفاده مستقیم از نتایج آن است.

در حقیقت، این روش به صورت بلادرنگ و تنها با اطلاعات محلی سیستم پیاده‌سازی می‌شود. اولین مثال در زمینه میدان پتانسیل توسط خطیب [21] ارائه شد. فضای مثال خطیب به گونه‌ای پیکر بندی شده بود که هدف در نقطه کمینه کل فضا و موانع و دیوارها در روی تپه‌ای با پتانسیل بالا قرار داشتند. با این روش میدان پتانسیل، ربات به سمت نقطه‌ای که پتانسیل کمتری دارد جذب می‌شود و از تپه‌ها با پتانسیل بالا دوری می‌کند. برآیند نیروها، جهت حرکت و سرعت ربات را مشخص می‌کنند.

در روش میدان پتانسیل، میدان جذب و میدان دفع به صورت جداگانه محاسبه شده و نتیجه نهایی از جمع آثار آن‌ها با یکدیگر به دست می‌آید. روش‌های مختلفی در میدان پتانسیل براساس عملکرد فوق وجود دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به تابع GPF کیروک¹¹، تابع خطیب-فیراس¹²، تابع پتانسیل سوپر کوادراتیک¹³، تابع پتانسیل هارمونیک¹⁴ و پتانسیل دفع برد¹⁵ [26-22] اشاره کرد. تمامی روش‌های فوق براساس داده‌های محلی از محیط، کار می‌کنند که به آن روش پتانسیل¹⁶ می‌گویند. یکی از دلایل جذابیت این روش‌ها عدم نیاز به پردازش قبل از برنامه‌ریزی مسیر است. زیرا طراحی یک رفتار پویا که منجر به اجتناب از برخورد با موانع شود، بسیار آسان است. مشکل اصلی میدان پتانسیل زمانی که موانع حضور داشته باشند، ظاهر می‌شود. در نتیجه، تابع پتانسیل محدب¹⁷ نخواهد بود و امکان به وجود آمدن کمینه محلی¹⁸ که اصطلاحاً به آن دام¹⁹ می‌گویند، در اطراف هدف وجود خواهد داشت. کمینه محلی، نتیجه شکل غیرقابل پیش‌بینی پتانسیل کل محیط بعد از جمع آثار است. از دیگر مشکلات میدان پتانسیل قابل پیش‌بینی نبودن خط سیر اصلی برای رسیدن به هدف است. به علاوه در عمل، تعیین ضرایب فرمول‌های میدان پتانسیل برای تضمین دور ماندن از موانع از اهمیت بالایی برخوردار است. مسیر طراحی شده از روش میدان

هنوز هم بسیاری از صنایع مهندسی و تولیدات به رباتیک مجهز نشده‌اند. به عنوان مثال، در بسیاری از کاربردها، فضای کاری¹ بزرگ و توانایی حمل بار² بیشتر از ربات‌های معمولی، با در نظر گرفتن هزینه آن، مورد نیاز است [3]. به دنبال حل این مسائل، کلاس جدیدی از ربات‌های موازی به نام ربات‌های موازی کابلی³ معرفی شده‌اند. ربات موازی کابلی مکانیزم حلقه بسته‌ای است که مجری نهایی توسط کابل‌ها به پایه‌ها متصل‌اند. هر یک از کابل‌ها به دور یک استوانه دوار پیچیده و توسط مکانیزمی به منظور روی هم نرفتن کابل‌ها، به موتور متصل شده‌اند [4]. شکل 1، یک ربات کابلی صفحه‌ای با n کابل را در فرم عمومی نشان می‌دهد که از موتورها، سیستم کابل جمع‌کن³ و مجری نهایی تشکیل شده است.

کنترل ربات‌های کابلی با توجه به رفتار کابل از دیگر همتایان خود چالش برانگیزتر است. تلاش‌های فراوانی برای مدل‌سازی و کنترل این کلاس از ربات‌ها، برای کاربردهای بلادرنگ و صنعتی انجام گرفته است [6,5]. برای تمامی ربات‌های موازی کابلی، یک تعادل استاتیکی بین نیروهای خارجی و کشش کابل‌ها باید وجود داشته باشد [7]. با فرض بدون جرم بودن کابل‌ها و همچنین عدم افزایش طول آنها در اثر کشش بسیاری از استراتژی‌های کنترلی مورد استفاده برای ربات‌های موازی معمولی می‌توانند برای ربات‌های کابلی نیز مورد استفاده قرار گیرند. برای مثال در کنترل کلاسیک با استفاده از کنترلر PID در [9,8]، نتایج قابل قبولی به دست آمده است. در کنترل مدرن، کنترل مکانیزم‌های کابلی با استفاده از شناسایی سیستم بر مبنای منطق فازی تطبیقی⁴ در [10] بحث شده است. از کنترلر غیر خطی لغزشی⁵ در فضای کاری قابل دسترس⁶، برای یک ربات کابلی صفحه‌ای⁷ با قیدهای نیرویی در ورودی موتورها در [11] استفاده شده است. تلاش‌های فراوانی برای به دست آوردن معادلات سینماتیکی و دینامیکی که بتوان از آنها یک مدل ساده از ربات کابلی فضایی، جهت کنترل آنلاین با دقت مناسب انجام داد، صورت گرفته است [13,12]. در مقالات [15,14] نیز تلاش بر پیاده‌سازی روش کنترلر PID به همراه مقاوم‌سازی در برابر اغتشاشات موضوع اصلی پژوهش بوده است. با همین دیدگاه در مقاله [16] کنترلر تطبیقی مقاوم ارائه و روی ربات‌های موازی کابلی فضایی پیاده‌سازی شده است.

یکی از اهداف اصلی این مقاله بیان مزایای روش کنترلی گشتاور محاسبه شده⁸ در مقایسه با روش‌های ارائه شده در دیگر مقالات است. در این روش علاوه بر اینکه دقت افزایش یافته است، صرفه‌جویی در انرژی به علت محاسبه و کنترل میزان گشتاور وجود خواهد داشت. همچنین این روش یک کنترل سازگار⁹ با ساختار ربات موازی کابلی است. در این روش گشتاور به گونه‌ای محاسبه می‌شود که معادله کنترلی خطی شده و سپس ربات به صورت حلقه بسته کنترل خواهد شد [17]. در این مقاله از تابع بهینه‌سازی¹⁰ متلب برای تحقق قید مثبت بودن نیروی کابل‌ها و تضمین محدود بودن نیرو بین دو مقدار کمینه و بیشینه استفاده شده است. از دیگر اهداف این مقاله مسیریابی بدون برخورد ربات با مصرف انرژی بهینه است که در مورد ربات‌های موازی کابلی بسیار کم مورد توجه قرار گرفته است. از جمله

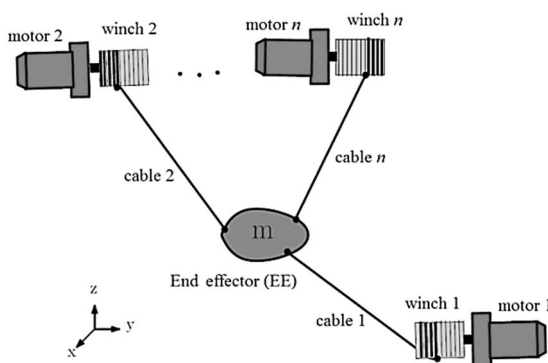


Fig. 1 Schematic view of a CDPR with n cables

شکل 1 فرم عمومی ربات‌های کابلی صفحه‌ای

¹¹ Krogh's GPF function

¹² Khatib's FIRAS function

¹³ Superquadratic potential function

¹⁴ Harmonic potential function

¹⁵ Beard's attractor and repulsor potential

¹⁶ Local potential approaches

¹⁷ Convex

¹⁸ Local minimum

¹⁹ Trap

¹ Workspace

² Load carrying capacity

³ Cable-driven parallel robots (CDPR)

⁴ ANFIS

⁵ Sliding mode control (SMC)

⁶ Feasible workspace

⁷ Cable-Suspended Parallel Robot

⁸ Computed Torque Method

⁹ Compliant

¹⁰ Fmincon

1-2- سینماتیک ربات

در ربات‌های کابلی با تغییر زاویه موتور و در نتیجه تغییر طول کابل‌ها موقعیت مجری نهایی تغییر می‌کند. در شکل 2 مدل سینماتیکی یک ربات کابلی نشان داده شده است.

A_i و B_i ($i=1,2,\dots,n$) به ترتیب نقاط اتصال i امین کابل به پایه و مجری نهایی هستند، l_i بردار طول کابل i ام و s_i بردار یکه در راستای آن است. a_i و b_i به ترتیب بردار اتصال A_i ها به مرکز مختصات G (مرجع) و بردار اتصال B_i ها به مرکز مختصات E (مختصات متصل به مجری نهایی) هستند. با توجه به شکل 2 موقعیت مجری نهایی در مختصات G از رابطه (1) به دست می‌آید:

$$c = -l_i + a_i - F_G R_{F_E} \times b_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

در معادله (1)، c بردار موقعیت ربات در فضای دو بعدی و R ، ماتریس دوران از مختصات F_E به F_G ، از رابطه (2) محاسبه می‌شود:

$$F_G R_{F_E} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

در رابطه (2)، θ زاویه دوران حول محور Z است. با مشتق‌گیری از معادله (1) می‌توان به نرخ تغییر بردار طول کابل‌ها طبق رابطه (3) دست یافت:

$$\dot{l}_i \dot{A}_i = [c - a_i + b_i]^T [\dot{c} - \dot{a}_i + \dot{b}_i] \quad (3)$$

در معادله (3) فرض بر این است که b_i در مختصات مرجع است. اگر ω_i را بردار سرعت زاویه‌ای مجری نهایی در مختصات متصل به آن در نظر بگیریم، از مبث مشتق بردار واضح است که $\dot{b}_i = \omega_i \times b_i$ و همچنین $\dot{a}_i = 0$ در نتیجه از بازنویسی معادله (3)، رابطه (4) به دست می‌آید:

$$\dot{l}_i = s_i^T \dot{c} + (b_i \times s_i^T) \omega_i \quad (4)$$

در معادله (4) s_i بردار یکه در راستای کابل i ام، از رابطه (5) در هر لحظه محاسبه می‌شود:

$$s_i = \frac{l_i}{\sqrt{l_i^T l_i}} \quad (5)$$

در نهایت معادله سینماتیک معکوس ربات از معادله (6) به دست خواهد آمد:

$$\dot{L} = Jt \quad (6)$$

در معادله (6)، $\dot{L} = [\dot{l}_1, \dot{l}_2, \dots, \dot{l}_n]^T$ بردار جابه‌جایی طول کابل‌ها و $t = [c, \omega]^T$ بردار سرعت‌های خطی و زاویه‌ای مجری نهایی است. ماتریس

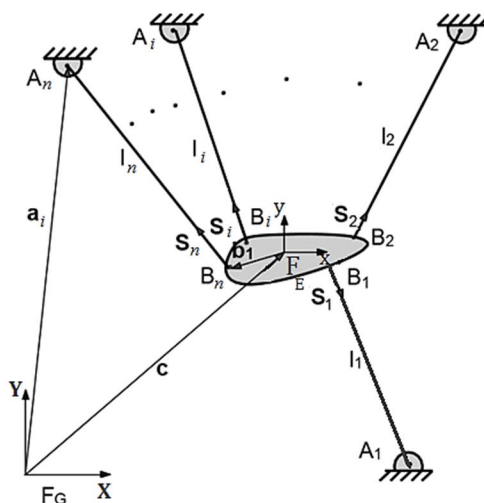


Fig. 2 Kinematic modeling of a CDPR with n cables
 شکل 2 مدل سینماتیکی یک ربات کابلی با n کابل

پتانسیل بهینه نیست و غالباً با مسیر بهینه موجود برای رسیدن به هدف تفاوت بسیاری دارد. در حالی که اکثر توابع پتانسیل بخاطر وجود کمینه محلی دارای مشکل هستند.

در [27] تابع جدیدی از میدان پتانسیل براساس موقعیت و سرعت ربات، موانع و هدف ارائه شده است. همچنین راه حلی برای مشکل غیر قابل دسترس بودن هدف در صورت نزدیک بودن مانع به آن، که اصلاح این مشکل را گنرون¹ می‌نامند، ارائه شده است. در حالی که توانایی جمع آثار در روابط میدان پتانسیل مزیت‌های فراوانی دارد، گاهی اوقات کمینه محلی ناخواسته‌ای را تولید می‌کند. برای حل مشکل کمینه محلی روش‌های مختلفی بررسی شده است [28-30]. نوع دیگری از توابع پتانسیل، توابع پتانسیل کلی² هستند که از جمله آن می‌توان به تابع پتانسیل ناوبری³ اشاره کرد. محاسبه تابع پتانسیل ناوبری مستلزم دانستن تمام اطلاعات محیط است. در نتیجه تنها یک کمینه کلی ایجاد می‌گردد [31].

در این مقاله برای محاسبه مسیر دارای بهینه انرژی از روش میدان پتانسیل مجازی استفاده شده است. برای اجتناب از گرفتاری در بهینه‌های محلی مقدار جاذبه هدف بسیار بیشتر از موانع در نظر گرفته شده است. همچنین در صورتی که در بخشی از مسیر حرکت مقدار تغییر مکان بسیار کم شود مقادیر دافعه اجسام و شعاع مؤثر آنها کاهش یافته و مقدار جاذبه هدف افزایش می‌یابد. پس از عبور از بهینه محلی، مجدداً ضرایب به حالت عادی باز خواهند گشت. تأثیرگذاری این روش در بخش چهارم مقاله به خوبی نشان داده شده است و شبه‌کد مربوط به آن ارائه گردیده است. از جمله پژوهش‌های مشابه می‌توان به مقاله [32] اشاره نمود که با استفاده از روش میدان پتانسیل مجازی به مسیریابی بدون برخورد برای ربات موازی 3-RRR پرداخته است. در این مرجع موانع استاتیکی فرض شده و مشکلاتی از جمله در نظر نگرفتن تکینگی ربات، زمان‌بر بودن روش ارائه شده و همچنین برخورد لینک‌ها با یکدیگر وجود دارد. در ادامه این مقاله مقایسه‌ای با این روش صورت گرفته است. در مرجع [33] نیز کنترل ربات موازی کابلی صفحه‌ای براساس مود لغزشی و بازخورد پردازش تصویر صورت گرفته است. نوآوری مقاله حاضر نسبت به این مقالات و سایر پژوهش‌ها استفاده از روش میدان پتانسیل مجازی برای اجتناب از برخورد کابل‌ها و مجری نهایی با موانع پویا و ناگهانی است. همچنین به صورت هم‌زمان این الگوریتم از روشی برای کمینه نمودن انرژی مصرفی ربات استفاده می‌کند.

در ادامه، بخش دوم مقاله روش به دست آوردن فرم عمومی معادله‌های سینماتیکی و دینامیکی برای هر ساختار از ربات‌های کابلی صفحه‌ای را شرح می‌دهد. سپس در قسمت سوم به کنترل معادله دینامیکی حاصل برای یک نمونه ربات چهار کابلی صفحه‌ای به روش گشتاور محاسبه شده پرداخته می‌شود. قسمت چهارم شامل ارائه روش مسیریابی به کمک میدان پتانسیل و شبیه‌سازی‌ها با نرم‌افزار متلب است. سرانجام و در قسمت آخر مقاله نتیجه‌گیری از پاسخ‌های شبیه‌سازی شده و پیشنهادها برای کارهای آینده انجام خواهد شد.

2- مدل ربات‌های موازی صفحه‌ای کابلی

در این بخش معادلات سینماتیکی و دینامیکی ربات‌های موازی کابلی صفحه‌ای در فرم عمومی و سپس برای یک ربات کابلی صفحه‌ای خاص به منظور استفاده از مدل به دست آمده در کنترل محاسبه شده است.

¹ GNRON
² Global potential field
³ Navigation function

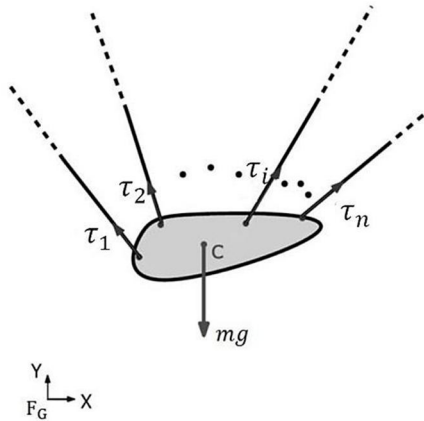


Fig. 3 Free-body-diagram of a planar CDPR's end-effector

شکل 3 نمودار آزاد مجری نهایی در ربات کابلی صفحه‌ای

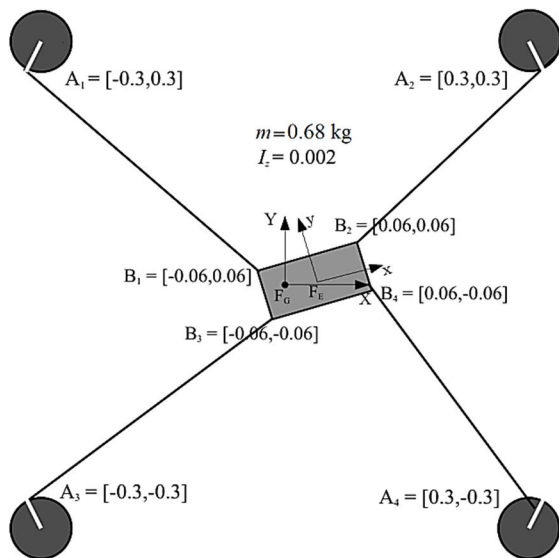


Fig. 4 Design parameters of the understudy CDPR

شکل 4 مشخصه‌های ربات کابلی صفحه‌ای مورد مطالعه

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (15)$$

در رابطه (15)، m جرم مجری نهایی و I ممان اینرسی آن است. ماتریس مولفه‌های کوریولیس⁶ (C) از رابطه (16) به دست می‌آید:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega I_z \omega \end{bmatrix} \quad (16)$$

لازم به ذکر است در شکل 4، A_i ها در مختصات مرجع و B_i ها در مختصات متصل به جسم هستند. همچنین \emptyset زاویه مجری نهایی با محور Y و X است.

3-2- صحنه‌گذاری⁷ معادله دینامیکی

در این بخش به منظور اطمینان از معادله دینامیکی و همچنین ژاکوبین به دست آمده برای ربات کابلی مورد بررسی در مقاله یک مدل مجازی⁸ در محیط شبیه‌سازی مکانیکی متلب و با مشخصات داده شده در شکل 4 پیاده‌سازی شده است (شکل 5). شایان ذکر است که در این مدل جرم

له ژاکوبین¹ ربات، از رابطه (7) محاسبه می‌شود:

$$J = \begin{bmatrix} S_1 & Rb_1 \times S_1 \\ S_2 & Rb_2 \times S_2 \\ \vdots & \vdots \\ S_n & Rb_n \times S_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

با در نظر گرفتن سینماتیک ربات از فرم به دست آورده شده در معادله (6)، در قسمت بعد به تحلیل دینامیک ربات‌های کابلی صفحه‌ای در حالت کلی (n کابل) پرداخته شده است.

2-2- دینامیک ربات

با فرض تحت کشش بودن کابل‌ها و صرف نظر از جرم آن‌ها، از نمودار آزاد² نیروهای وارد بر مجری نهایی (شکل 3)، معادله دینامیکی ربات با استفاده از قوانین نیوتون-اولی³ از روابط (8) و (9) به دست می‌آیند:

$$\tau_1 S_1 + \tau_2 S_2 + \dots + \tau_n S_n + m \begin{bmatrix} 0 \\ -g \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} \ddot{x}_c \\ \ddot{y}_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

در معادله (8)، τ_i نیروی کشش در کابل نام i و g ثابت گرانش است (ثابت گرانش در صورتی که ربات کابلی صفحه‌ای به صورت عمودی باشد، در راستای یکی از محورها خواهد بود، در غیر این صورت و در صورت افقی بودن ربات مقدار آن در راستای محور سوم وجود داشته که به دلیل روی سطح قرار گرفتن مجری نهایی ربات در معادله‌ها وارد نمی‌شود). در صورتی که جرم مجری نهایی نسبت به کابل‌ها بسیار بیشتر باشد، می‌توان با دقت خوبی از جرم و همچنین انعطاف موجود در کابل‌ها، در مقایسه با سایر قطعات مکانیکی، صرف نظر کرد [7]. با استفاده از نکته فوق و با توجه به مشخصه‌های ربات مورد بررسی در این مقاله از جرم و همچنین انعطاف موجود در کابل‌ها، در مقایسه با سایر قطعات بکار رفته در ربات، صرف‌نظر شده است. مومنتم زاویه‌ای⁴ مجری نهایی حول مرکز جرم آن برابر است با:

$$H_c = I_c \omega \quad (9)$$

در معادله (9)، I_c ممان اینرسی⁵ مجری نهایی است. با مشتق‌گیری از این معادله، روابط (10, 11) به دست می‌آید:

$$\dot{H}_c = \frac{\partial H_c}{\partial t} + \dot{\omega} \times H_c = I_c \dot{\omega} + \omega I_c \omega \quad (10)$$

$$\dot{H}_c = \sum_{i=1}^n b_i \times S_i \tau_i \quad (11)$$

از آنجا که در ربات کابلی صفحه‌ای مورد بررسی سرعت زاویه‌ای ω تنها حول محور Z وجود دارد، مقدار آن اسکالر بوده و از رابطه (12) به دست می‌آید. همچنین ممان اینرسی تنها حول محور Z وجود داشته و از رابطه (13) محاسبه می‌شود:

$$\omega = \dot{\emptyset} \quad (12)$$

$$I_c = I_z \quad (13)$$

از معادله‌های (8) تا (13) معادله دینامیکی به فرم کلی نشان داده شده در رابطه (14) به دست می‌آید [13]:

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Mg = -J^T \tau \quad (14)$$

مشخصات ربات کابلی صفحه‌ای مورد بررسی در شکل 4 آورده شده است. در معادله (14)، بردار گرانش $g = [0 \ 9.81 \ 0]^T$ ، بردار $q = [x \ y \ \emptyset]^T$ بردار موقعیت و زاویه مجری نهایی و τ بردار نیروی درون کابل‌ها است. ماتریس جرم M از رابطه (15) محاسبه می‌گردد:

¹ Jacobian

² Free-body-diagram

³ Newton-Euler equations

⁴ Angular momentum

⁵ Moment of inertia

⁶ Coriolis terms

⁷ Verification

⁸ Virtual model

و به عنوان ورودی به همراه q های مطلوب به بلوک شماره 3 (تابعی که به منظور محدود کردن و مثبت کردن نیروی کابل‌ها استفاده شده است) وارد می‌شوند. بنابراین به خطا، مشتق خطا و انتگرال خطا به عنوان ورودی نیاز است. با استفاده از اختلاف بین ورودی مطلوب و مقدار کنترل شده آن، خطا محاسبه شده و می‌توان مشتق و انتگرال آن را به دست آورد. همچنین در تابع استفاده شده در بلوک 3، نیروها در وارون ژاکوبین ربات ضرب شده و به صورت یک ماتریس 4×1 گشتاور کنترل شده به همراه q ها و مشتق آن‌ها به ورودی بلوک شماره 4 وارد می‌شوند، تا از معادله کنترلی اصلی q های کنترل شده به دست آیند. مقادیر مناسب ضرایب کنترلی از روش سعی و خطا با هدف دنبال کردن مسیر مطلوب نشان داده شده در شکل 6، انتخاب شدند. نیروهای به دست آمده در کابل‌ها بعد از اعمال کنترل در شکل 9 نشان داده شده است.

$$k_p = 15, \quad k_v = 23, \quad k_i = \quad (21)$$

همان‌گونه که پیشتر نیز اشاره شد در رابطه (21)، ضریب انتگرال‌گیر به دلیل اجتناب از نوسانی شدن و ناپایداری، کوچک انتخاب شده است. با استفاده از کنترلر طراحی شده، در بخش بعد ربات مسیر محاسبه شده توسط میدان پتانسیل را پیموده تا به نقطه هدف برسد.

4- معادلات مسیریابی به کمک میدان پتانسیل مجازی

بنیان روش میدان پتانسیل بر این اساس است که نقطه هدف دارای

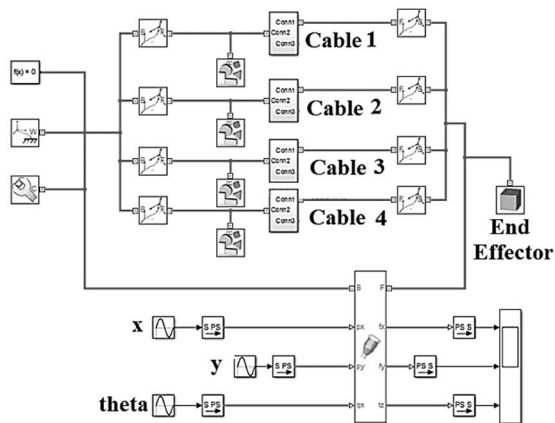


Fig. 5 Desired path for tracking a given trajectory

شکل 5 نمایی از مدل مجازی ایجاد شده در محیط شبیه‌سازی مکانیکی متلب

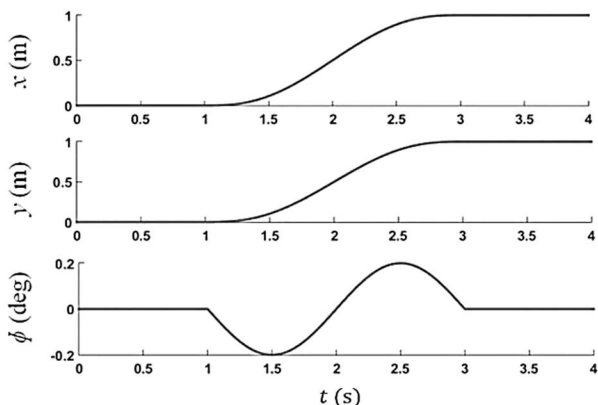


Fig. 6 Desired path for tracking a given trajectory

شکل 6 مسیر مطلوب مورد نظر جهت دنبال کردن مسیر در نظر گرفته شده

کابل‌ها در نظر گرفته نشده است. با اعمال هم‌زمان مسیر مشخص نشان داده شده در شکل 6 به معادله دینامیکی به دست آمده برای ربات و مدل مجازی آن و مقایسه نیروهای خروجی و ممان ایجاد شده، مشاهده می‌شود که اختلاف بسیار ناچیزی بین این دو مدل وجود دارد. همانگونه که در نمودار شکل 7 قابل مشاهده است، این اختلاف نیرو و ممان از مرتبه حدود 10^{-14} و 10^{-15} است و مقدار قابل قبولی برای اطمینان از درستی معادله دینامیکی به حساب می‌آید و می‌توان گفت رفتار دو مدل یکسان است. شایان ذکر است که با محاسبه نیروهای دورن کابل‌ها از مدل مجازی و ضرب آن در ژاکوبین وارون ربات می‌توان به این نیروها دست یافت و هنگام مقایسه دو مدل می‌توان از صحت ژاکوبین ربات نیز اطمینان حاصل کرد.

3- کنترل

در این بخش از کنترلر PID بر روی معادله‌های خطی شده با روش گشتاور محاسبه شده و یافتن پارامترهای این کنترلر، برای ربات چهار کابلی صفحه‌ای، استفاده شده است. به منظور افزایش سرعت و دقت دنبال کردن¹، معادله دینامیکی ربات ابتدا به روش گشتاور محاسبه شده خطی شد، که می‌تواند پایداری مجانبی کلی² را تضمین کند [34]. در ابتدای طراحی کنترلر PD پیشنهاد گردید. با انتخاب ضرایب مناسب همواره خطای حالت ماندگار³ در سیستم وجود داشت پس ضریب انتگرال‌گیر نیز به کنترلر اضافه شد. اضافه شدن ضریب انتگرال‌گیر به دلیل انتگرال‌گیری از خطا، باعث کاهش آن در هر مرحله می‌شود. همچنین باید اشاره کرد که در صورت بزرگ انتخاب کردن مقدار ضریب انتگرال‌گیر ممکن است ناپایداری رخ دهد.

به منظور خطی‌سازی معادله دینامیکی ارائه شده در بخش 2-2، گشتاور از رابطه (17) به عنوان ورودی کنترلر محاسبه می‌شود:

$$\tau = -J^T [M\ddot{q} + k_p \dot{e} + k_v \dot{e} + k_i \int e] + C\dot{q} + Mg \quad (17)$$

در رابطه (17)، k_p ، k_v و k_i به ترتیب ضرایب‌های کنترلی تناسبی، مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر هستند. حدس اولیه این پارامترها به کمک جدول ضرایب زیگلر-نیکلز⁴ بوده و با پروسه سعی و خطا مقدار مناسب پیدا شده است. ژاکوبین ربات یک ماتریس 3×4 (غیر مربعی) است و برای وارون کردن آن از روش شبه معکوس⁵ رابطه (18) استفاده می‌شود:

$$J^+ = (J^T J)^{-1} J^T \quad (18)$$

همچنین e و \dot{e} به ترتیب بردارهای خطای موقعیت، خطای سرعت و

انتگرال خطا بوده که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$e = q - q_d, \quad \dot{e} = \dot{q} - \dot{q}_d, \quad \int e = \int (q - q_d) \quad (19)$$

در رابطه (19)، \dot{q}_d و q_d به ترتیب موقعیت و سرعت مطلوب هستند. گشتاور به دست آمده از رابطه (17) به عنوان ورودی به بلوک سیستم اعمال شده و می‌توان به q ها دست یافت:

$$\ddot{q} = -M^{-1}(J^T \tau + C + Mg) \quad (20)$$

با دوبار انتگرال‌گیری از معادله (20)، q کنترل شده به دست خواهد آمد.

به دلیل ویژگی ذاتی کابل که تنها تحمل کشش را دارد، در ربات‌های کابلی همواره به حداقل یک کابل اضافه برای تضمین قید در کشش بودن کابل‌ها نیاز است. شکل 8 کنترلر طراحی شده برای ربات معرفی شده را در محیط سیمولینک⁶ متلب نشان می‌دهد. در بلوک شماره 2 قانون کنترلی نوشته شده

¹ Tracking

² Global asymptotically stable

³ Steady state error

⁴ Ziegler-Nichols

⁵ Pseudo Inverse

⁶ Simulink

⁷ Fmincon

نقطه به عنوان هدف انتخاب می‌شود. پتانسیل کلی محیط از جمع دو مولفه زیر به دست می‌آید [23]:

$$U_{total}(P) = U_{att}(P) + U_{rep}(P) \quad (22)$$

در معادله (22)، پارامتر $U_{total}(P)$ میدان پتانسیل کل محیط، $U_{att}(P)$ میدان پتانسیل جاذبه و $U_{rep}(P)$ میدان پتانسیل دافعه است. تمام این توابع براساس موقعیت q هستند که در فضای دو بعدی به صورت $P = [x, y]^T$ و در فضای سه بعدی به صورت $P = [x, y, z]^T$ تعریف می‌شوند.

1-4- میدان پتانسیل جاذبه

اکثر توابع میدان پتانسیل از رابطه (23) برای محاسبه میدان جاذبه استفاده می‌کنند:

$$U_{att} = \frac{1}{2} K_{att} \|P_{target} - P_{robot}\|_2^h \quad (23)$$

در معادله (23)، پارامتر K_{att} ضریب جذب بوده و مقدار آن همواره مثبت است. P_{robot} و P_{target} نشان دهنده موقعیت هدف و ربات هستند و $\|P_{target} - P_{robot}\|_2^h$ فاصله اقلیدسی ربات و هدف است. اگر $0 < h \leq 1$ باشد میدان پتانسیل جذب بصورت مخروطی شکل شده و فقط راس آن (نقطه هدف) دارای حداقل پتانسیل است. اما غالباً این ضریب به صورت $2 \leq h$ در نظر گرفته می‌شود، تا حداقل پتانسیل در نقطه هدف قرار گیرد. در این [33] برای کمینه شدن انرژی از مقادیر مختلف h استفاده شده است. در این پژوهش مقدار $h = 2$ و همچنین ضریب جذب $K_{att} = 1$ در نظر گرفته شده است. با مشتق گیری از میدان پتانسیل، می‌توان نیروی جاذبه وارد بر ربات را با رابطه (24) محاسبه نمود:

$$f_{att} = -\frac{\partial U_{att}}{\partial P_{robot}} = K_{att}(P_{target} - P_{robot}) \quad (24)$$

در معادله (24)، پارامتر f_{att} بردار نیروی جاذبه است. این نیرو همراستی بردار بین مجری نهایی ربات و نقطه هدف است.

2-4- میدان پتانسیل دافعه

به طور کلی، میدان پتانسیل دافعه در اطراف مانع دارای مقدار بسیار زیادی است و دور از آن روی ربات بی اثر است. روابط متعددی برای میدان پتانسیل دافعه ارائه شده که در اینجا به رابطه خطیب-فیراس (25) اشاره می‌شود [19]

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2} K_{rep} \left(\frac{1}{\rho_{RO}} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2, & \rho_{RO} \leq \rho_0 \\ 0, & \rho_{RO} > \rho_0 \end{cases} \quad (25)$$

در معادله (25)، پارامتر K_{rep} ضریب دافعه و مقداری مثبت است. ρ_{RO} فاصله هندسی ربات تا مانع و ρ_0 فاصله‌ای است که میدان پتانسیل آن تأثیرگذاری دارد. با مشتق گیری از میدان پتانسیل، می‌توان نیروی دافعه را با رابطه (26) محاسبه نمود:

$$f_{rep} = \begin{cases} -\frac{K_{rep}}{\rho_{RO}^2} \frac{P_{target} - P_{robot}}{\|P_{target} - P_{robot}\|_2}, & \rho_{RO} \leq \rho_0 \\ 0, & \rho_{RO} > \rho_0 \end{cases} \quad (26)$$

در ادامه خروجی کنترلر ربات، با در نظر گرفتن میدان پتانسیل، پیاده‌سازی می‌گردد. تصویر حرکت ربات با توجه به موانع مورد تحلیل قرار گرفته و با شناسایی موانع و لبه‌یابی آنها از مسیر معمولی جدا می‌شود. در نهایت با استفاده از روش میدان پتانسیل مسیر مطلوب به دست می‌آید.

3-4- مسیر انرژی بهینه

به منظور رعایت حد فاصل عدم برخورد، قانون اجتناب از مانع به نحوی

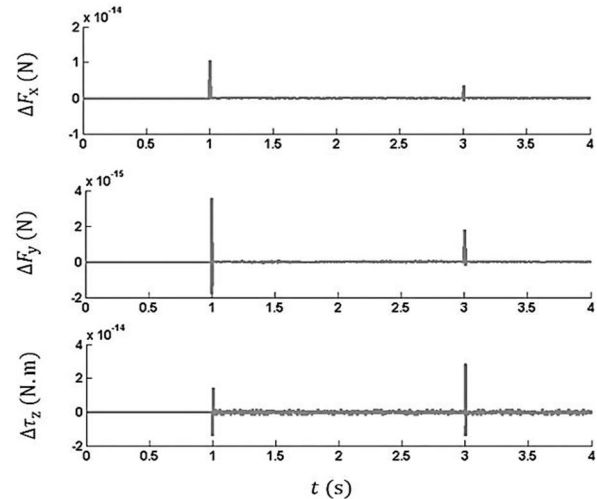


Fig. 7 Difference of obtained forces and moments from virtual and dynamic model of robot.

شکل 7 اختلاف نیروها و ممان‌های به دست آمده از مدل مجازی و مدل دینامیکی در یک مسیر مشابه

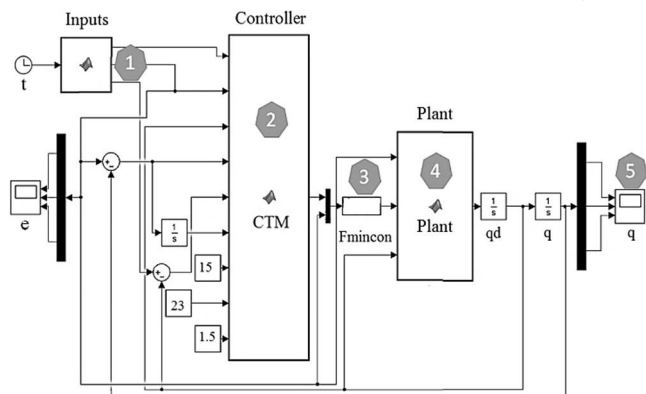


Fig. 8 Control of the understudy planar CDPR in Simulink

شکل 8 کنترل ربات کابلی موازی صفحه‌ای در محیط شبیه‌سازی متلب

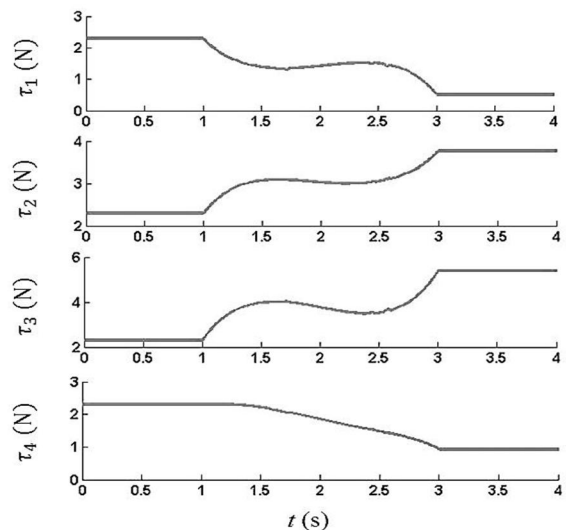


Fig. 9 Obtained cable forces for the path shown in Fig.

شکل 9 نیروی درون کابل‌ها برای مسیر داده شده در شکل 6

پایین‌ترین پتانسیل و موانع همچون تپه دارای بالاترین پتانسیل هستند. اساس ایده ارائه شده بر پایه میل طبیعی به کاهش پتانسیل است. در نتیجه همگرا شدن به نقطه‌ای با پتانسیل کمتر انجام می‌گیرد، بنابراین پایین‌ترین

مشخص می‌کند که نتیجه آن شکل 11 است. در نهایت و در خط 21 میدان‌های نهایی حاصل از این دو میدان به دست آمده و شکل 12 ایجاد می‌شود. خطوط 22 الی 24 نقطه بعدی حرکت هستند. این انتخاب مسیر بر اساس افزایش میدان پتانسیل جذب و دوری از موانع به همراه کاهش انرژی تابع هدف صورت می‌گیرد. به صورت کلی می‌توان مشخص نمود که مجری نهایی در جهت کاهش مصرف انرژی چه مقدار حرکت کند. خط 25 برای ذخیره مسیر عبوری ربات است و در یک بردار، نقاط جدید ذخیره می‌گردند. در نهایت با اتمام حرکت و رسیدن به محل هدف، مقادیر تغییرات انرژی ربات و مسیر حرکت آن گزارش می‌شوند.

پس از به دست آمدن هر نقطه در مسیریابی ربات آن نقطه به ربات دستور داده خواهد شد و بر اساس کنترلر طراحی شده گشتاور مورد نیاز محاسبه می‌شود و حرکت ربات در این مسیر، انجام می‌گیرد. در نهایت به منظور همگرایی به هدف، مقدار خطا و همچنین نیروهای کابلی ایجاد شده توسط این کنترلر گزارش می‌شوند. فرض بر این است که در حرکت، ربات می‌تواند بدون خروج از محدوده فضای کاری خود به اندازه مشخص از موانع دور باشد و این اجتناب از برخورد در تمامی مسیر وجود دارد. همچنین شایان ذکر است که میدان پتانسیل دافعه‌ی مانع، مقدم بر میدان پتانسیل جاذبه هدف است، بدین معنا که کابل‌ها و صفحه متحرک هنگام نزدیک شدن به مانع، ابتدا از آن، با توجه به روابط (25) و (26)، دور می‌شوند و هم‌زمان بر اساس رابطه (24) به آن نزدیک می‌گردند. سرعت این حرکت بر اساس تقسیم‌بندی مقدار قدرت میدان تعیین شده و احتمال برخورد به موانع تعریف می‌گردد. مسیر در نظر گرفته شده در حالت اول یک مانع دینامیک است که نتیجه حرکت مجری نهایی ربات در شکل 14 آورده شده است. شکل 15 بیانگر نیروهای کابلی به دست آمده از این مسیر و شکل 16 نیز میزان خطای حرکت در مسیر مطلوب (مسیر شکل 14) را نشان می‌دهد. این روش به صورت هم‌زمان در مدت 4 ثانیه شبیه‌سازی شده است.

برای آزمودن توانایی مدل ارائه شده، از نتایج آن برای یک مثال پیچیده‌تر با موانع مختلف که حرکت پیش‌بینی نشده‌ای دارند استفاده می‌شود. شکل 17 حرکات پیش‌بینی نشده و غیرخطی دو مانع با شکل‌های مختلف را نشان می‌دهد. این موانع به صورت ناگهانی در محیط ظاهر شده و برای مدت زمانی حرکت نامشخصی را طی نموده و از محیط خارج می‌شوند. برای نشان دادن حرکت کلی موانع از پانزده فریم متفاوت استفاده شده است. از فریم دو الی شش جسم اول و از فریم نه الی سیزده جسم دوم در محیط حضور دارند که با قرار دادن شماره روی موانع نشان داده شده است. شکل 18 خروجی این مسیریابی است که مسیر مطلوب حرکت مجری نهایی را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است حضور جسم جدید به صورت ناگهانی، مسیر حرکت را به مقدار زیادی تغییر داده است و پس از آن نیز مسیر کلی حرکت تغییر یافته است. مانند قسمت قبلی خطای تعقیب مسیر در شکل 19 آورده شده است. همچنین مقادیر گشتاورها برای مسیر شکل 18، در شکل 20 آورده شده است.

به منظور مقایسه میان روش حاضر و روش‌های قبلی نتایج این کار با مقالات [27]، [35] و [36] در جدول 1 برای یک عملکرد یکسان آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، روش حاضر به لحاظ دقت و همچنین سرعت پیاده‌سازی و مصرف انرژی دارای بهترین عملکرد در میان این مقالات است.

تعریف می‌گردد که نزدیکترین کابل به جسم و عملگر نهایی در محدوده مشخصی از میدان قرار گیرد که این مقدار با U_{\min} نمایش داده می‌شود. همچنین مسیر حرکت ربات به نحوی است که مقدار انرژی مصرفی موتورها، در کمینه مقدار خود قرار داشته باشند. به دلیل اینکه مسأله بهینه‌سازی در هر لحظه به صورت برخط¹ محاسبه می‌گردد، این مسأله به صورت رابطه (27) قابل بیان است [31]:

$$\int_0^t \|\tau\|_2^2 dt, \quad \text{s.t. } U_{\text{robot}} < U_{\min}$$

$$\tau_{\max} > \tau_i > \tau_{\min}, \quad i = \{1, 2, 3, 4\}$$

در رابطه (27) U_{robot} مقدار میدان پتانسیل ربات، τ_{\min} کمینه کشش مجاز و τ_{\max} بیشینه کشش مجاز است. در الگوریتم 1 روند کلی کنترل بدون برخورد با موانع دینامیکی، با کمینه مصرف انرژی، آورده شده است. در قسمت بعد پیاده‌سازی این روش برای ربات موازی کابلی صفحه‌ای با در نظر گرفتن کشش کابل‌ها ارائه خواهد شد. شبیه‌سازی و نمایش حرکت ربات در نرم‌افزار متلب صورت می‌گیرد. خروجی این برنامه نیروی کشش هر یک از کابل‌های ربات است. شایان ذکر است که این بهینه‌سازی بر روی مسیری که ربات آنرا طی می‌نماید، تعریف می‌گردد. مسیر حرکت مانع مسیری دلخواه مانند آنچه در شکل 13 آمده است تعریف می‌گردد. برای محاسبه مسیر دارای بهینه انرژی از روش میدان پتانسیل مجازی، مقادیر گشتاور بر اساس روش کنترلی گفته شده به صورت برخط به میدان پتانسیل داده می‌شوند. بنابراین حرکت مجری نهایی بر اساس کمینه‌سازی مصرف انرژی به صورت قید مسأله بهینه‌سازی جذب به سمت هدف نهایی بیان می‌گردد. در نتیجه حرکت مجری نهایی علاوه بر جذب شدن به هدف، در مسیر کاهش قید کشش کابل‌ها نیز است. برای اجتناب از گرفتاری در بهینه‌های محلی مقدار جاذبه، دو پارامتر D_s و k_s تعریف می‌گردند. پارامتر D_s حوزه مؤثر هر مانع را مشخص می‌کند و مقدار k_s برای تعریف شدت جاذبه هدف به نسبت دافعه اجسام و موانع است. در صورتی که در بخشی از مسیر مقدار تغییر مکان مجری نهایی بسیار کم شود، در شرایطی که هنوز به هدف نرسیده است، مقادیر دافعه اجسام و شعاع مؤثر یک واحد کاهش و مقدار جاذبه هدف یک واحد افزایش می‌یابد. اگر جایگاهی به حالت عادی بازگردند یعنی عبور از بهینه محلی رخ داده است و مجدد ضرایب به حالت عادی باز خواهند گشت و در غیر این صورت این تغییر ضرایب ادامه دارد. تأثیرگذاری این روش در زمانی که موانع ناگهانی و دینامیکی در محیط کاری وجود دارند بسیار بالا است.

الگوریتم 1 به منظور تعیین مسیر مناسب حرکت مجری نهایی، به نحوی که از برخورد کابل‌ها و مجری نهایی با موانع و با یکدیگر جلوگیری شود، استفاده می‌شود. خطوط 1 و 2 به ترتیب ورودی و خروجی‌های الگوریتم و خطوط 3 و 4 مکان اولیه و هدف حرکت مجری نهایی را تعیین می‌کنند. خط 5 یک while را با شرط رسیدن مجری نهایی به هدف فعال می‌کند. خطوط 6 الی 8 برای به روز نمودن ناحیه دفع مؤثر اجسام و مقدار نسبی جذب هدف به دفع موانع هستند که نحوه به روز شدن آنها پیشتر توضیح داده شد. خطوط 9 الی 19، تعریف میدان پتانسیل برای هر نقطه در صفحه هستند، در این الگوریتم کل ناحیه فضای کاری بر اساس شرایط مربوطه و معادله‌های به دست آمده، میدان پتانسیل مخصوص به خود را می‌گیرند. نتیجه این دستورات ایجاد شکل 10 برای میدان پتانسیل کابل‌ها، عملگر نهایی، ربات و هدف است. خط 20 میدان پتانسیل جذب و ناحیه جذب هدف را

¹ Online

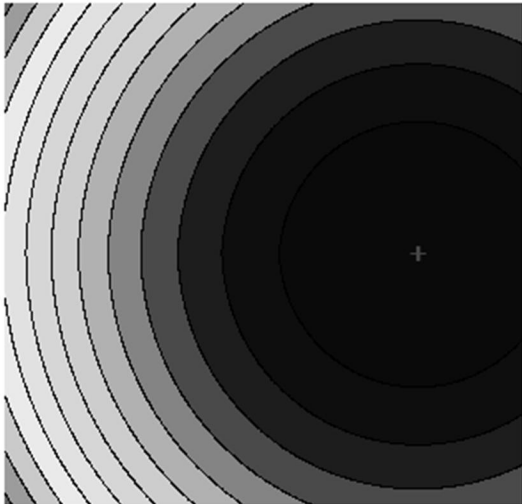


Fig. 11 Potential field of goal

شکل 11 میدان پتانسیل هدف

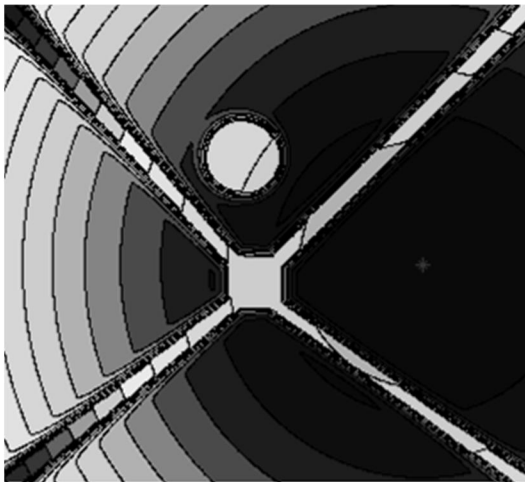


Fig. 12 Potential field of goal, obstacle, cables and dynamic plane
شکل 12 میدان پتانسیل هدف به همراه میدان پتانسیل تولیدشده حاصل از مانع و کابل‌ها و صفحه متحرک

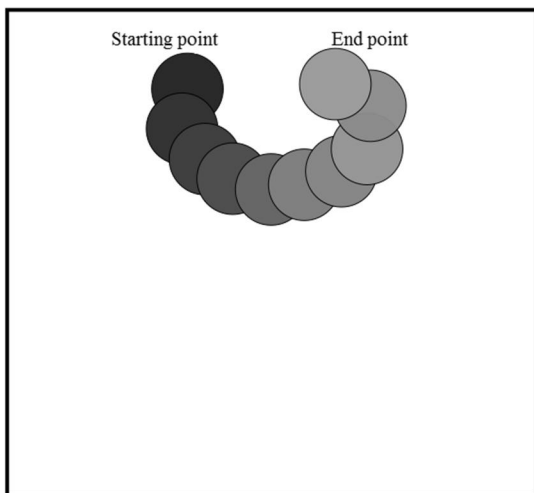


Fig. 13 Movement path of dynamic obstacle in workspace of robot
شکل 13 مسیر حرکت جسم در فضای کاری ربات

الگوریتم 1: کنترل و مسیریابی اجتناب از برخورد با موانع دینامیکی با کمینه انرژی

```

1: Input: initial and target position of the robot and objects paths
2: Output: minimal energy obstacle avoided path
3:  $P(x_{initial}, y_{initial})$  = start position of the end-effector
4:  $P(x_{final}, y_{final})$  = Final position of the end-effector
5: while  $(x \sim x_{initial}) \vee (y \sim y_{initial})$ 
6: Update( Scaling factor, Distance of influence )
7:  $k_s$  = Scaling factor
8:  $D_s$  = Distance of influence
9: (xsize, ysize)= size of the pic
10: for i = 1:xsize
11: for j = 1:ysize
12:  $r_d = D_s(i,j)$ ;
13: if  $(r_d \leq D_i)$ 
14:  $U_{rep}(i, j) = 0.5 (r_d - D_i)^2 / k_s$ ;
15: else
16:  $U_{rep}(i,j) = 0$ ;
17: End if
18: End for
19: End for
20:  $U_{att} = 0.5 k_s (P_{initial} - P_{final})^2$ ;
21: Sum = [ Sum (y-1,x-1), ..., Sum (y+1,x+1)];
22:  $E = \sum_{p=1}^P ||\tau||_2^2$ 
23: dis = [ E (S)];
24: F = min(dis(:));
25:  $X_{new}, Y_{new} \leftarrow F$ 
26: end while
27: return  $(X_{new}, Y_{new}, E)$ 
    
```

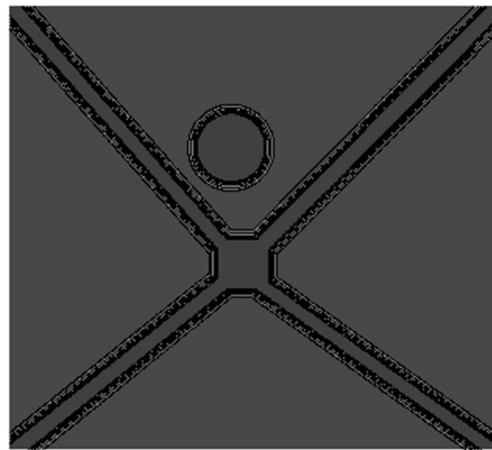


Fig. 10 Potential field of obstacle and cables and dynamic plane
شکل 10 میدان پتانسیل تولیدشده حاصل از مانع و کابل‌ها و صفحه متحرک

جدول 1 مقایسه میان روش مقاله حاضر و روش‌های استفاده شده

پارامتر	مقاله حاضر	مرجع [27]	مرجع [35]	مرجع [36]
روش مورد استفاده	میدان پتانسیل بهینه شده	میدان پتانسیل	الگوریتم ژنتیک	میدان پتانسیل ترکیبی
زمان (ثانیه)	25	180	2460	65
دقت (متر)	0.001	0.1	0.5	0.025
مصرف انرژی	قید در سرعت و نیروی مصرفی	بدون قید	بدون قید	قید در سرعت

5- نتیجه گیری

در ربات‌های کابلی، کنترل دقیق و بدون برخورد کابل‌ها و موانع به یکدیگر می‌تواند باعث جلوگیری از آسیب به ربات و خسارات احتمالی شود. در این مقاله ابتدا معادله سینماتیکی و دینامیکی ربات‌های موازی کابلی صفحه‌ای در

دست آمده روشی بر پایه گشتاور محاسبه شده، به منظور کنترل ربات مورد مطالعه، ارائه گردید. الگوریتم اجتناب از برخورد با مانع به کمک روش میدان پتانسیل مجازی برای ربات استفاده شد. به منظور جلوگیری از گرفتار شدن

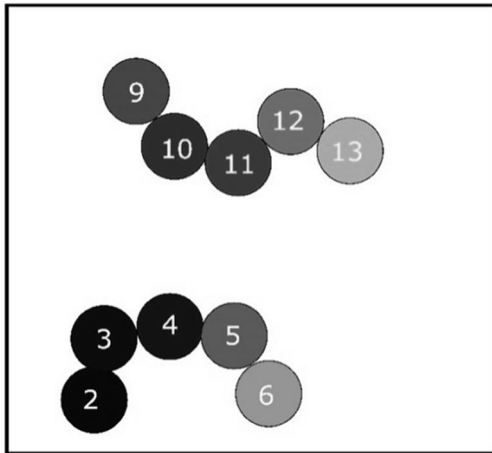


Fig. 17 Random movement path of two dynamic obstacle in workspace of robot

شکل 17 مسیر حرکت دو جسم در زمان به صورت دینامیک و تصادفی در محیط فضای کاری ربات

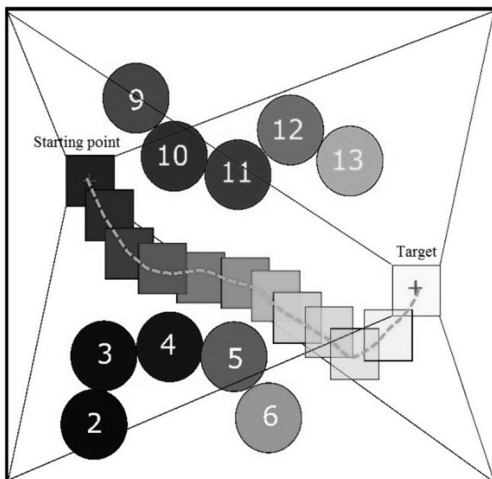


Fig. 18 Obstacle avoidance path planning with potential field for Fig. 17

شکل 18 مسیریابی بدون تداخل به کمک میدان پتانسیل برای شکل 17

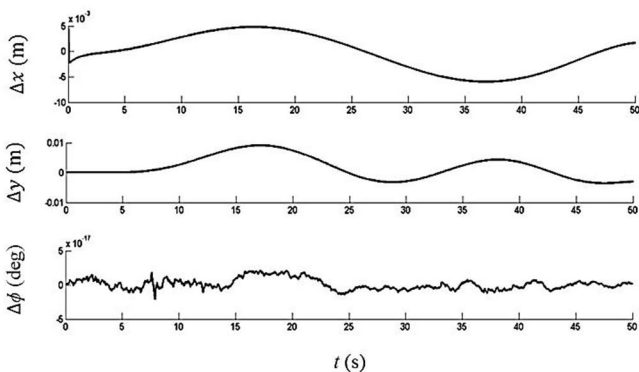


Fig. 19 Trajectory error of the path presented in Fig. 18

شکل 19 خطای مسیریابی برای مسیر شکل 18

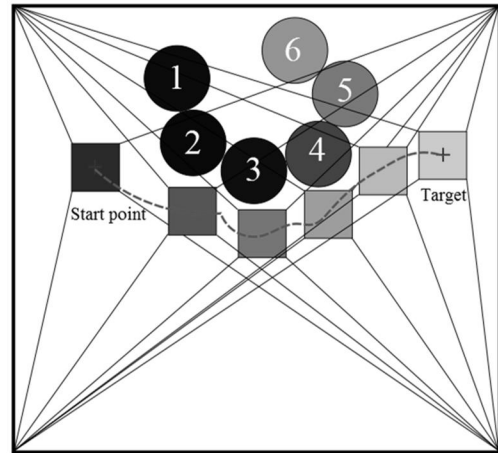


Fig. 14 Obstacle avoidance path planning with potential field for Fig. 13

شکل 14 مسیریابی بدون تداخل به کمک میدان پتانسیل برای شکل 13

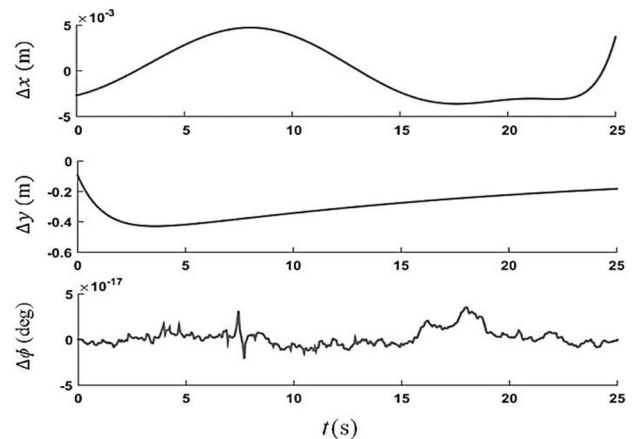


Fig. 15 Trajectory error of the path presented in Fig. 14

شکل 15 خطای مسیریابی برای مسیر شکل 14

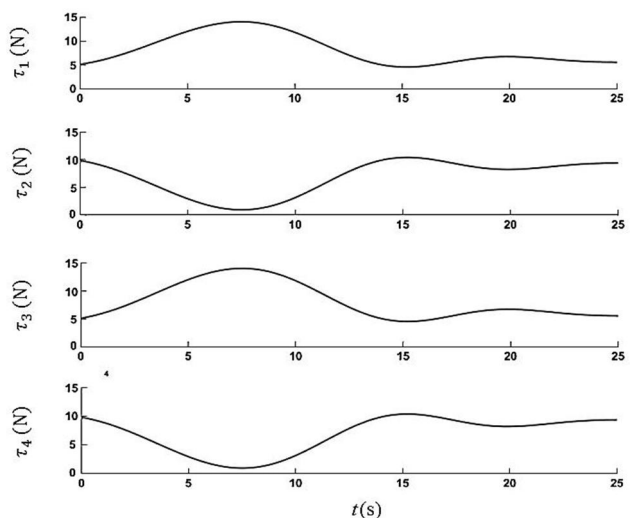


Fig. 16 Cables forces in trajectory of the obtained path presented in Fig. 14

شکل 16 نیروی درون کابل‌ها برای مسیر شکل 14

فرم کلی به دست آمد. سپس این معادلات برای یک ربات کابلی صفحه‌ای خاص به دست آمده و صحت‌گذاری شدند. بعد از اطمینان از معادله‌های به

- based control and identification of planar cable-driven parallel robots, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 75, pp. 187-202, 2016.
- [12] M. Khosravi, H. R. Taghirad, Dynamics analysis and control of cable driven robots considering elasticity in cables, *CCToMM 2011 Symposium (Comptesrendus-Proceedings)*, June 2, 2011.
- [13] M. Khosravi, H. R. Taghirad, Experimental performance of robust PID controller on a planar cable robot, *In Cable-Driven Parallel Robots*, Springer, Vol. 12, pp. 337-352, 2013.
- [14] Z. Jinhua, Z. Jian, D. Haifeng, W. Sunan, Self-organizing genetic algorithm based tuning of PID controllers, *Journal of Information Sciences*, Vol. 179, No. 2, pp.1007-1018, 2009.
- [15] R. Babaghasabha, M. A. Khosravi, H. D. Taghirad, Adaptive control of KNTU planar cable-driven parallel robot with uncertainties in dynamic and kinematic parameters, *Mechanisms and Machine Science*, Vol. 32, pp. 145-159, 2014.
- [16] M. Korayem, H. Habibnejad, Tourajzadeh, Maximum DLCC of spatial cable robot for a predefined trajectory within the workspace using closed loop optimal control approach, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Springer, Vol. 63, No. 1, pp. 75-99, 2011.
- [17] A. Afkavian, H. Bayani, M. T. Masouleh, Computed torque control of a cable suspended parallel robot, *3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM)*, Vol. 3, No. 1, pp. 749-754, 2015.
- [18] C. Frazier, *Re-active vector equilibrium: A novel method of autonomous vehicle navigation using artificial potentialf*, PhD Thesis, University of Ottawa, 2015.
- [19] M. A. Kareem, M. H. Garibeh, A. Eyad, Autonomous mobile robot dynamic motion planning using hybrid fuzzy potential field, *Soft Computing*, Vol. 16, No. 1, pp. 153-164, 2012.
- [20] P. Khosla, R. Volpe, Superquadratic artificial potentials for obstacle avoidance and approach in robotics and automation, *Proceedings, IEEE International Conference on*, pp. 1778-1784, 1988.
- [21] O. Khatib, The potential field approach and operational space formulation in robot control, *Springer In Adaptive and Learning Systems*, pp. 367-377, 1986.
- [22] S. A. Masoud, A. A. Masoud, Constrained motion control using vector potential fields, *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, *IEEE Transactions on* 30, No. 3, pp. 251-272, 2000.
- [23] L. Podsedkowski, J. Nowakowski, M. Idzikowski, I. Vizvary, A new solution for path planning in partially known or unknown environment for nonholonomic mobile robots, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 34, No. 2, pp. 145-152, 2001.
- [24] M. Wang, J. Liu, Fuzzy logic based robot path planning in unknown environment in machine learning and cybernetics, *Proceedings of 2005 International Conference on IEEE*, vol 2, pp. 813-818, 2005.
- [25] T. L. Lee, C. J. Wu, Fuzzy motion planning of mobile robots in unknown environments, *Journal of Intelligent and Robotic System*, Vol. 37, No. 2, pp. 177-191, 2003.
- [26] C. Fengyi, W. Ji, D. Zhao, J. Lv, Apple picking robot obstacle avoidance based on the improved artificial potential field method, *Fifth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI)*, Vol. 7, No. 12, pp. 909-913, 2012.
- [27] S.S. Ge, Y.J. Cui, Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method, *Autonomous Robots*, Vol. 13, No. 3, pp. 207-222, 2002.
- [28] L. Guanghui, Y. Tamura, A. Yamashita, H. Asama, Effective improved artificial potential field-based regression search method for autonomous mobile robot path planning, *International Journal of Mechatronics and Automation* Vol. 3, No. 3, pp. 141-170, 2013.
- [29] H. Amaris, Path-planning solution based on a potentiel field non uniformly distributed, *Vienna Austria Elsevier*, Vol. 31, No. 7, pp. 242-257, 2014.
- [30] F. Dian, Z. H. A. N. G., L. I. U. Fu, Research and development trend of path planning based on artificial potential field method, *Computer Engineering & Science*, Vol. 12, No. 2, pp. 18-25, 2013.
- [31] K. Yoram, J. Borenstein, Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation, *In Robotics and Automation, 1991 IEEE International Conference on*, pp. 1398-1404. IEEE, 1991.
- [32] H. Kazemi, M. Tale Masouleh, P. Nozari, R. Sabbagh Novin, Path planning of 3-RRR planar parallel robot by avoiding mechanical interferences via artificial potential field, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 317-325, 2015. (in Persian فارسی)
- [33] H. Bayani, M. Tale Masouleh, A. Kalhor, Practical performance comparison of pole placement and sliding mode controller for position control of cable-driven parallel robot using visual servoing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 63-74, 2015. (in Persian فارسی)
- [34] W. Shang, C. Shuang, Nonlinear computed torque control for a high-speed planar parallel manipulator, *Mechatronics*, Vol. 19, No. 6, pp. 987-992, 2009.
- [35] T. Lianfang, C. Collins, An effective robot trajectory planning method using genetic algorithm, *Mechatronics*, Vol. 14, No. 5, pp. 455-470, 2004.
- [36] M. Wang, Y. T. Wang, T. DW, J. Jiang, G. Zhang, Path planning of mobile robot based on compound potential field method, *Application Research of Computers*, Vol. 10, No. 3, pp. 55-70, 2012.

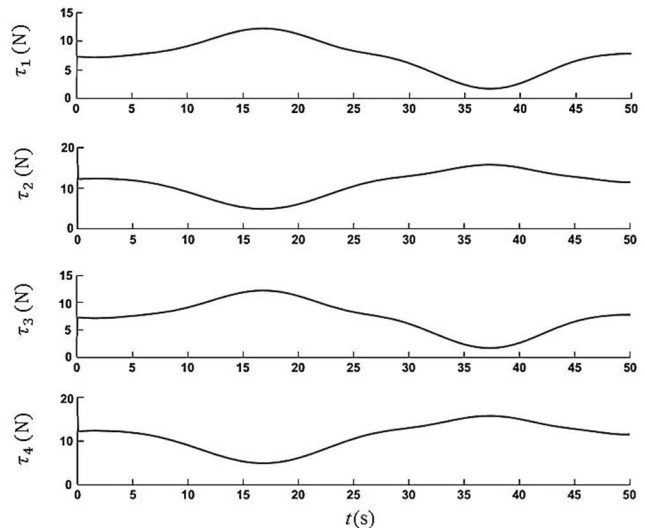


Fig. 20 Cables forces in trajectory of the obtained path for Fig. 18

شکل 20 مقادیر گشتاور کابل‌ها برای مسیر شکل 18

ربات در نقاط کمینه محلی، یک روش جدید شامل تغییر نسبی میزان جاذبه و دافعه میدان‌ها و فاصله تحت تأثیر موانع ایجاد گردید. همچنین برای عبور از مسیر با کمینه انرژی مصرفی، تابعی بر اساس کشش کابل‌ها تعریف شد. ضمن به کار بردن روش‌های اشاره شده، از نمودارهای به دست آمده ملاحظه گردید ربات بدون هیچ برخوردی به نقطه هدف می‌رسد. در آینده می‌توان این الگوریتم را برای ربات‌های موازی کابلی فضایی و ربات‌های دارای لینک صلب دیگر مورد استفاده قرار داد. در این حالت باید فضای میدان پتانسیل به صورت سه بعدی تعریف گردد. همچنین می‌توان الگوریتم کنترلی پیش‌بین را با روش میدان پتانسیل تلفیق نموده تا دوری از موانع دینامیکی ناگهانی به نحو بهتری صورت پذیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود روش ارائه شده برای ربات‌های موازی کابلی فضایی در محیط‌های پیچیده‌تر پیاده‌سازی شود.

6- مراجع

- [1] M. W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar, *Robot modeling and control*, Wiley New York, Vol. 3, pp. 8-26, 2006.
- [2] J. P. Merlet, *Parallel Robots*, Springer Netherlands, Vol. 2, pp. 5-16, 2006.
- [3] P. Dewdney, The large adaptive reflector: A giant radio telescope with an aero twist, *Canadian Aeronautics journal*, Vol. 48, No. 4, pp. 219-231, 2002.
- [4] O. Saber, A spatial translational cable robot, *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 7, No. 3, pp. 6-11, 2015.
- [5] G. Hongbo, L. YongGuang, Cascade control of a hydraulically driven 6-DOF parallel robot manipulator based on a sliding mode, *Control Engineering Practice*, Vol. 16, No. 9, pp. 1055-1068, 2008.
- [6] J. Brest, Self-adapting control parameters in differential evolution: A comparative study on numerical benchmark problems, *IEEE Transaction on computation*, Vol. 10, No. 6, pp. 646-657, 2006.
- [7] T. Maier, C. Woerle, Dynamics and control of a cable suspension manipulator, *The 9th German Japanese Seminar for Nonlinear Problems in Dynamical Systems*, Berlin, German, 2000.
- [8] H. Cheng, Y. K. Yiu, Z. Li, Dynamics and control of redundantly actuated parallel manipulators, *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, Vol. 8, No. 4, pp. 483-491, 2003.
- [9] H. Bayani, R. Sadeghian, M. T. Masouleh, A. Kalhor, On the control of planar cable-driven parallel robot via classic controllers and tuning with intelligent algorithms, *3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM)*, Vol. 2, No. 7, pp. 623-628, 2015.
- [10] L. Cheng-Dong, Y. Jian-Qiang, Z. Dong-Bin, Inverse control of cable-driven parallel mechanism using type-2 fuzzy neural network, *Acta Automatica Sinica*, Vol. 36, No. 3, pp. 459-464, 2010.
- [11] B. Hassan, M. T. Masouleh, A. Kalhor, An experimental study on the vision-