Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(1) (2020) 19-22
DOI: 10.22060/mej.2018.13947.5760

Design, Modeling and Control of a Hybrid Climbing Robot in Manipulation Mode Using Feedback Linearization Control Method

V. Boomeri, H. Tourajizadeh*

Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

ABSTRACT: In this paper, design, modeling and control of a grip-based planar climbing robot is performed which is consist of a triangular plate and three actuating legs. This robot is extremely applicable for many applications in which a human operator should climb through a truss infrastructure and implement some manipulations on the relevant installations. A grip-based climbing robot is designed which has three legs and grippers for climbing through the truss and infrastructures and is able to perform manipulating tasks by locking two legs and its corresponding grippers. This robot is a kind of hybrid robot which has two phase of climbing and operating modes. The control is performed for the operational phase using Feedback Linearization (FBL) in order to overcome the disturbances of operation. Overall kinematics and kinetics of the robot is modeled. All of the modeling are verified by conducting some analytic and comparative simulation scenarios in the MATLAB and the results are also compared with ADAMS software to investigate the correctness of modeling and simulations. Also by the aid of the proposed climbing robot, it is possible to climb and perform a complete operational task through trusses and infrastructures with the best status of safety and accuracy.

Review History:

Received: 10 Jun. 2018
Revised: 11 Nov. 2018
Accepted: 29 Apr. 2018
Available Online: 11 Agu. 2018

Keywords:

Climbing robot
Manipulator
Hybrid robot
Modeling
Feedback linearization control.

1- Introduction

By developing metallic bridges, telecom and electricity masts, truss shaped structures like scaffolds used in constructive industry and astronomy technology such a rocket lunch station the demand of locomotion on such these infrastructures is seriously felt. By consideration of dangers for working on such these structures for workers, climbing robots are designed to ascend mentioned structures in order to do tasks including manipulating, maintenance, contractions (riveting and welding) and periodic inspections. ROMA II [1] for climbing walls, Climbot [2] and Shady3D [3] and Libra [4] for climbing trusses, PCR [5] a parallel robot and 3Dclimber [6] for climbing poles and pipes with circular area. In this paper design and modeling (kinematics and dynamic modeling) of a hybrid three limbed climbing robot is explained and at the end the designed robot is controlled by feedback linearization method which results show well control during manipulation.

2- Distinct Characteristics of Designed Robot

The basic characteristics: 1- For climbing infrastructures against gravity 2- Planar movement. 3- Grip-based Climbing robot 4- Hybrid mechanism. 5- Five Degree of Freedoms (Dofs) robot by neglecting grippers Dofs. 6- High stability because of two point gripped as support. 7- Redundant Dofs for best maneuvering through complex profiles. 8- High stiffness by parallel part configured by 2 linear jacks. 9- Less and logical loads on supports by well distribution of total load on pair of gripper grasped the terrain simultaneously. The inspiration for designing this climbing robot is monkey movement on trees which can balance himself by grasping two point of a branch by his legs or tail or hands and by other hand or leg is seeking for new point to grab as new support. The configuration of robot is as Fig. 1(a) .Series of such this movements (grabbing and seeking for new point to grab) form a locomotion on tree. Here we consider seeking for new point to grab as a manipulating task and modeling with control is considered in this phase by knowing that a chain of manipulations movement constitutes locomotion Fig. 1(b).

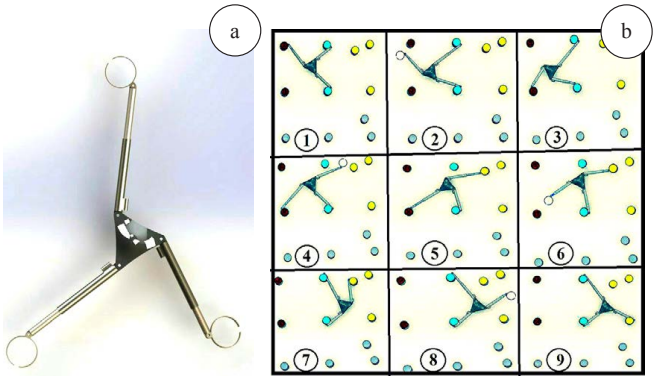


Fig. 1. (a). Robot shape-(b). Robot locomotion steps

*Corresponding author's email:tourajizadeh@khu.acir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

3- Kinematics and Dynamics Modeling

Kinematics of the system can be defined by establishing the relation between the active joint space movement and the end-effector workspace motion:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = J\left[\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{d}_2, \dot{\theta}_3, \dot{d}_3\right]^T \tag{1}$$

while x,y,w are the workspace displacement of the end-effector and $\theta_1, \theta_2, d_2, \theta_3, d_3$ are the active joint space of the robot. J is the Jacobean matrix of the system and its elements can be provided by extracting the geometrical relations of the robot components.

Dynamics of the system is also extracted using Lagrange method and the resultant dynamic equation of the system can be defined as follow where D is the inertia matrix, C is Coriolis matrix and g is gravitation vector of the system. τ and f are the input torque and force of the actuators.

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ f_1 \\ \tau_3 \\ f_2 \end{bmatrix} = D(\theta_1, \theta_2, d_2, \theta_3, d_3)_{(5\times5)} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{d}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{d}_3 \end{bmatrix} + C(\theta_1, \theta_2, d_2, \theta_3, d_3, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{d}_2, \dot{\theta}_3, \dot{d}_3)_{(5\times5)} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{d}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{d}_3 \end{bmatrix} + g(\theta_1, \theta_2, d_2, \theta_3, d_3)_{(5\times1)} \tag{2}$$

4- Control Design

Feedback linearization is employed here for controlling the operational tasks of the robot manipulator. Considering the extracted dynamic equation of the system, the required input of the actuators can be defined as:

$$\tau = D(\mathrm{q})(\ddot{q}_d - K_v \dot{e} - K_p e) + C(\mathrm{q}, \dot{q})\dot{q} + g(\mathrm{q}) \tag{3}$$

where d denotes the desired value of the parameter, this input results in the following error dynamics through which the proper gain of pole placement procedure can be extracted:

$$\mathrm{D(q)}(\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e) = 0 \rightarrow \ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = 0 \tag{4}$$

5- Simulation and Result Verification

Desired Value of the joint space is:

$$\begin{aligned} &\theta_1 = 0.004t^2 + \theta_1(0)(\mathrm{rad}); \theta_2 = -0.01t^2 + \theta_2(0)(\mathrm{rad}); \\ &d_2 = 0.0004t^2 + \mathrm{d}_2(0)(\mathrm{m}); \theta_3 = 0.02t^2 + \theta_3(0)(\mathrm{rad}); \\ &d_3 = -0.1\sin(0.625\,\mathrm{t}) + \mathrm{d}_3(0)(\mathrm{m}) \end{aligned} \tag{5}$$

The extracted workspace of the manipulator velocity along y using kinematics and its comparison with ADMAS is shown in Fig. 2 which shows good compatibility:

Table 1. Parameters of robot

Parameter	Symbol	Value	Unit
Cylinder length	L_1	0.1	m
Piston length	L_2	0.1	m
Distance between two supporting grippers	Le	0.4	m
Chassis triangle side	b	0.2	m
Mass of the robot components	m_i	2	kg
Moment of inertia of the robot components	I_i	0.001	kg.m^2
Chassis mass	M_G	4	kg
Moment of inertia of the chassis	I_G	0.004	kg.m^2

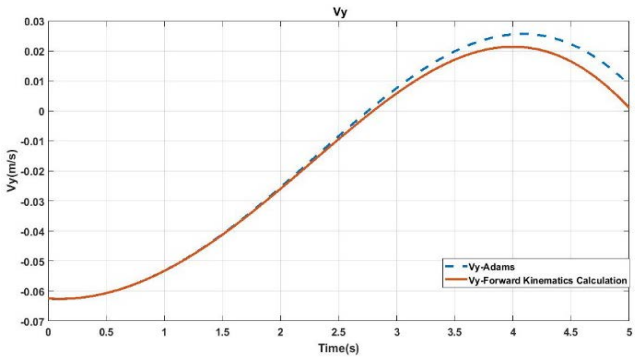


Fig. 2. Forward kinematics compared with MSC-Adams simulation

Required motor torque (motor 2) using dynamics and its comparison with ADAMS is as Fig. 4.

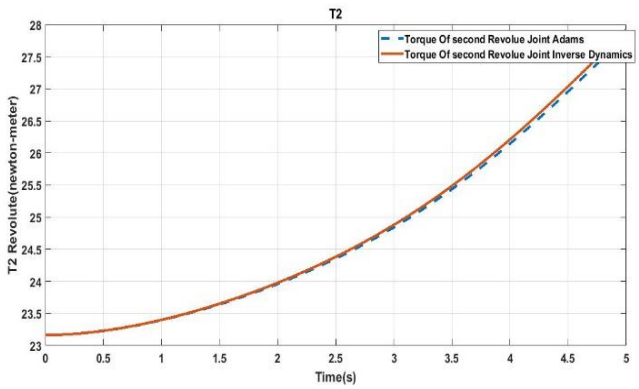


Fig. 3. 2nd motor torque by inverse dynamics compared with MSC-Adams simulation

In order to verify the designed controller the following desired workspace is considered:

$$\begin{aligned} &V_x = -0.002t^3 + 0.01t^2(\mathrm{m/s}) \\ &V_y = -0.00288t^3 + 0.0144t^2(\mathrm{m/s}) \\ &\dot{\phi}_z = -0.014t^2.\sin(2t) + 0.07t.\sin(2t)(\mathrm{rad/s}) \end{aligned} \tag{6}$$

Following disturbance is implemented to check the efficiency of the designed controller:

$$\tau_{dis1} = 3\sin(10t); \tau_{dis2} = 3\sin(10t)$$
$$f_{dis1} = 1.5\sin(5t); \tau_{dis3} = 0.5\sin(10t + \frac{\pi}{2}) \quad (7)$$
$$f_{dis2} = 0.1\sin(10t)$$

Considering proper controlling gain results in the following joint space movement and its comparison with open loop system for joint 2 Fig. 4 shows comparison between controlled and non-controlled system under disturbances:

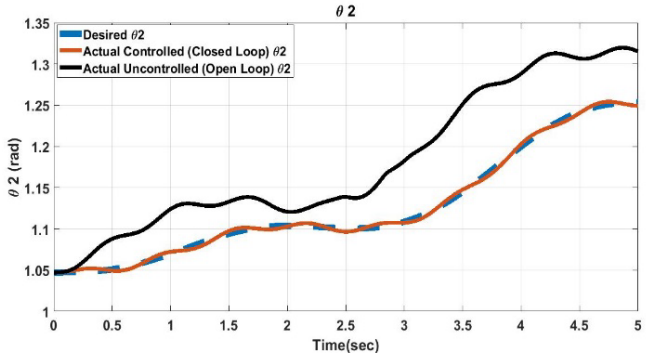


Fig. 4. Comparison between controlled and non-controlled system for 2nd revolute joint

It can be seen that the open loop system diverges from the desired value of the joint space path while the designed controller can track the path successfully with a great compatibility.

6- Conclusion

In this paper, for the tasks like movement on scaffold and maintenance with high mobility, a new planar grip based robot was designed. According to its functionality by inspiration of monkey's movement on trees the robot was designed. This robot with 2 locomotion and manipulation phases was made by combination of serial and parallel mechanism (non-fully parallel) which is called hybrid. Kinematic and dynamic modelling of the manipulation phase was performed with 5 DOFs joint space and 3 DOFs workspace. Feedback linearization controller was designed and implemented on the robot to neutralize the destructive effect of operational disturbances. In order to verify the efficiency of the robot design and the proposed controller, some comparative and analytic simulation scenarios was prepared and also the results was compared with ADAMS. It was shown that not only the robot is able to move successfully through the trusses but also is able to do an operational task with the least amount of error.

References

[1] Balaguer, C., Pastor, J., Giménez, A., Padrón V., Abderrahim M., 1998 "ROMA: Multifunctional autonomous self-supported climbing robot for inspection applications", *IFAC Proceedings* Vol. 31, No., pp. 563-568.

[2] Guan Y., Jiang L., Zhu H., Wu W., Zhou X., Zhang H., Zhang X., 2016, "Climbot: A Bio-Inspired Modular Biped Climbing Robot—System Development, Climbing Gaits, and Experiments", *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol.8, No. 2.

[3] Yoon Y., Rus D., 2007, "Shady3d: A robot that climbs 3d trusses", *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on, IEEE*, pp. 4071-4076.

[4] Mavroidis C., 2000, "A simplified cartesian-computed torque controller for highly geared systems and its application to an experimental climbing robot", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 122, No. 1.

[5] Aracil R., Saltarén R., Reinoso O., 2003, "Parallel robots for autonomous climbing along tubular structures", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 42, No. 2, pp. 125-134.

[6] Tavakoli M., Marques L., 2011, "3DCLIMBER: Climbing and manipulation over 3D structures", *Mechatronics*, Vol. 21, No.1, pp. 48-62.

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۱، سال ۱۳۹۹، صفحات ۵۷ تا ۸۴
DOI: 10.22060/mej.2018.13947.5760

طراحی، مدل‌سازی و کنترل یک ربات هیبرید بالارونده پنجه‌دار، در فاز تعمیراتی به روش بازخورد خطی سازی شده

وحید بومری، حامی تورجی زاده*

دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

خلاصه: در این مقاله طراحی, مدلسازی و کنترل یک ربات صفحه ای بالارونده از نوع پنجه‌دار انجام شده است که دارای سه پایه‌ی پنجه‌ای و یک صفحه‌ی مثلثی شکل است. در بسیاری از سازه‌های خرپایی و داربستی انجام عملیات بر روی آن‌ها برای کارگران خطرناک است. در این مقاله رباتی پنجه‌دار با سه پایه طراحی شده است که توانایی بالارفتن از سازه‌های خرپایی و داربستی را دارد و با قفل شدن پنجه‌های دو پایه امکان انجام عملیات تعمیراتی توسط صفحه‌ی مثلثی و پایه‌ی سوم است. این ربات از نوع هیبریدی (ترکیب سری و موازی) بوده و دارای دو فاز کاری شامل عملیاتی و بالارونده است. در مرحله ی انجام عملیات به منظور خنثی سازی اغتشاشات ناشی از تعمیرات کنترل مقاوم حلقه بسته بر اساس روش بازخورد خطی ساز انجام شده است. در این مقاله ساختار ربات مناسب برای این منظور طراحی شده و سینماتیک و دینامیک آن مدلسازی شده است. تمامی طراحی‌ها, مدلسازی‌ها و کنترل ربات به کمک انجام شبیه سازی های عددی توسط سیمولینک در نرم افزار متلب اثبات شده و صحت کار به کمک شبیه سازی در نرم افزار آدامز مورد بازبینی قرار گرفته است. اثبات شده که به کمک ربات طراحی شده و مدلسازی‌ها و کنترل صورت گرفته شده می توان در یک ساختار خرپایی شکل عملیات متنوع عمرانی را با موفقیت انجام داد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۲۰
بازنگری: ۱۳۹۶/۱۲/۲۰
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۰۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۵/۲۰

کلمات کلیدی:
ربات بالارونده
عملگر تعمیراتی
ربات هیبریدی
مدل‌سازی
کنترل بازخورد خطی‌ساز

۱- مقدمه

با توجه به پیشرفت عظیم در تکنولوژی الکترونیک و برق رسانی و همچنین گسترش بیش از حد اینترنت در سراسر جهان و پیشرفت در سیستم حمل و نقل و راه‌سازی و ساختمان و همچنین مسائل انرژی‌های نوین از قبیل انرژی هسته‌ای و خورشیدی و انرژی‌های ناشی از سوخت فسیل، سازه‌هایی خرپا شکل مرتفع برای این گونه صنایع در اکثر نقاط جهان به چشم می‌خورد. از این گونه ساختارها می‌توان دکل‌های برق، دکل‌های مخابراتی، پل‌های فلزی، سکوهای نفتی، داربست‌های موجود در ساختمان‌ها، خرپاهای نگهدارنده سقف در سالن‌ها و ورزشگاه‌ها، سیستم‌های لوله کشی در سایت‌های هسته‌ای، برج‌های مراقبت در اماکن نظامی، تجهیزات فضایی همچون سکوی پرتاب موشک، دکل‌های موجود در کشتی‌های باربری و غیره را نام برد. بدیهی است که دست‌یابی به ارتفاعات موارد نام برده برای انسان کاری بس طاقت فرسا و خطرناک خواهد بود. خطراتی شامل سقوط و برق گرفتگی از شایع‌ترین خطرات کار در ارتفاعات می‌باشد و در برخی موارد حتی برای کارگران دست‌یابی به آن جا غیر ممکن است مانند سایت‌های هسته‌ای که حضور انسان در برخی از نواحی آن به طور کلی منع شده است و یا سایت‌های فضایی مانند ماهواره‌ها که انسانی برای تعمیرات و نگهداری وجود ندارد که به انجام کارها بپردازد. این گونه ربات‌های متحرک بر خلاف بقیه ربات‌های متحرک موجود در دنیا می‌بایست در خلاف جاذبه زمین و در زمینه‌ای غیر از زمینه مسطح حرکت کنند و این مساله تمایز جدی بین این دسته از ربات‌ها با باقی ربات‌های موجود بر روی زمین است. اولین نتیجه حرکت در خلاف جاذبه زمین، نیاز به نیروها و گشتاورهای بالا برای حرکت و حفظ پایداری است. دسته رباتی که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود، ربات بالارونده‌ای است که توانایی حرکت بر روی ساختارهایی داربست مانند و خرپا شکل را دارد. ربات‌های بالارونده با توجه به نوع وظیفه‌ای که دارند به چند نوع ربات‌های پنجه‌دار[1]، ربات‌های چرخ‌دار[2] بالارونده، ربات‌های پایه‌دار حشره‌ای[3] ، ربات‌های چسبنده بالارونده[4] و ربات

1 Gripping Robots
2 Wheel-based Robots
3 Insect Robots
4 Adhesive Climbing Robots

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: tourajizadeh@khu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

بالارونده از نردبان[1] تقسیم می‌شود که با توجه به نوع موضوع مورد نیاز برای استفاده از ربات می‌توان در طراحی از هر یک از انواع مذکور استفاده نمود.

ربات روما[2] توسط گیمنز و بلیگر ساخته شده است که برای اجرای حرکات سه بعدی نسبتا پیچیده طراحی شده است که از آن می‌توان به عنوان یک ربات بالارونده از ساختارهای فلزی صنعتی استفاده کرد [۱]. به عنوان مثال برای صعود از پروفیل‌های پل‌های فلزی و همچنین تیر آهن‌های ساختمان‌ها می‌توان از ربات روما استفاده کرد. ربات پی‌سی‌ار[3] با الهام از مکانیزم استوارت[4] برای بالا رفتن از میله‌ها و اجسام استوانه‌ای شکل با مقاطع دوار با در نظر گرفتن زانویی و انحناها و همچنین برای بالا رفتن از درختان توسط سالترین و همکاران در اسپانیا طراحی شده است که تنها ضعف این ربات این است که میزان انحنای لوله به حدی نباشد که باعث شود سیلندرهای ربات با یکدیگر برخورد کنند و مکانیزم قفل شود و همچنین عبور از انشعابات برای این ربات با توجه به ساختار آن امکان پذیر نیست [۲]. ربات پوبوت‌وی۲ برای بالا رفتن از میله‌ها با مقاطع مخروطی توسط جی سی فاروکس در فرانسه طراحی و ساخته شده است تا بتواند علاوه بر صعود از میله‌ها از انحناهای در سر راه هم عبور نماید [۳]. ربات پوبوت‌وی۲[5] عضو دسته ربات‌های چرخ‌دار است. مساله محدود کننده، محدودیت سطوح مقطعی است که می‌تواند از آن بالا برود و همچنین امکان عبور از انشعاب با توجه به ضرورت وظیفه وجود ندارد و برای عبور از موانع تدبیر خوبی چیده نشده است و موانع با اندازه بزرگ امکان گذر از آن به نوعی غیر ممکن است. ربات کلایم‌بوت[6] با الهام از طبیعت جانداران دوپا برای صعود از اماکن مورد نظر سه بعدی توسط زی هایفی و جی یایشنگ در چین طراحی و ساخته شده است [۴]. این ربات با شبیه سازی میمیک[7] حیوانات می‌تواند به راحتی از میله‌ها و سازه‌ها بالا برود. تغییرات شکل و پیکربندی این ربات خاصیت انعطاف پذیری و تطبیق پذیری حرکتی خوبی را محیا کرده است. مساله‌ای که در این ربات به چشم می‌خورد ساختار سری آن است که تنها با یک تکیه‌گاه باید بالا رفتن و پایداری را امکان پذیر کند که این امر موجب ایجاد گشتاورهای شدید در موتور نگه دارنده در تکیه‌گاه می‌شود و همچنین خطای قابل ملاحظه‌ای را می‌تواند منجر شود. ربات هیبرید[8] توسط توکلی در دانشگاه شریف ساخته شده است [۵]. رباتی که به صورت ترکیب مکانیزم سری و موازی می‌باشد. ربات هیبرید دارای چهار درجه آزادی است که از بین این چهار درجه آزادی دو تای آن مربوط به جابه جایی و دوتای آن مربوط به دوران حول محورهای مورد نظر می‌باشد. این ربات در مواجه با موانع و انشعابات و انحناهای موجود سر راه مانند ربات پی‌سی‌ار نمی‌تواند مانور حرکتی مناسبی از خود نشان دهد. ربات تری‌دی‌کلایمبر[9] توسط محمود توکی در دانشگاه کلمبیا به منظور بالا رفتن از سازه‌ها و میله‌ها با کم‌ترین درجه آزادی ممکن ساخته و طراحی شده است [۶]. از قابلیت‌های این ربات امکان مانوپولیت[10] کردن است که می‌توان از آن برای کارهایی از جمله رنگ آمیزی و جوش کاری استفاده کرده که به این منظور ماژول[11] اضافی بر روی آن نصب شده است. ربات یوتی-پی‌سی‌ار[12] [۷] در دانشگاه تهران توسط نیلی و همکاران طراحی و ساخته شده است که یک ربات چرخ دار است و برعکس بقیه‌ی ربات‌های پنجه‌دار با استفاده از چرخ حرکت رو به بالای پیوسته ایجاد می‌کند. چرخ‌های پایینی با موتور رانده می‌شوند و وظیفه‌ی ایجاد حرکت را بر عهده دارند. محدودیت مانور حرکتی در این ربات بسیار به چشم می‌خورد. این ربات صرفا برای بالا رفتن از میله‌های صاف ساخته شده است و در مواقع مواجه با موانع سر راه (به جز موانع پله‌ای تغییر سطح مقطع میله) نمی‌تواند حرکتی از خود نشان دهد. ربات تری‌بوت[13] [۸] یک ربات با قابلیت شگفت انگیز قدرت مانور پذیری بالا می‌باشد که برای بالا رفتن از درختان با شاخ و برگ‌هایی با شکل‌های نامنظم و نامتعارف توسط تین‌لان‌لام در شانگ‌های چین در سال ۲۰۱۱ طراحی و ساخته شده است. به دلیل تعداد درجات آزادی زیاد آن، ربات می‌تواند یک حرکت پیوسته از خود نشان دهد. حرکت‌هایی نظیر منبسط و منقبض شدن بدنه‌ی ربات درست مانند یک کرم ابریشم است. علی رغم سرعت و پایداری مناسب این ربات، بار قابل حمل توسط آن محدود است و صرفا می‌توان از این گونه ربات برای حرکت بر روی درختان استفاده کرد و انجام کارهای دیگر به نوعی توسط این ربات به سختی شاید صورت بپذیرد. ربات شادی‌تری‌دی[14] [۹] توسط یوریم یون در دانشگاه ماساچوست امریکا برای بالا رفتن از خرپاها و سازه‌ها طراحی و ساخته شده است. ساختار ربات به صورت ماژولار[15] می‌باشد که در حین حرکت و عملیات قطعات مختلف ربات می‌توانند به یک دیگر وصل شوند یا جدا شوند. در طراحی ربات بالارونده چندعضوی[16] [۱۰] توسط کریگ سانتانا و غیره در دانشگاه ام‌ای‌تی[17] تحت نظر ناسا مدل سازی و شبیه سازی

1 Ladder Climbing Robots
2 ROMA
3 PCR
4 Stewart Mechanism
5 PobotV2
6 Climbot
7 Mimic
8 Hybrid Robot
9 3Dclimber
10 Manipulation
11 Module
12 UT-PCR
13 Treebot
14 Shady3D
15 Modular Robots
16 Multi limbed climbing robot
17 MIT

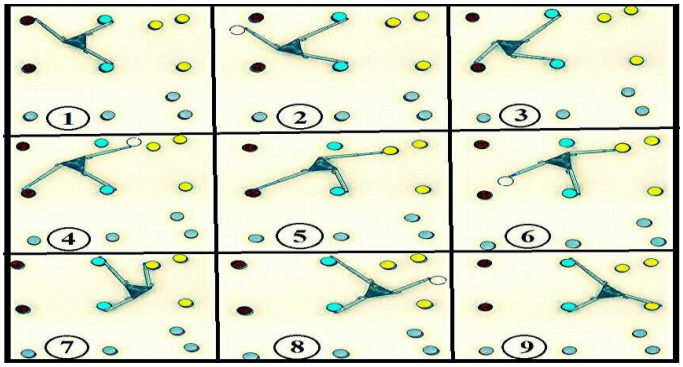
شده است از روش کنترل ترانهاده ژاکوبین مختصه شده[1] استفاده شده است تا در آن تمامی مختصات تعمیم یافته[2] کنترلی را اعم از موقعیت و نیروها را کنترل نماید .ساختار ربات سه پایه با شش درجه آزادی و شش مفصل فعال[3] در صفحه می‌باشد که مکانیزم آن به صورت سری شاخه‌دار[4] است. در آن با استفاده از کامپلیانس[5] که فرض وجود فنر و دمپر در انتهای هر مانوپلاتور هست سعی بر کنترل نیروها به روش استاتیکی[6] شده است. ربات لیبرا[7] [۱۱] طراحی شده توسط کنستانتین ماورودیس و بولی در دانشگاه ام‌ای‌تی تحت حمایت ناسا یک ربات بالارونده از سازه‌های فضایی به صورت حرکت در صفحه است که با یک بدنه که با سه پایه بندی شکل که با مفاصل به هم مرتبط هستند، شاخه‌دار شده است. در طراحی ربات از روش محاسبه گشتاورهای دکارتی حرکتی[8] برای کنترل ربات استفاده شده است. در محاسبات دینامیک ربات فرض سری بودن ربات مطرح است که با توجه به حرکت کلی ربات که در لحظاتی ربات به دلیل آن که دو پایه آن همزمان دو نقطه ثابت را می‌گیرند، مساله توازی ربات مطرح می‌گردد که در محاسبات دینامیک و کنترل به آن توجه نشده است. سری بودن ربات گفته شده با توجه به بازوهای آزاد آن می‌تواند گشتاورهای شدیدی را به موتور پنجه متصل به قسمت ثابت بازو وارد نماید که این امر در کنار مانور حرکتی خوب، باعث ایجاد خطاهای زیاد و حتی شکستن اجزا شود که برای ساخت آن می‌بایست از موتورهای قوی و سازه محکم استفاده کرد. دسته دیگر ربات‌های بالارونده، ربات‌هایی هستند که قابلیت صعود بر روی نردبان را دارند ربات انسان نمای دی‌ارسی–هوبو[9] [۱۲] توسط جاینگرو لئو تحت حمایت دارپا[10] می‌باشد که گونه‌ای پیشرفته از ربات انسان نمایی است که برای بالا رفتن از نردبان‌هایی با هر اندازه و شکلی طراحی شده است. ربات استریسک[11] [۱۳] طراحی و ساخته شده توسط شوتا فوجی و همکاران که یک ربات متحرک پایه‌دار حشره‌ای شکل است که با شش پایه به صورت بندبندی که با مفاصل دورانی به یک دیگر متصل شده‌اند که هر پایه دارای سه درجه آزادی است و در مجموع دارای ۱۸ درجه آزادی می‌باشد که برای بالا رفتن از سطوح مختلف طراحی و ساخته شده است. ربات دیگری که برای بالا رفتن از میله‌های چوبی عمودی از آن استفاده شده است ربات رایز–وی۳[12] [۱۴] می‌باشد که با ساختار حشره‌ای خود می‌تواند از میله‌های با سطح مقطع بزرگ بالا بروند. مانور حرکتی پایین این ربات در هنگام دور زدن و عبور از موانع و سرعت پایین آن نقطه ضعف منحصر به فرد این گونه ربات است. برای ربات‌های بالارونده از دیوار روما ۲[13] [۱۵] طراحی و ساخته شده است که از فناوری پمپ‌های مکشی برای ایجاد خلا در فنجان‌های متصل[14] به دیوار برای چسبیدن استفاده می‌کند که ساختار آن شبیه نمونه اولیه روما ۱ می‌باشد که به جای پنجه‌ها پمپ‌های ایجاد خلا در آن به کار برده شده است. ربات چند منظور دیگر برای بالا رفتن از دیوار با فناوری مکشی و ایجاد خلا دبلیو–کلایم‌بوت[15] [۱۶] طراحی و ساخته شده است که این ربات نیز مانند نمونه اولیه خود (کلایمبوت) به جای پنجه‌ها از فنجان‌های ایجاد خلا در آن استفاده شده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود طراحی رباتی که توانایی صعود از ساختارهای خرپایی و داربستی را به واسطه‌ی عملگرهای گریپی داشته باشد و در عین حال بدنه‌ی اصلی آن تمامی درجات آزادی صفحه‌ای شامل انتقالی و دورانی را فراهم کند به گونه‌ای که توانایی انجام عملیات تعمیراتی توسط یک منیپولاتور نصب شده بر روی بدنه فراهم گردد در تحقیقات پیشین از قلم افتاده است و در یک ربات متحرک که قرار است صعود را انجام دهد و تا حد امکان پایداری خود را در برابر شرایط بیرونی از جمله عوامل ناخواسته و اغتشاشات حفظ کند، بهترین مدل پیشنهادی برای صلبیت آن، ساختار توازی آن است که ربات طراحی شده در این مقاله با ساختار موازی خود می‌تواند در هر لحظه دو نقطه

شکل ۱: نمای کلی ربات طراحی شده

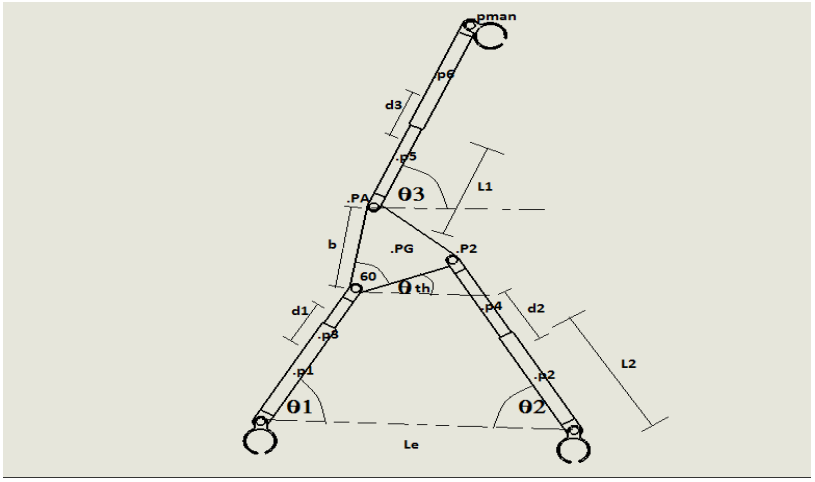
Fig. 1. The configuration of designed robot

1 Coordinated Jacobean Transpose Control
2 Generalized Coordinates
3 Active Joint
4 Branched Serial
5 Compliance
6 Quasi Static
7 Libra
8 Simplified Cartesian Computed Torque (SCCT)
9 DRC_Hubo
10 Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)
11 ASTERISK
12 RiseV3
13 ROMA II
14 Adhesion Cups
15 W_Climbot



شکل ۲: حرکت کلی ربات در صفحه از میان میله‌ها

Fig. 2. The steps of robot's locomotion on infrastructure



شکل ۳: شماتیک ربات به همراه معرفی پارامترهای روی آن

Fig. 3. The Robot's geometry with introduced parameters

را به عنوان تکیه گاه اختیار کند تا با تقسیم نیروها با نسبت منطقی از فشار بر موتورها بکاهد و بتواند بار بیشتری را با خود حمل کند همچنین اطمینان بیشتری برای عدم سقوط در آن فراهم گردد. با مدلسازی کامل سینماتیکی و دینامیکی ربات امکان کنترل ربات در فاز تعمیراتی به کمک روش بازخورد خطی سازی شده فراهم گشته است تا در مقابل اغتشاشات ناشی از تعمیرات مقاوم بماند.

بنابراین در ابتدا در بخش اهداف و نقطه نظرات طراحی برای ربات معرفی شده است که چگونه با طراحی مکانیزم، می‌توان نیازهای مورد نظر برای یک ربات بالا رونده از ساختارهای شبکه‌ای را بر طرف کرد. سپس در بخش محاسبات هندسه و سینماتیک (مستقیم و معکوس) کلی ربات به دست خواهد آمد تا فاز حرکت شناسی آن به طور کامل به دست آید. در بخش دینامیک ربات (دینامیک معکوس) با روش لاگرانژ به دست خواهد آمد تا با فرمالیسون به دست آمده از محاسبات دینامیک، کنترل مستقیم حلقه باز[1] ربات برای فاز بالا روندگی صورت پذیرد در ادامه این بخش رهیافتی برای به دست آوردن دینامیک مستقیم ربات برای پلانت دینامیکی[2] ربات به دست می‌آید تا برای بررسی و صحه سنجی محاسبات کنترل مستقیم از آن بهره جست. نهایتا در بخش بعدی برای فاز تعمیراتی ربات که دچار اغتشاش می‌گردد کنترلر بر اساس روش بازخورد خطی سازی شده طراحی گشته است. در بخش شبیه‌سازی آنالیتیکی[3] محاسبات در کدنویسی توسط نرم افزار متلب–سیمولینک[4] صورت می‌پذیرد و با نتایج حاصله از شبیه سازی ام‌اس‌سی–آدامز[5] مقایسه خواهد شد تا اطمینان از صحت محاسبات مدل سازی دینامیکی و سینماتیکی وکنترلی ربات

1 Feed Forward Control (Open Loop Control)
2 Dynamic Plant
3 Analytical Simulation
4 Matlab-Simulink
5 MSC-ADAMS

حاصل شود. در نهایت دیده خواهد شد که ربات طراحی شده توانایی صعود از ساختارهای داربستی و خرپایی و انجام تعمیرات عمرانی را به شکل مقاوم دارد.

۲- طراحی هندسی و مدل‌سازی سینماتیکی

برای طراحی ربات با توجه به کارکرد آن در ارتفاع و با توجه به این امر که پایداری ربات امری حیاتی برای یک ربات بالارونده است، طراحی ربات به صورت یک ربات موازی به همراه یک بازوی سری صورت پذیرفته است. بنابراین با این ساختار می‌توان ادعا نمود که ربات پایداری مناسب و دقت و سرعت مورد نیاز برای یک ربات بالارونده را دارا می‌باشد که می‌تواند میزان بار به نسبت زیادی را بدون از دست دادن پایداری و سقوط به نقطه‌ای دلخواه در فضا حمل کند. الهامی که برای طراحی این ربات از آن استفاده شده است میمون‌ها هستند که برای حرکت بر روی درختان همواره یک دست آزاد برای نشانه گیری دارند تا نقطه بعدی مورد نظر را بگیرند و با یک دست دیگر و دم خود به طور همزمان شاخه‌ای دیگر از درخت را گرفته است. این ربات از نوع هیبریدی صفحه‌ای می‌باشد که ادغام مکانیزم سری و موازی است و برای سه درجه آزادی در فضای کاری برای انجام عملیات تعمیراتی، به کمک پنج مفصل فعال کنترل می‌گردد. ربات صفحه‌ای بالا رونده را به گونه‌ای طراحی کرده‌ایم که توانایی حرکت در صفحه‌ی قائم با بیشترین فضای کاری را داشته باشد. شکل شماتیکی ربات طراحی شده را در شکل ۱ ملاحظه می‌کنید. ربات دارای سه پایه و یک صفحه‌ی مثلثی شکل است.

در واقع رباتی با پنج درجه آزادی به همراه پنج عملگر که در فضای کاری سه درجه آزادی دارد پیشنهاد شده است که با دو درجه آزادی اضافه می‌تواند قدرت مانوردهی بهتر برای عبور از موانع و عدم مواجه با حالت تکین[1]، از خود نشان بدهد. بنابراین حرکت نقطه انتهایی منوپلاتور با کمک قسمت سه درجه آزادی بخش موازی و دو درجه آزادی بخش سری ربات، صورت می‌پذیرد. مساله حائز اهمیت قسمت موازی ربات است که در دسته خاصی از ربات‌های موازی قرار می‌گیرد که به آن ربات‌های موازی ناکامل[2] می‌گویند. دلیل این نوع دسته بندی جنبه‌های توپولوژی[3] می‌باشد. همانطور که واضح است در هر ربات موازی حداقل یک حلقه بسته مشاهده می‌شود (حداقل دو نقطه از ربات هستند که همزمان تکیه‌گاه‌هایی را گرفته‌اند) که اگر با دید بهتر و توپولوژیکی به قضیه نگاه کنیم، در واقع حداقل دو حلقه بسته در یک ربات موازی می‌توان یافت (با در نظر گرفتن حلقه دیگر که پشت همان حلقه اول است از دید به پشت). حال مساله‌ای که مطرح می‌شود، تعداد حلقه‌های بسته ربات است که آیا از لحاظ تعداد با تعداد درجات آزادی مستقل ربات برابر است یا خیر، اگر این دو تعداد با یک دیگر برابر باشند، ربات موازی کامل[4] است در غیر این صورت ربات موازی ناکامل است. برای روشن شدن این موضوع ربات استوارت را مثال می‌زنیم که دارای شش حلقه بسته توازی است و دارای شش درجه آزادی است که با شش عملگر خطی به صورت متقارن کنترل می‌شود پس یک ربات موازی کامل است [۱۷]. ربات طراحی شده در این مقاله، با توجه به وجود دو حلقه بسته سینماتیکی و سه درجه آزادی مستقل، یک ربات موازی ناکامل است. چالشی که ناکاملی در ربات موازی ایجاد می‌کند این است که انتخاب مفاصل فعال برای حرکت دلخواه به راحتی میسر نیست و باید با توجه به شناخت کلی حرکتی که توسط منوپلاتور قرار است صورت بپذیرد، مفاصل فعال انتخاب می‌شوند که این مفاصل متقارن نیستند به بیان دیگر از یک جنس نمی‌باشند (دو مفصل دورانی و یک مفصل خطی). این امر انتخاب مفاصلی خاص به عنوان مفاصل فعال، به نوع آوری خاصی نیاز دارد که در این مقاله به آن پرداخته شده است.

ربات در دو مد حرکتی کار می‌کند. ۱. مد کاری[5] که در آن دو پنجه مربوط به دو بازو ربات داربست را به محکمی نگه داشته و با تغییرات درجات آزادی مفاصل انتهای پایه‌ی سوم که بازوی آزاد می‌باشد، عملیات کاری و منوپولیشن صورت می‌پذیرد ۲. مد حرکتی[6] که در آن بعد از این که بازوی آزاد به نقطه مورد نظر برای اتصال رسید، آن قسمت را با پنجه به محکمی می‌گیرد و یکی از پایه‌های محکم شده به داربست توسط پنجه مربوطه رها می‌شود تا به عنوان بازوی آزاد دیگر به دنبال نقطه مورد نظر دیگر برود تا آن را بگیرد. این عملیات به صورت چرخه‌وار متناوبا تکرار می‌شود تا حرکت ربات در صفحه شکل بگیرد. از آنجا که قدم اول کنترل ربات، کنترل آن در فاز انجام عملیات می‌باشد، در این مقاله این فاز مورد توجه قرار گرفته است. همچنین همانطور که مشخص است در واقع مد حرکتی خود ترکیبی متناوب از یک سری منوپولیشن یا همان مد تعمیراتی یا کاری است که اطلاع از محاسبات دینامیک و سینماتیک مد اول پیش شرط مد حرکتی است. این مساله در شکل ۲ روشن شده است که مد حرکتی مشتمل بر تعدادی مد کاری است که عملیات تعویض پایه‌های ثابت و متحرک متناوبا تعویض نقش می‌کنند.

در این مقاله تنها تحلیل سینماتیکی، دینامیکی و کنترلی مد اول انجام شده است. ربات برای حرکت در فضای کاری در مد اول که در واقع سه درجه

1 Singularity
2 Non-Fully Parallel Robots
3 Topology
4 Fully Parallel
5 Manipulation Mode
6 Locomotion Mode

آزادی مربوط به مختصات دکارتی صفحه‌ای پنجه نهایی است (که همان عملگر نهایی ربات می‌باشد). برای کنترل حرکت کامل در صفحه فضای مفاصلی مطابق شکل ۳ را در نظر می‌گیریم که شامل ۶ مفصل دورانی و ۳ مفصل پیریسماتیک[1] که از این تعداد سه مفصل در قسمت موازی ربات و دو مفصل در قسمت سری ربات که همان بازو آزاد ربات باشد به عنوان مفاصل فعال که ورودی به آن‌ها اعمال می‌شود، در نظر گرفته شده است.

۳- مدلسازی

۳-۱- سینماتیک

با توجه به این موضوع که در ربات‌های موازی تعدادی از مفاصل غیر فعال[2] هستند و تعدادی فعال، باید سعی شود که درجات آزادی وابسته را بر حسب درجات آزادی مستقل بیان کرد. این کار در ربات‌های موازی با استفاده از روابط هندسی امکانپذیر است.

برای استخراج روابط سینماتیکی نیاز است تا پارامترهای هندسی سیستم تعریف شوند. با توجه به موازی بودن ربات و تشکیل یک حلقه‌ی بسته می‌توان معادله‌ی هندسی حلقه‌ی بسته تشکیل شده را در دو راستای x، y نوشت که به صورت روابط (۱) و (۲) تعریف کرد:

$$(L_1+L_2+d_1)\cos\theta_1+b.\cos\theta_{th}+(L_1+L_2+d_2)\cos\theta_2=Le \quad (۱)$$

$$(L_1+L_2+d_1)\sin\theta_1+b.\sin\theta_{th}=(L_1+L_2+d_2)\sin\theta_2 \quad (۲)$$

در روابط فوق θ_1 و θ_2 و d_2 فضای مفاصل مستقل هستند (مختصات تعمیم یافته مستقل[3]) که همان مفاصل فعال انتخابی برای قسمت موازی ربات می‌باشند. L_1 طول پیستون‌ها و L_2 طول سیلندرها و b طول اضلاع مثلث متساوی الاضلاع هستند (بدنه اصلی ربات). همچنین θ_{th} مقدار دوران بدنه اصلی ربات و d_1 یک درجه آزادی وابسته (مفصل غیر فعال) است. با حل روابط (۱) و (۲) می‌توان درجات آزادی وابسته را بر حسب درجات آزادی مستقل به دست آورد. در نهایت دو درجه آزادی وابسته، بر حسب درجه آزادی مستقل به صورت روابط (۳) و (۴) خواهد بود.

$$\theta_{th}=Arc(\sin\left\{\frac{(L_1+L_2+d_2).\sin(\theta_1+\theta_2)-Le.\sin\theta_1}{b}\right\}+\theta_1 \quad (۳)$$

$$d_1=\frac{(L_1+L_2+d_2)\sin\theta_2}{\sin\theta_1}-\frac{b\sin\left\{Arc(\sin\left\{\frac{(L_1+L_2+d_2).\sin(\theta_1+\theta_2)-Le.\sin\theta_1}{b}\right\}+\theta_1\right\}}{\sin\theta_1}-L_1-L_2 \quad (۴)$$

حال موقعیت نقاط مورد نظر (مرکز جرم اجزای مختلف ربات که در شکل موقعیت آن‌ها نشان داده شده است) را بر حسب درجات آزادی مستقل مطرح شده به دست می‌آوریم که به صورت (p_1,p_2,p_3,p_4,p_5,p_6) تعریف می‌شوند:

$$P2=\begin{bmatrix}-(L_1+L_2+d_2)\cos\theta_2+Le\\(L_1+L_2+d_2)\sin\theta_2\end{bmatrix}$$

$$PG=P2-\begin{bmatrix}\frac{b}{2}.\cos\theta_{th}\\\frac{b}{2}.\sin\theta_{th}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}-\frac{b}{2}\frac{\sqrt{3}}{3}\sin\theta_{th}\\\frac{b}{2}\frac{\sqrt{3}}{3}\cos\theta_{th}\end{bmatrix} \quad (۵)$$

$$PA=P2-\begin{bmatrix}\frac{b}{2}.\cos\theta_{th}\\\frac{b}{2}.\sin\theta_{th}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}-\frac{b}{2}\sqrt{3}\sin\theta_{th}\\\frac{b}{2}\sqrt{3}\cos\theta_{th}\end{bmatrix}$$

$$p_1=\begin{bmatrix}\frac{L_2}{2}.\cos\theta_1\\\frac{L_2}{2}.\sin\theta_1\end{bmatrix},p_2=\begin{bmatrix}Le-\frac{L_2}{2}.\cos\theta_2\\\frac{L_2}{2}.\sin\theta_2\end{bmatrix},p_3=\begin{bmatrix}(L_2+\frac{L_1}{2}+d_1)\cos\theta_1\\(L_2+\frac{L_1}{2}+d_1)\sin\theta_1\end{bmatrix}$$

$$p_4=\begin{bmatrix}Le-(L_2+\frac{L_1}{2}+d_2)\cos\theta_2\\(L_2+\frac{L_1}{2}+d_2)\sin\theta_2\end{bmatrix} \quad (۶)$$

همان طور که در رابطه (۷) مشهود است، بازوی اضافی که مکانیزم سری است به مکانیزم موازی ربات اضافه شده است لذا دو درجه آزادی مستقل اضافی تحت عناوین θ_3 و d_3 پدید می‌آید. در نهایت ربات ترکیبی سری موازی با پنج درجه آزادی خواهیم داشت.

$$p_5=PA+\begin{bmatrix}\frac{L_1}{2}.\cos\theta_3\\\frac{L_1}{2}.\sin\theta_3\end{bmatrix}$$

$$p_6=PA+\begin{bmatrix}(L_1+\frac{L_2}{2}+d_3)\cos\theta_3\\(L_1+\frac{L_2}{2}+d_3)\sin\theta_3\end{bmatrix} \quad (۷)$$

$$P_{man}=PA+\begin{bmatrix}(L_1+L_2+d_3)\cos\theta_3\\(L_1+L_2+d_3)\sin\theta_3\end{bmatrix}$$

1 Prismatic Joint
2 Passive Joints
3 Independent Generalized Coordinates

باتوجه به حل معادلات هندسی از قسمت موازی ربات توانسیم درجات آزادی وابسته را بر حسب درجات آزادی مستقل به دست بیاوریم، بنابراین کافی است در معادلات نقاط ربات به علاوه یک نقطه دیگر که عملگر نهایی ربات است (P_{man})، به جای درجات آزادی وابسته، معادله درجات وابسته بر حسب درجه آزادی مستقل روابط (۳) و (۴) را قرار دهیم.

سینماتیک مستقیم

حال با توجه به مختصات به دست آمده از نقاط مختلف (مراکز جرم اجزا ربات) می‌توانیم رابطه‌ای برای سینماتیک مستقیم بدست آوریم که به صورت رابطه (۸) است.

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = J\left[\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{d}_2, \dot{\theta}_3, \dot{d}_3\right]^T \qquad (۸)$$

قسمت چپ رابطه (۸) (zω,yv,xv) سرعت در فضای کاری است که شامل سرعت‌های راستای افقی و عمودی و میزان سرعت دورانی می‌باشد که با ماتریس ژاکوبین J به سمت راست معادله یعنی فضای سرعتی مفاصل ربات مربوط می‌شود. ماتریس ژاکوبین سرعتی J برای هر نقطه به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_{ix}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial p_{ix}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial p_{ix}}{\partial d_2} & \frac{\partial p_{ix}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial p_{ix}}{\partial d_3} \\ \frac{\partial p_{iy}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial p_{iy}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial p_{iy}}{\partial d_2} & \frac{\partial p_{iy}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial p_{iy}}{\partial d_3} \\ \frac{\partial \varphi_{iz}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \varphi_{iz}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial \varphi_{iz}}{\partial d_2} & \frac{\partial \varphi_{iz}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial \varphi_{iz}}{\partial d_3} \end{bmatrix} \qquad (۹)$$

موقعیت سینماتیکی نقاط p_1 تا p_6 همان موقعیت مراکز جرم اجزا ربات هستند به علاوه یک نقطه اضافی که همان نقطه انتهایی منوپلاتور(P_{nam}) می‌باشد که در بحث سینماتیک در اینجا این نقطه، نقطه مطلوب مورد نظر ما است. میزان دوران φ_{iz} در همه اجزا در راستای عمود بر صفحه حرکتی ربات است که همان درجات آزادی θ_1 و θ_2 و θ_3 و θ_{th} هستند که یکی از آن ها(θ_{th}) وابسته است و برحسب درجات آزادی مستقل دیگر بیان می‌شود که پیش تر توضیح داده شده است.

سینماتیک معکوس

برای به دست آوردن رابطه‌ای برای سینماتیک معکوس می‌بایست برای حرکت دلخواه عملگر نهایی، مقدار حرکت مفاصل که همان حرکت درجه آزادی مستقل هستند را به دست آورد. این کار از طریق ژاکوبین سرعتی قابل انجام است. کافیست از ژاکوبین سرعتی معکوس گرفت و در بردار سرعت دلخواه مورد نظر آن را ضرب کرد. سپس با انتگرال گیری بر حسب زمان از سرعت‌های مفاصل و با توجه به موقعیت معلوم ابتدایی آن، موقعیت‌های مورد نیاز مفاصل را برای حرکت دلخواه عملگر نهایی در بازه زمانی مشخص به دست آورد.

با توجه به این که ژاکوبین برای ربات با پنج درجه آزادی مورد بحث دارای سه سطر و پنج ستون است (ربات پنج درجه آزادی در فضای کاری سه درجه آزادی حرکت صفحه‌ای) معکوس گیری از آن امکان ندارد چرا که با توجه به داشتن دو درجه اضافی آزادی می‌توان بینهایت حالت برای حرکت مفاصل برای حرکت دلخواه عملگر به دست آورد. چاره کار استفاده از معکوس مجازی ماتریس[1] است که وظیفه آن به دست آوردن معکوس ماتریس‌های غیر مربعی است که به شکل رابطه (۱۰) تعریف می‌شود.

$$A^+ = (\mathrm{A}^T \mathrm{A})^{-1} A^T$$
$$\Rightarrow \left[\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{d}_2, \dot{\theta}_3, \dot{d}_3\right]^T = (\mathrm{J}^T \mathrm{J})^{-1} J^T \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \qquad (۱۰)$$

۳- ۲- دینامیک

دینامیک معکوس

برای به دست آوردن دینامیک ربات با استفاده از رابطه‌ی زیر می‌توانیم دینامیک ربات را از روش انرژی (اویلر لاگرانژ)[2] به دست آوریم.

$$F_n = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_n}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_n}, L = K - P \qquad (۱۱)$$

در رابطه فوق L لاگرانژین است که حاصل تفریق انرژی جنبشی K از انرژی پتانسیل P است که انرژی پتانسیل، همان پتانسیل گرانشی است و انرژی جنبشی مجموع انرژی جنبشی دورانی و خطی اجزا مختلف ربات است که با به دست آوردن سرعت نقاط مختلف گفته شده که مشتق زمانی موقعیت‌های سینماتیکی معرفی شده می‌باشد به دست خواهد آمد. nFمعرف نیروهای تعمیم یافته[3] است. در رابطه (۱۱) q_n همان درجات آزادی مستقل ($\theta_1, \theta_2, d_2, \theta_3, d_3$) هستند. برای مرتب سازی فرمول لاگرانژ با استفاده از

1 Pseudo Inverse
2 Euler Lagrange Method
3 Generalized Forces

ژاکوبین سرعتی می‌توان فرمول ساده شده و مرتبی را به شکل رابطه‌های خلاصه شده‌ای به دست آورد [۱۸]. با توجه به روابط حرکتی، دینامیک معکوس قابل دست یابی است که می‌توان برای یک مسیر مشخص نیروهای تعمیم یافته را به دست آورد که گشتاور مورد نیاز موتورها برای ایجاد آن حرکت است. این معادله، اساس کنترل ربات‌ها به روش گشتاورهای محاسبه شده است که در آن می‌توان با توجه به مشخص بودن مسیر در فضای مفاصل یا کاری که به کمک سینماتیک به هم قابل تبدیل‌اند، گشتاورهای مورد نیاز موتورها را به شکل مستقیم یا حلقه باز به دست آورد. در نهایت معادله‌ی دینامیکی با توجه به محاسبات فوق برای ربات طراحی شده به شکل زیر حاصل می‌گردد:

$$\tau = D(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q)$$

$$\begin{bmatrix}\tau_1\\ \tau_2\\ f_1\\ \tau_3\\ f_2\end{bmatrix} = D(\theta_1,\theta_2,d_2,\theta_3,d_3)_{(5\times5)}\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_1\\ \ddot{\theta}_2\\ \ddot{d}_2\\ \ddot{\theta}_3\\ \ddot{d}_3\end{bmatrix} + \ldots$$
$$+C(\theta_1,\theta_2,d_2,\theta_3,d_3,\dot{\theta}_1,\dot{\theta}_2,\dot{d}_2,\dot{\theta}_3,\dot{d}_3)_{(5\times5)}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_1\\ \dot{\theta}_2\\ \dot{d}_2\\ \dot{\theta}_3\\ \dot{d}_3\end{bmatrix} + g(\theta_1,\theta_2,d_2,\theta_3,d_3)_{(5\times1)} \qquad (۱۲)$$

در رابطه فوق D ماتریس اینرسی می‌باشد که بر حسب پنج درجات آزادی اصلی به صورت مثبت و معین به دست می‌آید. قسمت ماتریس C معرف نیروهای کوریولیس می‌باشد و g معرف نیروهای ناشی از جاذبه را نشان می‌دهد.

باید توجه داشت که در معادلات فوق تک تک درایه‌ها شامل جملات غیرخطی طولانی هستند که قابل اشاره در متن نبوده و برای انجام صحه سنجی و شبیه سازی در نرم افزار متلب کدنویسی و استخراج گشته‌اند و نتایج به صورت نمودارهای گشتاور و نیرو به دست آمده است.

دینامیک مستقیم

پس از محاسبه‌ی گشتاور مورد نیاز موتورها برای طی مسیر مشخص، به منظور صحه سنجی روابط نیاز است تا خود دینامیک ربات نیز مدل شود تا با اعمال گشتاورهای محاسبه شده به آن از حصول مسیر دلخواه اطمینان حاصل شود. این همان دینامیک مستقیم ربات است که با توجه به معادلات استخراجی نیاز به حل دستگاه معادلات دیفرانسیل جفت[1] شده دارد. برای حل دینامیک مستقیم کافیست از رابطه‌ی معادله‌ی حرکت استفاده کنیم تا با حل معادلات دیفرانسیل آن که معادلات مرتبه دو می‌باشند (مشتق دوم درجات آزادی مستقل بر حسب زمان) دینامیک مستقیم را به دست آوریم که به این معنا است که به ازای گشتاورهای داده شده تحت عنوان ورودی، میزان حرکت مفاصل درجات آزادی مستقل چقدر خواهد بود.

برای این کار می‌بایست معادلات حرکت گفته شده در مراحل قبل را به طوری ساده کنیم که مشتق دوم درجات آزادی مستقل در یک طرف معادله، بر حسب درجات آزادی و سرعت‌های درجه آزادی مطرح شوند. با گرفتن دو انتگرال از رابطه‌ها می‌توان معادلات دینامیک مستقیم را به دست آورد (با توجه به پیکربندی و سرعت‌های اولیه ربات، ثابت‌های اولیه دو انتگرال به دست خواهد آمد) که در معادله‌ی حل شده ورودی گشتاورها می‌باشند و سیگنال‌های سرعت و موقعیت مفاصل نیز در پلانت فیدبک[2] می‌شوند تا معادله دینامیک مستقیم در هر لحظه در جریان باشد. رابطه (۱۳) موارد فوق را بیان می‌کند که چگونه دینامیک مستقیم قابل حصول است.

$$\ddot{q} = D(q)^{-1}(\tau - C(q,\dot{q})\dot{q} - g(q)) \qquad (۱۳)$$

با توجه به رابطه فوق می‌توان با استفاده از روش‌های عددی در سیمولینک، مقادیر سرعت و موقعیت در هر لحظه را فیدبک کرد و با ورودی گشتاورها و نیروها مقدار مشتق دوم درجات آزادی مستقل را به دست آورد. با یک بار انتگرال گیری می‌توان سرعت را به دست آورد که فیدبک می‌شود به معادله و با دوبار انتگرال گیری موقعیت به دست می‌آید که آن هم به داخل معادله در هر لحظه فیدبک می‌شود. معادله‌ی فوق برای ربات طراحی شده به شکل رابطه (۱۴) حاصل می‌آید:

$$\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_1\\ \ddot{\theta}_2\\ \ddot{d}_2\\ \ddot{\theta}_3\\ \ddot{d}_3\end{bmatrix} = D(\theta_1,\theta_2,\mathrm{d}_2,\theta_3,\mathrm{d}_3)_{(5\times5)}^{-1}$$
$$\times\left\{\begin{bmatrix}\tau_1\\ \tau_2\\ f_1\\ \tau_3\\ f_2\end{bmatrix} - C(\theta_1,\theta_2,\mathrm{d}_2,\theta_3,\mathrm{d}_3,\dot{\theta}_1,\dot{\theta}_2,\dot{\mathrm{d}}_2,\dot{\theta}_3,\dot{\mathrm{d}}_3)_{(5\times5)}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_1\\ \dot{\theta}_2\\ \dot{d}_2\\ \dot{\theta}_3\\ \dot{d}_3\end{bmatrix} - g(\theta_1,\theta_2,\mathrm{d}_2,\theta_3,\mathrm{d}_3)_{(5\times1)}\right\} \qquad (۱۴)$$

لذا توانستیم برای یک ورودی مورد نظر گشتاور و نیرو، مسیر و میزان

1 Coupled ODEs
2 Feedback

حرکت مفاصل درجات آزادی را به دست آوریم که همان دینامیک مستقیم است.

٤- کنترل سیستم به روش بازخورد خطی سازی شده

معادلات دینامیکی که در فوق به دست آمد، برای کنترل حلقه باز سیستم ربات کافی می‌باشند ولی مساله‌ای که مطرح می‌شود این است که آیا ربات در برابر اغتشاشات خارجی می‌تواند حرکت دلخواه را دنبال کند یا خیر. آن چه که مسلم است، در طراحی کنترل با روش دینامیک معکوس یا همان روش گشتاورهای محاسبه شده، هیچ نوع تضمینی برای پاسخ دقیق و تعقیب درست در معرض اغتشاشات وجود ندارد. بنابراین نیاز است در روش کنترلی علاوه بر قسمت دینامیک معکوس یا همان کنترل حلقه باز ، کنترل فیدبک هم استفاده شود که به آن صورت، ورودی کنترلی ترکیبی از کنترل حلقه باز و حلقه بسته ایجاد می‌شود که به واسطه آن اثرات اغتشاشات بر طرف شوند و تعقیب مسیر دستور داده شده به خوبی پیمایش شود.

با توجه به ساختار به شدت غیرخطی که در دینامیک پیچیده ربات مشاهده می‌شود، روش خطی سازی فیدبک[1] روشی مناسب است تا به واسطه آن بتوان اثرات اغتشاش را از بین برد و تعقیب دقیق را انجام داد. ضمن این موضوع که در سیستم عدم قطعیت‌ها چه به صورت فیزیکی و چه به صورت مدلسازی در نظر گرفته نشده‌اند و فرض بر این پایه است که مدل سازی و فیزیک ربات به درستی محاسبه و اندازه‌گیری شده است و صرفا فرض شده است که سیستم باید در مقابل اغتشاشات مقاوم بماند، این روش کنترلی، روشی منطقی آسان و کاربردی می‌باشد که نیاز به روش‌های پیچیده تر کنترلی که حجمی انرژی و محاسبات را صرف خود می‌کند،احساس نمی‌شود. البته لازم به ذکر است که روش خطی سازی فیدبک کنترل کاملا مقاوم[2] نمی‌باشد چرا که مساله پایدارسازی که در خطی سازی فیدبک لحاظ می‌شود تنها می‌تواند اغتشاشات کم دامنه با تغییرات موقتی و کم فرکانس را جبران و بر طرف کند [۱۹].

کاری که قرار است در اینجا انجام دهیم طراحی یک سیستم کنترلی با روش خطی سازی فیدبک است که قرار است برای تک تک مفاصل که اغتشاشات محیطی به صورت نیرو و گشتاور به آن‌ها وارد می‌شود را اثرش را از بین ببرد و از ناپایداری سیستم جلوگیری کند و مسیر فضای مفاصل را روی منحنی دستور داده شده نگه دارد. این روش برای خطاهای احتمالی اندازه گیری شرایط اولیه (تنظیم[3]) و یا خطاهای مدل سازی می‌تواند مفید واقع شود. در اینجا ما فقط برای اثرات اغتشاش بیرونی که به مفاصل وارد می‌شوند کنترلر را طراحی می‌کنیم. با توجه به اینکه روش کنترلی مورد استفاده روش بازخورد خطی سازی شده‌ی ورودی-متغیر[4] می‌باشد لذا همه‌ی متغیرها کنترل شده و فیدبک همه‌ی آن‌ها لازم است. از آنجایی که کنترل در فضای مفاصل صورت گرفته است برای محاسبه‌ی موقعیت و سرعت فیدبک مفاصل استفاده از انکودر کافی می‌باشد. قابل اثبات است که سیستم کنترل شده به این روش پایدار لیاپانوف می‌باشد.

در ابتدای امر معادله دینامیکی دلخواه و مورد نظر را به شکل زیر در نظر می‌گیریم.

$$\tau = D(\mathrm{q}_d)\ddot{q}_d + C(\mathrm{q}_d, \dot{q}_d)\dot{q}_d + g(\mathrm{q}_d) \qquad (۱۵)$$

در رابطه (۱۵) qd در واقع همان فضای مفاصل دلخواه[5] است که به سیستم دستور داده می‌شود تا توسط مفاصل ربات دنبال شود.

حال قانون کنترلی زیر را به شکل رابطه (۱۶) برای سیستم در نظر می‌گیریم

$$\tau = D(\mathrm{q})\ddot{q}_d + C(\mathrm{q}, \dot{q})\dot{q} + g(\mathrm{q}) \qquad (۱۶)$$

با جایگذرای قانون کنترلی فوق در معادله دینامیکی تمام عوامل غیر خطی از بین خواهند رفت و عبارت زیر باقی می‌ماند.

$$D(\mathrm{q})\ddot{q}_d = D(\mathrm{q})\ddot{q} \rightarrow \ddot{q} = \ddot{q}_d \qquad (۱۷)$$

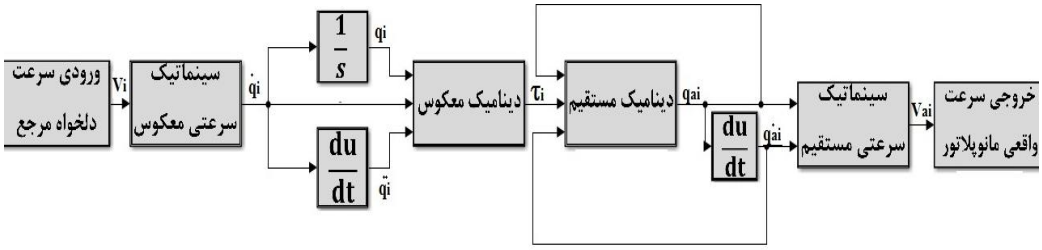
با در نظر گرفتن قانون کنترلی معرفی شده در رابطه (۱۶) به دینامیک پایدار دست خواهیم یافت که تحت عنوان روش قانون کنترل مبتنی بر گشتاور های محاسبه شده[6] شناخته می‌شود.

$$\tau = D(\mathrm{q})(\ddot{q}_d - K_v\dot{e} - K_p e) + C(\mathrm{q}, \dot{q})\dot{q} + g(\mathrm{q}) \qquad (۱۸)$$

در رابطه (۱۸) e خطای تعقیب است و Kp و Kv ماتریس‌های مربعی بهره‌های تناسبی و مشتقی (سرعتی) خطاها می‌باشند که به صورت مثبت معین می‌باشند که تعداد سطرها و ستون‌های آن برابر تعداد درجات آزادی اصلی سیستم هستندکه معمولا به صورت قطری محاسبه می‌شوند که هر

1 Feedback Linearization Control Method
2 Robust Control

3 Regulation
4 input-state
5 Desired
6 Computed Torque Method Control (CTM)



شکل ٤: نمودار بلوک دیاگرام کلی ربات برای کنترل حلقه باز (دیاگرام کلی دینامیک و سینماتیک)

Fig. 4. Overall controlling block diagram for open loop control (kinematics and kinetics diagram).

Table 1. The kinematic and kinetic parameters of the climbing robot for simulation

جدول ۱: پارامترهای سینماتیکی و سینتیکی ربات بالارونده برای شبیه سازی

پارامتر	واحد	مقدار	نماد
طول سیلندرها	m	0.1	L_1
طول پیستون ها	m	0.1	L_2
فاصله بین دو پنجه ثابت	m	0.4	Le
طول ضلع مثلث بدنه اصلی	m	0.2	b
جرم اجزا ربات	kg	2	m_i
ممان اینرسی اجزا	$kg.m^2$	0.001	I_i
جرم بدنه اصلی ربات	kg	4	M_G
ممان اینرسی بدنه اصلی ربات	$kg.m^2$	0.004	I_G
شتاب گرانش	$\frac{m}{s^2}$	-9.81	$g\downarrow$

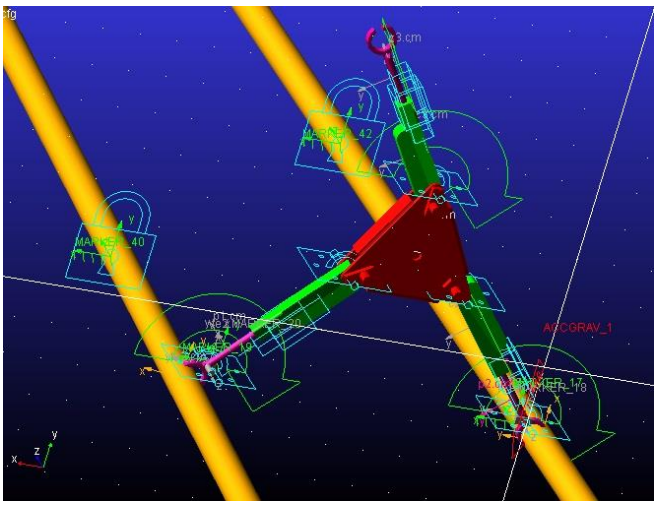
عدد روی قطر معرف بهره تناسبی یا مشتقی برای هر مفصل اصلی است.

با جایگذاری رابطه دینامیک در رابطه قانون کنترلی خواهیم داشت.

$$D(q)(\ddot{e}+K_v\dot{e}+K_pe)=0\rightarrow\ddot{e}+K_v\dot{e}+K_pe \qquad (۱۹)$$

رابطه (۱۹) در واقع بیانگر دینامیک خطی شده خطا است. همان طور که مشخص با قانون کنترلی که ذکر شد توانستیم به رابطه پایدار خطا دست پیدا کنیم که با انتخاب مقادیر دلخواه مثبت برای درایه‌های ماتریس‌های تناسبی و مشتقی (Kp و Kv) می‌توانیم زمان پاسخ و دقت تعقیب را تحت عوامل اغتشاشی بیرونی، تنظیم نماییم. این کار با در نظر گرفتن رابطه خطی خطاها صورت می‌پذیرد که کافی است ماتریس‌های حالت خطی را بنویسیم و با در نظر گرفتن مقادیر ویژه آن پایداری و رفتار سیستم را بررسی نماییم.

روش قانون کنترل مبتنی بر گشتاورهای محاسبه شده شامل دو بخش است که به صورت رابطه (۲۰) نمایش داده می‌شود.



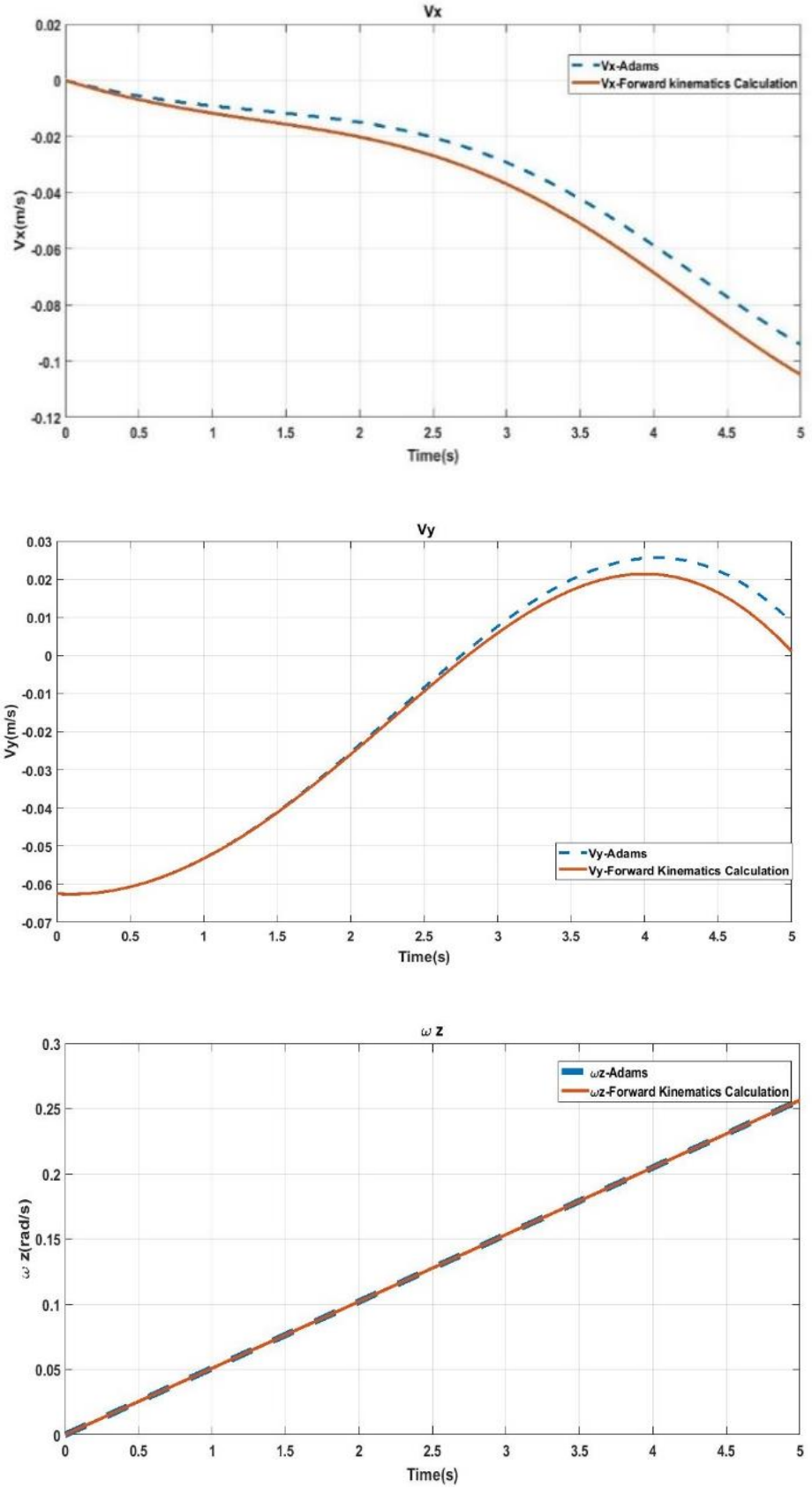
شکل۵: نمایی از شبیه سازی دینامیکی سینماتیکی ربات در نرم افزار اماس‌سی–آدامز

Fig. 5. Climbing robot modeled in dynamic simulator MSC-ADAMS

$$\tau=\left\{D(q)\ddot{q}_d+C(q,\dot{q})\dot{q}+g(q)\right\}_{(\text{FeedForward_Control})} \qquad (۲۰)$$
$$+\left\{D(q)(-K_v\dot{e}-K_pe)\right\}_{(\text{Feedback_Control})}$$

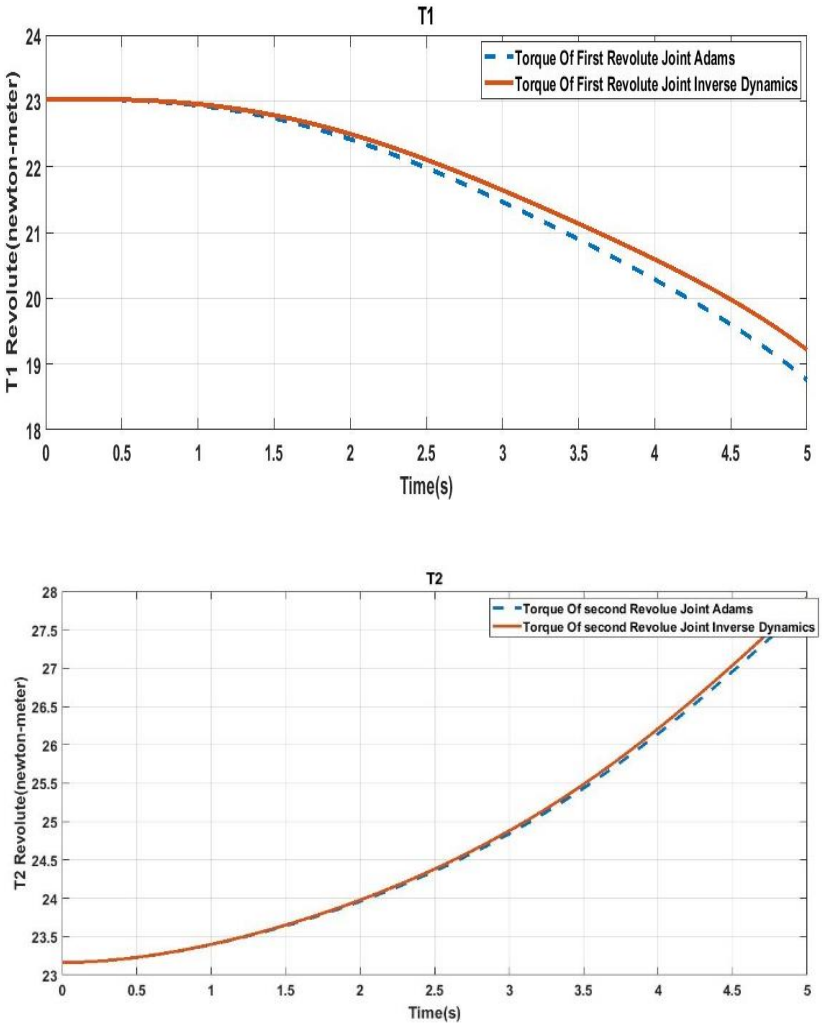
بنابراین ورودی کنترلی حاصلی از جمع ورودی کنترلی حلقه باز و حلقه بسته به صورت رابطه کلی (۲۰) می‌باشد [۲۰].

حال می‌توان انتظار داشت که با اعمال اغتشاش به صورت نیرو و گشتاور به مفاصل اصلی ربات می‌توان پاسخ مورد نظر دلخواه را به دست آورد که تعقیب بر روی مسیر فرمان داده شده با دقت هر چه تمام صورت پذیرد که در بخش شبیه سازی این مطلب بیشتر بحث خواهد شد و نتایج دینامیک مستقیم (مقایسه فضای مفصل واقعی با فضای مفصل فرمان داده شده) نشان داده خواهند شد.



شکل۶: نتایج سینماتیک مستقیم برای سرعت (الف: سرعت در راستای x، ب: سرعت در راستای y و ج: سرعت زاویه‌ای)

Fig. 6. The result of forward speed kinematics (The velocity along X direction, B. The velocity along Y direction, C. Angular velocity along Z direction)



الف

ب

شکل ۷: نمودار مقایسه بین دینامیک معکوس و اماس‌سی–آدامز برای نتایج سینتیکی (الف: گشتاور موتور۱، ب: گشتاور موتور۲

Fig. 7. The comparison between inverse dynamics and MSC-Adams result for kinetics investigation(A. Motor 1 torque, B. Motor 2 torque)

۵- شبیه سازی و صحه سنجی

به منظور انجام صحه سنجی و حصول اطمینان از صحت مدلسازی‌های صورت گرفته برای ربات طراحی شده دو سری شبیه سازی عددی صورت گرفته که اولی در محیط متلب–سیمولینک صورت پذیرفته است که در آن با شبیه سازی سینماتیک مستقیم و معکوس و هم چنین سینتیک مستقیم و معکوس و مقایسه‌ی نتایج مرحله‌ی اول، صحه سنجی صورت پذیرفته است. در مرحله‌ی دوم نتایج حاصله با نتاج نرم افزار اماس‌سی–آدامز مقایسه شده است.

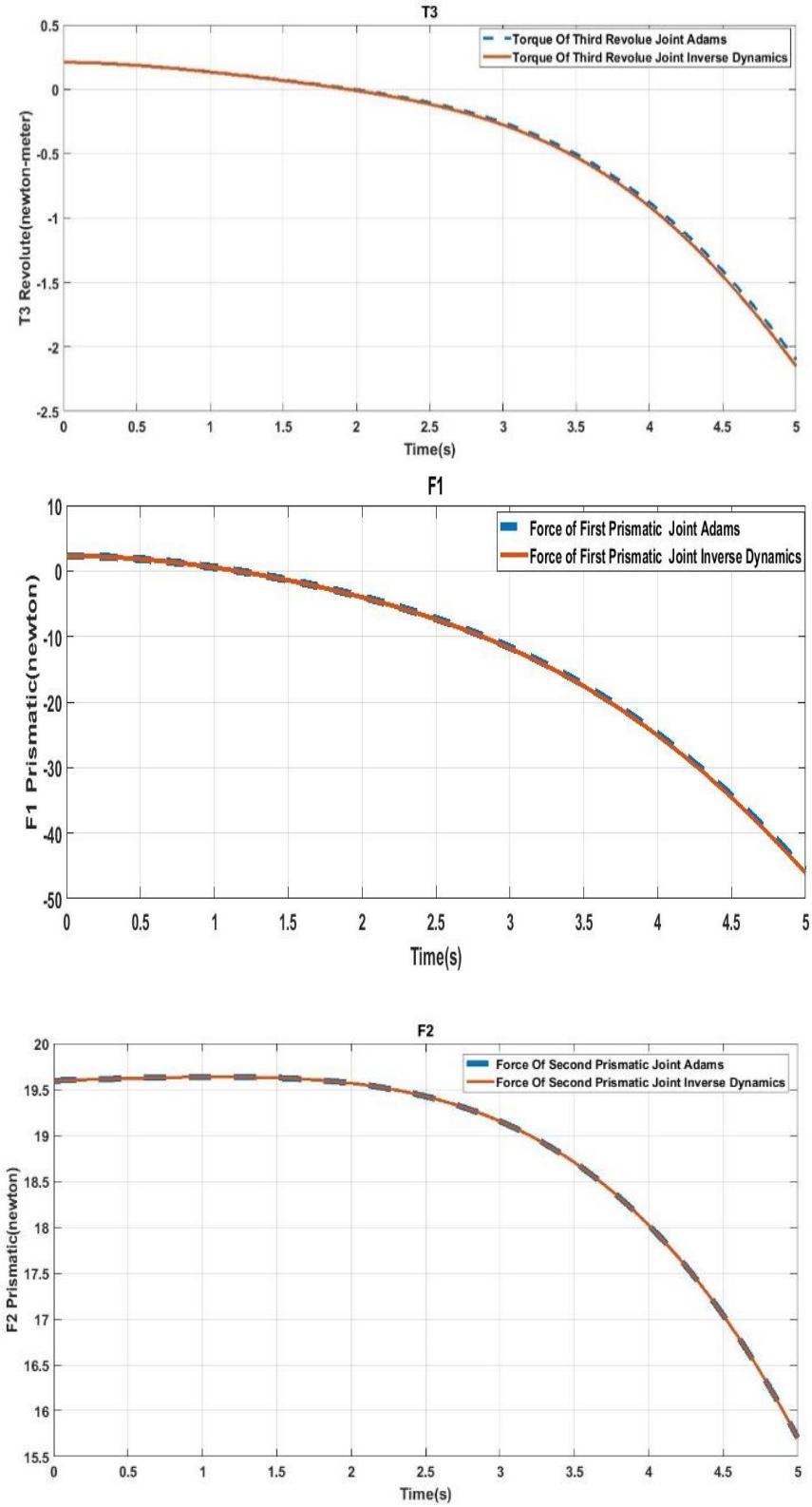
چارت مباحث قابل بحث مربوط به سینماتیک و سینتیک در بلوک دیاگرام شکل ۴ برای روشن سازی مسائل نشان داده شده است.

ربات با مشخصات سینماتیکی و سینتیکی درجدول ۱، شبیه سازی شده است و همانطور که قبلا ذکر شد ربات در مد تعمیراتی عمل کرده وحرکت صفحه‌ای دارد:

۵- ۱- سینماتیک

در این قسمت با دادن مسیری مشخص برای پنج درجه آزادی فضای مفاصل به صورت تابعی از زمان می‌توان موقعیت سرعتی نقطه انتهایی بازوی آزاد را در قضای کاری برای ۵ ثانیه اول حرکت به دست آورد. شرایط اولیه و تابع ورودی زمانی فضای مفاصل به صورت روابط (۲۱) و (۲۲) نمایش داده شده است. رابطه (۲۲) موقعیت فرمان داده شده را بر حسب تابعی از زمان برای پنج ثانیه حرکت برای تمامی مفاصل را نشان می‌دهد:

$$\begin{aligned}&\theta_1(0)=1.0472(\text{rad});\theta_2(0)=1.0472(\text{rad});d_2(0)=0(\text{m})\\&\theta_3(0)=1.5708(\text{rad});d_3(0)=0(\text{m});Le=0.4(\text{m});g=9.81(\text{m/s}^2)\downarrow\end{aligned}\quad(۲۱)$$



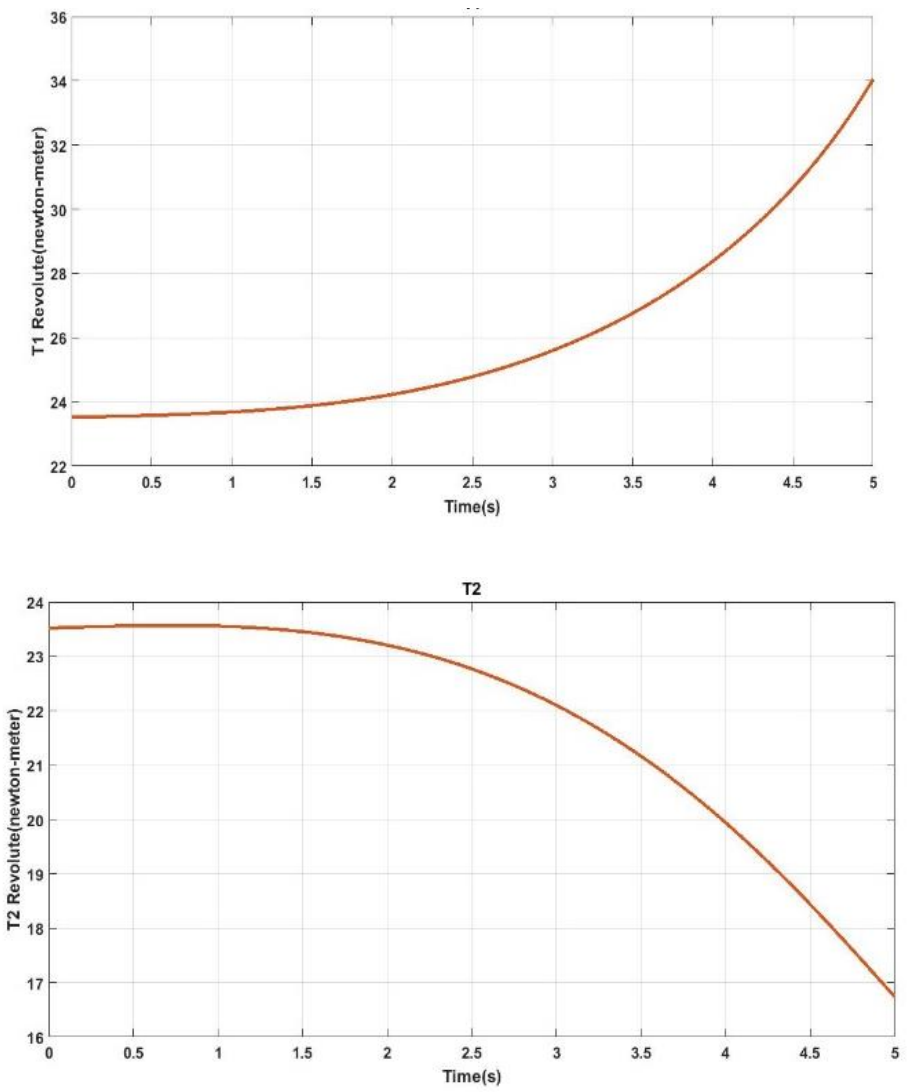
ج

د

ه

ادامه شکل ۷: نمودار مقایسه بین دینامیک معکوس و ام‌اس‌سی-آدامز برای نتایج سینتیکی . ج: گشتاور موتور۳، د:نیروی جک۱ ، ه: نیروی جک۲)

Fig. 7. The comparison between inverse dynamics and MSC-Adams result investigation (C. Motor 3 torque, D. Jack 1 linear force, E. Jack 2 linear force)



الف

ب

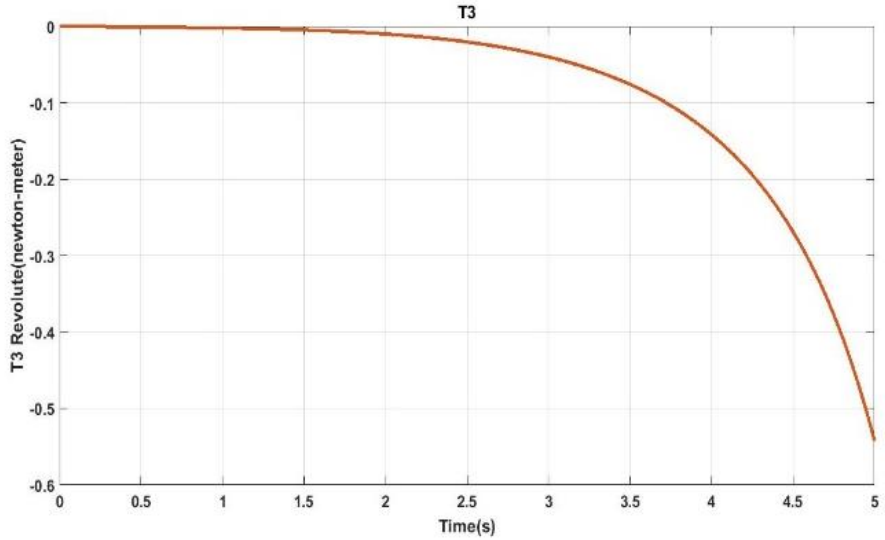
شکل ۸: نمودار سینتیکی حاصله از دینامیک معکوس برای حرکت منوپلاتور در راستای افق (الف: گشتاور موتور۱، ب: گشتاور موتور۲

Fig. 8. The kinetics results from horizontal motion of manipulator (A. Motor 1 torque, B. Motor 2 torque)

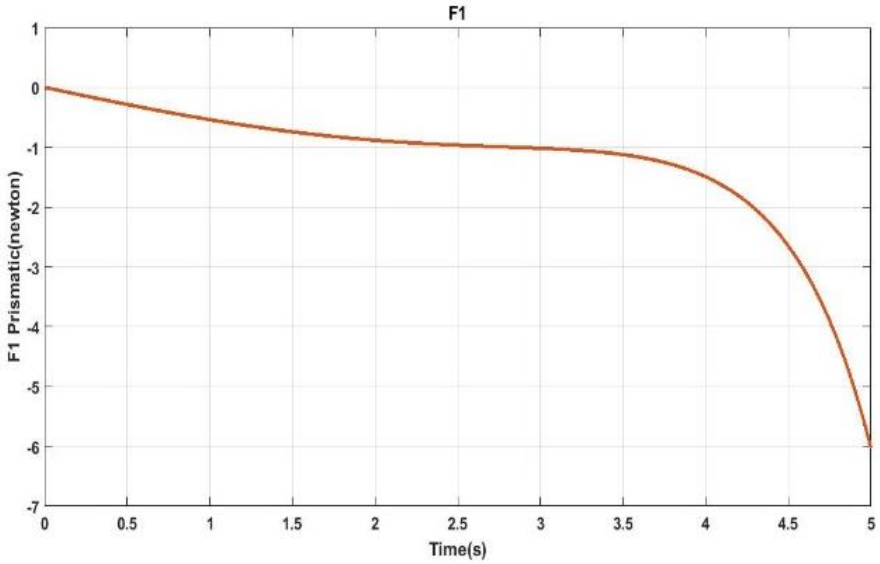
$$\begin{aligned} \theta_1 &= 0.004t^2 + \theta_1(0)(\mathrm{rad}) \\ \theta_2 &= -0.01t^2 + \theta_2(0)(\mathrm{rad}) \\ d_2 &= 0.0004t^2 + \mathrm{d}_2(0)(\mathrm{m}) \\ \theta_3 &= 0.02t^2 + \theta_3(0)(\mathrm{rad}) \\ d_3 &= -0.1\sin(0.625\,\mathrm{t}) + \mathrm{d}_3(0)(\mathrm{m}) \end{aligned} \tag{۲۲}$$

برای انجام مقایسه نتایج سینماتیک مستقیم با نرم افزار اماس‌سی-آدامز، ربات طراحی شده در این نرم افزار، بر اساس جدول ۱ مدلسازی شده است که در شکل ۵ نشان داده شده است. تمامی مفاصل بر حسب وظایف آن که به صورت دورانی یا خطی می‌باشند به عنوان رابط بین اجزا ربات به کار رفته است و اصطحکاک مفاصل نیز ناچیز فرض شده است و شبیه سازی برای پنج ثانیه حرکت در معرض جاذبه گرانش صورت می‌پذیرد. برای انجام این مدلسازی در نرم افزار اماس‌سی-آدامز برای مد تعمیراتی که دو پنجه که ثابت هستند به شکل مفصل دورانی ساده در قسمت گرفته شده میله توسط پنجه، مدلسازی شده است (فرض قفل بودن پنجه‌ها بر روی میله و مدل سازی آن به صورت مفصل ساده دورانی). با تعریف حرکت برای مفاصل اصلی ربات، به صورت توابع ریاضیاتی که در رابطه (۲۲) نمایش داده شده، در نرم افزار اماس‌سی-آدامز شبیه سازی حرکتی را به دست می‌آوریم. در قسمت نتایج اماس‌سی-آدامز می‌توانیم اطلاعات شبیه سازی را به دست آوریم. نتایجی از جمله مقدار حرکت در فضای دکارتی نقطه انتهایی مانوپلاتور با انتخاب مارکر[1] مربوط به آن و یا حتی نیروها و گشتاورهای مفاصل اصلی را که حرکت بر حسب رابطه مشخص برای آن

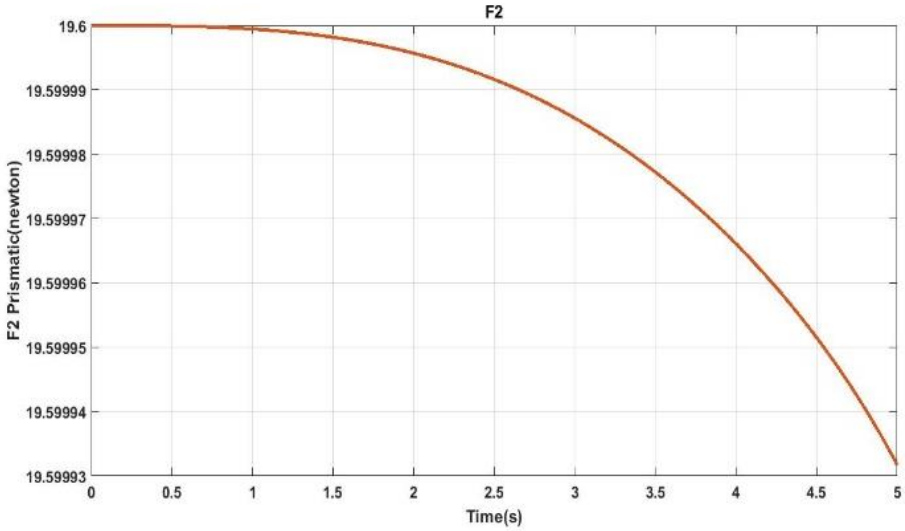
1 Marker



ج



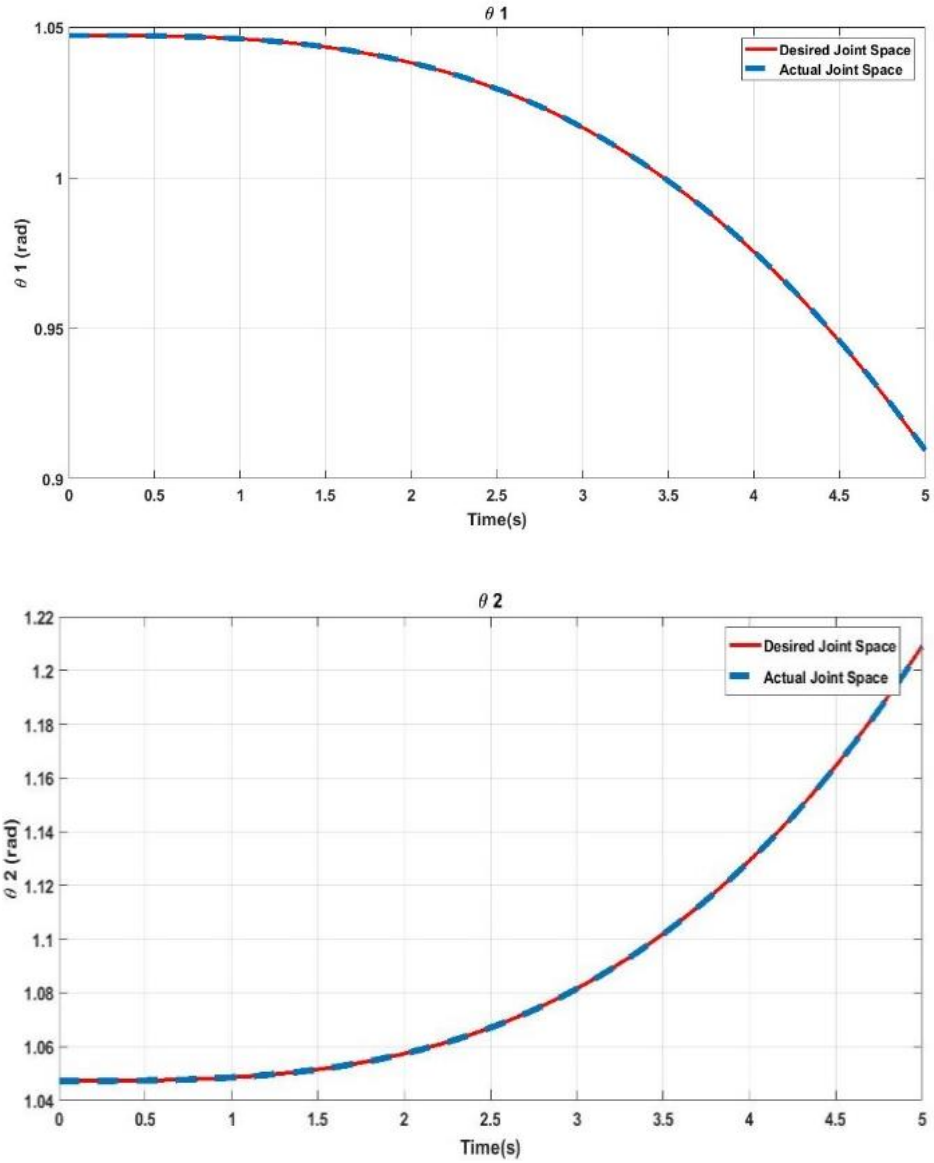
د



ه

ادامه شکل ۸: نمودار سینتیکی حاصله از دینامیک معکوس برای حرکت منوپلاتور در راستای افق ج: گشتاور موتور۳، د:نیروی جک۱ ، ه: نیروی جک۲)

Fig. 8. The kinetics results from horizontal motion of manipulator (C. Motor 3 torque, D. Motor 2 torque, E. Jack 2 linear force)



الف

ب

شکل ۹: نمودار مقایسه تغییرات واقعی و دلخواه سینماتیک بر حسب زمان (الف: تغییر زاویه موتور۱، ب: تغییر زاویه موتور۲

Fig. 9. The comparison between actual result of kinematics and the desired joint space (A. rotation of motor 1,B. rotation of motor 2)

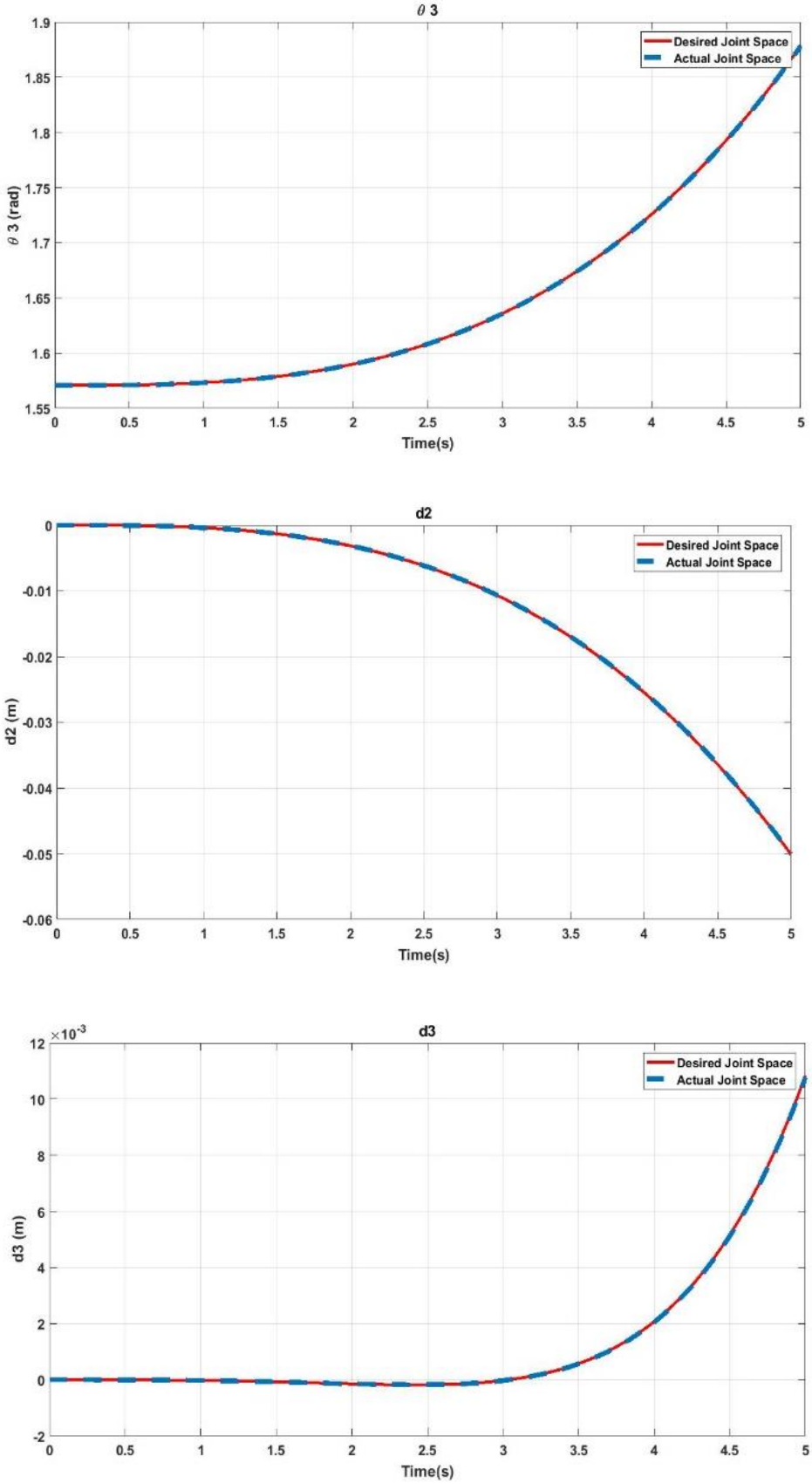
تعریف شده است، نیز می‌توان به دست آورد. در شبیه سازی اماس‌سی-آدامز در قسمتی که قرار است سینماتیک معکوس بررسی شود، نتایج حاصل از سینماتیک معکوس که در شبیه سازی سیمولینک، برای پنج ثانیه حرکت به صورت رشته اعداد با گام‌های کوچک به ازای بازه زمانی ریز شده که معرف موقعیت دورانی و جابجایی هر لحظه برای هر مفصل می‌باشد، در نرم افزار اماس‌سی-آدامز به صورت اسپیلاین[1] در می‌آوریم تا به عنوان تابع حرکت به هر کدام از مفاصل اعمال گردد تا از نتایج آن برای صحه سنجی دینامیکی و سینماتیکی استفاده شود.

مقایسه بین محاسبات دستی سینماتیک مستقیم با جواب بررسی شده در نرم افزار شبیه سازی آدامز برای حرکت فضای مفاصل که به صورت رابطه نشان داده شده است به شکل ۶ می‌باشد که سرعت نهایی مانوپلاتور را در سه راستای افقی عمودی و دورانی نشان می‌دهد:

همانطور که ملاحظه می گردد تطابق خوب و قابل قبولی بین سینماتیک مستقیم به دست آمده از سیمولینک و اماس‌سی-آدامز برقرار است که ماکزیمم خطای آن در حد ۵ درصد مشاهده می‌شود که حاکی از صحت و دقت خوب مدلسازی انجام شده دارد.

از آنجایی که ماتریس ژاکوبین غیر مربعی است برای مقایسه‌ی سینماتیک مستقیم و معکوس نمی‌توان از فضای مفاصل شروع کرد چرا که معکوس آن نیاز به استفاده از معکوس مجازی ماتریس ژاکوبین دارد

1 Spiline



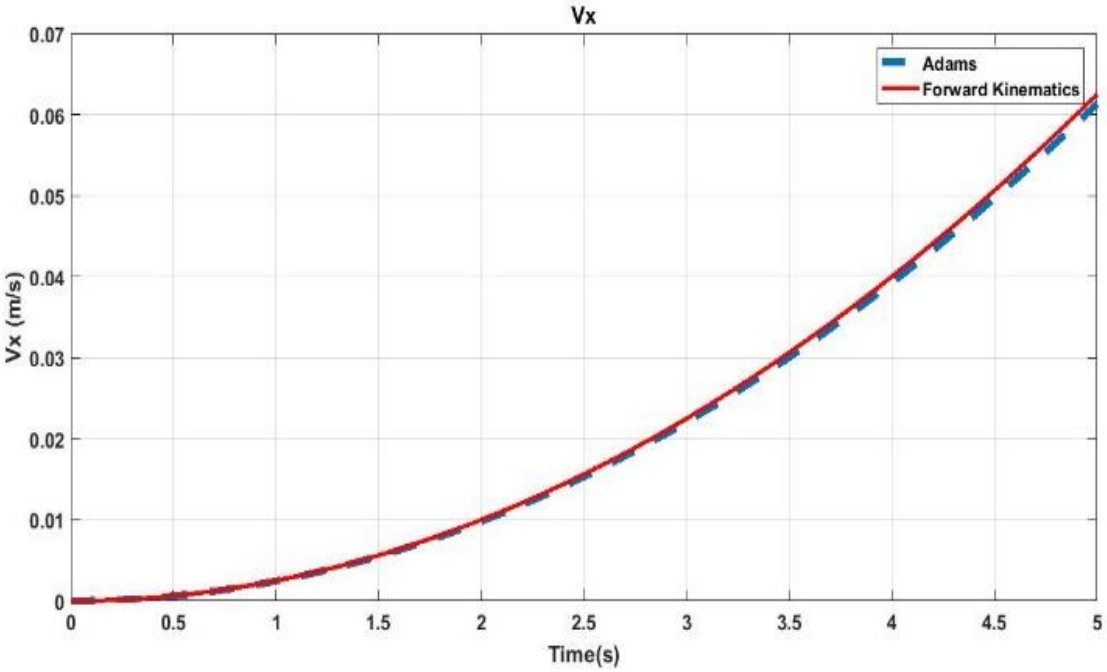
ج

د

ه

ادامه شکل ۹: نمودار مقایسه تغییرات واقعی و دلخواه سینماتیک بر حسب زمان ج: تغییر زاویه موتور۳، د: تغییر طول جک۱ ، ه: تغییر طول جک۲)

Fig. 9. The comparison between actual result of kinematics and the desired joint space (C. rotation of motor 3,D. linear displacement of jack 1, E. linear displacement of jack 2)



شکل ۱۰: مقایسه نتایج سینماتیک مستقیم با نتایج اماس‌سی-آدامز

Fig. 10. The comparison between forward kinematics results and MSC-Adams results

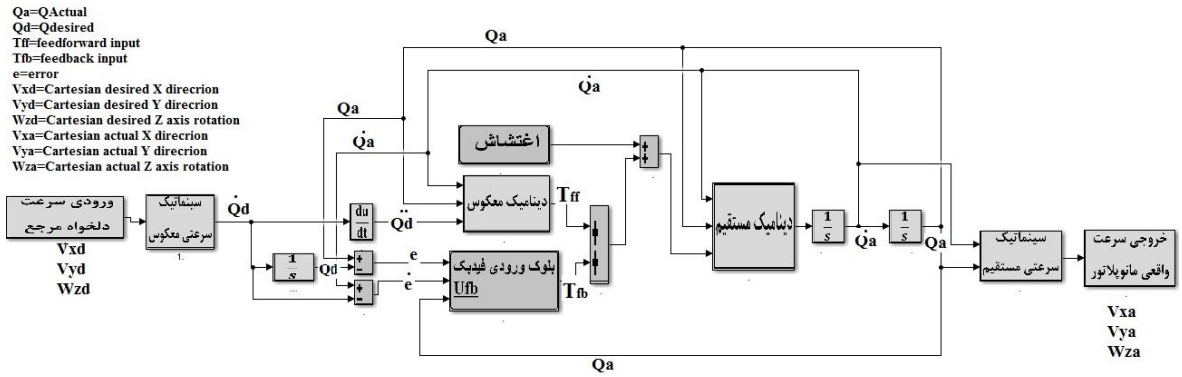
که منجر به جواب واحد نمی‌گردد. در قسمت شبیه سازی دینامیکی، مسیر مانوپلاتور تعریف می‌شود و یکی از جواب‌های فضای مفاصل آن، توسط سینماتیک معکوس بررسی خواهد شد و نتایج به صورت نمودار مقایسه فضای مفاصل حقیقی حاصل از دینامیک مستقیم و فضای دلخواه مفاصل حاصل از سینماتیک معکوس، قابل مشاهده‌اند.

۵- ۲- دینامیک

در محاسبات دینامیک معکوس با توجه به حرکت دلخواه مفاصل که در رابطه (۱۲) تعریف شد، گشتاور مورد نیاز برای هر یک از مفاصل به دست می‌آید. در ادامه نمودار گشتاورها و نیروهای مربوطه به هر یک از مفاصل، بین محاسبات دینامیک معکوس و نتایج شبیه ساز دینامیکی آدامز مقایسه صورت گرفته است که در شکل ۷ نشان داده شده است.

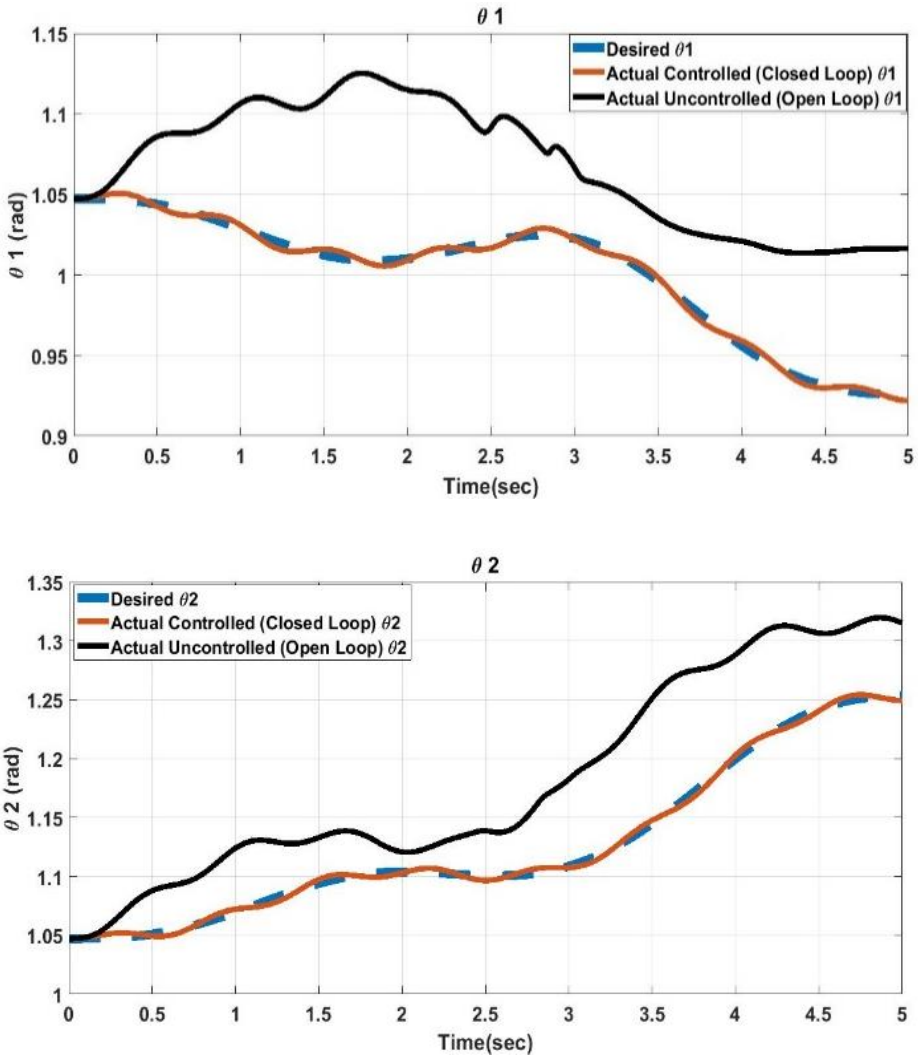
تطابق خوب دو نرم افزار حاکی از صحت مدلسازی سینتیکی ربات است.

همانطور که ملاحظه می‌گردد مرتبه‌ی مقادیر لازم برای ورودی‌ها نسبتا بزرگ می‌باشد که علت آن مربوط به هویت بالاروندگی ربات بازودار است که باید بر گرانش غلبه کند. حال از فضای کاری شروع می‌کنیم و مسیر دلخواه زیر را به صورت رابطه (۲۳) با همان شرایط اولیه رابطه (۲۱)، برای فضای کاری در نظر می‌گیریم که حرکت افقی نقطه انتهایی منوپلاتور مد نظر می‌باشد که به صورت رابطه زیر نمایش داده شده است:



شکل ۱۱: بلوک کنترلی ربات به کمک روش بازخورد خطی سازی شده (حلقه‌های کنترلی درونی و بیرونی)

Fig. 11. The feedback linearization control block diagram (the inner and outer control loops)



الف

ب

شکل ۱۲: پاسخ ربات در حضور اغتشاش و مقایسه آن بین کنترل حلقه باز و حلقه بسته در فضای مفاصل (الف: تغییر زاویه موتور۱، ب: تغییر زاویه موتور۲

Fig. 12. The robot response in existence of disturbance and comparison between open loop control and closed loop control in joint space (A. rotation of motor 1,B. rotation of motor 2)

$$V_x = 0.0025t^2(\text{m/s}); V_y = 0(\text{m/s}); V_z = 0(\text{m/s}) \quad (۲۳)$$

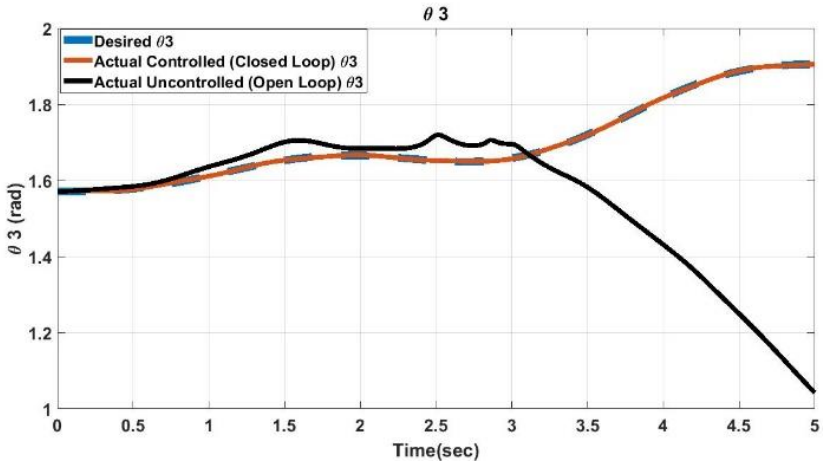
با حل سینماتیک معکوس، فضای مفاصل استخراج می‌گردد که همان فضای مفاصل دلخواه[1] می‌باشند تا در ادامه با نتایج حاصله از فضای مفاصل واقعی[2] حاصل از دینامیک مستقیم، مقایسه شوند. با به دست آوردن فضای مفاصل توسط سینماتیک معکوس از فضای کاری مانوپلاتور، نتایج دینامیک معکوس برای حرکت در راستای افق نقطه انتهایی بازوی آزاد به رابطه (۲۳) به شکل نمودارهای شکل ۸ است.

حال به بررسی دینامیک مستقیم می‌پردازیم تا از صحت محاسباتی دینامیک معکوس مطمئن شویم. برای این کار باید گشتاورها و نیروهایی که از دینامیک معکوس به دست آمده‌اند را به عنوان ورودی به پلانت دینامیکی (دینامیک مستقیم) وارد نماییم تا ببینیم که آیا فضای مفاصل دلخواه (حاصله از سینماتیک معکوس مسیر منوپلاتور دلخواه) به خوبی تعقیب می‌شوند یا خیر. در شکل ۹ مقایسه‌ها برای پنج مفصل (خطی و دورانی) نشان داده شده است. توجه داریم که نتایج سینماتیک معکوس در واقع، فضای مفاصل دلخواه را برای فضای کاری مورد نظر به دست می‌آورد و دینامیک مستقیم فضای مفاصل حقیقی را به ازای ورودی نیروها و گشتاورهای محاسبه شده از دینامیک معکوس را به دست می‌آورد. بنابراین با مقایسه این دو فضای مفصل (دلخواه و واقعی)، می‌توانیم شرحی از صحت محاسبات را عرضه نماییم.

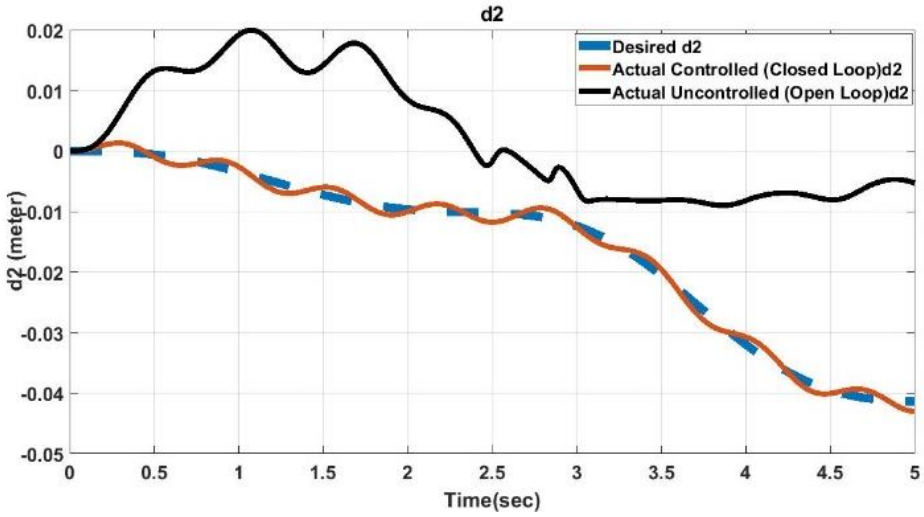
همانطور که در پنج نمودار فوق مشهود است، فضای مفاصل واقعی

1 Desired Joint Space
2 Actual Joint Space

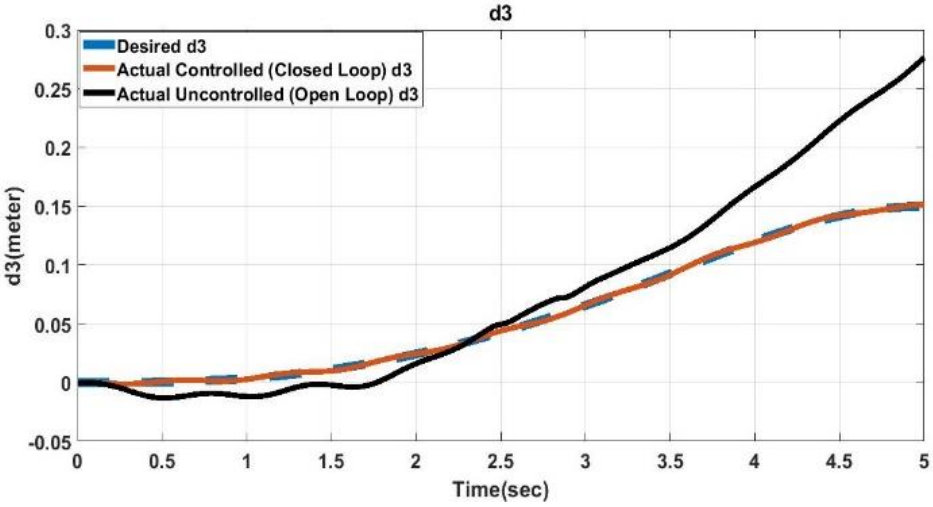
ج



د

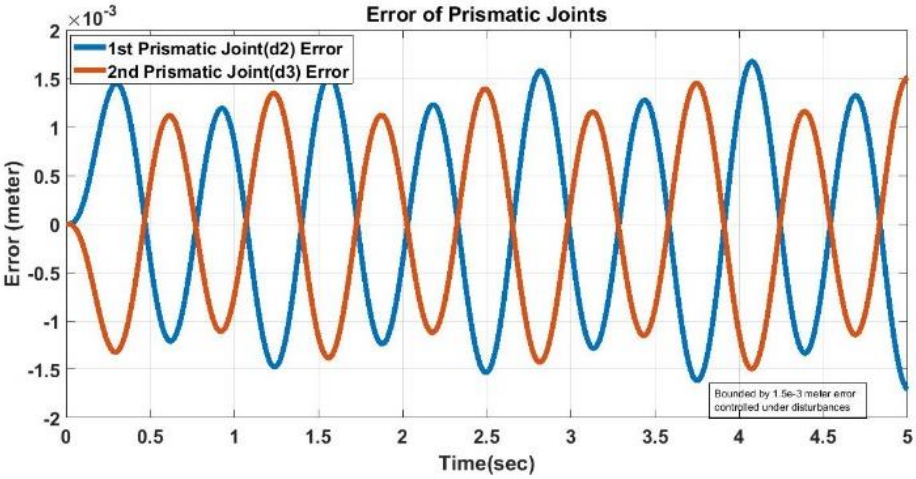


ه

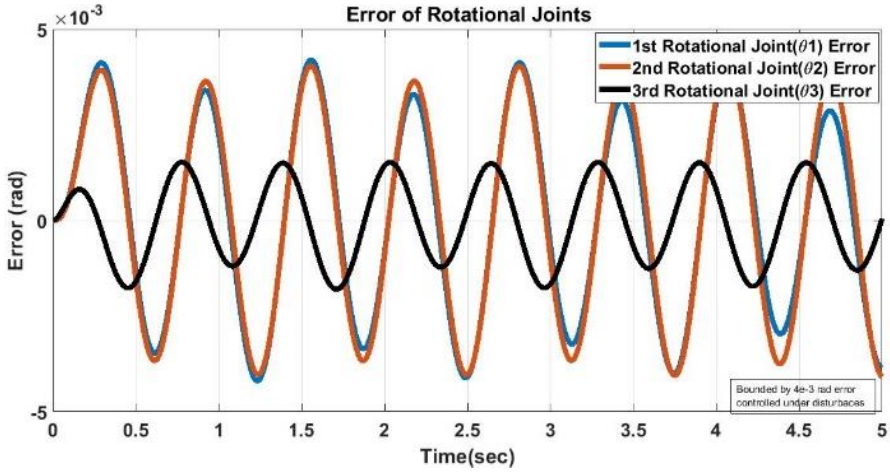


ادامه شکل ۱۲: پاسخ ربات در حضور اغتشاش و مقایسه آن بین کنترل حلقه باز و حلقه بسته در فضای مفاصل ج: تغییر زاویه موتور۳، د: تغییر طول جک۱ ، ه: تغییر طول جک۲)

Fig. 12. The robot response in existence of disturbance and comparison between open loop control and closed loop control in joint space (C. rotation of motor 3,D. linear displacement of jack 1, E. linear displacement of jack 2)



الف



ب

شکل ۱۳: خطای مفاصل در کنترل به روش حلقه بسته (الف: خطای انتقالی جک ها ، ب: خطای دورانی مفاصل)

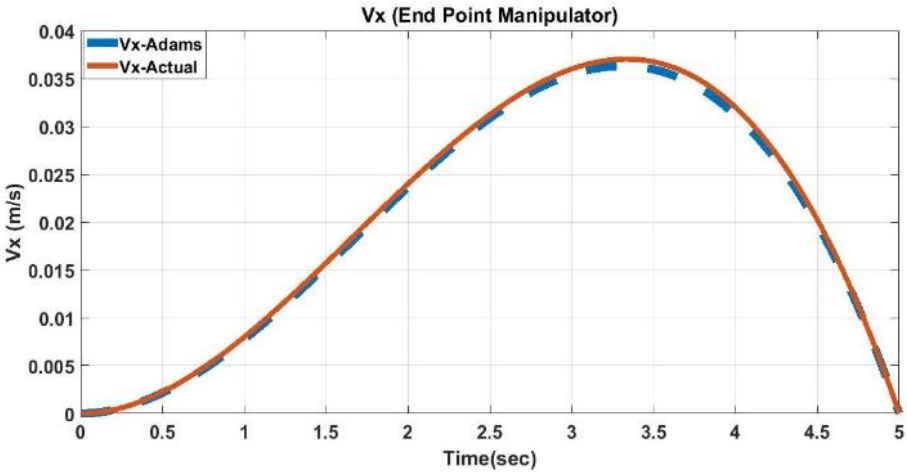
Fig. 13. The control error of closed loop method (A. the errors of linear jacks displacements, B. The errors of motors rotations)

کاملا بر فضای مفاصل دلخواه منطبق است که این مساله صحت کامل محاسبات سینماتیک معکوس و دینامیک معکوس و دینامیک مستقیم را نشان می‌دهد (به شکل ۴ مراجعه کنید).

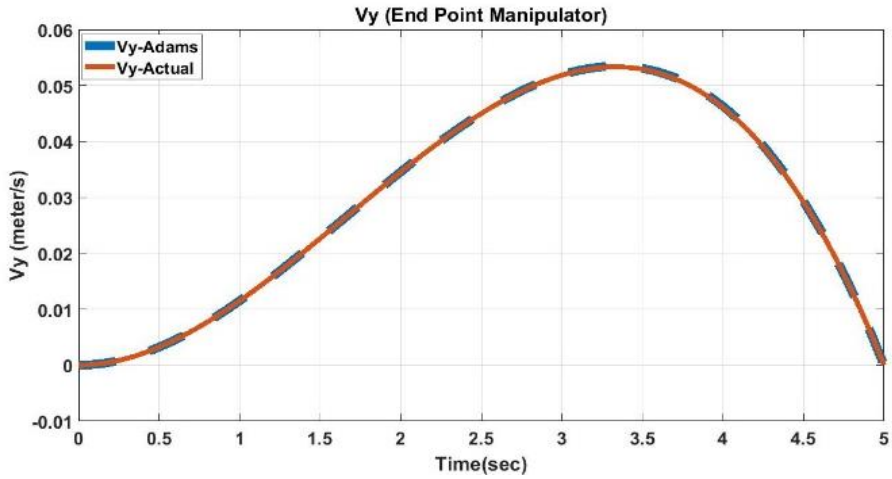
حال همین نتایج را به سینماتیک مستقیم می‌دهیم تا اطمینان حاصل گردد مسیر دلخواه فضای کاری را که به عنوان ورودی به سیستم داده شده است طی می‌کند یا خیر. مقایسه سینماتیک مستقیم و معکوس و مقایسه‌ی آن‌ها با نتیجه‌ی اماس‌سی-آدامز به شکل ۱۰ است.

که تطابق عالی آن‌ها نشان از صحه سنجی قابل قبول سینماتیکی ربات دارد که در واقع نشان می‌دهد که نقطه انتهایی منوپلاتور با اختلاف بسیار اندک مسیر افقی تعریف شده را طی می‌کند. با توجه به چارت شکل ۴ می‌توانیم ادعا نماییم که از اول بلوک دیاگرام طراحی ربات تا انتهای آن، بررسی‌ها به صورت دقیق و بی نقص صورت پذیرفته و محاسبات به طور کامل صحیح می‌باشند و کنترل حلقه باز به صورت دقیق صورت پذیرفته است.

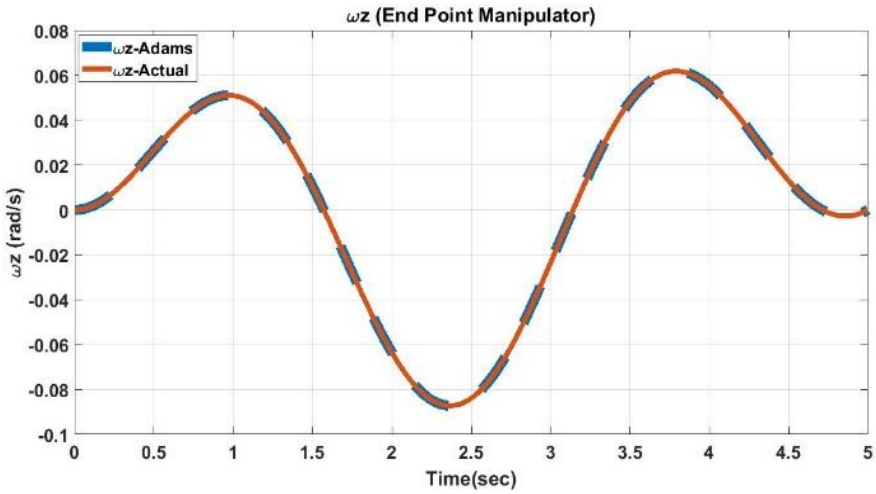
در تمام اشکال فوق میزان نیروهای جک‌ها (F) بر حسب نیوتن و گشتاور موتورها (T)بر حسب نیوتن-متر که درجات آزادی اصلی سیستم را کنترل می‌کنند، برای پنج ثانیه اول حرکت نشان داده شده است. بنابراین توانستیم با روش دینامیک معکوس، ورودی‌های کنترلی برای ربات برای حرکت دلخواه مانوپلاتور را به دست آوریم که نتایج با روش دینامیک مستقیم و نتایج شبیه سازی اماس‌سی-آدامز مقایسه شد تا از صحت محاسبات اطمینان حاصل شود.



الف



ب



ج

شکل ۱۴: مقایسه پاسخ سیستم به کمک کنترل حلقه بسته و آدامز (الف: سرعت در راستای x، ب: سرعت در راستای y و ج: سرعت زاویه ای)

Fig. 14. The comparison between closed loop responses and MSC-Adams responses in work space (A. The velocity along X direction, B. The velocity along Y direction, C. Angular velocity along Z direction)

۵- ۳- کنترل

با توجه به نمودار بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل ۱۱،کنترل یک ربات با روش خطی سازی فیدبک را نمایش می‌دهیم که زیر مجموعه‌های دینامیکی و سینماتیکی نیز در آن به چشم می‌خورد.

برای شبیه سازی دینامیکی و کنترلی، مسیر دلخواه فرمان برای نقطه انتهایی مانوپلاتور در نظر می‌گیریم که این فرمان به صورت فرمان حرکتی در راستای x و y و دوران در راستای محور z برای نقطه انتهایی منوپلاتور می‌باشد. معادلات فرمان حرکتی به صورت رابطه (۲۴) است که سناریوی حرکتی مورد نظر برای ربات در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned} V_x &= -0.002t^3 + 0.01t^2 (\text{m/s}) \\ V_y &= -0.00288t^3 + 0.0144t^2 (\text{m/s}) \\ \dot{\phi}_z &= -0.014t^2.\sin(2t) + 0.07t.\sin(2t)(\text{rad/s}) \end{aligned} \quad (۲۴)$$

در رابطه (۳۱) Vx سرعت مانوپلاتور در راستای افق ، Vy سرعت مانوپلاتور در راستای عمودی و سرعت منوپلاتور در جهت دوران در راستای محور عمود بر صفحه می‌باشد که به صورت توابعی بر حسب زمان نشان داده شده‌اند.

ابتدا با روش سینماتیک معکوس فضای مفاصل را به دست می‌آوریم که این کار با استفاده از روابط وارون مجازی ماتریس ژاکوبین امکان پذیر است که در معادله رابطه (۱۰) به آن پرداخته شده است.

فضای مفاصلی که از سینماتیک معکوس حاصل می‌شوند در واقع همان فضای مفاصل دلخواه یا فرمان داده شده هستند (کنترل در مضای مفاصل صورت می‌پذیرد لذا از فضای دکارتی به فضای مفاصل تبدیل با روش سینماتیک معکوس صورت پذیرفته است).

در سه مرحله نمودارهای فضای مفاصل در شکل‌های زیر نشان داده شده است. فضای مفاصل فرمان داده شده و دلخواه که از سینماتیک معکوس فضای دکارتی فرمان داده شده به دست آمده‌اند، نمودار فضای مفاصل حقیقی در معرض اغتشاش بیرونی که نتیجه دینامیک مستقیم هستند که در آن‌ها با روش حلقه باز ورودی کنترلی مشخص شده و نمودار فضای حقیقی مفاصل منتج از دینامیک مستقیم در معرض اغتشاشات بیرونی که ورودی کنترلی از روش خطی سازی فیدبک (جمع جمله ورودی حلقه باز و حلقه بسته) به دست آمده که برای هر یک از مفاصل با یک دیگر مقایسه شده‌اند.

مقدار اغتشاشی که به سیستم وارد می‌شود به صورت هارمونیک در نظر گرفته شده است که برای هر مفصل به صورت زیر است.

$$\begin{aligned} \tau_{dis1} &= 3\sin(10\,t)(\text{Newton.meter}) \\ \tau_{dis2} &= 3\sin(10\,t)(\text{Newton.meter}) \\ f_{dis1} &= 1.5\sin(5\,t)(\text{Newton}) \\ \tau_{dis3} &= 0.5\sin(10\,t+\frac{\pi}{2})(\text{Newton.meter}) \\ f_{dis2} &= 0.1\sin(10\,t)(\text{Newton}) \end{aligned} \quad (۲۵)$$

همان طور که در رابطه (۲۵) مشخص است مقادیر اغتشاش به صورت گشتاور و نیرو به صورت توابع متناوب با فرکانس خاص به سیستم وارد می‌شوند که مقادیر به اندازه‌ای انتخاب شده‌اند تا سیستم ناپایدار نشود و بتوان اثرات آن را در کنترل حلقه باز و حلقه بسته برای مقایسه نشان داد. ($\tau_{dis۱}$, $\tau_{dis۲}$, $f_{dis۱}$ $\tau_{dis۳}$, $f_{dis۲}$) به ترتیب اغتشاشات وارد آمده به مفاصل دورانی و خطی ربات هستند که به صورت تابع هارمونیک تعریف شده‌اند (سیستم در برابر اغتشاشات قویتر برای دامنه بزرگتر نیز مقاوم می‌باشد فقط برای نمایش مقایسه حلقه باز در معرض اغتشاشات به گونه‌ای که سیستم ربات تکین نشود، این مقادیر اغتشاش برای بررسی صحت کنترل انتخاب شده‌اند).

برای قسمت فیدبک ورودی مقادیر بهره‌های تناسبی و مشتقی برای زمان نشست با معیار ۲ درصد t_s=۰/۵ انتخاب شده‌اند و نیز مقدار نسبت میرایی ζ= ۰,۷ مناسب برای کمینه کردن ماکزیمم فراجهش انتخاب شده است.

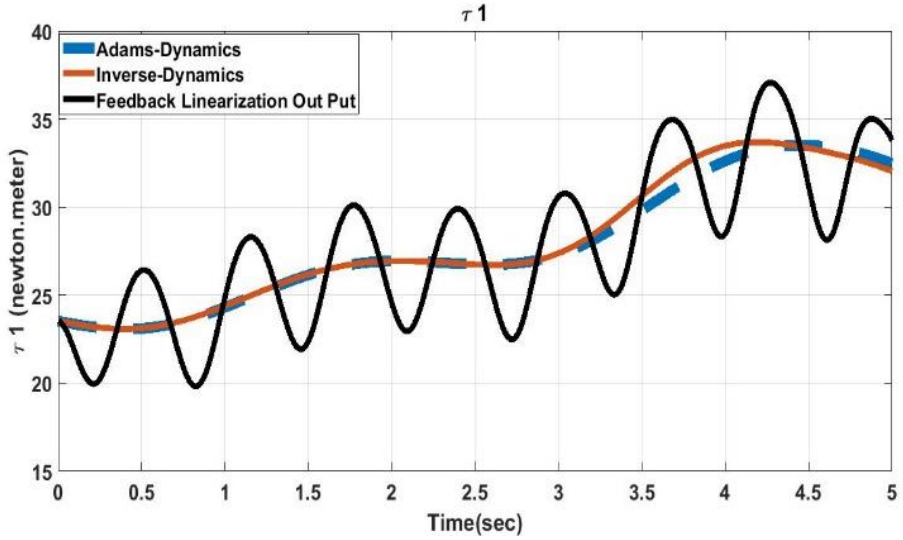
رابطه‌ی زمان نشست به صورت رابطه (۲۶) تعریف می‌شود.

$$t_s = \frac{4}{\varsigma\omega_n} \rightarrow 2\%error \quad (۲۶)$$

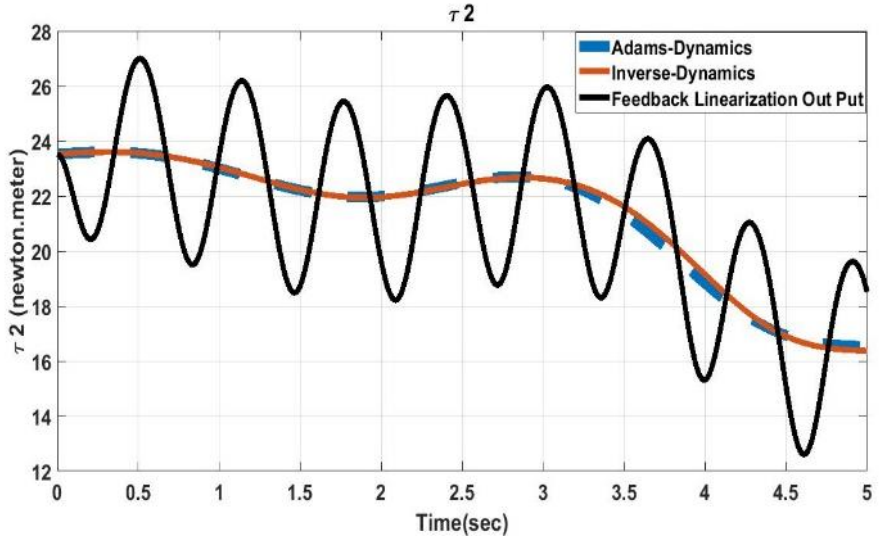
لذا با انتخاب زمان نشست مشخص می‌توان مقادیر ضرایب تناسبی و مشتقی را برای قسمت فیدبک ورودی به شکل رابطه (۲۷) دست آورد.

$$\begin{aligned} K_p &= \omega_n^2 \\ K_v &= 2\varsigma\omega_n \end{aligned} \quad (۲۷)$$

با توجه به موارد فوق و با در نظر گرفتن زمان نشست ۰/۵ ثانیه ماتریس قطری بهره‌های تناسبی و مشتقی به صورت رابطه (۲۸) به دست می‌آید که برای تمام مفاصل این بهره‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که پایداری این مقادیر برای سیستم با توجه به مقادیر ویژه منفی تضمین شده می‌باشد که پیش‌تر درباره آن صحبت شد. این ضرایب به



الف



ب

شکل ۱۵: مقایسه ورودی لازم برای کنترل ربات بین سیستم حلقه باز، حلقه بسته و آدامز (الف: گشتاور موتور۱، ب: گشتاور موتور۲ ج: گشتاور موتور۳، د: نیروی جک۱ ، ه: نیروی جک۲)

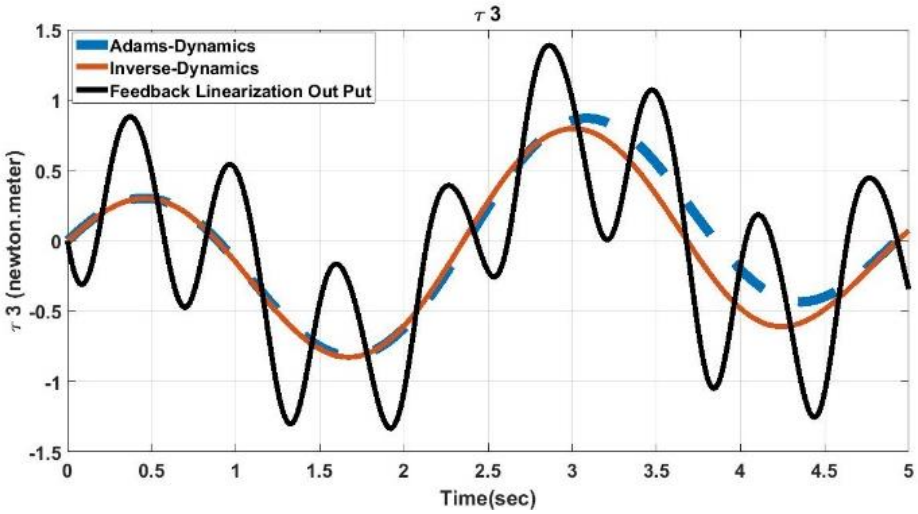
Fig. 15. The comparison between open loop control inputs and closed loop control inputs(A. Motor 1 torque, B. Motor 2 torque)

گونه‌ای طراحی شده‌اند تا فرکانس‌های دینامیک‌های مدل نشده‌ی فرکانس بالا را تحریک نکنند.

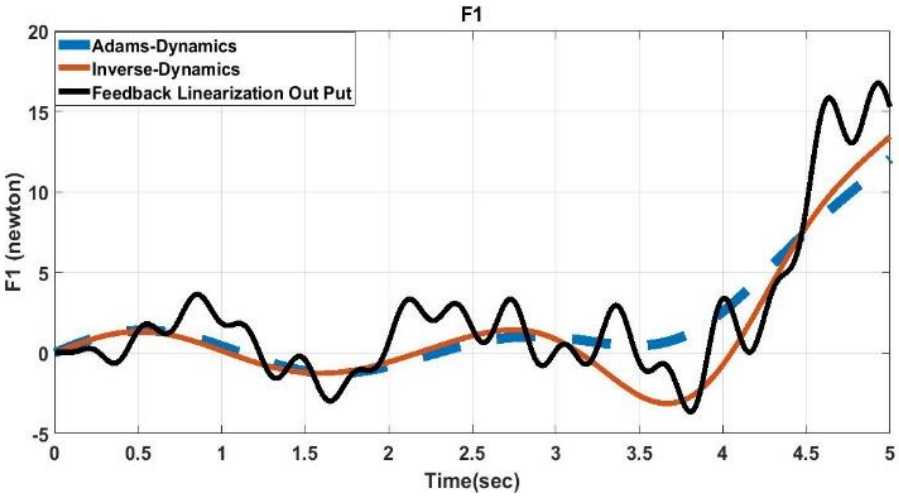
$$K_p = \begin{bmatrix} 130.6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 130.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 130.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 130.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 130.6 \end{bmatrix}$$
$$K_v = \begin{bmatrix} 16 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 16 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 16 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 16 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 16 \end{bmatrix} \quad (۲۸)$$

همانطور که از نمودارهای زیر در شکل ۱۲ برمی‌آید، در اثر وجود یک اغتشاش جزئی و هر چقدر اندک مسیر فضای مفاصل حقیقی که از دینامیک مستقیم حاصل می‌شوند برای حالت ورودی کنترل حلقه باز به شدت از مسیر تعقیب منحرف می‌شوند و حرکات نامنظمی را شکل می‌دهند. ولی در حالت ورودی فیدبک، اغتشاشات نمی‌توانند مسیر تعقیب را منحرف کنند و مسیر فرمان داده شده با دقت تعقیب و دنبال می‌شود که این نشان دهنده عملکرد خوب کنترلر است.

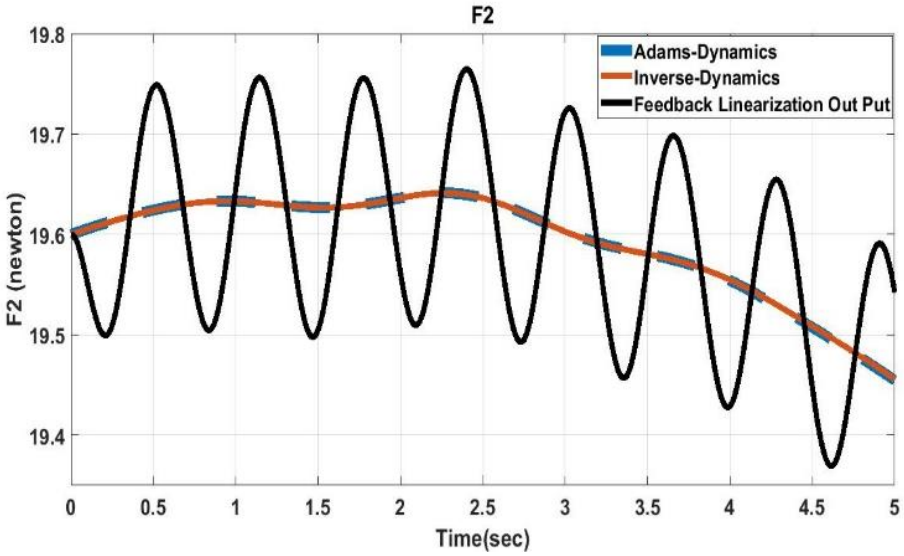
در ادامه دو نمودار مربوط به خطاهای تعقیب را برای حالت کنترل شده با روش خطی سازی فیدبک در شکل ۱۳ مشاهده می‌کنیم که مربوط به



ج



د



ه

ادامه شکل ۱۵: مقایسه ورودی لازم برای کنترل ربات بین سیستم حلقه باز، حلقه بسته و آدامز (ج: گشتاور موتور۳، د: نیروی جک۱ ، ه: نیروی جک۲)

Fig. 15. The comparison between open loop control inputs and closed loop control inputs (C. Motor 3 torque, D. Jack 1 linear force, E. Jack 2 linear force)

مفاصل دورانی و مفاصل خطی می‌باشند.

همانطورکه مشاهده می‌شود میزان خطای ماکزیمم برای مفاصل دورانی حدود ۰/۰۰۴ رادیان است (۰/۴ درصد خطا) و برای مفاصل خطی حدود ۱/۵ میلی متر (یک درصد خطا) است که در کل دقت خوبی با درصد خطای پایینی را نشان می‌دهد.

در نهایت با استفاده از سینماتیک مستقیم، فضای مفاصل به دست آمده از دینامیک مستقیم حاصل از ورودی کنترلی همراه با فیدبک را با نتایج سینماتیک مستقیم در نرم افزار شبیه ساز اماس‌سی-آدامز مقایسه می‌کنیم تا از صحت محاسبات دینامیکی و سینماتیکی اطمینان حاصل نماییم.

همانطورکه از تطابق عالی نمودارهای حاصل از سینماتیک مستقیم بین محاسبات سیمولینک و شبیه‌ساز دینامیکی اماس‌سی-آدامز در شکل ۱۴ مشخص می‌شود، محاسبات سینماتیک و دینامیک به درستی انجام شده است و مساله تعقیب در حضور اغتشاشات به خوبی صورت پذیرفته است.

در ادامه مقدار ورودی‌های گشتاورها و نیروهای حاصله از ورودی کنترلی حلقه بسته با قاعده خطی سازی فیدبک[1] که حاصل جمع قسمت حلقه باز و حلقه بسته سیستم در معرض اغتشاش می‌باشد به همراه گشتاورها و نیروهای حاصله از محاسبه دینامیک معکوس (ورودی کنترلی حلقه باز) که در دینامیک بررسی شد به همراه نتایج حاصله از نیروها و گشتاورها در شبیه‌ساز دینامیکی اماس‌سی-آدامز در شکل ۱۵ به صورت مقایسه‌ای نشان داده شده است.

همانطور که از نمودارها برمی‌آید نتایج حاصله از دینامیک معکوس به خوبی با نتایج دینامیکی در شبیه ساز دینامیکی اماس‌سی-آدامز در سناریو معرفی شده در بخش سینماتیک در رابطه (۲۴)، تطابق دارد که این مساله بیانگر دقت و صحت محاسبات در معادلات دینامیک می‌باشد.

نمودار دیگر که در شکل ۱۵ به صورت نوسانی ظاهر شده است نمودار ورودی‌های کنترلی حاصل از جمع قسمت حلقه باز و حلقه بسته به صورت گشتاور و نیرو می‌باشند که برای جبران کردن اثر اغتشاش هارمونیکی به صورت نوسانی در آمده‌اند تا مسیر دلخواه به درستی تعقیب شود که پیش‌تر مطرح شد (به ازای تغییر در مقادیر اغتشاش سیستم حلقه بسته با در نظر گرفتن خطاهای لحظه‌ای ورودی مورد نیاز برای تعقیب را تولید می‌نماید).

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک ربات بالارونده صفحه‌ای جدید از نوع پنجه‌ای طراحی و معرفی شد که برای انجام عملیات حرکتی و تعمیراتی در داربست‌ها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. این ربات از نوع ربات‌های هیبریدی یا ترکیب ربات موازی و سری است که دارای دو مد حرکتی و تعمیراتی می‌باشد. در این مقاله مد تعمیراتی ربات در نظر گرفته شده است و با توجه به سه درجه آزادی در فضای کاری و پنج درجه آزادی در فضای مفاصل مدلسازی سینماتیکی و سینتیکی ربات انجام گرفت و برای آن کنترلر بازخورد خطی سازی شده طراحی گردید. در بخش سینماتیکی، سینماتیک موقعیتی و سرعتی ربات به شکل مستقیم و معکوس استخراج گردید و دیدیم که با توجه به مربعی نبودن ماتریس ژاکوبین برای محاسبات معکوس نیاز به معکوس مجازی می‌باشد. لذا فضای مفاصل در بخش سینماتیک معکوس به شکل بهینه استخراج گردید. در بخش سینتیک نیز دینامیک معکوس ربات به کمک روش لاگرانژ استخراج گردید که دیدیم می‌تواند منجر به طراحی کنترلر برای ربات به کمک روش گشتاورهای محاسبه شده گردد که برای فاز بالارونده‌گی مناسب است. همچنین دینامیک مستقیم نیز به عنوان مدل دینامیکی ربات برای استفاده در صحه سنجی کنترلر طراحی شده به شکل دسته‌ای از معادلات دیفرانسیلی جفت شده استخراج و حل گردید. نهایا برای آماده‌سازی ربات برای مقابله با اغتشاشات در حین انجام عملیات تعمیراتی و مقاوم سازی آن، کنترلر حلقه بسته بر اساس الگوریتم بازخورد خطی سازی شده برای ربات طراحی گردید. ربات طراحی شده و صحت مدلسازی‌ها و کنترل‌های صورت گرفته به دو روش مورد صحه سنجی قرار گرفت. در روش اول دیدیم که خروجی دینامیک مستقیم و معکوس که در محیط متلب شبیه سازی شده مشابه می‌باشد و با تقریب نزدیک به ۱۰۰ درصد تطابق خوبی بین مسیر مستقیم و معکوس وجود دارد که نشان دهنده‌ی مدلسازی صحیح ربات است. در روش دوم صحه سنجی ربات طراحی شده در محیط اماس‌سی-آدامز مدل شد و هم خروجی‌های سینماتیکی آن و هم خروجی‌های سینتیکی آن با نتایج متلب همخوانی داشته و در سینماتیک ماکزیمم خطا در حدود۱۰درصد و در دینامیک حدود ۰/۱ درصد می‌باشد که دقت بالای مدلسازی و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همچنین در قسمت طراحی کنترلر

1 Uff+Ufb

با انجام شبیه سازی‌های مقایسه‌ای اثبات گردید که عملکرد ربات در فاز تعمیراتی بدون کنترلر حلقه بسته‌ی طراحی شده در حدود ۰/۴۰ خطا دارد در حالی که این خطا در سیستم حلقه بسته به کمک افزایش مناسب ورودی ها به ۰/۰۴ کاهش یافت. همچنین تطابق خوب نتایج این بخش با نتایج نرم افزار آدامز صحه سنجی سیستم و کنترلر طراحی شده را تقویت کرد. لذا نتیجه می‌گیریم که ربات طراحی شده به کمک مدلسازی‌های ارائه شده و کنترلر طراحی شده برای آن توانایی برآورد خواسته‌های ما برای بالا رفتن از داربست‌ها و انجام تعمیرات را دارا می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله برخود لازم می‌دانند تا بدین وسیله از صندوق حمایت از پژوهشگران و فن آوران کشور بابت حمایت‌های علمی و مالی در راستای تحقیقات مربوط به این مقاله تشکر و قدردانی کنند.

منابع

[1] C. Balaguer, J. Pastor, A. Giménez, V. Padrón, M. Abderrahim, ROMA: Multifunctional autonomous self-supported climbing robot for inspection applications, IFAC Proceedings Volumes, 31(3) (1998) 563-568.

[2] R. Aracil, R. Saltarén, O. Reinoso, Parallel robots for autonomous climbing along tubular structures, Robotics and Autonomous Systems, 42(2) (2003) 125-134.

[3] J.-C. Fauroux, J. Morillon, Design of a climbing robot for cylindro-conic poles based on rolling self-locking, Industrial Robot: An International Journal, 37(3) (2010) 287-292.

[4] Y. Guan, L. Jiang, H. Zhu, W. Wu, X. Zhou, H. Zhang, X. Zhang, Climbot: A Bio-Inspired Modular Biped Climbing Robot—System Development, Climbing Gaits, and Experiments, Journal of Mechanisms and Robotics, 8(2) (2016) 021026.

[5] M. Tavakoli, M.R. Zakerzadeh, G. Vossoughi, S. Bagheri, A hybrid pole climbing and manipulating robot with minimum DOFs for construction and service applications, Industrial Robot: An International Journal, 32(2) (2005) 171-178.

[6] M. Tavakoli, L. Marques, 3DCLIMBER: Climbing and manipulation over 3D structures, Mechatronics, 21(1) (2011) 48-62.

[7] E. Noohi, S.S. Mahdavi, A. Baghani, M.N. Ahmadabadi, Wheel-based climbing robot: Modeling and control, Advanced Robotics, 24(8-9) (2010) 1313-1343.

[8] T.L. Lam, Y. Xu, A flexible tree climbing robot: Treebot-design and implementation, in: Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on, IEEE, 2011, pp. 5849-5854.

[9] Y. Yoon, D. Rus, Shady3d: A robot that climbs 3d trusses, in: Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on, IEEE, 2007, pp. 4071-4076.

[10] S. Dubowsky, C. Sunada, C. Mavroidis, Coordinated motion and force control of multi-limbed robotic systems, Autonomous Robots, 6(1) (1999) 7-20.

[11] C. Mavroidis, A simplified cartesian-computed torque controller for highly geared systems and its application to an experimental climbing robot, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 122(1) (2000) 27.

[12] J. Luo, Y. Zhang, K. Hauser, H.A. Park, M. Paldhe, C.G. Lee, M. Grey, M. Stilman, J.H. Oh, J. Lee, Robust ladder-climbing with a humanoid robot with application to the darpa robotics challenge, in: Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on, IEEE, 2014, pp. 2792-2798.

[13] S. Fujii, K. Inoue, T. Takubo, Y. Mae, T. Arai, Ladder climbing control for limb mechanism robot "ASTERISK", in: Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on, IEEE, 2008, pp. 3052-3057.

[14] G.C. Haynes, A. Khripin, G. Lynch, J. Amory, A. Saunders, A.A. Rizzi, D.E. Koditschek, Rapid pole climbing with a quadrupedal robot, in: Robotics and Automation, 2009.

ICRA'09. IEEE International Conference on, IEEE, 2009, pp. 2767-2772.

[15] C. Balaguer, A. Gimenez, A. Jardón, Climbing robots' mobility for inspection and maintenance of 3D complex environments, Autonomous Robots, 18(2) (2005) 157-169.

[16] H. Zhu, Y. Guan, W. Wu, L. Zhang, X. Zhou, H. Zhang, Autonomous pose detection and alignment of suction modules of a biped wall-climbing robot, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 20(2) (2015) 653-662.

[17] J.-P. Merlet, Parallel robots, Springer Science & Business Media, 2006.

[18] M.W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar, Robot modeling and control, Wiley New York, 2006.

[19] J.-J.E. Slotine, W. Li, Applied nonlinear control, Prentice hall Englewood Cliffs, NJ, 1991.

[20] R.M. Murray, Z. Li, S.S. Sastry, S.S. Sastry, A mathematical introduction to robotic manipulation, CRC press, 1994.