

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(6) (2021) 821-824 DOI: 10.22060/mej.2021.18404.6810

Dynamic modeling and control of cleaning robot for agro-photovoltaic

F. Hajiahmadi¹, P. Zarafshan^{1*}, M. Dehghani², S. A. A. Moosavian³, R. Hasan-beygi¹

1- Department of Agro-Technology, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Department of Food Technology, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Review History:

Received: May, 10, 2020 Revised: Jan. 09, 2021 Accepted: Jan. 23, 2021 Available Online: Jan. 27, 2021

Keywords:

Cleaner robot photovoltaic panels Agro-photovoltaic Dynamics modeling Model base control Simulation

ABSTRACT: In this paper, modeling and control of a robotic carrier for the cleaning system of solar farms are presented. Since solar panels are placed in natural environments, there is always a problem of dust accumulation on the panels, which results in absorbed energy reduction. Hence, robotic cleaners can be used for solar panels. For relocation of the cleaning robot between solar panel rows, an automated carrier mechanism is required. Hence, a robotic system for cleaner displacement is introduced, and its dynamics modeling and control are presented. The robot kinetics and kinematics models have been derived and validated by ADAMS software. Hence, kinetics and kinematics model-based controllers are introduced for robot motion control. Using the kinetics model, a computed torque method controller is designed and simulated. For less computational effort, a transposed Jacobian controller is designed, using the kinematics model. Finally, to increase control performance, an modified transposed Jacobian controller is also designed. The desired trajectory is designed for the robot. Finally, for software verification and analysis, the controllers are simulated, using co-simulation of MATLAB Simulink and ADAMS model. The simulation results show the satisfactory performance of the controllers and can be used for further design analysis of the prototype.

1-Introduction

Solar power is one of the most important energy sources in the world. One major problem that reduces the energy efficiency of solar panels is the dust accumulation on the panels. This problem gets worse for AgroPhotoVoltaic (APV) systems, in which solar panels are placed at agricultural sites. These systems are used where land is scarce and very valuable; and also, where the plants need to have a shelter or a partial shadow against the direct sunlight, [1-2].

To avoid deficiency, the panels must be cleaned in regular plans. This cleaning is a difficult maintenance task for large solar farms, with many long rows of solar panels, considering the high risks of electric shocks for the workers and damaging of the panels. Furthermore, due to very wide area, the quality of cleaning is usually low, and sometimes a lot of water is required, or heavy machinery is used, as depicted specifically, where very wide panels are placed at higher heights, specific machinery is required, which might have heavy and low flexible arms that can damage the panels, [3-4]. Exploiting light, small, and smart robotic cleaning systems, the maintenance process can be done automatically or remotely controlled, with higher task qualities and without human safety risks. Furthermore, a longer lifecycle of panels and less water consumption may be achieved. Using such automatic systems regularly, dust, snow, and birds' faces and

corps can be removed. Even in dry areas, studies have shown that up to 15% of energy loss due to the mentioned problems, [5-6].

Many designs have been presented for solar panel cleaning robots, [7]. Some robots can move on the panels, [8], while some others move on the ground or rails and clean the panels all along their path, [9-10]. In most solar farms, the panels are placed in rows of tens or hundreds of meters. Typically, each row of panels has its robot. The main reason is the difficulty of robot transportation between the rows. To overcome this problem, a different carrier robotic system can be used, to transfer the cleaner between the rows, [11-12]. The rows are typically placed adjacently, and it is possible to place passage beside them for such a carrier robot.

In this paper, as a part of the initial design of the robotic maintenance system, the kinematics and dynamics model of the carrier robot is presented. The initial design of the robotics system is briefly presented. Then, kinematics and kinetics modeling of the robot are presented. In section two, the derived model is validated, using ADAMS software. For the validation, after the validation, in section three, a controller is designed for the robot. The controlled robot is simulated using MATLAB Simulink and ADAMS co-simulation. The results show that the proposed system is capable of the desired tasks. These results are also used for finalizing the design,

*Corresponding author's email: p.zarafshan@ut.ac.ir



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.



Fig. 1. Schematic of the system with geometric specifications

before manufacturing the robotic system. In the next section, model-based controllers of the robotic system. This study is used to analyze the performance and the requirements of the prototype, before its manufacture. The robot kinetics and kinematics models have been modeled both mathematically and by ADAMS. According to the required conditions and consideration of solar farms, the robot must work accurately, following proper trajectories. Hence, model-based controllers can be good choices for this system. In section four, the kinematics model is used to design a Transposed Jacobian (TJ) controller. The controller is designed and simulated for tracking the planned trajectory. Then, to improve the control results, a Modified Transposed Jacobian (MTJ) controller is designed and simulated. In section five, to achieve better results, with the expense of more computational efforts, a Computed Torque Method (CTM) controller is designed as a kinetics model-based controller. All controllers are simulated and verified using the co-simulation of MATLAB Simulink and ADAMS model, [13-14]. Finally, the controller performances are presented and the results are compared.

2- Methodology

2.1. Dynamics modeling

In this section, the dynamics modeling of the robot is presented. The kinematics variables are introduced, The robot has three degrees of freedom, including moving forward and backward on a rail; and two degrees for height adjustment of the front and rear scissors. Based on the motor placement, (x, θ_1, θ_2) can be chosen as the inputs of the control system, or as the general coordinates. Regarding the final task, the position of the table -considered as the robot End Effector- the control output or the general coordinates can be considered as $(x_{ee}, y_{ee}, \theta_{ee})$.

2.2. System kinematics

For kinetics and kinematics modeling, the position of mass centers and orientation of all parts are required. Hence, using the geometry, orientation and center position of all robot parts are as follows. It should be noted that the robot body is referred to as link 0. The Jacobian matrices for x, y positions of links are derived as follows, where v refers to linear velocity. Likewise, the Jacobian matrices for orientations of the links where, ω refers to angular speeds. Hence, the mass center velocity v_i and angular velocity ω_i of each link. Using the Jacobian matrices, the velocities can be determined for the table and for other parts, to present a complete kinematics model. It should be noted that the inertia of the wheels are negligible compared to other masses, and their angular speed are also small. Hence, θ_3^- . θ_4^- . θ_5^- are not important for dynamics modeling.

2.3. Dynamic model validation

In this section, the derived dynamics model is validated using software simulation. For software simulation, ADAMSTM is used. The robot is modeled in the software, as represented the Fig. 2 (up). For comparison, the ADAMS model is exported to MATLAB Simulink as in Fig. 2 (down). For validation, four robot motions were simulated. For each motion simulation, a predefined motion is given to the ADAMS model, as the input. Then, the required motor forces/torques are read as the simulation output. Finally, the results are compared with the model from, [17]. In order to use ADAMS simulator, first, the models of all robot links are built in the software, including mass and inertia and dimension of each link. Then, all of the constraints, forces, torques and motions must be defined and added to the model. Since our model calculations are performed in MATLAB, the ADAMS model is exported to MATLAB Simulink.



Fig. 2. Comparison of modeling results in ADAMS software and extracted dynamic equations

3- Conclusions

This paper presented modeling and control of a robotic transportation system, for the cleaner unit used in solar farms. First, the system geometry, its parameters, and the kinematics modeling were presented. Then, the Lagrange method was used to derive the dynamics model of the robot. For validation, the robot was also modeled in ADAMS. The results achieved from ADAMS and the presented dynamics models were compared. The main reasons for this robot modeling are to study the robot performance for prototype design and also the design of its motors, based on its performance in a control task. Hence, after modeling, a PID controller was proposed and designed, for position control of the robot. The kinetics and kinematics models were introduced, to be used in the model-based controllers. Based on the robot properties, the desired trajectory was designed for the robot motion, between two adjacent solar panel rows. First, a TJ controller was designed based on the kinematics model. The controller presented satisfactory results. However, the steady-state errors could not be eliminated. Thus, an MTJ controller was introduced and designed. Using the MTJ method, the steadystate errors were eliminated, with minimum computational costs. Then, to achieve perfect performance, a kinetics model was used for control. Hence, a CTM controller was presented and designed. This method is a feedback linearization method, which shows great performance with the cost of computational efforts for the kinetics model. The simulation results showed great performance for this controller.

References

- E. De Schepper, S. Van Passel, J. Manca, T. Thewys, Combining photovoltaics and sound barriers–A feasibility study, Renewable energy, 46 (2012) 297-303.
- [2] C. Dupraz, H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier, Y. Ferard, Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic schemes, Renewable energy, 36(10) (2011) 2725-2732.
- [3] A. Syafiq, A. Pandey, N. Adzman, N. A. Rahim, Advances in approaches and methods for self-cleaning of solar photovoltaic panels, Solar Energy, 162 (2018) 597-619.
- [4] N. M. Kumar, K. Sudhakar, M. Samykano, S. Sukumaran, Dust cleaning robots (DCR) for BIPV and BAPV solar power plants-A conceptual framework and research challenges, Procedia Computer Science, 133(2018) 746-754.
- [5] J. Burgaleta, A. Ternero, D. Vindel, I. Salbidegoitia, G. Azcarrraga, Gemasolar, key points for the operation of the plant, SolarPACES, Marrakech, (2012).
- [6] S. Bushong, Robot Cleans Solar Panels And Protects Efficiency, Dust Wars, (2013).
- [7] D. Deb, N. L. Brahmbhatt, Review of yield increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82 (2018) 3306-3313.
- [8] A. Saini, A. Nahar, A. Yadav, D. S. Shekhawat, M. A. Vijayvargiya, Solar Panel Cleaning System, 3(5) (2017).
- [9] A. K. Mondal, K. Bansal, A brief history and future aspects

in automatic cleaning systems for solar photovoltaic panels, Advanced Robotics, 29(8) (2015) 515-524.

- [10] Serbot Swiss Innovations. GEKKO Solar Robot; [cited 2019 Aug]. Available from: http://WWW/en/solar-panelscleaning/gekko-solar-robot." (accessed).
- [11] M. Anderson, Robotic device for cleaning photovoltaic panel arrays, in Mobile Robotics: Solutions and Challenges: World Scientific, (2010) 367-377.
- [12] Ecoppia. EMPOWERING SOLAR; [cited 2019 Aug]. Available from: http://WWW/products-and-services/." (accessed).
- [13] M. A. Jaradat, A fully portable robot system for cleaning solar panels, in 2015 10th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA), (2015) 1-6.
- [14] D. C. Tranca, D. Rosner, A. V. Palacean, Autonomous

flexible low power industrial IoT controller for solar panels cleaning systems, in 2017 21st International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS), (2017) 106-112.

- [15] H. Wang, W. Ren, C. C. Cheah, Y. Xie S. Lyu, Dynamic Modularity Approach to Adaptive Control of Robotic Systems With Closed Architecture, IEEE Transactions on Automatic Control, 65(6) (2020) 2760-2767.
- [16] O. Christidi-Loumpasefski, G. Rekleitis, E. Papadopoulos, Concurrent Parameter Identification and Control for Free-Floating Robotic Systems during On-Orbit Servicing, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Paris, France, (2020).
- [17] John J. Craig, Introduction to Robotics Mechanics and Control. 3rd ed., (2018).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

F. Hajiahmadi, P. Zarafshan, M. Dehghani, S. A. A. Moosavian, R. Hasan-beygi, Dynamic modeling and control of cleaning robot for agro-photovoltaic, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(6)(2021) 821-824.

DOI: 10.22060/mej.2021.18404.6810



نشريه مهندسي مكانيك اميركبير

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۶۰ سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۴۶۵ تا ۳۴۷۸ DOI: 10.22060/mej.2021.18404.6810

مدلسازی دینامیکی و کنترل یک ربات پاککننده برای مزارع خورشیدی

فريما حاجي احمدي٬، پيام زرافشان٬*، محمد دهقاني٬، سيد على اكبر موسويان٬، سيد رضا حسن بيگي٬

۱– گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران ۲– گروه مهندسی ماشینهای صنایع غذایی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران ۳– گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

خلاصه: در این مقاله به معرفی و مدلسازی دینامیکی و کنترل یک ربات پایه متحرک برای پاک کردن صفحات فتوولتائیک مزارع خورشیدی پرداخته میشود. با توجه به قرارگیری صفحات فتوولتائیک در محیطهایی که عملیات کشاورزی در آنها انجام میشود، همواره مشکل تجمع گرد و خاک بر روی سطح صفحات فتوولتائیک، منجر به کاهش بازده انرژی بی می گردد. به همین دلیل و با توجه به موقعیت قرارگیری صفحات فتوولتائیک بایستی به صورت دورهای در زمانهای معین ب به پاک کردن این صفحات پرداخته شود. برای پاک کردن صفحات فتوولتائیک میتوان از رباتهای خودکار پاک کننده استفاده نمود. برای جابجاکردن ربات پاک کننده بین ردیفهای صفحات فتوولتائیک میتوان از رباتهای خودکار پاک کننده متحرک برای جابهجایی استفاده می گردد. در این طرح، پایه متحرک ربات به یک بازوی ساده مجهز شده است تا بتواند نیروگاه از یک سیستم خودکار بهره جست و بر خلاف طرحهای موجود نیازی به استفاده از یک ربات برای پاک کردن صفحات فتوولتائیک میتوان از رباتهای خودکار پاک کننده نیروگاه از یک سیستم خودکار بهره جست و بر خلاف طرحه پایه متحرک ربات به یک بازوی ساده مجهز شده است تا بتواند نمی باشد. بنابراین، ضمن معرفی این سیستم رباتیک، و به عنوان بخشی از تحلیل و طراحی اولیه، به مدلسازی دینامیکی و کنترل آن پرداخته میشود. در پایان، مزایا و معایب هر روش برای ربات طراحی هایی و مراحی اولیه، به مدلسازی دینامیکی و میتورل آن پرداخته میشود. در پایان، مزایا و معایب هر روش برای ربات طراحی شده در انجام عملیات پاک کردن صفحات فتوولتائیک بر فتوولتائیک بررسی می گرد.

تاریخچه داوری: دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۱ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۲۰ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۴ ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۱/۰۸

کلمات کلیدی: ربات پاککننده صفحات فتوولتائیک مزارع خورشیدی مدلسازی دینامیکی کنترل مدل مبنا شبیهسازی

استفاده فراوانی قرار گرفته است. این امر باتوجه به قرار گیری صفحات

فتوولتائیک در مزارع کشاورزی موجب افزایش دوچندان گرد و خاک

نشسته شده بر روی این صفحات فتوولتائیک می گردد که خود لزوم

پاکسازی آنها را پررنگتر مینماید،[۲-۱]. همانطور که در (شکل

۱) مشاهده می شود، ابتدا به عنوان معیار، برای یک هکتار زمین

کشاورزی استاندارد، ظرفیت تولید محصول کشاورزی را یک واحد

و بازدهی آن را۱۰۰٪ در نظر می گیریم. همچنین برای یک هکتار

زمین نیروگاه خورشیدی معمولی، ظرفیت استاندارد تولید انرژی را

یک واحد و بازدهی آن را ۱۰۰٪ در نظر میگیریم. به این ترتیب،

در مجموع از یک هکتار کشاورزی و یک هکتار نیروگاه، یک واحد

محصول کشاورزی و یک واحد انرژی تولید می گردد. در حالت دوم،

با استفاده ترکیبی از این دو هکتار زمین، بصورت همزمان محصولات

کشاورزی کشت شده و همچنین صفحات فتوولتائیک بر روی آن

قرار داده می شوند. در این حالت ترکیبی، هم بازدهی تولید محصول کشاورزی و هم بازدهی تولید انرژی در هر هکتار، از ۱۰۰٪ به ۸۰٪

۱– مقدمه

در دهههای اخیر و با توجه به خطر تمامشدن سوختهای فسیلی، توسعهی منابع انرژیهای تجدیدپذیر بیشتر مدنظر قرار گرفته است. که این امر کاهش مصرف سوختهای فسیلی را منجر شده است. انرژیهای تجدیدپذیر شامل انرژی خورشیدی، انرژی زمین گرمایی، انرژی باد، انرژی زیستتوده، انرژی هیدروالکتریک، انرژی جزرومد میباشند. انرژی خورشیدی یکی از مهمترین منابع انرژیهای تجدیدپذیر بوده که در سرتاسر جهان مورد استفاده قرار میگیرد و آلودگی تولیدی انرژی خورشیدی در محیط زیست تقریبا برابر با صفر میباشد. یکی از مشکلات عمده که منجر به کاهش بازده صفحات فتوولتائیک میگردد، گرد و خاک نشسته شده بر روی این صفحات میباشد. از طرفی، مزارع برقی-کشاورزی^۲ که معرف استفاده دوگانه زمین برای تولید انرژی از صفحات فتوولتائیک و کشاورزی

Agro Photovoltaic, APV

* نویسنده عهدهدار مکاتبات: *p.zarafshan@ut.ac.ir

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



شکل ۲. استفاده از ماشین الات پیچیده برای پاککردن صفحات، با دسترسیهای دشوار [۵] Fig. 2. Using complecated machines to clear solar panels with difficult access [5]

طور چشم گیری پایین می آورد. به منظور جلو گیری از کاهش راندمان صفحات فتوولتائیک در اثر انباشت گرد و غبار محیطی، لازم است با توجه به منطقه جغرافیایی، در زمانهای معین و به طور دوره ای سطح این صفحات پاک شوند. از طرفی پاک کردن صفحات فتوولتائیک به صورت سنتی برای ردیفهای مختلف در سطوح گسترده، کاری سخت، پرهزینه و پرخطر می باشد و در بعضی موارد حتی می تواند منجر به برق گرفتگی و مصدومیتهای شدید برای کار گران و عوامل انسانی گردد. همچنین در این روشهای پاکسازی، کیفیت منظور استفاده گردیده است، (شکل ۲). در بسیاری از موارد به دلیل نصب و قرار گیری صفحات فتوولتائیک در ارتفاع بالا و با زوایای تقریبا از نیروی انسانی، از ماشین آلات پیچیده ای استفاده می گردد که گاه به یک بازوی سنگین و کم انعطاف مجهز هستند که می تواند موجب آسیبرسانی به صفحات فتوولتائیک گردند، [۳–۴]

استفاده از ربات به عنوان یک ماشین مکانیزه برای پاککردن صفحات فتوولتائیک در مزارع خورشیدی که از ردیفهای چند دهتایی تا چندصدتایی تشکیل شدهاند در پژوهشهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در این روشها، برای پاککردن هر ردیف از صفحات فتوولتائیک از یک ربات بهره گرفته شده است. از این رو، به کمک رباتهای سبک و کم حجم که عملیات پاککردن این صفحات فتوولتائیک را به صورت هوشمند و قابل کنترل از راه دور و بدون استفاده از نیروی انسانی انجام دهند، توانسته است علاوه بر افزایش







شکل ۱. استفاده هم زمان از یک زمین کشاورزی برای تولید محصول و انرژی [۴–۳]

Fig. 1. Simultaneous usage of agricultural land for crop production and energy [3-4]

کاهش مییابد. به این ترتیب، مجموع تولید دو هکتار زمین برابر با ۱/۶ واحد محصول کشاورزی و ۱/۶ واحد محصول انرژی الکتریکی خواهد بود. به این ترتیب، در مجموع بازدهی کل اقتصادی از ۱۰۰٪ در حالت اولیه به ۱۶۰٪ افزایش مییابد، [۳-۴]. این دستاورد مهم در استفاده بهینه از زمین، به شرطی محقق میشود که زمینهای اطراف صفحات خورشیدی، تا حد امکان تبدیل به مسیر رفت و آمد نشده و قابل کشت باقی بمانند. در ادامه خواهیم دید که با استفاده از ایده مورد بحث این مقاله در بکارگیری سامانه رباتیک برای تجهیزات تمیزکننده صفحات، زمین اطراف صفحات خورشیدی دستنخورده باقی مانده و به ظرفیت تولید کشاورزی آسیبی نمیرسد.

صفحات فتوولتائیک به سه صورت در مزارع کشاورزی قرار می گیرند. در نوع اول، صفحات فتوولتائیک بین محصولات قرار می گیرند. در نوع دوم، صفحات فتوولتائیک بر بالای محصولات کشاورزی قرار می گیرند و در نوع سوم، اگر محصولات کشاورزی در گلخانه کشت شوند صفحات فتوولتائیک در بالای سقف گلخانه نصب می شوند که امروزه نوع دوم بیشتر مورد توجه می باشد. سیستمهای مزارع برقی – کشاورزی، به دو علت عمده مورد توجه قرار می گیرند؛ اولا در مناطقی که محدودیت مساحت زمین وجود داشته باشد؛ ثانیا در مواردی که محصولات کشاورزی و گیاهان نیاز به سایه یا سقف مانغ رسیدن نور به سلول خورشیدی شده و در نتیجه، کاهش جریان داخل كارخانه به مداخله ايراتور نياز دارند، [٢٠]. ربات اكوييا ايي چهار که یک ربات کاملاً مستقل است که از برسهای میکروفایبر برای جاروکردن گرد و خاک در صفحهها استفاده میکند. این ربات برای ردیفهای بزرگی از صفحات خورشیدی واقع در محیطهای خشک و شنی طراحی شده است، [۲۱]. ربات سولار براش که یک ربات سبک وزن و مستقل برای پاککردن صفحات خورشیدی یا شیشه در محیطهای خشک است. با استفاده از فنجانهای مکش، روی صفحات خورشیدی حرکت میکند و امکان عبور از شکاف ها تا ۳۰ میلی متر و کار بر روی سطوح کجشده تا ۳۵ درجه را ممکن می سازد، [۲۲] شرکت میراکیی رباتهای سبک وزن با باتری را طراحی میکند که می توانند به صورت مستقل آرایههای صفحه خورشیدی در مقیاس بزرگ را پاک کنند. پاککننده ربات با چرخهای کوچک که از فناوری سنسور استفاده می کند تا به طرز ماهرانهای بتواند کل آرایههای خورشیدی را با استفاده از برسهای چرخان به حرکت درآورد تا گرد و خاک و شن را از بین ببرد، [۲۳] ربات نوماد یک سیستم پاککننده صفحات خورشیدی بیابانی است. این ربات دارای قابلیتهای مکانیکی منحصر به فردی دارد که به آن اجازه می دهد در حالی که ۹۹/۶ ٪ گرد و خاک را با پاککردن روزانه از بین میبرد. این ربات فقط سه قسمت متحرک دارد، [۳۴].

با توجه به قرارگیری ردیفهای زیادی از صفحات خورشیدی در نیروگاهها برای صرفهجویی در هزینه باید بتوان با استفاده از یک ربات تمام ردیفهای صفحات خورشیدی را پاک نمود. برای غلبه بر مشکلات مطرحشده در بالا و با استفاده از حاشیه ردیفها، این امکان وجود دارد که یک مسیر مناسب برای حرکت ربات حامل پاککننده صفحات در نظر گرفته شود. بنابراین در این پژوهش، به بررسی یک ربات حامل پاککننده صفحات فتوولتائیک پرداخته میشود که در ربات حامل پاککننده صفحات فتوولتائیک پرداخته میشود که در یک مسیر ریل گزاری شده بتواند سیستم پاککننده را بین ردیفهای این سیستم رباتیک و سپس به مدلسازی سینماتیک، سینتیک آن پرداخته میشود. همچنین با شبیه ازی چند کنترلر مناسب، این میداخته میشود. وات طراحی شده در انجام عملیات پاککردن مفحات فتوولتائیک قبل از شروع به ساخت پرداخته میشود. این ربات دارای سه درجه آزادی که شامل یک درجه حرکت روی ریل و دو درجه برای تنظیم ارتفاع و زاویه است میباشد. در نهایت، با توجه کیفیت پاککنندگی، موجبات کاهش خطرات جانی و افزایش طول عمر صفحات فتوولتائیک و همینطور کاهش مصرف آب و سایر منابع انرژی و نیز هزینههای نیروی انسانی را موجب شود. همچنین علاوه بر پاککردن ذرات گرد و غبار، برای مواردی همچون برفروبی و رفع فضولات و لاشه پرندگان نیز می توان از چنین سیستمی هایی استفاده نمود. مطالعات در مناطق خشک نشان میدهد که این تلفات میتواند تا ۱۵ درصد از کل ظرفیت تولید در روز را شامل شود و در طول یک ماه راندمان را تا ۵۰٪ کاهش دهد، [۸-۶]. طرحهای متنوعی برای رباتهای پاککننده صفحات فتوولتائیک ارائه شده است، [۹] برخي از اين رباتها، قابليت حركت دلخواه روى صفحات فتوولتائيك را داشته [۱۰]، برخی دیگر در یک مسیر مشخص، شبیه حرکت روی ریل، از ابتدا تا انتهای صفحات را پاک مینمایند،[۱۲–۱۱]از آنجایی که، صفحات فتوولتائیک در ردیفهای چند ده یا چند صد متری قرار می گیرند و انتقال بین این ردیف ها دشوار می باشد، در تمامی روشهای فوق برای پاککردن هر ردیف از این صفحات، یک ربات مورد استفاده قرار گرفته است، [۱۶-۱۳]. در این راستا رباتهای متعددی وجود دارند که برمبنای استراتژی پاککردن، تعدادی از سیستمهای معروف در ادامه شرح داده شدهاند. برخی رباتهای کاملا مکانیزه، صفحات خورشیدی فتوولتائیک را با حرکت یک برس به صورت افقی پاک می کنند. با داشتن طول ۱ تا ۱۶ متر و داشتن باتری ۱۲ ولت می تواند به صورت اتوماتیک مستقر شود، [۱۷]. سیستم دیگر، ربات پیوی اسپین میباشد که ربات مکانیزه که از میلههای تلسکوپی با برس پاککننده در قسمت بالا تشکیل شده است. این ربات اولین نوع از یک سیستم پاککننده با میلهی تلسکوپی همراه با فشار آب است. ربات پیوی اسپین بر اساس دو برس لاستیکی با دوام که در جهتهای مخالف می چرخند کار می کند، خاک و سایر آلایندهها را از سطح ماژول پاک می کند، [۱۸]. ربات رزولا سینفونیا یک ربات کاملا هوشمند میباشد. این ربات به جای اینکه به ریل متصل شود، قادر است از یک صفحه یخورشیدی به صفحه ی دیگر حرکت کند، تا بتواند فضولات و کثیفی صفحههای خورشیدی را کاملا از بین ببرد. این ربات مجهز به برس پاککن، برف پاککن و مواد شوینده است و همچنین آب ذخیره شده در مخزن خود را آب پاش می کند، [۱۹] ربات هکتور نیز نوع دیگر ربات کاملا مکانیزه می باشد. رباتهای هکتور فقط برای پرکردن مخزن آب، تعویض باتری و توزیع آن در



Fig. 3. Schematic of the system with geometric specifications

به حساسیتهای شرایط رباتهای پاککننده، به طراحی و مقایسه عملکرد چند کنترلر مدل مبنا بر روی مسیر مطلوب طراحی شده پرداخته میشود. برای کاهش محاسبات کنترلی از روشهای مختلف بهره جسته شده است. علاوه بر کاهش محاسبات، خطای ایجاد شده نیز کاهش پیدا کرده است. به دلیل این که سیستم مورد نظر باید حرکت نرم و آرام و بدون شتاب داشته باشد از کنترل مدل مبنا استفاده شده است که در ابتدا از روش کنترل گشتاور محاسبه شده^۱ بهره گرفته شده است و سپس به شبیه سازی روش کنترل ژاکوبین مبنا^۲ پرداخته میشود. در ادامه و به منظور بهبود عملکرد، به طراحی و شبیه سازی یک کنترلر ژاکوبین مبنا اصلاح شده^۳ پرداخته شده است. در پایان، مقایسه و بحث بر روی نتایج شبیه سازی کنترلرها ارایه گردیده است.

۲- مدلسازی دینامیکی با استفاده از روش لاگرانژ

در این بخش، به استخراج معادلات دینامیکی ربات پرداخته میشود. بدین منظور، ابتدا متغیرهای سینماتیکی مشخص شده و سپس به مدلسازی دینامیک ربات پرداخته میشود. یک شمای کلی از ربات طراحیشده به همراه مشخصات سینماتیکی تمامی اجزاء و مشخصات هندسی پارامترهای آن در (شکل ۳) آورده شده است. باتوجه به محل نصب موتورها، ($(\theta_{r}, x, \theta_{1})$ به عنوان متغیرهای کنترلی

درنظر گرفته میشوند. از آن جا که موقعیت و زاویهی میز حامل پاککننده به عنوان خروجی نهایی درنظر گرفته میشود ابتدا به استخراج مقادیر آن پرداخته میشود.

۲-۱ استخراج معادلات سینماتیکی سیستم:

موقعیت و زاویهی میز حامل پاککننده یا $x_{ee}, y_{ee}, \theta_{ee}$ در معادلات ۱–۳ استخراج گردیده است:

$$x_{ee} = x + \frac{l_{ee}}{2} \times \cos\theta_{ee} = x + l_{ee} \times \frac{a}{2\sqrt{(2l_1 \sin\theta_1 - 2l_2 \sin\theta_2)^2 + a^2}}$$
(1)

$$y_{ee} = 2l_2 sin\theta_2 + \frac{l_{ee}}{2} \times sin\theta_{ee} = 2l_2 sin\theta_2 + l_{ee} \times \frac{(2l_1 sin\theta_1 - 2l_2 sin\theta_2)}{2\sqrt{(2l_1 sin\theta_1 - 2l_2 sin\theta_2)^2 + a^2}}$$
(Y)

$$\theta_{ee} = tan^{-1} \left(\frac{2l_1 sin\theta_1 - 2l_2 sin\theta_2}{a} \right) \tag{(1)}$$

که در آن l_{ee} طول میز حامل (مجری نهایی)، ه طول بدنه θ_1 اصلی، l_1 طول عضو ۲، l_2 طول عضو ۲، θ_1^{1} زاویه یقیچی اول و 2° زاویه یقیچی دوم میباشند. به منظور خلاصه سازی، به جای j° زاویه یقیچی دوم میباشند. به منظور خلاصه سازی، به جای inti د intic, $s_1 = c_1$ میباشند. به منظور خلاصه سازی، به جای intic و isono از $s_1 = c_1$ میباشند. به منظور محاسبه می X و Y تمام مرکز جرمها محاسبه شده و سپس به منظور محاسبه ی سرعتها، با مشتق گیری از معادله های فوق، ماتریس های ژاکوبین محاسبه می گردد. در نهایت برای ژاکوبین مجری نهایی داریم:

Computed Torque Method, CTM

² Transposed Jacobian, TJ

³ Modified Transposed Jacobian, MTJ

همچنین انرژی پتانسیل به صورت زیر محاسبه شده است:

$$G = - (J_{v_1}^T(m_1g) + J_{v_2}^T(m_2g) + \dots + J_{v_n}^T(m_ng))$$
(۱۱)

در نتیجه، مقدار G یک ماتریس ۱×۳ خواهد بود. ماتریس V نیز
از رابطه زیر بدست میآید:
$$V = c \times \dot{q}$$
 (۱۲)

در پایان معادلات فرم بسته سیستم برابر خواهد بود با: $M(q)\begin{bmatrix} \ddot{q}_{1} \\ \ddot{q}_{2} \\ \ddot{q}_{3} \end{bmatrix} + B(q)\begin{bmatrix} \dot{q}_{1}\dot{q}_{2} \\ \dot{q}_{1}\dot{q}_{3} \\ \dot{q}_{2}\dot{q}_{3} \end{bmatrix} + C(q)\begin{vmatrix} \dot{q}_{1}^{2} \\ \dot{q}_{2}^{2} \\ \dot{q}_{3}^{2} \end{vmatrix} + G(q) = \begin{bmatrix} \tau_{1} \\ \tau_{2} \\ \tau_{3} \end{bmatrix}$ (۱۳)

از طرفی، مختصات کاری موردنظر سیستم مفروض $X = [x_{ee} \ y_{ee} \ \theta_{ee}]^T$ که برابر است با مختصات و زاویه مجری نهایی. برای تبدیل سرعت از فضای مفصلی به فضای کاری از ماتریس ژاکوبین به صورت زیر استفاده می شود:

$$\dot{X} = J_{ee} \times \dot{q} \tag{14}$$

سپس، با استفاده از ماتریس ژاکوبین میتوان روابط دینامیکی سیستم را در فضای کاری بصورت زیر بیان نمود:

$$M_X \ddot{X} + V_X + G_X = F_x \tag{10}$$

$$J_{ee} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{l_{l_{ee}}\cos\theta_{l}(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})}{a^{2} \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}} + I\right)^{\frac{3}{2}}} \\ 0 & \frac{l_{l_{ee}}\cos\theta_{l}}{a \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}} + I\right)^{\frac{1}{2}}} - \frac{l_{l_{ee}}\cos\theta_{l}(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2} \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}} + I\right)^{\frac{3}{2}}} \\ (f) \\ & \frac{l_{2l_{ee}}\cos\theta_{2}(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})}{a^{2} \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}} + I\right)^{\frac{3}{2}}} \\ 2l_{2}\cos\theta_{2} - \frac{l_{2l_{ee}}\cos\theta_{2}}{a \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}} + I\right)^{\frac{1}{2}}} - \frac{l_{2l_{ee}}\cos\theta_{2}(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2} \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}} + I\right)^{\frac{3}{2}}} \\ 2l_{2}\cos\theta_{2} - \frac{l_{2}l_{ee}}\cos\theta_{2}}{a \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}} + I\right)^{\frac{1}{2}}} - \frac{l_{2l_{ee}}\cos\theta_{2}(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2} \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}} + I\right)^{\frac{3}{2}}} \\ a = \frac{l_{2}l_{ee}}\cos\theta_{2}}{a \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}} + I\right)^{\frac{3}{2}}} \\ a = \frac{l_{2}l_{ee}}\cos\theta_{2}}{a \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}} + I\right)^{\frac{3}{2}}} \\ a = \frac{l_{2}l_{ee}}\cos\theta_{2}}{a \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}} + I\right)^{\frac{3}{2}}} \\ a = \frac{l_{2}l_{ee}}\cos\theta_{2}}{a \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}} + I\right)^{\frac{3}{2}}} \\ a = \frac{l_{2}l_{ee}}\cos\theta_{2}}{a \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}} + I\right)^{\frac{3}{2}}} \\ a = \frac{l_{2}l_{ee}}\cos\theta_{2}}{a \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}} + I\right)^{\frac{3}{2}}} \\ a = \frac{l_{2}l_{ee}}\cos\theta_{2}}{a \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}} + I\right)^{\frac{3}{2}}} \\ a = \frac{l_{2}l_{ee}}\cos\theta_{2}}{a \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}} + I\right)^{\frac{3}{2}}} \\ a = \frac{l_{2}l_{ee}}\cos\theta_{2}}{a \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}} + I\right)^{\frac{3}{2}}} \\ a = \frac{l_{2}l_{ee}}\cos\theta_{2}}{a \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}} + I\right)^{\frac{3}{2}}} \\ a = \frac{l_{2}l_{ee}}\cos\theta_{2}}{a \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}} + I\right)^{\frac$$

$$V_{c_i} = J_{v_i} \dot{q}$$

$$\omega_{c_i} = J_{\omega_i} \dot{q}$$
(Δ)

که در آن J_{v_i} و J_{a_i} بترتیب ژاکوبین سرعت خطی و ژاکوبین سرعت دورانی هر عضو میباشند و بردار $\dot{q} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta}]^T$ میباشد. بنابراین داریم:

$$\dot{x}_{ee} = \dot{x} - \frac{(l_1 l_{ee} \cos\theta_1 \dot{\theta}_1 + l_2 l_{ee} \cos\theta_2 \dot{\theta}_2) \times (2l_1 \sin\theta_1 - 2l_2 \sin\theta_2)}{a^2 \left(\frac{(2l_1 \sin\theta_1 - 2l_2 \sin\theta_2)^2}{a^2} + 1\right)^{\frac{3}{2}}}$$
(7)

$$\dot{y}_{ee} = \dot{\theta}_{l} \left(\frac{l_{l_{ee}} \cos \theta_{l}}{a \sqrt{\left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2}}{a^{2}}\right)^{2} + l}}{a^{2} \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2}}{a^{2}}\right)^{2} + l}\right)^{\frac{3}{2}} + a^{3} \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2}}{a^{2}}\right)^{2} + l}{a^{2} \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2}}{a^{2}}\right)^{2} + l} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{l}{a^{2} \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}}\right)^{2} + l}{a^{2} \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}}\right)^{\frac{3}{2}} + l} \left(\frac{l}{a^{2}}\right)^{\frac{3}{2}} + l}{a^{2} \left(\frac{(2l_{l}sin\theta_{l} - 2l_{2}sin\theta_{2})^{2}}{a^{2}}\right)^{\frac{3}{2}} + l}{a^{2}$$

$$\dot{\theta}_{ee} = \frac{2l_{i}\dot{\theta}_{i}cos\theta_{i}}{a\left(\frac{(2l_{i}sin\theta_{i}-2l_{2}sin\theta_{2}})^{2}}{a\left(\frac{(2l_{i}sin\theta_{i}-2l_{2}sin\theta_{2}})^{2}}{a\left(\frac{(2l_{i}sin\theta_{i}-2l_{2}sin\theta_{2}})^{2}}{a^{2}}+1\right)} - \frac{2l_{2}\dot{\theta}_{2}cos\theta_{2}}{a\left(\frac{(2l_{i}sin\theta_{i}-2l_{2}sin\theta_{2}})^{2}}{a^{2}}+1\right)} \qquad (A)$$

۲-۲ استخراج معادلات سینتیکی سیستم:

با استفاده روش لاگرانژ، معادلات دینامیکی ربات به فرم زیر استخراج میگردد، [۲۶–۲۵]:



Fig. 4. Dynamic model verification, dynamic simulation by ADAMS software

که در آن مقادیر
$$M_X,V_X,G_X$$
 با توجه به رابطه زیر بیان
می ${\cal R}$ ردد.

$$M_{X}(q) = J_{ee}^{-T}(q) \times M(q) \times J_{ee}^{-1}(q)$$

$$V_{X}(q,\dot{q}) = J_{ee}^{-T}(q) \times (V(q,\dot{q}) - M(q) \times J_{ee}^{-1}(q)\dot{J}_{ee} \times \dot{q}) \quad (19)$$

$$G_{Y}(q) = J_{ee}^{-T}(q) \times G(q)$$

۲-۳ صحه گذاری مدل دینامیک استخراج شده:

در این بخش، به منظور راستی آزمایی مدل دینامیک بدست آمده، به شبیه سازی ربات پرداخته و نتایج با مدل طراحی شده در نرمافزار آدامز مقایسه می شود، (شکل ۴). بدین منظور و برای انجام شبیه سازی ها، حرکت مشخصی به ربات داده می شود و نیروهای عملگری لازم در آن حرکت یک بار توسط مدل دینامیکی و یک بار توسط نرمافزار آدامز محاسبه می گردند، [۲۷]. برای استفاده از نرمافزار آدامز، ابتدا مدل سیستم مورد نظر در آن طراحی می شود. سپس، تمامی قیدها و نیروها برای مدل تعریف می گردد. در نهایت ویژگی های مدل به صورت یک بلوک به محیط سیمولینک متلب منتقل می شود. در محیط سیمولینک ورودی های سیستم تعیین شده و از طریق بلوک آدامز محاسبات دینامیکی انجام می شود، [۲۸].

در این شبیهسازی مطابق رابطه زیر هر سه موتور در حال حرکت میباشد. بنابراین داریم:

 $q = (0.3 \times \sin(0.2 \times \pi \times time) , \frac{\pi}{4} + 0.3 \times \sin(\frac{4 \times \pi}{3} \times time) , \text{ (VY)}$ $\frac{\pi}{4} - 0.3 \times \sin(\pi \times time))$

نتایج شبیهسازی این آزمون نیز در (شکل ۵) آمده است. مقایسه و تطبیق دو نمودار، حاکی از درستی و دقت بالای مدل دینامیکی استخراج شده برای سیستم مفروض در برابر نتایج شبیهسازیها در نرمافزار میباشد. توجه داریم که پارامترها و مشخصات هندسی و دینامیکی ربات مفروض در جدول ۱ آورده شده است.

۴- کنترلر تناسبی-مشتقگیر-انتگرالی^۱:

در این بخش، با استفاده از مدل دینامیک بدستآمده، به طراحی یک کنترلر برای رساندن ربات به موقعیت مورد نظر پرداخته میشود. بدین منظور، از یک کنترلر تناسبی-مشتقگیر-انتگرالی استفاده می گردد که دیاگرام بلوک کنترلی آن در (شکل ۶) نشان داده شدهاست. مطابق این شکل، موقعیت میز (مجرینهایی ربات) توسط سنسورها اندازه گیری شده و با مقدار مطلوب مقایسه می گردد. کنترلر سعی در به صفر رساندن خطا می کند. ابتدا با سادهسازی مدل دینامیکی و با توجه به ابعاد و ویژ گیهای آن، با هدف رسیدن

جدول ۱. مشخصات هندسی و دینامیکی ربات مفروض Table 1. Geometric and dynamic characteristics of the assumed robot

IZZ	وزن (كيلوگرم)	ضخامت (متر)	عرض (متر)	طول (متر)	لينک
•/9٣٤	١/٥	•/•0	•/•A	۰/٣٥٣	١
•/\V	٣	•/•0	•/•A	• /V • V	۲
•/\V	٣	•/•0	•/•A	• /V • V	٦
•/9٣٤	1/0	•/•0	•/•٨	۰/٣٥٣	v

1 PID controller



شکل ۵. مقایسه نتایح حاصل از مدلسازی در نرمافزار آدامز و معادلات دینامیکی استخراج شده

Fig. 5. Comparison of modeling results in ADAMS software and extracted dynamic equations



شکل ۶. دیاگرام بلوکی کنترلر PID برای ربات مورد نظر Fig. 6. PID controller block diagram for the assumed robot

جدول ۲. ضرایب کنترلر PID Table 2. PID controller gains

ضرایب کنترلی PID _x					
kı	k _D	k _p			
+ /٩٩	٨٠	٣٠			
فرایب کنترلیPID					
k _I	k _D	k _p			
٨٠٠	1	۵۰۰			
ضرایب کنترلیPID					
kı	k _D	k _p			
٨	١	۵۰۰			

 θ_1 (۱۵۰،۱۵۰) و برای θ_2 (۱۵۰،۱۵۰) برای عملگرهای دورانی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می دهد که کنترلر طراحی شده، خطا را در زمان مناسب به صفر رسانده است و عملکرد مطلوبی برای ربات با مشخصات مورد نیاز دارد.

اولیهای برای ضرایب کنترلر در نظر گرفته شد. سپس با سعی و خطا، این ضرایب اصلاح گشتند. در ادامه برای مشاهده عمکرد کنترلر، به شبیه سازی یک سناریو کنترلی پرداخته می شود. موقعیت اولیه ربات، به صورت $(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, 0)$ در نظر گرفته می شود. موقعیت مطلوب نیز به صورت $(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}, 0)$ مشخص شده است. با انتخاب ضرایب کنترلی در جدول ۲ نتایج شبیه سازی کنترلی به صورت (شکل ۷) حاصل شده است.

همانطور که در این شکل مشاهده می شود، خطا مقدار قابل قبولی را دربر گرفته است. همچنین مقادیر نیرو و گشتاور عملگرها (ورودی های سیستم) نیز در (شکل ۷) نمایش داده شده اند. برای اطمینان از قابل انجام بودن فرامین کنترلی، متناسب با قدرت عملگرهای مورد نظر، حد اشباع در جهت x برابر (۱۵۰،۱۵۰-) و برای



شکل ۷. نتایج شبیهسازی کنترلر PID در سه جهت x, θ_1, θ_2 بالا) موقعیتها، وسط) خطا، پایین) نیرو و گشتاور Fig. 7. PID controller simulation results in three directions x, θ_1, θ_2 , Top) Positions, Middle) Errors, Bottom) Force and Torque

۵- کنترلر ژاکوبین مبنا^۱:

Table 3. TJ controller gains $k_{px}=1,\dots,N/m$ $k_{py}=7,\dots,N/m$ $k_{p\theta}=\Delta\dots,N.m/rad$ $k_{vx}=1,\dots,Ns/m$ $k_{vy}=7,\dots,Ns/m$ $k_{v\theta}=\Delta\dots,N.ms/rad$

جدول ۳. ضرایب کنترلر TJ

۸) نشان شده است. همانطور که مشاهده می شود، گشتاورهای عملگری در محدوده مناسبی قرار دارند. نمودارهای خطا نیز حاکی از رفتار قابل قبولی از لحاظ نوسانات و فراجهش میباشند. با این حال، خطای ماندگار به خصوص در زوایا دیده می شود. این موضوع از ویژگیها و محدودیتهای کنترل ژاکوبین مبنا میباشد. توجه داریم که مقادیر اولیه برای شبیه سازی کنترلر ژاکوبین مبنا برابر با ($\frac{\pi}{9} + 6 \cdot 0 - , \frac{\pi}{9} + -0 \cdot 10^{-1})$ درنظر گرفته شده است.

۶-کنترلر ژاکوبین مبنا اصلاح شده^۲:

الگوریتم کنترلی ژاکوبین مبنا اصلاحشده در ردیابی مسیرهای سرعت بالا عملکرد بهتری از خود نشان داده است. این الگوریتم، با حفظ مزایای الگوریتم ژاکوبین مبنا در استفاده از ماتریس ژاکوبین برای محاسبات سریع، میتواند به منظور کاهش نوسانات کنترلی و از بین بردن خطای حالت ماندگار به کار گرفته شود، [۳۰]. از طرفی، کنترل ژاکوبین مبنا اصلاحشده هم بر اساس مدل سینماتیکی میباشد. در کنترل ژاکوبین مبنا حجم محاسباتی کمتر میباشد ولی کنترل ژاکوبین مبنا یکی از روشهای کنترل بر مبنای سینماتیک است. در این روش، گشتاورها و نیروهای کنترلی بر مبنای ماتریس ژاکوبین و خطای کنترلی محاسبه میشوند. از این روش به منظور سادهسازی استفاده میشود و عملکرد آن میتواند به صورت تصوری از فنر تعمیمیافته و دمپر باشد، [۲۹]. همچنین قبل از شبیهسازی کنترلی، نیاز به یک مسیر برای حرکت ربات مفروض در طی عملیات پاک کردن صفحات فتوولتائیک میباشد. بدین منظور، موقعیت اولیه ربات، به صورت $\left(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, 0\right)$ در نظر گرفته میشود. موقعیت مطلوب نیز به صورت $\left(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}, 0\right)$

$$x = 0.0347t^{3} - 0.0043t^{4} + 0.0001t^{5}$$

$$\theta_{1} = 0.349 + 0.0025t^{3} - 0.0003t^{4}$$

$$\theta_{2} = 0.349 + 0.0025t^{3} - 0.0003t^{4}$$

(1A)

که در آن t نشاندهندهی زمان میباشد. توجه داریم که قانون کنترلی در این روش بصورت زیر بیان میشود:

$$\tau = J_{ee}^{T} (k_{\nu} \dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{X}} + k_{p} \boldsymbol{e}_{\boldsymbol{X}}) \tag{19}$$

با انتخاب ضرایب کنترلی در جدول ۳ نتایج شبیهسازی در (شکل

² Modified Transpose Jacobian, MTJ

¹ Transpose Jacobian, TJ



شکل ۸. نتایج شبیهسازی کنترلر TJ در جهت (x, θ_1, θ_2)، بالا) موقعیتها، وسط) خطا، پایین) نیرو و گشتاور Fig. 8. TJ controller simulation results in three directions x, θ_1, θ_2 , Top) Positions, Middle) Errors, Bottom) Force and Torque

بدین ترتیب دستور کنترلی از لحظهی قبل برای آشنایی با چگونگی رفتار یک سیستم در کنترلر بهره میبرد، بدیهی است که اگر مقادیر خطا و نرخ آن بزرگ باشد، رابطهی فوق بیانگر دینامیک سیستم نخواهد بود، اما برای خطاهای ناچیز میتوان دستور کلی را معرف ماهیت دینامیک سیستم قرار داد. با این حال گنجاندن این سیگنال نیاز به اندازه گیری شتاب دارد و ممکن است در عمل بدست آوردن آن دشوار باشد. بدین ترتیب میتوان تقریب خوبی را برای h(t) فرض نمود که در این صورت مقدار آن برابر با F در یک

$$h(t) = F \int_{t-\Delta t}$$
(177)

با لحاظکردن این ترم ممکن است نتیجه به گشتاور مفصلی بیشتری منجر شود برای زمانی که e نسبتا زیاد باشد یا در مشتق دوم اختلالات زیاد وجود داشته باشد. برای جلوگیری از این مشکل احتمالی، الگوریتم استاندارد TJ لحظهای قابل استفاده است. بنابراین، احتمالی، الگوریتم استاندارد k لحظهای قابل استفاده است. بنابراین، یک عامل تنظیم کننده k با توجه به رابطه زیر به کار گرفته می شود: $h(t) = Fk \int_{t-\Lambda t}$ مقداری خطا نیز وجود دارد برای ازبینبردن این خطا روش کنترلی دیگری به اسم ژاکوبین مبنا اصلاحشده مورد بررسی قرار میگیرد. در این روش همانند کنترل به روش ژاکوبین مبنا بار محاسباتی کمتر شده همچنین مقدار خطایی که در کنترل قبل دیده میشد از بین رفته است. اساس کار کنترل ژاکوبین مبنا اصلاح شده همانند کنترل به روش ژاکوبین مبنا میباشد با این تفاوت که گشتاور ژاکوبین مبنا در یک تاخیری ضرب میشود. همچنین قانون کنترلی در این روش بصورت زیر بیان میشود:

$$\tau = J_{ee}^{T} \left(k_{v} \dot{e} + k_{p} e + h(t) \right) \tag{(7.)}$$

که در آن h(t) برای جبرانسازی اثرات دینامیکی میباشد. با توجه به رابطه $au = J^T(q) F$ میتوان نوشت:

$$F = k_v \dot{e} + k_n e + h(t) \tag{(1)}$$

از طرفی باتوجه به رابطه ۲۱ اگر سمت راست آن برابر صفر شود، بنابراین خطای ردیابی همگرا به صفر میشود، یعنی:

$$k_{v}\dot{e} + k_{p}e = F - h(t) \tag{(TT)}$$

که مقادیر k در آن برابر است با:

$$k = \begin{cases} 0 & e \ge e_{max} , \dot{e} \ge \dot{e}_{max} \\ I & e \le e_{max} , \dot{e} \le \dot{e}_{max} \end{cases}$$
(Ya)

و یا برای ساده کردن ضریب k می توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$k = \exp\left(-\left|\frac{e}{e_{max}}\right| - \left|\frac{\dot{e}}{\dot{e}_{max}}\right|\right)$$

$$k_{ii} = \exp\left(-\left|\frac{e_i}{e_{max_i}}\right| - \left|\frac{\dot{e}_i}{\dot{e}_{max_i}}\right|\right)$$
(79)

در عمل ضرایب $k_p e_v e_v$ را می توان به عنوان ماتریس مورب انتخاب کرد. بنابراین ضریب k در رابطه ۲۰ را می توان با یک ماتریس مورب K جایگزین نمود، با قرار دادن مقدار h(t) از رابطه ۲۴ در رابطه ۲۰ داریم:

$$\tau_{MTJ} = J^T \times \left(k_v \dot{e} + k_p e\right) + k \times F \int_{t - \Delta t}$$
(YY)

با انتخاب صحیح آستانههای حساسیت و مراحل زمانی کوچک، میتوان خطای حاصل شده را بر حسب ماتریس افزایش مورب k_p و k_v نوشت:

$$k_{v}\dot{e}+k_{p}e\cong0\tag{(1)}$$

بنابراین با استفاده از رابطه فوق می توان به نتایج کنترلی منظم تری دست یافت. با انتخاب ضرایب کنترلی در جدول ۴ نتایج شبیه سازی کنترلی به صورت (شکل ۹) حاصل شده است. توجه داریم که مقادیر اولیه برای کنترلر ژاکوبین مبنا اصلاح شده برابر است با: $\frac{\pi}{9} - 0.175 - \frac{\pi}{9}$

۷-کنترل روش گشتاور محاسبهشده':

در این بخش، به طراحی یک کنترلر به روش گشتاور محاسبه شده پرداخته می شود. این کنترلر، بر مبنای حل کامل مدل دینامیکی سیستم عمل می کند. به این ترتیب که با حل معادلات دینامیکی، گشتاور مورد نیاز را بدست آورده و به این ترتیب ورودی مورد نیاز سیستم را به طور دقیق محاسبه می کند. پس می توان سیستم را با خطاها و نوسان های کم، در مسیر مطلوب کنترل نمود، [۳۱]. برای

MTJ جدول ۴. ضرایب کنترلر Table 4. MTJ controller gains

$k_{px} = \dots N/m$	$k_{py} = \tau \cdots N/m$	$k_{p_{\theta}} = \delta \cdots N. m/rad$
$k_{vx} = \dots Ns/m$	$k_{v_y} = r \cdots Ns/m$	$k_{v_{\theta}} = a \cdots N.ms/rad$



شکل ۹. نتایج شبیهسازی کنترلر MTJ در جهت (x, $heta_1, heta_2$)، بالا) موقعیتها، وسط) خطا، پایین) نیرو و گشتاور

Fig. 9. MTJ controller simulation results in three directions x, θ_1, θ_2 , Top) Positions, Middle) Errors, Bottom) Force and Torque

¹ Computed Torque Method, CTM

Table 5. CTM controller gains						
$k_{px} = \delta$	$k_{vx} = \delta$					
$k_{p\theta 1} = \Delta$	$k_{v\theta_1} = \Delta$	۱۵۰ = حداشباع عملگرها				

k_{vθ2}=Δ

k_{pθ2}=Δ

جدول ۵. ضرایب کنترلر CTM

۱۱ بدست آمده است. که مقادیر اولیه برای کنترلر روش گشتاور محاسبه بدست آمده است. که مقادیر اولیه برای کنترلر روش گشتاور محاسبه شده برابر است با: $(\frac{\pi}{9} + \frac{\pi}{9}, 0 - 175 + \frac{\pi}{9})^{-0.10})$ نتایج نشان میدهد که کنترلر طراحی شده، خطا را در زمان مناسب به صفر رسانده است و عملکرد مطلوبی برای ربات مفروض بر روی مسیر طراحی شده با مشخصات مورد نیاز دارد.

۸- نتیجهگیری:

در این مقاله، به مدلسازی دینامیکی و کنترل یک ربات پایه متحرک به منظور جابهجاکردن واحد پاککننده صفحات فتوولتائیک مزارع خورشیدی پرداخته شد. بدین منظور، ابتدا معادلات سینماتیک ربات مفروض استخراج شد. سپس، با استفاده از روش لاگرانژ، معادلات دینامیکی ربات استخراج گشت. سپس، برای صحهگذاری ربات از نرمافزار آدامز بهره گرفته شد. نتایج حاصل از شبیهسازی دو مدل ریاضی و نرمافزاری در شرایط متفاوت محاسبه شد که نتایج حاکی از دقت و صحت معادلات بود. با توجه به اینکه هدف اصلی از مدلسازی دینامیکی سیستم، اجرای عملیات کنترلی بود، به طراحی



Fig. 11. CTM controller simulation results in three directions x, θ_1, θ_2 , Top) Positions, Middle) Errors, Bottom) Force and Torque

محاسبه خطا در فضای مفصلی، میتوان از رابطه زیر استفاده نمود: $e = q_d - q$

مطابق (شکل ۱۰) که نشاندهنده بلوک دیاگرام کنترلر در سیمولینک متلب میباشد، خطاهای سیستم از مقایسه مقادیر واقعی q و \dot{q} با مقادیر مطلوب آنها بدست میآیند. بنابراین داریم:

$$\ddot{q}_c = \ddot{q}_d + k_v \dot{e} + k_p e \tag{(7.)}$$

سپس، به کمک (^{*qc*})^{..}و با استفاده از معادله بدست آمده از دینامیک سیستم، مقدار گشتاور مورد نیاز برای حرکت مطلوب، مطابق معادله زیر بدست میآید:

$$\tau = M\ddot{q}_c + G + V \tag{(1)}$$

به این ترتیب، با فرض کوچکبودن خطاهای محاسباتی و مدلسازی و صرف نظر از خطاهای احتمالی ناشی از سنسورها و عملگرها، معادله حاکم بر حلقه کنترلی به صورت زیر خواهد بود:

$$\ddot{e} + k_{\nu}\dot{e} + k_{p}e = 0 \tag{(TT)}$$

به منظور انتخاب ضرایب $k_p e_v k_v$ میتوان از روش جایدهی قطبها استفاده نمود. برای سیستم مورد نظر، با توجه به ابعاد، اینرسی و ویژگیهای دینامیکی آن، با هدف رسیدن به زمان نشست حدود چهار ثانیه و به صفررساندن فراجهش، مقدار اولیهای برای ضرایب $k_p k_p$ و k_a در نظر گرفته شد. سپس با سعی و خطا و شبیه سازی های متعدد حلقه کنترلی، ضرایب اصلاح گشتند. مقادیر نهایی ضرایب در جدول ۵ نشان داده شده اند. همچنین، مقادیر مورد نظر به عنوان حد اشباع عملگرها، بر اساس موتورهای انتخاب شده در طراحی اولیه، در جدول



Fig. 10. CTM controller block diagram in the joint space form

$$au$$
نيرو يا گشتاور $\left(N, rac{N}{m}
ight)$

$$g$$
 ضریب گرانش $rac{\mathrm{m}}{\mathrm{sec}^2}$

ژاکوبین مجرینهایی Jee

1.

ریب موقعیت موقعیت

$$k_v$$
 ضریب سرعت e_x

$$\dot{e}_x$$
 سرعت خطای ماندگار $\left(egin{array}{c} {m \atop {
m sec}}, {
m rad} \ {
m sec} \end{array}
ight)$

مراجع

(m.rad)

sec

- E. De Schepper, S. Van Passel, J. Manca, T. Thewys, Combining photovoltaics and sound barriers–A feasibility study, Renewable energy, 46 (2012) 297-303.
- [2] C. Dupraz, H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier, Y. Ferard, Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic schemes, Renewable energy, 36(10) (2011) 2725-2732.
- [3] A. Syafiq, A. Pandey, N. Adzman, N. A. Rahim, Advances in approaches and methods for selfcleaning of solar photovoltaic panels, Solar Energy, 162 (2018) 597-619.
- [4] N. M. Kumar, K. Sudhakar, M. Samykano, S. Sukumaran, Dust cleaning robots (DCR) for BIPV and BAPV solar power plants-A conceptual framework and research challenges, Procedia Computer Science, 133(2018) 746-754.
- [5] J. Burgaleta, A. Ternero, D. Vindel, I. Salbidegoitia, G. Azcarrraga, Gemasolar, key points for the operation of the plant, SolarPACES, Marrakech, (2012).
- [6] S. Bushong, Robot Cleans Solar Panels And Protects Efficiency, Dust Wars, (2013).
- [7] D. Deb, N. L. Brahmbhatt, Review of yield

یک کنترلر تناسبی-مشتقگیر-انتگرالی پرداخته شد. نمودارهای خطا و گشتاور حاصل از شبیه سازی های کنترلری، نشان دهنده ی عملکرد مناسب آن می باشد. در ادامه و پس از طراحی مسیر مطلوب جهت جابجایی ربات پاک کننده، کنترلرهای مدل مبنا باتوجه به عملکرد مناسب آن ها مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، به شبیه سازی کنترلرهای ژاکوبین مبنا و ژاکوبین مبنا اصلاح شده که بر مبنای مدل سینماتیکی هستند و همچنین در ادامه به شبیه سازی کنترلر روش گشتاور محاسبه شده که بر مبنای مدل دینامیکی است پرداخته شد. در پایان نتایج عملکردی این کنترلرها با یکدیگر مقایسه و مزایا و معایب هریک بیان گردید.

فهرست علائم:

kg

$$a$$
 b b b a a

جرم هر عضو ممان اینرسی هر عضو

3448

 m_i

 I_{c_i}

and Automation (ICRA), Paris, France, (2020).

- [17] Realizzazioni Robot, Oct 2019. Realizzazioni Wash panel; serie: wp_ SEMOV; Alcuni esempi di soluzioni di lavaggio con sistemi washpanel semoventi, http://www.washpanel. com/realizzazioni.php.
- [18] pv SPIN, Oct 2019. pv SPIN, https://www. yumpu.com/en/document/view/10629569/pv spin-schletter-gmbh.
- [19] Sinfonia Robot, Oct 2019. Sinfonia Robot, https://www.renewableenergyworld. com/2014/11/10/from-module-cleaningrobots-to-flying-drones-japans-growing-solaro-m-market/.
- [20] Hector Robot, Oct 2019. Hector Robot, http://WWW/AEROESPACIAL/ProjectsD/ hectorcleaning-robot-system-for-heliostats/en.
- [21] Ecoppia E4, Aug 2019. Ecoppia: EMPOWERING SOLAR, https://www. ecoppia.com.
- [22] Solarbrush Robot, Oct 2019. Solarbrush. https://www.aerialpower.com/solarbrush/.
- [23] Miraikikai Robot, Aug 2019. Miraikikai, https://WWW/en/mjcompany/miraikikai.html.
- [24] NOMADD Robot, Oct 2019. NOMADD, http://www.nomaddesertsolar.com/.
- [25] John J. Craig, Introduction to Robotics Mechanics and Control. 3rd ed., (2018).
- [26] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar, Robot Modeling and Control. 1st ed.
- [27] M. Hafezipour, E. Saffari, P. Zarafshan, S. A. A. Moosavian, Manipulation control of multi-body free-floating space robot based on software combination, in 2013 First RSI/ ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), (2013) 271-276.
- [28] S. R. Larimi, P. Zarafshan, S. A. A. Moosavian, Stabilized supervising control of a two wheel mobile manipulator, in 2013 First RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), (2013) 265-270.
- [29] A. K. Khalaji, S. A. A. Moosavian, Modified

increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82 (2018) 3306-3313.

- [8] A. Saini, A. Nahar, A. Yadav, D. S. Shekhawat, M. A. Vijayvargiya, Solar Panel Cleaning System, 3(5) (2017).
- [9] A. K. Mondal, K. Bansal, A brief history and future aspects in automatic cleaning systems for solar photovoltaic panels, Advanced Robotics, 29(8) (2015) 515-524.
- [10] Serbot Swiss Innovations. GEKKO Solar Robot; [cited 2019 Aug]. Available from: http://WWW/en/solar-panels-cleaning/gekkosolar-robot." (accessed).
- [11] M. Anderson, Robotic device for cleaning photovoltaic panel arrays, in Mobile Robotics: Solutions and Challenges: World Scientific, (2010) 367-377.
- [12] Ecoppia. EMPOWERING SOLAR; [cited 2019 Aug]. Available from: http://WWW/ products-and-services/." (accessed).
- [13] M. A. Jaradat, A fully portable robot system for cleaning solar panels, in 2015 10th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA), (2015) 1-6.
- [14] D. C. Tranca, D. Rosner, A. V. Palacean, Autonomous flexible low power industrial IoT controller for solar panels cleaning systems, in 2017 21st International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS), (2017) 106-112.
- [15] H. Wang, W. Ren, C. C. Cheah, Y. Xie S. Lyu, Dynamic Modularity Approach to Adaptive Control of Robotic Systems With Closed Architecture, IEEE Transactions on Automatic Control, 65(6) (2020) 2760-2767.
- [16] O. Christidi-Loumpasefski, G. Rekleitis,
 E. Papadopoulos, Concurrent Parameter Identification and Control for Free-Floating Robotic Systems during On-Orbit Servicing, IEEE International Conference on Robotics

Robotics, 24(4) (2010) 605-626.

[31] M. Eslamy, S. A. A. Moosavian, Dynamics and Cooperative Object Manipulation Control of Suspended Mobile Manipulators, Journal of Intelligent & Robotic Systems, 60 (2010) 181–199. transpose Jacobian control of a tractor-trailer wheeled robot, Journal of Mechanical Science and Technology, 29 (2015) 3961–3969.

[30] M. Karimi, S. A. A. Moosavian, Modified transpose effective jacobian law for control of underactuated manipulators, Advanced

براى ارجاع به اين مقاله از عبارت زير استفاده كنيد: F. Hajiahmadi, P. Zarafshan, M. Dehghani, S. A. A. Moosavian, R. Hasan-beygi, Dynamic modeling and control of cleaning robot for agro-photovoltaic, Amirkabir J. Mech. Eng., 53 (6) (2021) 3465-3478. DOI: 10.22060/mej.2021.18404.6810

