

MÔ HÌNH VÀ MÔ PHỎNG THỰC ẢO CƠ CẤU SONG SONG ĐỒNG TRỤC DẠNG HÌNH CẦU

MODELING AND DIGITAL-TWIN SIMULATION OF COAXIAL SPHERICAL PARALLEL MANIPULATOR

LÊ MỸ TRANG^{1,a}, DƯƠNG TẤN ĐẠT¹, NGUYỄN HUY THẢO ANH¹,
ĐÀO NGUYỄN ANH TUẤN¹, NGUYỄN TẤN NÓ¹, LÊ HỒNG KỶ¹

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ Thuật Vĩnh Long

^aTác giả liên hệ: lemytrang9906@gmail.com

Nhận bài(Received): 03/3/2024; Phản biện (Reviewed):17/5/2024; Chấp nhận (Accepted):26/6/2024

TÓM TẮT

Bài báo trình bày một phương pháp mới trong mô hình hóa và mô phỏng thực ảo sử dụng công cụ Simscape Multibody/Matlab cho cơ cấu robot song song đồng trục dạng hình cầu. Các bước thiết lập mô hình mô phỏng, nhập mô hình CAD SolidWorks của robot, mô hình robot kết nối giao tiếp điều khiển thực ảo với Matlab thông qua công cụ Simscape Multibody được trình bày chi tiết trong bài báo. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm chứng minh chuyển động của cơ cấu robot song song đồng trục dạng hình cầu thực tế hoạt động đồng bộ với mô hình mô phỏng, mở ra hướng nghiên cứu mới trong mô phỏng thời gian thực cho các hệ cơ cấu song song đồng trục phức tạp.

Từ khóa: Cơ cấu song song đồng trục dạng hình cầu, mô phỏng thực ảo, mô hình hệ thống robot, Simscape multibody/Matlab.

ABSTRACT

This paper presents a novel method for modeling and digital twin simulation using Simscape Multibody/Matlab tools for a coaxial spherical parallel mechanism robot. The steps for setting up the simulation model, importing the SolidWorks CAD model of the robot, and establishing the virtual control interface between Matlab and the robot model through Simscape Multibody tool are detailed in the paper. The simulation and experimental results demonstrate that the motion of the coaxial spherical parallel mechanism robot operates synchronously with the simulation model, opening up new avenues for digital twin simulation research for complex parallel mechanism systems.

Keywords: Coaxial spherical paralalled mechanism, Digital-twin, robot system modeling, Simscape Multibody/Matlab.

1. GIỚI THIỆU

Cơ cấu song song có kiến trúc các khâu động học liên kết với nhau theo vòng kín, trong đó mặt để được điều khiển chuyển động, nó được kết nối với

mặt nền thông qua hai hoặc nhiều khâu [1]. Nhờ kết cấu song song, nên chúng thường có khả năng chịu tải trọng cao, nhanh, chắc chắn và chính xác hơn so với các cơ cấu vòng hở cùng chức năng nên

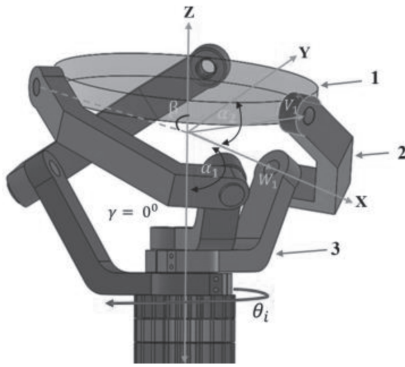
được ứng dụng trong các hệ thống robot gấp thả đối tượng, bộ phận định hướng và cố định đối tượng, thiết bị theo dõi [2-4]...Tuy nhiên, chúng còn tồn tại một số khuyết điểm như: không gian làm việc nhỏ, độ phức tạp của chuyển động, với những nhược điểm này làm cho việc kiểm soát điều khiển hoạt động, mô phỏng cơ cấu khó khăn, đặc biệt là xác định vùng không gian làm việc.

Công cụ mô phỏng được sử dụng rộng rãi trong các nhiệm vụ mô hình động học và động lực học robot, dùng để tối ưu hóa chuyển động, ước lượng không gian làm việc, và xác định chiến lược điều khiển, các công cụ mô phỏng phổ biến như là Gazebo [5] được phát triển bởi Open Source Robotics Foundation và được sử dụng trong cuộc thi DARPA Robotics Challenge [6]. Công cụ mô phỏng robot mã nguồn mở phổ biến khác là Webots [7] được phát triển bởi Cyberbotics Ltd chủ yếu để mô phỏng robot di động... Trong đó mô phỏng thực ảo (Digital-twin) là một lĩnh vực được liên tục quan tâm trong nhiều ngành công nghiệp, có nhiều nghiên cứu về phương pháp này đã được công bố, trong đó có một số bài đánh giá như [8],[9]. Mô phỏng thực ảo đề cập đến bản sao ảo hoặc mô hình của bất kỳ thực thể vật lý nào cả hai đều được kết nối thông qua trao đổi dữ liệu trong thời gian thực [10]. Ứng dụng của mô phỏng thực ảo bao gồm: giám sát thời gian thực, thiết kế, lập kế hoạch, tối ưu hóa, bảo trì, truy cập từ xa, [11-13] v.v. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu tập trung vào các hoạt động dây chuyền sản xuất, chưa xem xét cụ thể về ảnh hưởng của tác động mô hình lý thuyết động học, động lực học của hệ thống đến hoạt động của đối tượng mô phỏng.

Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu trình bày phương pháp mô hình hóa và mô phỏng thực ảo cho cơ cấu robot song song dạng hình cầu đồng trục. Đây là một trường hợp đặc biệt của một robot song song hình cầu có 3 bậc tự do, có khả năng xoay vô hạn quanh bất kỳ trục nào trong không gian làm việc của nó. Do có khả năng nhanh chóng tạo ra các mô hình của các hệ thống vật lý trong môi trường Simulink, nên công cụ Simscape Multibody được chọn làm công cụ xây dựng hệ thống hỗ trợ tương tác mô phỏng. Kết quả của nghiên cứu này là nền tảng cho việc phát triển thuật toán điều khiển chuyển động cho robot song song. Hơn nữa, phương pháp được trình bày trong bài báo này có thể được áp dụng vào việc mô hình hóa các cơ cấu robot song song chuyển động phức tạp khác.

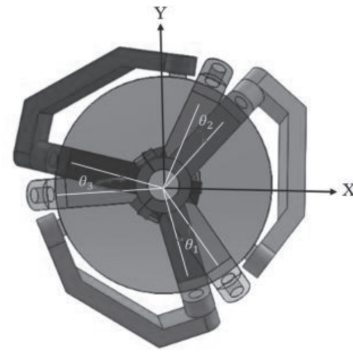
2. MÔ HÌNH ĐỘNG HỌC

Phân tích chuyển động của cơ cấu song song dạng hình cầu bắt nguồn từ chuyển động chung của cơ cấu robot song song được công bố trong các nghiên cứu trong [14-17]. Mặt đế trên của cơ cấu được gọi là mặt phẳng di động (hay mặt phẳng làm việc), được kết nối với mặt đế cố định thông qua 3 chân cách đều nhau được đánh số lần lượt $i = 1, 2, 3$ theo hướng ngược chiều kim đồng hồ, và mỗi chân gồm hai khâu liên kết có hình dạng cong: khâu dưới và khâu trên và góc α_1, α_2 đại diện cho độ cong của hai khớp này. Trục của các khớp mặt đế cố định, các khâu trung gian và mặt đế di động cắt nhau tại tâm quay và được xác định lần lượt bởi các vector đơn vị u_i, w_i và v_i , có hướng từ trung tâm quay theo hướng các khớp tương ứng.



Hình 1a. Hệ tọa độ trong robot

Hệ tọa độ tuân theo quy tắc bàn tay phải với gốc tọa độ là tâm quay được thể hiện như hình 1a. Trục z có phương vuông góc với mặt đế có chiều hướng lên trên theo tâm của trục xoay đồng trục cơ cấu, trong khi trục x được tạo thành bởi trục z và mặt phẳng thẳng đứng được tạo thành bởi khâu dưới khi robot ở vị trí góc, trục y được xác định theo quy tắc bàn tay phải. Góc β thể hiện sự nghiêng của các khớp v_i trên mặt phẳng di động so với trục z. Vị trí góc của cơ cấu robot song song được chọn sao cho ba khâu dưới cách nhau một góc 120° . Trong trường hợp này mặt phẳng làm việc nằm ngang, vuông góc và nằm bên phía phần dương của trục z. Đầu vào của các vị trí khớp bao gồm vector $\theta = [\theta_1; \theta_2; \theta_3]^T$ được đo từ các mặt phẳng được xác định bởi trục z và các vector đơn vị w_i với $i = 1; 2; 3$ tại cấu hình ban đầu đến các mặt phẳng của các liên kết gần nhất của các chân tương ứng với hướng kim đồng hồ là chiều dương như được minh họa trong hình 1b. Ở cấu hình ban đầu, vector của các vị trí khớp được đặt thành $\theta = [0; 0; 0]^T$. Sau khi mô hình hình học của cánh tay máy đã được xác định, mô hình động học của nó có thể được suy ra với tất cả các mối quan hệ toán học giữa không gian Descartes và không gian khớp. Trong [18], đã được chỉ ra rằng loại cơ cấu



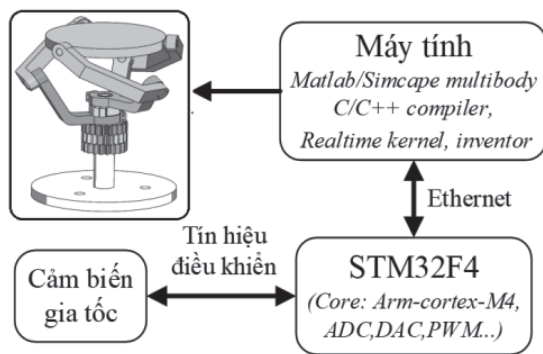
Hình 1b. Chiều dương của các khớp điều khiển

này có 8 phương pháp giải các bài toán động học chuyển tiếp và 8 phương pháp giải quyết các bài toán động học nghịch. Những phương pháp này đã được phân tích bởi các nghiên cứu trong các trường hợp của SPM đồng trục [19].

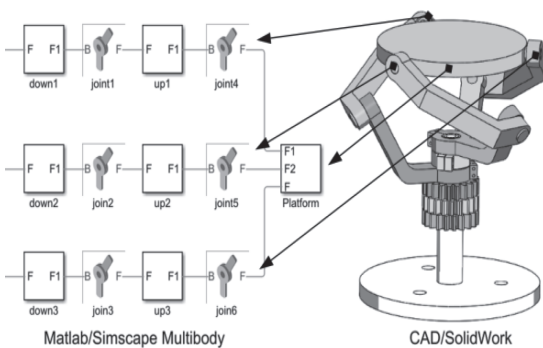
3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH MÔ PHỎNG

Mô phỏng thực ảo được xây dựng để kiểm tra hiệu suất của hệ thống điều khiển, cho phép phát triển các ứng dụng phức tạp kết hợp giữa phần thực với thành phần ảo trong quá trình điều khiển. Thông thường, trong mô phỏng thực ảo, thành phần thực là các bộ phận cần điều khiển, thành phần ảo là các bộ điều khiển và chúng có mối liên hệ vật lý với nhau. Bộ điều khiển được kết nối với mô hình thông qua các chuẩn truyền thông. Trong nghiên cứu này, mô phỏng thực ảo được xây dựng như hình 2, bao gồm ba thành phần chính: máy chủ, thiết bị tớ, và phần cứng thực tế.

Máy chủ: là máy tính đã được cài đặt phần mềm thiết kế cơ khí SolidWork, Matlab/simscape multibody, Real-time workshop, C/C++ compiler. Simscape multibody cho phép tham số hóa các mô hình thực tế bằng các biến và biểu thức trong Matlab, giúp thiết kế, thay đổi hệ thống dễ dàng trong môi trường Matlab/simulink.



Hình 2. Các thành phần chính của mô phỏng



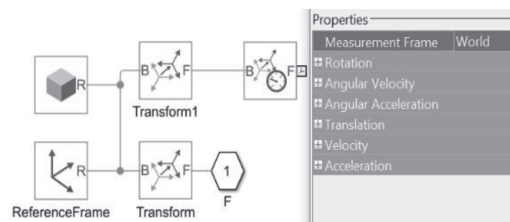
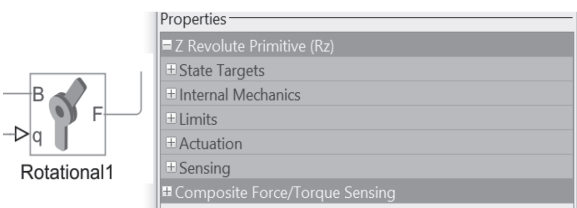
Hình 3. Mô hình CAD và simulink

Ta có thể tích hợp hệ thống thủy lực, điện, khí nén và cả hệ thống vật lý khác vào mô hình đang xây dựng bằng các khối có trong thư viện. Thiết bị tốt: là board vi điều khiển STM32F4 thu thập tín hiệu từ cảm biến gia tốc và truyền thông với máy

tính chủ qua chuẩn truyền ethernet. Phần cứng thực tế: là cơ cấu cơ khí sáu bậc tự do, tích hợp cảm biến gia tốc, cho phép đo được sáu thông số thay đổi của vật thể trong không gian.

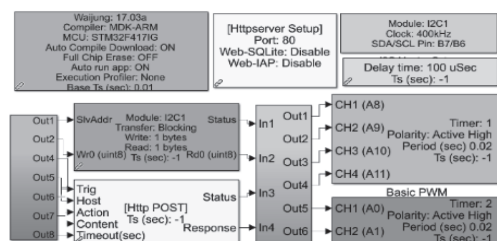
Mô hình CAD được thiết kế bằng phần mềm Solidwork với kích thước, vật liệu và cấu trúc được thực hiện giống với mô hình thực tế. Simscape multibody hỗ trợ biên dịch các chi tiết sau khi thiết kế, lắp ráp thành file có định dạng (.xml) tương ứng, sau đó được mở bằng Matlab/simulink. Trong môi trường simulink, thư viện Simscape hỗ trợ nhiều khối khác nhau, trong đó có các khối cơ bản: Rotational mô tả khớp xoay của robot, khối body mô tả các khâu, khối frame tương ứng với hệ tọa độ của robot (hình 3). Từ các khối Simulink này, cho phép ta thay đổi các thông số vật lý của chi tiết giống thực tế như: kích thước, khối lượng, momen quán tính...

Trong khối Rotational ta có thể cài đặt các giá trị cho khớp như: góc, vận tốc góc, gia tốc góc, momen... Ngoài ra, thuộc tính sensing còn cho phép ta đo ngược lại các giá trị đó.

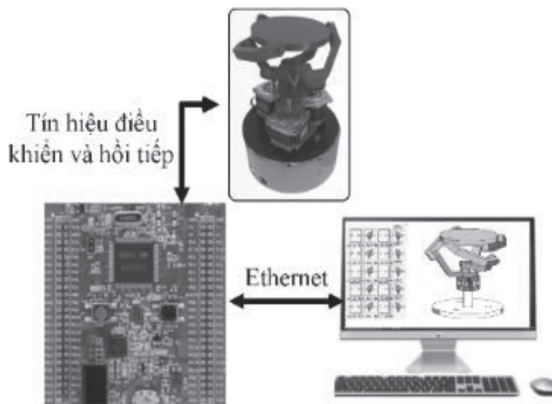


Hình 4. Thuộc tính của các khối trong Simscape

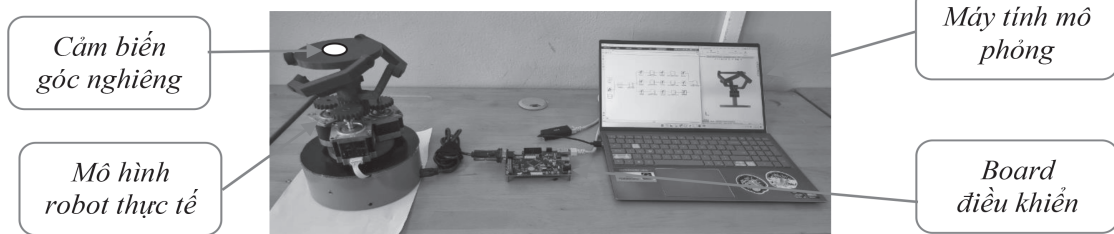
Khối Transform thường được liên kết với khối body (hình 4), và được hiểu như một hệ tọa độ gắn lên một khâu của robot, nếu truy cập vào thuộc tính của khối này, ta có thể đo được các thông số vật lý của khâu như: độ dịch chuyển tịnh tiến, các góc quay roll-pitch-yaw...



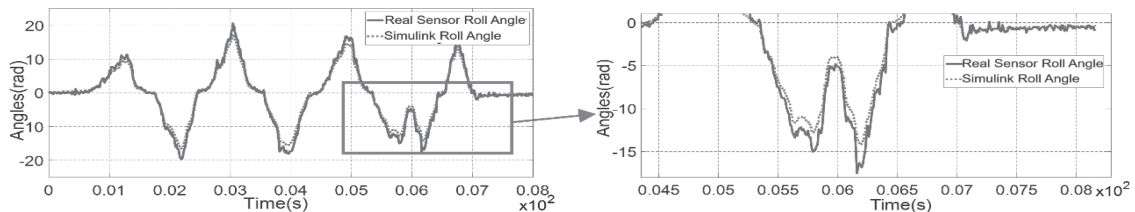
Hình 5: Chương trình board STM32F4



Hình 6: Mô hình thực nghiệm

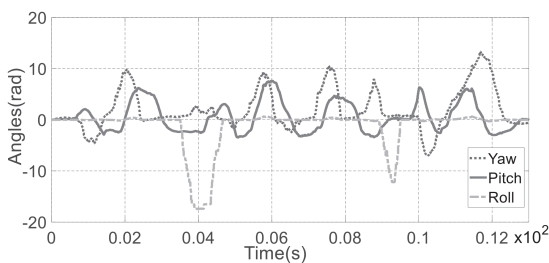


Hình 7. Mô hình thực nghiệm thực tế



Hình 8. Góc roll cảm biến gia tốc thực tế và đáp ứng góc roll của tín hiệu robot từ mô phỏng

Hình 8 mô tả đáp ứng góc roll của robot so với tín hiệu góc roll lấy trực tiếp từ cảm biến gia tốc, ta thấy robot chuyển động bám sát với tín hiệu thực tế, sai số lớn nhất chỉ xảy ra ở các thời điểm có vận tốc góc đổi dấu. Chuyển động xoay ba góc roll-pitch-yaw của robot khi nhận tín hiệu từ cảm biến gia tốc được thể hiện ở đồ thị hình 9.



Hình 9. Chuyển động xoay

4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Mô hình thực nghiệm bao gồm 3 thành phần: máy tính, board điều khiển và mô hình robot song song thực tế được mô tả trong hình 7. Để kiểm tra đáp ứng của hệ thống, bộ điều khiển truyền tín hiệu thay đổi các góc quay các khớp, đồng thời truyền tín hiệu từ cảm biến gia tốc được gắn trên mặt đế đến phần mềm Matlab, phần mềm mô phỏng Simulink/Matlab nhận tín hiệu từ board điều khiển đồng thời so sánh với tín hiệu đo được từ mô hình mô phỏng.

5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu đã xây dựng thành công mô hình mô phỏng thực ảo cho cơ cấu robot song song dạng hình cầu. Hoạt động của robot được thử nghiệm với sự thay đổi các góc xoay 3 khớp, với góc nghiêng được đo từ công cụ mô phỏng và cảm biến gia tốc thực tế được lắp đặt trên mặt phẳng làm việc của robot đồng thời kết quả cho thấy hoạt động đồng bộ từ mô hình thực tế với mô hình mô phỏng. Trong tương lai, nhóm nghiên cứu dự định phát triển và thử nghiệm tiếp mô phỏng điều khiển hướng dựa trên những mô hình động học, động lực học đã được

xây dựng trước và kiểm tra độ cứng vững của cơ cấu khi chuyển động. Một ý tưởng khác là tiền đề cho các nghiên cứu cao hơn trong lĩnh vực xây dựng các hệ thống tương tác thực ảo đòi hỏi độ chính xác và tin cậy cao như ô tô, tên lửa, tàu ngầm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] L. Rey and R. Clavel, “*The Delta parallel robot*,” in *Parallel Kinematic Machines*, pp. 401–417, Springer London, 1999.
- [2] D. Stewart, “*A platform with six degrees of freedom*,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 180, no. 1, pp. 371–386, 1965.
- [3] C. Gosselin and J.-F. Hamel, “*The Agile Eye: a high-performance three-degree-of-freedom camera-orienting device*,” in *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 1994)*, pp. 781–786, 1994.
- [4] C. Gosselin and J. Angeles, “*Singularity analysis of closed-loop kinematic chains*,” *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 281 – 290, 1990.
- [5] N. Koenig and A. Howard, “*Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator*,” in *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2004.
- [6] E. Krotkov, D. Hackett, L. Jackel, M. Perschbacher, J. Pippine, J. Strauss, G. Pratt, and C. Orłowski, “*The DARPA robotics challenge finals: Results and perspectives*,” in *Springer Tracts in Advanced Robotics*, pp. 1–26, Springer International Publishing, 2018.
- [7] O. Michel, “*Webots: Professional mobile robot simulation*,” *Journal of Advanced Robotics Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 39–42, 2004.
- [8] Fei TAO, Bin Xiao, Quinglin Qi, Jiang Cheng, Ping Ji, “*Digital twin modeling*,” *Journal of Manufacturing Systems*, Vol 64, 371-389, 2022.
- [9] Singh, M.; Fuenmayor, E.; Hinchy, E.P.; Qiao, Y.; Murray, N.; Devine, D. “*Digital Twin: Origin to Future*”. *Appl. Syst. Innov.* 2021.
- [10] Itxaro Errandonea, Sergio Beltrán, Saioa Arrizabalaga, “*Digital Twin for maintenance: A literature review*”, *Computers in Industry*, Volume 123, 2020, 103316,
- [11] Wenjie Jia, Wei Wang, Zhenzu Zhang, “*From simple digital twin to complex digital twin*”, *Advanced Engineering Informatics*, Volume 53, 2022, 101706.
- [12] Hassani, H.; Huang, X.; MacFeely, S. “*Impactful Digital Twin in the Healthcare Revolution*”. *Big Data Cogn. Comput.* 2022, 6, 83.
- [13] Zhang, R., Wang, F., Cai, J. et al. “*Digital twin and its applications: A survey*”. *Int J Adv Manuf Technol* 123, 4123–4136 (2022).
- [14] C. Gosselin and E. Lavoie, “*On the kinematic design of spherical threedegree-of-*

freedom parallel manipulators,” The International Journal of Robotics Research, vol. 12, no. 4, pp. 394–402, 1993.

- [15] S. Bai and M. R. Hansen, “*Forward kinematics of spherical parallel manipulators with revolute joints*,” International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2008.
- [16] A. Shintemirov, A. Niyetkaliyev, and M. Rubagotti, “*Numerical optimal control of a spherical parallel manipulator based on unique kinematic solutions*,” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 21, no. 1, pp. 98–109, 2016.
- [17] T. Taunyazov, M. Rubagotti, and A. Shintemirov, “*Constrained orientation control of a spherical parallel manipulator via online convex optimization*,” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 23, no. 1, pp. 252–261, 2018.
- [18] C. M. Gosselin, J. Sefrioui, and M. J. Richard, “*On the direct kinematics of spherical three-degree-of-freedom parallel manipulators of general architecture*,” Journal of Mechanical Design, vol. 116, no. 2, pp. 594–598, 1994.
- [19] I. Tursynbek, A. Niyetkaliyev, and A. Shintemirov, “*Computation of unique kinematic solutions of a spherical parallel manipulator with coaxial input shafts*,” in 2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), pp. 1524–1531, IEEE, 2019.