

PHÁT TRIỂN THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN VỚI GIAO TIẾP MẠNG TRONG HỆ THỐNG ROBOT

DEVELOP THE CONTROL ALGORITHM WITH NETWORK COMMUNICATION IN ROBOTICS SYSTEM

Nguyễn Khải Ân^{1,2}, Ngô Hà Quang Thịnh^{1,2}

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

²Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

TÓM TẮT

Trong các hệ thống công nghiệp, có nhiều phương pháp điều khiển đã được phát triển trong những các hệ thống servo như máy CNC hoặc rô bốt công nghiệp. Trong bài báo này, điều khiển qua mạng để đạt được hiệu suất thời gian thực cho hệ thống robot được đề xuất. Đầu tiên, các khái niệm cơ bản và định nghĩa về mạng công nghiệp được trình bày. Tiếp theo, cấu trúc của nền tảng phần cứng cũng như sơ đồ thiết kế được giới thiệu. Phần mềm triển khai để quản lý và xử lý các dữ liệu. Để xác minh cách tiếp cận được đề xuất, một hệ thống thử nghiệm được đưa ra để các chức năng điều khiển servo có thể được triển khai. Từ những kết quả này đã làm rõ rằng hiệu quả và tính khả thi của thiết kế và kiểm soát của chúng tôi phù hợp với ứng dụng công nghiệp.

Từ khóa: *Index Terms - EtherCAT; Điều khiển thời gian thực; Robotics; Giao thức Ethernet; Hệ thống servo.*

ABSTRACT

In the industrial systems, many control methods have been developed for servo systems such as CNC machines or industrial robots. In this paper, network control to achieve real-time performance for the robotic system is proposed. Firstly, the basic concepts and definitions of industrial networking are presented. Secondly, the structure of the hardware platform as well as the design diagram is introduced. To verify the proposed approach, the test system is established so that servo control functions can be implemented. From these results, it could be seen clearly that the efficiency and feasibility of our design and control are suitable for industrial applications.

Keywords: *Index Terms-EtherCAT; Real-time control; Robotics; Ethernet protocol; Servo system.*

1. PHẦN GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, fieldbus hiện là một giải pháp tuyệt vời cho công nghệ tiêu chuẩn trong tự động hóa. Đầu vào/đầu ra phân tán (I/Os) đã thay thế hệ thống dây song song thành thẻ I/O tập trung trong hầu hết các ứng dụng. Người dùng được hưởng lợi từ chân đo án được cải thiện, cài đặt đơn giản và ít dây hơn. Có một số tiêu chuẩn giao tiếp trong ngành như CANOpen [1], Modbus TCP [2], Profibus [3] hoặc DeviceNet [4]. Công nghệ Fieldbus cho phép các ứng dụng trên diện rộng của các hệ thống điều khiển dựa trên máy tính. Trong khi hiệu suất của bộ điều khiển CPU - đặc biệt là máy tính công nghiệp (IPC) - đang tăng lên nhanh chóng, các hệ thống bus trường thông thường đã trở thành một vấn đề hạn chế hiệu quả của hệ thống điều khiển. Một yếu tố khác là cấu trúc điều khiển phân lớp, bao gồm một số hệ thống cấp dưới (thường là theo chu kỳ): tác vụ điều khiển thực tế (PLC task [5]), hệ thống fieldbus, và có thể cả các bus mở rộng địa chỉ, cục bộ vào I/O hệ thống hoặc đơn giản là chu trình phần mềm cục bộ trong các thiết bị ngoại vi. Thời gian đáp ứng thường cao hơn 3-5 lần so với thời gian chu kỳ điều khiển - một giải pháp không đạt yêu cầu.

Trên mức hệ thống fieldbus - tức là bộ điều khiển mạng - Ethernet đã thực sự trở thành công nghệ tiên tiến nhất hiện có [6]. Các ứng dụng Ethernet ở cấp I/O, ô đĩa đã được sở hữu bởi các hệ thống fieldbus trong quá khứ. Yêu cầu chính đối với loại ứng dụng này là khả năng đáp ứng thời gian thực cao, phù hợp với lượng dữ liệu lớn, nhỏ và tất nhiên, hiệu quả về chi phí. EtherCAT đáp ứng những nhu cầu này và đồng thời cung cấp công nghệ internet ở cấp độ I/O [7, 8].

Công nghệ EtherCAT khắc phục những

hạn chế hiện có của các giải pháp Ethernet công nghiệp khác [9, 10]: các Ethernet packets không được nhận nữa, sau đó được giải mã với dữ liệu đã xử lý và sau đó được sao chép vào từng thiết bị. Tại đây, các thiết bị EtherCAT slaves đọc dữ liệu được gửi đến chúng trong khung di chuyển qua các nút. Tương tự như vậy, dữ liệu đầu vào được thêm vào trong khi các bức điện đang truyền đi. Các khung hình hầu như không có độ trễ (vì độ trễ chỉ mất vài nano giây). Khung được gửi bởi đường truyền chính tới thiết bị tiếp theo cho đến khi nó đến cuối phân đoạn này [11]. Thiết bị cuối cùng tìm thấy một công đang mở và gửi lại khung cho chính.

EtherCAT không nhanh hơn đáng kể so với các hệ thống fieldbus truyền thống nhưng nó là nhanh nhất trong số các giải pháp Ethernet công nghiệp. Thời gian chu kỳ EtherCAT điển hình là 50-250 μ s, trong khi hệ thống fieldbus truyền thống mất từ 5-15 ms để cập nhật [12]. EtherCAT làm cho sức mạnh xử lý của máy tính công nghiệp có sẵn cho các ứng dụng, điều khiển nhanh hơn mang lại kết quả chính xác hơn.

EtherCAT cũng rất chính xác. Đồng hồ đo phân phối của nó cho phép lấy mẫu giá trị đo và thiết lập đầu ra trong một mạng rộng được đồng bộ hóa. Jitter nhỏ hơn 1 micro giây. Trong hầu hết các trường hợp, độ lệch thậm chí nhỏ hơn 100 nano giây [13]. Độ chính xác này lý tưởng cho các ứng dụng chuyển động đồng bộ và tích hợp các nhiệm vụ đo lường trong cùng một mạng.

EtherCAT cũng không tốn nhiều tiền [14]. Một phần nó có phần mềm được triển khai trên máy chủ trên công EtherCAT tiêu chuẩn, một phần là do chip điều khiển nô lệ giá rẻ. Về cáp truyền thông cũng tiết kiệm chi phí,

EtherCAT không yêu cầu thiết bị chuyên mạch hoặc các thành phần cơ sở hạ tầng hoạt động khác và sử dụng cáp và đầu nối tiêu chuẩn.

Về mặt kỹ thuật cũng giảm vì không cần điều chỉnh mạng, các tính năng chẩn đoán của công nghệ này cung cấp vị trí lỗi chính xác và yêu cầu ít thời gian khắc phục sự cố hơn.

Trong bài báo này, một cách tiếp cận mới trong việc phát triển điều khiển thời gian thực cho hệ thống sản xuất được trình bày. Mục đích của phương pháp của chúng tôi là tạo ra một đơn vị mô-đun, bộ điều khiển đa chức năng để điều khiển có độ tin cậy cao và mạnh mẽ. Ban đầu, khuôn khổ của hệ thống điều khiển chuyên động dựa trên EtherCAT được đề cập. Sau đó, thiết kế phần cứng được minh họa để khởi chạy giản đồ ứng viên. Sau đó, cấu trúc phần mềm của giao thức trao đổi dữ liệu và truyền thông được trình diễn. Do đó, từ thiết kế đề xuất, nó được xác thực trong nhiều kịch bản thực tế để cho thấy tính hiệu quả, tính khả thi và các ứng dụng có thể có trong ngành công nghiệp thế giới thực. Phần còn lại của bài báo này được tổ chức như sau. Phần 2 thường đưa ra các khái niệm và định nghĩa cơ bản về hệ thống mạng. Việc triển khai phần cứng trong nền tảng thực tế được mô tả trong Phần 3. Các thành phần phần mềm cùng với giao tiếp dữ liệu được tiết lộ trong Phần 4. Kết quả công việc của chúng tôi được trình bày trong Phần 5 để có thể dễ dàng thấy được lợi ích và hiệu suất vượt trội trong hệ thống được đề xuất. Cuối cùng, một số kết luận trong Phần 6 được thực hiện để tập trung vào các thông số kỹ thuật mạnh mẽ.

2. KIẾN TRÚC CỦA GIAO THỨC MẠNG

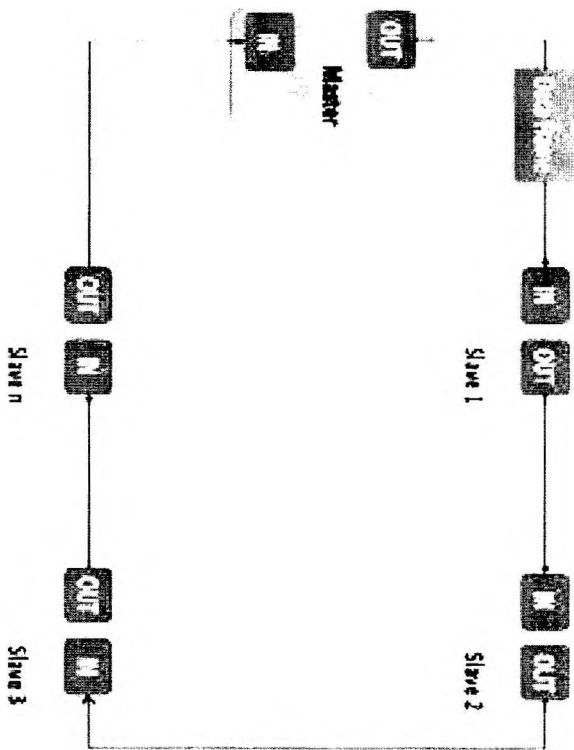
Giao thức EtherCAT cơ bản như Hình 1 chỉ hỗ trợ một Master, giao tiếp với nhiều Slaves. Trong mỗi chu kỳ, Master truyền 1

khung dữ liệu chỉ trong 1 chu kỳ và chứa tất cả dữ liệu điều khiển cho các Slaves, đây là lý do chính khiến tốc độ truyền của EtherCAT thấp tới 0,05 ms. Cách tiếp cận này giúp đảm bảo hoạt động theo thời gian thực và tránh sự chậm trễ. Mỗi thiết bị EtherCAT xử lý khung dữ liệu liên quan của nó một cách nhanh chóng và thêm dữ liệu của nó vào khung dữ liệu khi nó di chuyển trên mạng. Mạng EtherCAT không yêu cầu thiết bị chuyên mạch trong mạng. Mỗi thiết bị EtherCAT thường có hai cổng Ethernet, cổng đầu tiên là cổng nhận để kết nối thiết bị trước đó và cổng thứ hai để kết nối với thiết bị tiếp theo trong mạng. Khi ở chế độ chân, bánh xe quay sẽ hoạt động giống như một con lắc ngược ở mỗi bước. Gọi n là số chốt trên bánh xe và các đại lượng được ký hiệu như trong Hình 2.

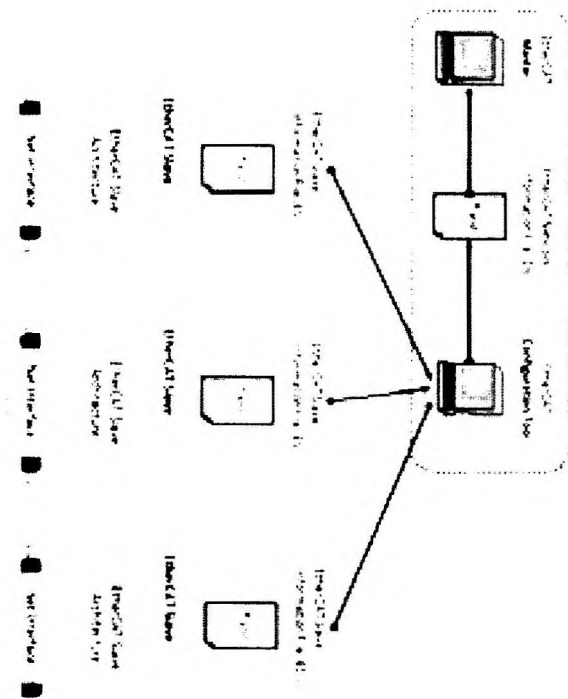
EtherCAT master sử dụng cổng Ethernet và thông tin cấu hình mạng được lưu trữ trong tệp EtherCAT Network Information (ENI) như Hình 2. ENI được tạo dựa trên các tệp EtherCAT Slave Information (ESI) do nhà sản xuất cung cấp cho mỗi thiết bị. Các nô lệ được kết nối qua Ethernet, bất kỳ cấu trúc liên kết nào cũng có thể được sử dụng cho EtherCAT. Slave liên kết đến master thông qua một tệp XML được cung cấp bởi nhà sản xuất hoặc người dùng đã xác định một tệp.

2.1. Master station

Phần cứng duy nhất được yêu cầu cho EtherCAT Master là một bộ điều khiển với tiêu chuẩn giao tiếp EtherCAT với tiêu chí NIC, 100 Mbit/s Full duplex. Trong công nghiệp, người dùng thường sử dụng IPC của Beckhoff làm Master. Trong nghiên cứu, nhà nghiên cứu đã sử dụng nền tảng TwinCAT để làm cho bộ điều khiển chạy trực tiếp trên máy tính và sau đó máy tính là Master.



Hình 1. Mô tả kết nối mạng



Hình 2. Cấu trúc của kết nối mạng

Phần mềm được sử dụng để lập trình và điều khiển là nền tảng TwinCAT 3 (hoặc TwinCAT 2) được tích hợp trong Visual Studio.

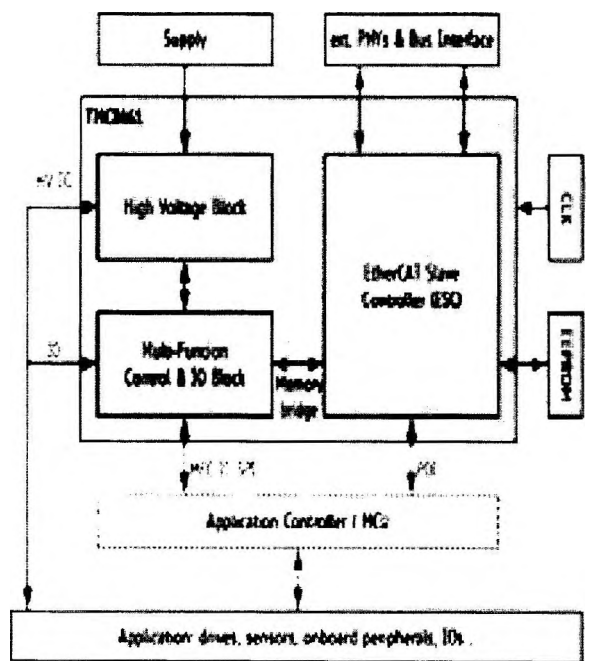
2.2. Slaves station

Có ba thành phần chính như:

- Physical layer (PL): giao diện mạng.
- Data link layer (DL): bộ điều khiển nô lệ EtherCAT và EEPROM.
- Application layer (AL): bộ điều khiển ứng dụng hoặc vi điều khiển.

3. ĐẶC ĐIỂM KỸ THUẬT PHẦN CỨNG

Để chứng minh mức độ phần cứng, một bảng thử nghiệm như Hình 3 được thiết kế để đánh giá tất cả các tính năng của bộ điều khiển nô lệ EtherCAT. Nó có thể được sử dụng làm mô-đun giao diện bus cho các ứng dụng công nghiệp.



Hình 3. Sơ đồ khối bảng đánh giá

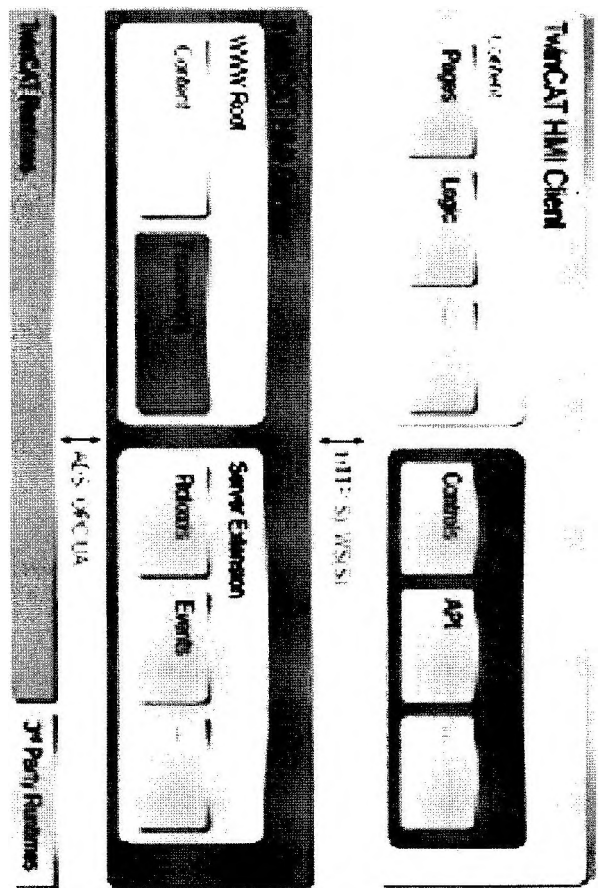
Trong thiết kế này, vai trò quan trọng là IC TMC8461 được nhúng công nghệ EtherCAT. Nó cho phép truyền khung dữ liệu với giao thức truyền thông nhanh chóng, có độ tin cậy cao và các chân đầu vào/đầu ra khác nhau. Ngoài ra, nó hỗ trợ giao diện giao tiếp với các IC khác thông qua tiêu chuẩn SPI. Có hai cổng RJ45 để kết nối mạng bằng dây LAN. Bên cạnh đó, bo mạch này cho phép dễ dàng truy cập vào tất cả các chức năng của chip thông qua các đầu cắm và đầu nối chân pin.

4. GIAO DIỆN PHẦN MỀM

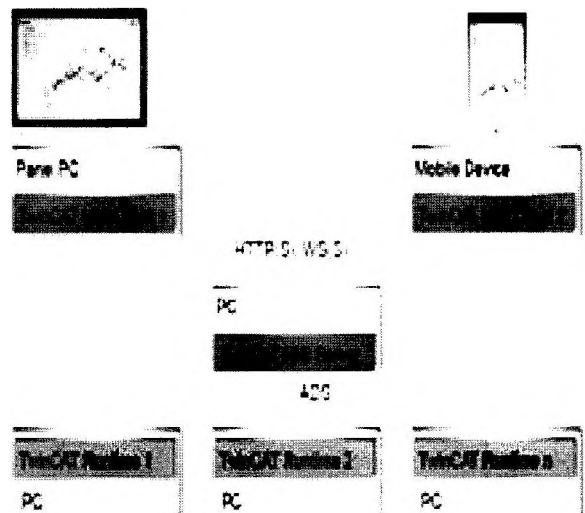
Máy chủ HMI TwinCAT như Hình 4 là một máy chủ web được phát triển bởi Beckhoff. Nó độc lập với nền tảng và không dựa vào bất kỳ chức năng máy chủ web nào của hệ điều hành. Thông qua phần mở rộng máy chủ, nó có thể cung cấp các chức năng bổ sung như hệ thống báo cáo hoặc các giao thức khác. TwinCAT HMI Server hỗ trợ giao thức TwinCAT ADS và do đó có thể giao tiếp với tất cả các thiết bị TwinCAT.

Máy chủ HMI TwinCAT có thể giúp liên kết nhiều Clients vào Bộ điều khiển EtherCAT như Hình 5, và thậm chí các Clients có thể liên kết với nhiều thời gian chạy TwinCAT của TwinCAT.

Kiến trúc của các thành phần phần mềm được mô tả như Hình 6. Sự tích hợp trong ngôn ngữ C/C++ hoặc bộ mã hóa Simulink làm cho nó có thể lập trình các đối tượng tự động hóa song song với sự hỗ trợ của Microsoft Visual Studio. Các đối tượng (mô-đun) được tạo ra có thể trao đổi dữ liệu với nhau và gọi nhau một cách độc lập với ngôn ngữ mà chúng được viết.



Hình 4. Sơ đồ của TwinCAT HMI Server

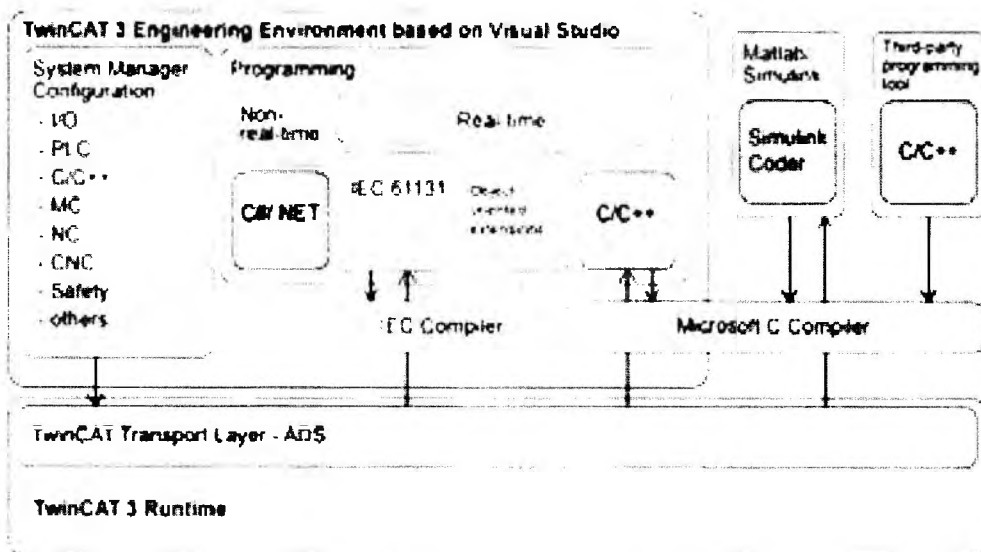


Hình 5. Sơ đồ TwinCAT HMI Server-Multi-runtime

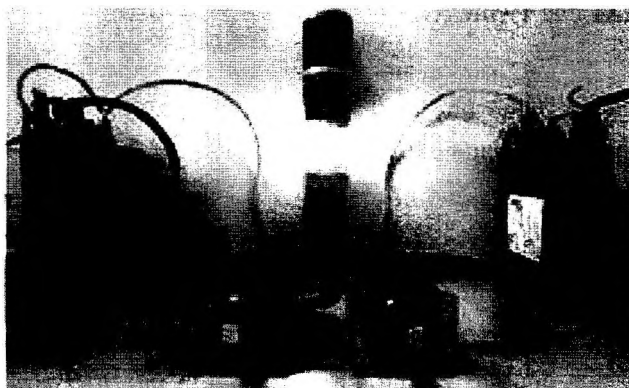
5. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM XÁC MINH

Để xác minh hiệu suất cao của phương pháp tiếp cận của chúng tôi, nền tảng tổng thể được khởi chạy trong kịch bản thực tế như Hình 7. Hệ thống servo phải hỗ trợ giao thức truyền thông dựa trên EtherCAT, được liên kết với bộ điều khiển chuyên động qua cáp LAN. Ba đèn LED cũng được kết nối với hệ thống này để cho biết trạng thái lái xe. Trong mỗi khoảng thời gian lấy mẫu, dữ liệu được truyền đến servo và nhận thông tin phản hồi đến bộ điều khiển máy chủ.

Kết quả thử nghiệm từ hệ thống servo được đề xuất được minh họa trong Hình 8. Mục đích của thử nghiệm này là đo lỗi đồng bộ hóa giữa hai bộ truyền động servo. Để có được hiệu suất theo dõi, khung dữ liệu được trao đổi liên tục giữa chủ và nô lệ. Tại thời điểm đó, các giá trị so sánh giữa hai nô lệ được tính toán trong mỗi chu kỳ servo. Cả hai kết quả này bao gồm theo dõi vận tốc và lỗi đồng bộ hóa, được hiển thị để ước tính hiệu suất cao của hệ thống được đề xuất trong các xác nhận thực tế.



Hình 6. Sơ đồ khối của các thành phần phần mềm



Hình 7. Thử nghiệm thực tế trên hệ thống servo bằng cách sử dụng phương pháp được đề xuất

TP. Hồ Chí Minh cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 07/02/2022

Ngày phản biện: 17/02/2022

Tài liệu tham khảo:

[1]. Lee, F. S., Lin, C. I., Chen, Z. Y., & Yang, R. X. (2021). Development of a control architecture for a parallel three-axis robotic arm mechanism using CANopen communication protocol. *Concurrent Engineering*, 29(3), 197-207.

[2]. Yusheng, W., Kefeng, F., Yingxu, L., Zenghui, L., Ruikang, Z., Xiangzhen, Y., & Lin, L. (2017, March). Intrusion detection of industrial control system based on Modbus TCP protocol. In 2017 IEEE 13th International Symposium on Autonomous Decentralized System (ISADS) (pp. 156-162). IEEE.

[3]. Gabor, G., Pintilie, C., Dumitrescu, C., Costica, N., & Plesca, A. T. (2018, October). Application of Industrial PROFIBUS-DP Protocol. In 2018 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE) (pp. 0614-0617). IEEE.

[4]. Murvay, P. S., & Groza, B. (2018, November). A brief look at the security of DeviceNet communication in industrial control systems. In *Proceedings of the Central European Cybersecurity Conference 2018* (pp. 1-6).

[5]. Lin, H. Y., Cheng, I. W., Huang, Y. H., Liu, H. C., Lin, Y. H., Yang, C. Y., ... & Chen, Y. J. (2018, June). Applying Socket on Connecting EtherCAT and OpenPLC. In 2018 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE) (pp. 1-5). IEEE.

[6]. Langlois, K., van der Hoeven, T., Cianca, D. R., Verstraten, T., Baeck, T., Convens, B., ... & Vanderborght, B. (2018). Ethercat tutorial: An introduction for real-time hardware communication on windows [tutorial]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 25(1), 22-122.

[7]. Park, S. M., Kim, H., Kim, H. W., Cho, C. N., & Choi, J. Y. (2017). Synchronization improvement of distributed clocks in EtherCAT networks. *IEEE Communications Letters*, 21(6), 1277-1280.

[8]. Park, S. M., Kim, H. W., Kim, H. J., & Choi, J. Y. (2020). Accuracy improvement of master-slave synchronization in EtherCAT networks. *IEEE Access*, 8, 58620-58628.

[9]. Park, S. M., Kwon, Y., & Choi, J. Y. (2020). Time Synchronization Between EtherCAT Network and External Processor. *IEEE Communications Letters*, 25(1), 103-107.

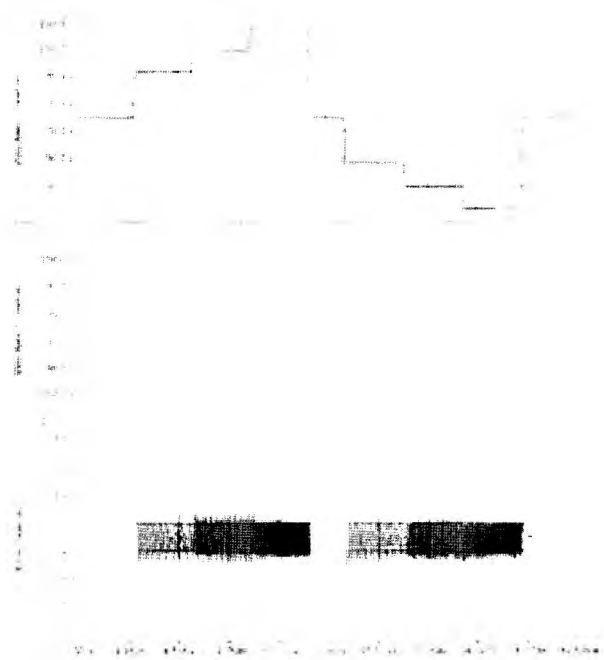
[10]. Maruyama, T., & Yamada, T. (2017, September). Spatial-temporal communication redundancy for high performance EtherCAT master. In 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) (pp. 1-6). IEEE.

[11]. Stoj, J. (2020). Cost-effective hot-standby redundancy with synchronization using EtherCAT and real-time ethernet protocols. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 18(4), 2035-2047.

[12]. Wu, X., & Xie, L. (2017, October). On the wireless extension of EtherCAT networks. In 2017 IEEE 42nd Conference on Local Computer Networks (LCN) (pp. 235-238). IEEE.

[13]. Delgado, R., Choi, B. W., & Song, H. (2018, January). Application of EtherCAT in microgrid communication network: A case study. In 2018 International Conference on Platform Technology and Service (PlatCon) (pp. 1-6). IEEE.

[14]. Bu-Hai, S., Yong-Zhi, W., & Chuan, D. (2017, May). A design of realtime communication based on EtherCAT in industrial robot control system based on LinuxCNC. In 2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC) (pp. 5776-5780). IEEE.



Hình 8. Kết quả thực tế trên hệ thống servo sử dụng cách tiếp cận được đề xuất

6. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, một thiết kế hiệu quả của bộ điều khiển chuyển động trong hệ thống gia công được giới thiệu. Thành phần cốt lõi của kiểm soát thời gian thực bằng cách sử dụng công nghệ EtherCAT được phát triển. Nền tảng phần cứng bao gồm bộ điều khiển chuyển động và ổ đĩa servo phụ. Giao tiếp của cả phần mềm và phần sụn được minh họa để trao đổi dữ liệu được truyền với tốc độ cao và đáng tin cậy. Một số thử nghiệm trong phòng thí nghiệm được thực hiện trong ứng dụng trong thế giới thực. Nó được xác minh rằng tính khả thi, hiệu quả và mạnh mẽ của cách tiếp cận này đã được phê duyệt.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này, do Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh tài trợ theo mã số đề tài SVKSTN-2021-CK-32. Chúng tôi cảm ơn sự hỗ trợ về thời gian và cơ sở vật chất của Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia