

NGHIÊN CỨU VỀ TRUYỀN THÔNG PROFINET THỜI GIAN THỰC VÀ ĐIỀU KHIỂN PHỐI HỢP HAI ROBOT KUKA KR6 R700 Z200 BẰNG PLC SIMATIC S7-1200

A STUDY OF REAL-TIME PROFINET COMMUNICATION AND COORDINATED CONTROL OF DUAL KUKA KR6 R700 Z200 ROBOTS USING SIMATIC S7-1200 PLC

Lê Đức Độ*, Vũ Anh Quân, Nguyễn Mạnh Toàn

Khoa Cơ khí Chế tạo máy, Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội

*Email: do.leduc@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày việc xây dựng và kiểm chứng một hệ thống truyền thông PROFINET Real-Time (RT) nhằm điều khiển phối hợp hai robot SCARA KUKA KR6 R700 Z200 sử dụng PLC SIMATIC S7-1200 trong một cell làm việc có băng tải chung. Hệ thống được triển khai dựa trên kiến trúc PROFINET với PLC đóng vai trò IO-Controller và các robot SCARA hoạt động như IO-Device, giao tiếp thông qua bộ điều khiển KRC5 micro và giao diện Auto-External. Quá trình cấu hình được thực hiện bằng phần mềm TIA Portal và KUKA WorkVisual, bao gồm nhập tệp GSDML, ánh xạ tín hiệu I/O chu kỳ và thiết lập thời gian cập nhật mạng. Cơ chế điều phối dựa trên token trong PLC được sử dụng để đảm bảo hai robot vận hành luân phiên, tránh chồng lấn vùng làm việc và duy trì thông lượng ổn định. Hiệu năng hệ thống được đánh giá thông qua phép đo độ trễ khứ hồi (ping-pong) và phân tích telegram PROFINET RT bằng Wireshark. Kết quả cho thấy độ trễ truyền thông trung bình khoảng 8 ms và jitter nhỏ hơn 2 ms trong quá trình vận hành đồng thời của hai robot. Các kết quả này chứng minh rằng PROFINET RT cung cấp khả năng truyền thông mang tính quyết định và đủ độ ổn định để điều phối nhiều robot SCARA trong các cell sản xuất nhỏ gọn.

Từ khóa: PROFINET RT; Ethernet công nghiệp; Robot SCARA; KUKA KR6 R700 Z200; PLC SIMATIC S7-1200; Điều khiển phối hợp robot; Truyền thông thời gian thực.

ABSTRACT

This study presents the implementation and validation of a PROFINET Real-Time (RT) communication system for the coordinated control of two KUKA KR6 R700 Z200 SCARA robots using a SIMATIC S7-1200 programmable logic controller (PLC). The experimental cell consists of two SCARA robots sharing a conveyor workspace and communicating cyclically with the PLC through PROFINET. The robots operate in Auto-External mode, allowing the PLC to manage their execution states using a small set of deterministic I/O signals such as DRIVES_ON, MOVE_ENABLE, and EXT_START, while the robot controller handles motion planning internally. The system is configured using TIA Portal and KUKA WorkVisual, including GSDML integration, device naming, and cyclic I/O mapping. A token-based coordination strategy implemented in the PLC ensures that the robots operate sequentially and avoid workspace conflicts while maintaining

stable throughput. System performance is evaluated using a PLC-based ping-pong latency test and PROFINET RT telegram analysis captured with Wireshark. Experimental results show an average round-trip latency of approximately 8 ms and network jitter below 2 ms during simultaneous robot operation. These results demonstrate that PROFINET RT provides sufficiently deterministic communication to support reliable coordination of multiple SCARA robots in compact industrial automation cells.

Keywords: PROFINET RT; Industrial Ethernet; SCARA robot; KUKA KR6 R700 Z200; SIMATIC S7-1200 PLC; Coordinated robot control; Real-time communication.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Robot SCARA được ứng dụng phổ biến trong các không gian sản xuất chật hẹp đơn giản bởi vì chúng di chuyển rất nhanh và không đòi hỏi nhiều diện tích. Hình học của chúng đơn giản, trục thẳng đứng có độ cứng cao và không gian làm việc ngang phù hợp với hầu hết bố trí băng tải hoặc đồ gá. Những đặc điểm này khiến chúng phù hợp với các trạm lắp ráp, dây chuyền đóng gói, nạp PCB và các tác vụ pick-and-place lặp lại liên tục trong ngày [1].

Khi hai hoặc nhiều robot SCARA vận hành trong cùng một khu vực, vấn đề thời gian trở nên quan trọng hơn nhiều so với dự đoán; chỉ vài mili-giây trễ cũng có thể dẫn đến bỏ sót chi tiết hoặc chong lún không gian làm việc – một hiện tượng đã được ghi nhận trong các cell sản xuất đa robot [10]. Những sai lệch như vậy thường khó nhận thấy trong các thử nghiệm ngắn nhưng có xu hướng tích lũy trong các chu kỳ vận hành dài, khiến yêu cầu ổn định thời gian trở nên ngày càng quan trọng.

Ethernet công nghiệp đã thay thế phần lớn các hệ thống fieldbus cũ trong các dây chuyền hiện đại. Băng thông tăng và khả năng chẩn đoán rõ ràng hơn góp phần vào sự chuyển đổi này, nhưng ưu điểm cốt lõi nằm ở khả năng truyền thông chu kỳ dự đoán được [8], [12]. Trong môi trường sử dụng thiết bị Siemens,

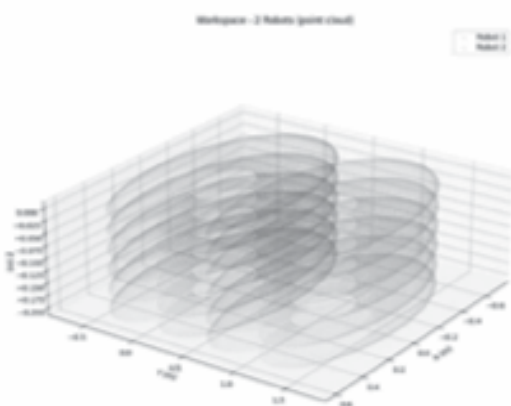
PROFINET là lựa chọn mặc định, cung cấp chu kỳ cập nhật ở mức mili-giây và cấu trúc IO-Controller/IO-Device đơn giản [6]. Với chu kỳ lặp ngắn, robot SCARA phơi bày rất rõ các sai lệch truyền thông nhỏ: jitter mạng thường biểu hiện dưới dạng lệch nhẹ ở thời điểm kích hoạt, khớp với các kết luận trong những nghiên cứu về Ethernet thời gian thực [9], [11]. Do đó, duy trì truyền thông mang tính quyết định là điều thiết yếu để đảm bảo hai robot hoạt động nhất quán khi làm việc cạnh nhau. Sự khác biệt giữa giả định thời gian trong lý thuyết và hành vi thực tế trên sản xuất chính là động lực của nghiên cứu này.

Robot KUKA KR6 R700 Z200 SCARA, sử dụng bộ điều khiển KRC5 micro nhỏ gọn. Chế độ Auto-External của nó cung cấp tập cố định các bit lệnh và trạng thái PROFINET – DRIVES_ON, MOVE_ENABLE, EXT_START, READY, RUNNING, DONE – cho phép PLC điều khiển tiến trình trạng thái nội bộ mà không can thiệp vào tính toán quỹ đạo [2], [16]. Việc phân chia trách nhiệm – PLC xử lý chuỗi logic còn bộ điều khiển robot xử lý lập kế hoạch chuyển động – phù hợp với các khuyến nghị tích hợp PROFINET [3], [5].

Mặc dù PROFINET được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp, tài liệu mô tả quá trình của hai robot SCARA khi chia sẻ cùng một băng tải và cùng phản ứng với tín hiệu thời

gian từ PLC vẫn còn hạn chế. Phần lớn tài liệu chỉ đề cập thời gian Ethernet ở mức tổng quát hoặc tập trung vào các phương pháp đo lường cụ thể [8], [11]. Trong khi đó, sự tương tác chi tiết giữa thời gian cập nhật PROFINET, jitter, hành vi của trình điều khiển PNIO và máy trạng thái Auto-External của SCARA hiếm khi được mô tả trực tiếp. Trên thực tế, chính các chi tiết này quyết định việc robot có nhận đúng từng chuyển trạng thái hay đôi khi bỏ sót cạnh xung – một vấn đề đặc biệt quan trọng trong cell hai robot, nơi cả hai bộ thao tác phải phản hồi nhất quán mà không bị lệch theo thời gian [9].

Trong nghiên cứu này, một mạng PROFINET RT được xây dựng bằng hai robot KR6 R700 Z200 và một PLC S7-1200 đóng vai trò IO-Controller. Các bước kỹ thuật trong TIA Portal và WorkVisual bao gồm gán tên thiết bị, tải tệp GSDML, chọn tham số PNIO, ánh xạ I/O Auto-External và thiết lập ưu tiên ở tầng Ethernet theo hướng dẫn PROFINET [3], [6], [7]. Một cơ chế cấp quyền dựa trên token trong PLC quyết định robot nào được phép bắt đầu chu kỳ trước, bảo đảm tách biệt vật lý và tránh can thiệp lẫn nhau trong vùng làm việc chung.



Hình 1. Workspace – Hai robot SCARA KUKA KR6 R700 Z200.

Hành vi thời gian được đánh giá bằng thử nghiệm ping-pong dựa trên PLC và phân

tích gói tin bằng Wireshark – những phương pháp phù hợp với các tiêu chuẩn đánh giá hiệu năng Ethernet thời gian thực [11], [12]. Kết quả thu được đạt kỳ vọng: thời gian cập nhật nằm trong khoảng 4-8 ms theo khuyến nghị PROFINET RT, và jitter duy trì dưới khoảng 2 ms ngay cả khi cả hai robot hoạt động. Những phát hiện này cho thấy một hệ thống PROFINET RT được thiết kế đúng kỹ thuật là đủ để điều phối hai robot SCARA vận hành trong cell nhỏ, có độ nhạy cao với thời gian. Chúng đồng thời là tài liệu tham khảo hữu ích cho các kỹ sư triển khai những hệ thống tương tự và gợi ra các hướng phát triển tiếp theo như PROFINET IRT, lập lịch TSN hoặc chiến lược điều phối nâng cao hơn [15]. Trong các thử nghiệm sơ bộ, ảnh hưởng của việc lệch thời gian bằng tải đặc biệt rõ ràng, càng củng cố nhu cầu về một nền tảng truyền thông được kiểm soát chặt chẽ.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu được thực hiện thông qua việc xây dựng một cell robot thực nghiệm gồm hai robot SCARA KUKA KR 6 R700 Z200 được điều khiển bởi PLC SIMATIC S7-1200 thông qua mạng truyền thông công nghiệp PROFINET RT. PLC đóng vai trò IO-Controller, trong khi mỗi robot hoạt động như một IO-Device thông qua bộ điều khiển KRC5 micro và driver PNIO tích hợp [2], [3], [4]. Mô hình này cho phép PLC gửi các tín hiệu điều khiển Auto-External như DRIVES_ON, MOVE_ENABLE và EXT_START, đồng thời nhận các trạng thái phản hồi READY, RUNNING và DONE từ robot theo chu kỳ truyền thông thời gian thực [16]. Quá trình cấu hình hệ thống được thực hiện bằng TIA Portal V16 và KUKA WorkVisual. Tệp GSDML của robot được nhập vào môi trường TIA Portal để thiết lập thiết bị PROFINET, gán tên thiết bị bằng DCP và cấu hình chu kỳ cập nhật trong

khoảng 4-8 ms theo khuyến nghị của tiêu chuẩn PROFINET RT [5], [6], [7]. Các tín hiệu Auto-External được ánh xạ vào vùng nhớ I/O chu kỳ của PLC, trong khi phía robot cấu hình driver PNIO để đảm bảo sự tương thích giữa bit điều khiển PLC và máy trạng thái nội bộ của robot [2], [3]. Để kiểm chứng hiệu năng truyền thông và độ ổn định thời gian của hệ thống, hai phương pháp đo được áp dụng. Thứ nhất, thử nghiệm ping-pong I/O dựa trên PLC được sử dụng để đo độ trễ khứ hồi của kênh PROFINET giữa PLC và robot. Thứ hai, công cụ Wireshark được sử dụng để thu thập và phân tích các frame PROFINET RT nhằm đánh giá jitter của telegram theo thời gian. Các phương pháp này tuân theo các quy trình đánh giá đặc tính thời gian thực của Ethernet công nghiệp đã được đề xuất trong các nghiên cứu trước [9], [11], [12]. Dữ liệu thu thập từ các phép đo được sử dụng để đánh giá tính quyết định của truyền thông PROFINET RT và khả năng phối hợp giữa hai robot SCARA trong một cell làm việc chung.

2.1. Xây dựng mô hình

Mô hình nghiên cứu được xây dựng dưới dạng một cell robot công nghiệp gồm hai robot SCARA KUKA KR 6 R700 Z200 hoạt động phối hợp trên cùng một băng tải, được điều khiển tập trung bởi PLC SIMATIC S7-1200 thông qua mạng truyền thông công nghiệp PROFINET RT. Trong kiến trúc này, PLC đóng vai trò IO-Controller, thực hiện logic điều khiển trình tự và gửi các tín hiệu điều khiển đến robot theo chu kỳ truyền thông thời gian thực. Mỗi robot SCARA được trang bị bộ điều khiển KRC5 micro, hoạt động như một IO-Device trong mạng PROFINET và trao đổi dữ liệu chu kỳ thông qua driver PNIO tích hợp [2], [3], [4]. Hai robot SCARA được bố trí ở hai phía của băng tải để thực hiện các thao tác pick-and-place luân phiên. Do đặc điểm hình

học phẳng của robot SCARA, vùng làm việc của hai robot có thể chồng lấn một phần, vì vậy hệ thống cần cơ chế điều phối thời gian để đảm bảo không xảy ra va chạm trong quá trình vận hành [1], [10]. PLC giám sát các tín hiệu trạng thái của robot và cảm biến băng tải để quyết định robot nào được phép bắt đầu chu kỳ tiếp theo. Trong hệ thống, giao tiếp điều khiển giữa PLC và robot được thực hiện thông qua chế độ Auto-External của bộ điều khiển KUKA. PLC gửi các tín hiệu điều khiển như DRIVES_ON, MOVE_ENABLE và EXT_START, trong khi robot phản hồi các trạng thái READY, RUNNING và DONE theo chu kỳ PROFINET RT [16]. Cơ chế trao đổi tín hiệu này cho phép PLC điều khiển tiến trình thực thi chương trình robot mà không can thiệp trực tiếp vào thuật toán lập kế hoạch chuyển động bên trong bộ điều khiển robot [2]. Toàn bộ hệ thống được kết nối thông qua một switch Ethernet công nghiệp hỗ trợ PROFINET, tạo thành topo hình sao giữa PLC và hai robot. Kiến trúc này giúp giảm độ trễ truyền thông, hạn chế jitter do tắc nghẽn hàng đợi và đảm bảo chu kỳ truyền thông ổn định theo khuyến nghị của tiêu chuẩn PROFINET [6], [7], [12]. Mô hình cell thực nghiệm này tạo nền tảng để đánh giá tính quyết định của truyền thông PROFINET RT cũng như khả năng phối hợp giữa hai robot SCARA trong một môi trường sản xuất tự động.



Hình 2. Mô hình cell thực nghiệm gồm hai robot SCARA KUKA KR 6 R700 Z200, PLC SIMATIC S7-1200 và mạng truyền thông PROFINET RT.



2.2. Thiết bị thực nghiệm

Hệ thống thực nghiệm được xây dựng từ các thiết bị tự động hóa công nghiệp tiêu chuẩn nhằm đảm bảo khả năng vận hành ổn định và phù hợp với môi trường truyền thông PROFINET thời gian thực. Các thành phần chính của hệ thống gồm robot SCARA, bộ điều khiển robot, PLC điều khiển trung tâm, hạ tầng mạng công nghiệp và các thiết bị hỗ trợ cấu hình – giám sát. Robot được sử dụng trong nghiên cứu là KUKA KR 6 R700 Z200, một robot SCARA bốn trục được thiết kế cho các tác vụ pick-and-place tốc độ cao trong các dây chuyền lắp ráp và đóng gói công nghiệp [1]. Robot có vùng làm việc ngang rộng, độ cứng cao theo phương thẳng đứng và khả năng lặp lại chính xác, phù hợp cho các ứng dụng thao tác lặp lại trên băng tải. Mỗi robot được điều khiển bởi bộ điều khiển KUKA KRC5 micro, tích hợp giao diện PROFINET PNIO cho phép trao đổi dữ liệu chu kỳ với PLC thông qua các tín hiệu Auto-External [2], [3]. Bộ điều khiển trung tâm của hệ thống là PLC SIMATIC S7-1200 CPU1214C, đóng vai trò IO-Controller trong mạng PROFINET [4]. PLC thực hiện các chức năng điều khiển trình tự, xử lý tín hiệu cảm biến băng tải và điều phối hoạt động của hai robot thông qua các tín hiệu điều khiển DRIVES_ON, MOVE_ENABLE và EXT_START. Đồng thời PLC nhận các trạng thái phản hồi như READY, RUNNING và DONE từ robot để xác định trạng thái thực thi của từng chu kỳ làm việc [16]. Hạ tầng truyền thông được xây dựng dựa trên mạng Ethernet công nghiệp PROFINET RT, trong đó PLC và hai robot được kết nối thông qua một switch Ethernet công nghiệp hỗ trợ QoS và LLDP nhằm đảm bảo truyền thông chu kỳ ổn định và giảm thiểu jitter trong quá trình vận hành [6], [7]. Ngoài ra, một máy tính kỹ thuật được sử dụng để cấu hình và giám sát hệ thống thông qua phần mềm TIA Portal V16 và KUKA WorkVisual, đồng thời thực hiện thu

thập dữ liệu truyền thông bằng công cụ phân tích gói tin Wireshark [5]. Tập hợp các thiết bị trên tạo thành một nền tảng thí nghiệm hoàn chỉnh cho việc đánh giá hiệu năng truyền thông PROFINET RT và khả năng phối hợp giữa hai robot SCARA trong môi trường cell robot công nghiệp.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Phần này trình bày các kết quả thực nghiệm khi đánh giá hệ thống truyền thông PROFINET RT và chiến lược điều khiển phối hợp hai robot SCARA KUKA KR 6 R700 Z200. Phân tích tập trung vào các chỉ số chính gồm độ trễ truyền thông, jitter của telegram PROFINET và hiệu năng phối hợp giữa hai robot trong cell thí nghiệm [9], [11], [12].

3.1. Kết quả độ trễ khứ hồi

Độ trễ khứ hồi (Round-Trip Latency – RTL) được đo bằng thử nghiệm I/O ping-pong trên PLC với các chu kỳ cập nhật 4 ms, 6 ms và 8 ms.

Ở cấu hình 4 ms, hệ thống đạt:

- RTL trung bình: 7.9 ms;
- RTL nhỏ nhất: 7.2 ms;
- RTL lớn nhất: 9.1 ms.

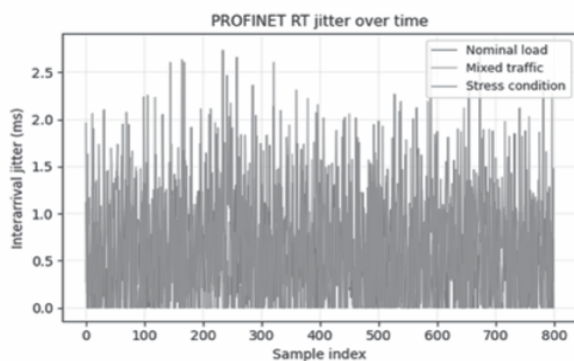
Kết quả cho thấy độ trễ truyền thông ổn định và phù hợp với đặc tính hoạt động của PROFINET RT trong các hệ thống Ethernet công nghiệp [6], [7]. Trong suốt quá trình thử nghiệm không ghi nhận hiện tượng mất phản hồi hoặc tăng đột biến độ trễ.

3.2. Phân tích jitter

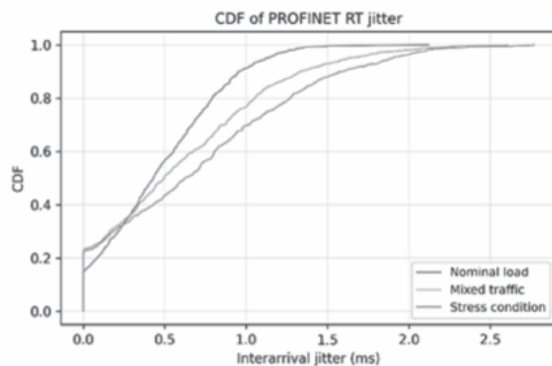
Phân tích hơn 200.000 telegram PROFINET RT bằng Wireshark cho thấy:

- Jitter trung bình: 0.42 ms;
- Jitter p95: 1.28 ms;
- Jitter p99: 1.84 ms.

Các giá trị này nằm trong giới hạn yêu cầu cho các ứng dụng robot SCARA tốc độ cao, vốn cần jitter dưới khoảng 2 ms để đảm bảo đồng bộ tín hiệu điều khiển [10], [12]. Khi bổ sung lưu lượng nền, jitter tăng nhẹ nhưng vẫn nằm trong phạm vi chấp nhận được.



Hình 3. Dòng thời gian jitter của các telegram PROFINET RT mô phỏng.



Hình 4. Hàm phân phối tích lũy (CDF) của jitter PROFINET RT.

3.3. Độ toàn vẹn tín hiệu điều khiển

Các tín hiệu Auto-External được theo dõi bằng PLC trace cho thấy:

- EXT_START được robot nhận trong 1-2 chu

kỳ PROFINET;

- DONE phản hồi ngay sau khi robot hoàn tất chuyển động;
- RESET đưa robot về trạng thái READY trong 2-3 chu kỳ.

Không ghi nhận sai lệch trình tự điều khiển, cho thấy sự đồng bộ tốt giữa PLC và bộ điều khiển robot [2], [4].

3.4. Hiệu năng phối hợp hai robot

Chiến lược điều phối dựa trên token và mutual-exclusion cho phép hai robot hoạt động luân phiên mà không xảy ra xung đột vùng làm việc. Trong 15 phút vận hành liên tục, hệ thống đạt:

- Tổng số chu kỳ: 1780;
- Độ biến thiên chu kỳ: < 2.5%;
- EXT_START bị bỏ lỡ: 0.

Thông lượng đạt 118-122 chu kỳ/phút, tương đương các hệ SCARA công nghiệp sử dụng băng tải [10].

4. KẾT LUẬN

Như vậy, nghiên cứu này đã xây dựng và kiểm chứng được hệ thống truyền thông PROFINET Real-Time (RT) điều khiển phối hợp hai robot SCARA KUKA bằng PLC S7-1200 trong hệ thống làm việc có băng tải. Hệ thống sử dụng kiến trúc IO-Controller (PLC) và IO-Device (Robot), được cấu hình qua TIA Portal và KUKA WorkVisual với cơ chế điều phối bằng token để tránh va chạm. Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống vận hành ổn định với độ trễ trung bình đạt khoảng 8 ms và jitter < 2 ms. Điều này đã chứng minh PROFINET RT hoàn toàn đáp ứng tính quyết định và độ tin cậy cao cho việc điều phối đa robot trong các hệ thống sản xuất nhỏ gọn. ❖



Ngày nhận bài: 20/6/2026

Ngày phản biện: 24/6/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. KUKA Robotics, KR 6 R700 Z200 – Product Specification, KUKA AG, Augsburg, Germany, 2023.
- [2]. KUKA Robotics, KRC5 Micro – System Integrator Manual, KUKA AG, 2022.
- [3]. KUKA Robotics, KUKA PROFINET Device (PNIO) – Configuration and Commissioning Manual, KUKA AG, 2023.
- [4]. Siemens AG, SIMATIC S7-1200 Programmable Controller – System Manual, Nuremberg, Germany, 2020.
- [5]. Siemens AG, TIA Portal V16 – PROFINET Engineering and Diagnostics Guide, Industrial Automation Division, 2020.
- [6]. PROFIBUS & PROFINET International (PI), PROFINET System Description, Version 2.43, Karlsruhe, Germany, 2023.
- [7]. PROFIBUS & PROFINET International (PI), PROFINET Performance and Real-Time Guideline, PI Working Group, 2021.
- [8]. L. Lo Bello, “Real-Time Ethernet: Determinism, Design Principles, and Performance Challenges”. IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 15, no. 5, pp. 3174-3186, 2019.
- [9]. A. Wenzel and M. Wollschlaeger, “Deterministic Ethernet Communication in Industrial Robotics: A PROFINET-Based Evaluation”. IEEE Trans. Industrial Informatics, vol. 17, no. 3, pp. 1852-1864, 2021.
- [10]. S. Dustmann and K. Fleming, “Communication Architectures for Multi-Robot Industrial Cells”. IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 6, no. 4, pp. 8923-8930, 2021.
- [11]. J. Jasperneite, M. Schumacher, and K. Weber, “An Approach for Measurement and Validation of Real-Time Characteristics in Industrial Ethernet Systems”. IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 14, no. 2, pp. 6-18, 2020.
- [12]. A. Meier, “Industrial Communication with PROFINET: Concepts, Design, and Implementation”. Springer, 2020.
- [13]. IEC 61158:2019, Industrial Communication Networks – Fieldbus Specifications, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2019.
- [14]. IEC 61784-2:2020, Real-Time Industrial Ethernet Profiles, International Electrotechnical Commission, 2020.
- [15]. B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, and M. ten Hompel, “Handbook of Industry 4.0 and Cyber-Physical Systems”. Springer, 2022.
- [16]. KUKA Robotics, External Control (Auto-External) – Interface Description, KUKA AG, Technical Publication, 2022.