

THIẾT KẾ VÀ LẮP RÁP HỆ THỐNG CIM ỨNG DỤNG IOT PHỤC VỤ ĐÀO TẠO

Trần Minh Sang¹, Trần Đức Thắng¹, Đinh Đức Hạnh¹

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày việc thiết kế và lắp ráp một hệ CIM tích hợp IoT nhằm phục vụ đào tạo. Điểm mới của hệ thống nằm ở kiến trúc điều khiển hỗn hợp sử dụng các thành phần có chi phí thấp, giúp sinh viên hiểu và thực hành tích hợp lập trình nhúng, điện tử và cơ khí ở mức độ cơ bản. Hệ CIM gồm bàn cấp phôi, cánh tay robot, trạm phay CNC và băng tải vận chuyển. Mô-đun Wi-Fi ESP-8266 có chức năng IoT cho phép đồng bộ hóa vận hành hệ CIM theo trình tự và thiết lập kết nối không dây cho phép vận hành và giám sát từ xa. Kết quả vận hành cho thấy độ trễ giao tiếp từ Blynk app đến ESP-8266, từ ESP-8266 đến CNC Mach3, và độ ổn định vận hành toàn hệ thống lần lượt là $(1,184 \pm 0,366)$ s, $(0,742 \pm 0,268)$ s, và $(93,89 \pm 5,52)$ %. Tuy hệ thống còn nhiều hạn chế về thiết bị, chuẩn giao tiếp và độ ổn định theo tiêu chuẩn công nghiệp nhưng vẫn đáp ứng nhu cầu phục vụ giảng dạy thực hành các môn học liên quan đến hệ thống sản xuất thông minh.

Từ khóa: *Hệ thống sản xuất tích hợp (CIM), Internet of things (IoT), máy CNC, cánh tay robot.*

1. Tổng quan

Hệ thống sản xuất tích hợp máy tính (Computer Integrated Manufacturing – CIM) được xem là nền tảng cốt lõi của các hệ thống công nghiệp hiện đại, cho phép hợp nhất các quá trình sản xuất thông qua việc trao đổi dữ liệu liền mạch và điều khiển tự động. Các hệ thống CIM ban đầu tập trung vào việc tích hợp các cấu trúc đơn khối như: cánh tay máy robot, trạm gia công, băng tải và hệ thống lưu trữ thành một quy trình thống nhất được điều khiển bởi máy tính trung tâm [1]. Điều này khiến hệ CIM hoạt động theo quy trình một chiều với khả năng kết nối ít linh hoạt với môi trường bên ngoài.

Sự xuất hiện của Internet vạn vật (IoT) đã làm thay đổi căn bản quan niệm về CIM, chuyển đổi hệ thống thành mô hình tích hợp chặt chẽ Cyber-Physical Systems (CPS). Mô hình này hợp nhất giữa công nghệ thông tin, mạng truyền thông và các hệ thống cơ-điện tử, tạo nên một hệ thống thông minh có khả năng nhận biết, phân tích và phản ứng theo thời gian thực dựa trên dữ liệu từ môi trường vật lý [2]. Các nghiên cứu gần đây đã làm rõ tiềm năng của tích hợp IoT-CIM, từ việc đề xuất kiến trúc phân lớp như mô hình 5C (kết nối, chuyển đổi dữ liệu thành thông tin, không gian mạng, nhận thức và cấu hình thích ứng) của Lee và cộng sự [3], cho đến các ứng dụng thu thập dữ liệu phục vụ bảo trì dự đoán và chẩn đoán sớm [4], hay nâng cao khả năng tái cấu hình của dây chuyền sản xuất [5].

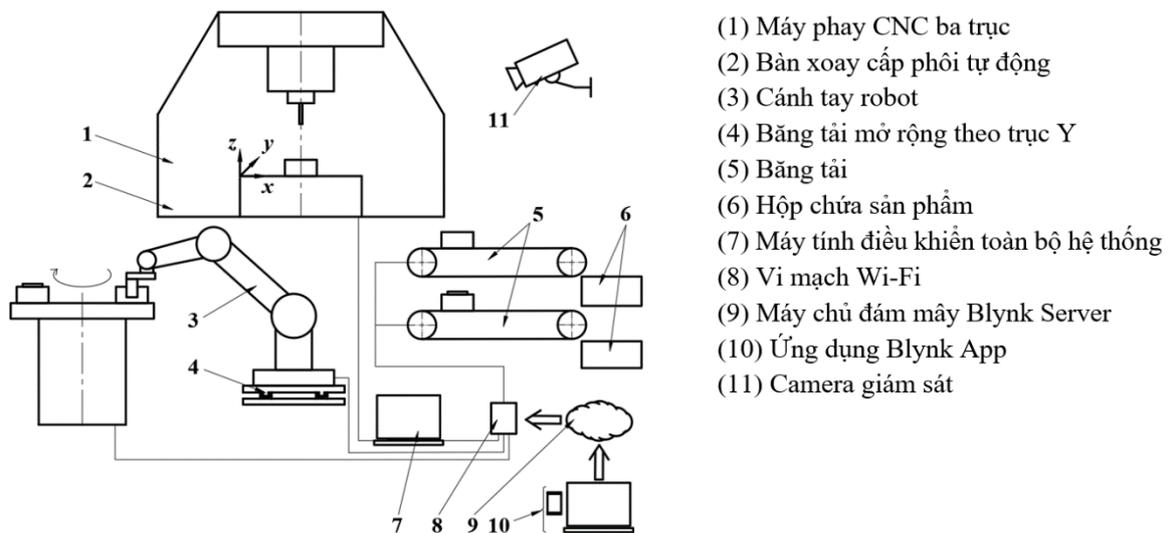
Các hệ thống CIM-IoT đã bước ra khỏi phòng thí nghiệm và dần đi vào thực tế sản xuất, được thúc đẩy bởi các hãng công nghệ lớn như FESTO, YASKAWA, Mitsubishi,

Siemens... [6, 7]. Tuy nhiên, các hệ thống CIM-IoT thương mại hoàn chỉnh thường cho chi phí rất lớn, vượt quá khả năng đầu tư của các cơ sở giáo dục, đặc biệt là ở các quốc gia đang phát triển. Do đó khó có khả năng trang bị cho sinh viên thực hành. Hơn nữa, hầu hết các nghiên cứu tích hợp CIM-IoT hiện có đều tập trung vào sản xuất công nghiệp và đòi hỏi hạ tầng công nghệ thông tin phức tạp. Các mô hình này không được thiết kế để trở thành mô hình chi phí thấp, dễ tiếp cận cho mục đích đào tạo cơ bản. Hiện tại, thiếu một mô hình thực hành vừa có chi phí đầu tư thấp, vừa tích hợp đầy đủ các chức năng cốt lõi của CIM (gồm trạm gia công CNC, cánh tay robot, băng tải và cơ cấu cấp phôi) và có khả năng điều khiển/giám sát từ xa thông qua IoT.

Nhằm giải quyết những hạn chế trên, nghiên cứu này hướng tới mục tiêu chính là thiết kế và lắp ráp một hệ thống CIM tích hợp IoT ở mức cơ bản, với chi phí đầu tư thấp phục vụ mục tiêu đào tạo trong các cơ sở giáo dục. Cụ thể, các đóng góp chính của bài báo bao gồm: (1) Phát triển thống CIM (gồm trạm cấp phôi, cánh tay robot, trạm gia công CNC, hệ băng tải) có khả năng kết nối, điều khiển và giám sát từ xa thông qua nền tảng IoT cơ bản, và (2) Xây dựng kiến trúc điều khiển hỗn hợp, sử dụng các thành phần điện tử cơ bản, dễ tiếp cận (như Arduino, ESP8226) và phần mềm CNC Bob Mach3, nhằm tạo ra một hệ thống CIM có đầy đủ chức năng học tập cơ bản, tối ưu về chi phí và dễ tiếp cận đối với người học. Cách tiếp cận này giúp giảm chi phí đáng kể, đồng thời vẫn đảm bảo sinh viên được tiếp cận thực hành với các nguyên lý cốt lõi của hệ thống sản xuất thông minh, qua đó nâng cao chất lượng đào tạo nguồn nhân lực Công nghiệp 4.0.

2. Thiết kế hệ thống CIM

2.1 Cấu trúc hệ CIM kết nối IoT cơ bản



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc của hệ CIM

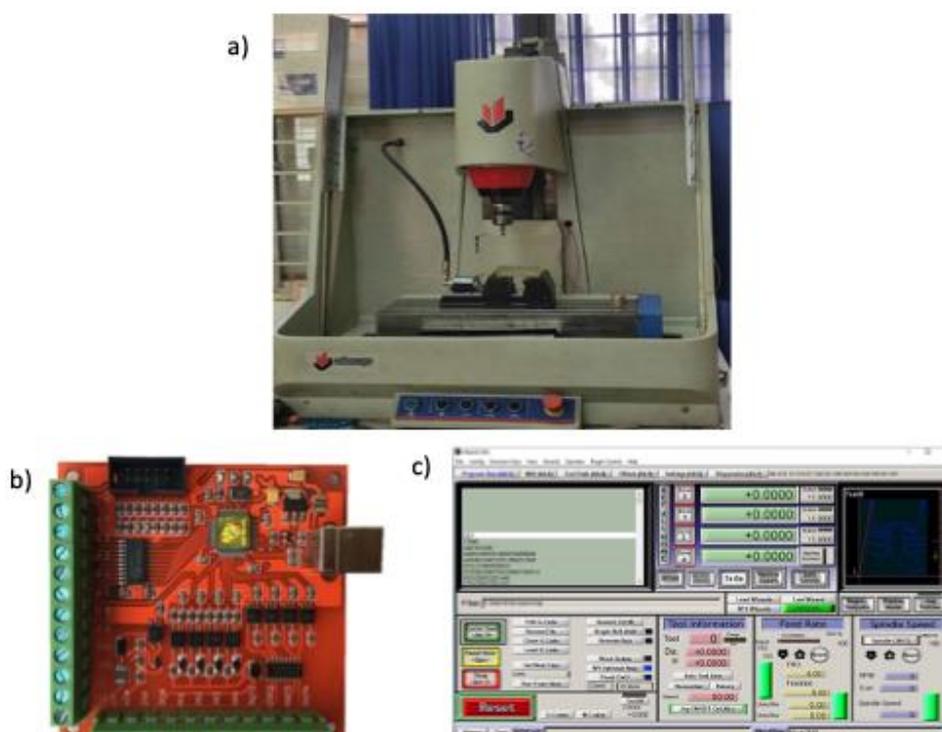
Cấu trúc hệ thống CIM trong nghiên cứu này (Hình 1) được thiết kế theo cấu trúc phân lớp gồm: (i) Lớp vật lý – (1) Máy phay CNC ba trục; (2) Bàn xoay cấp phôi tự động

(có chức năng cung cấp phôi cho máy phay CNC); (3) Cánh tay robot (thực hiện thao tác chuyển phôi từ bàn xoay sang máy CNC); (4) Băng tải mở rộng theo trục Y (hỗ trợ di chuyển của cánh tay robot theo phương Y); (5) Băng tải (vận chuyển sản phẩm theo loại sau gia công đến hộp chứa); (6) Hộp chứa sản phẩm (lưu trữ sản phẩm theo loại sau khi gia công). (ii) Lớp điều khiển: (7) Máy tính điều khiển toàn bộ hệ thống. (iii) Lớp mạng: (8) Vi mạch Wi-Fi; (iv) Lớp ứng dụng: (9) Máy chủ đám mây Blynk Server; (10) Ứng dụng Blynk App; (11) Camera giám sát cung cấp giao diện cho người học/giảng viên. Hệ thống này được thiết kế nhằm đảm bảo khả năng tích hợp giữa các thiết bị cơ điện tử và nền tảng IoT, cho phép giám sát và điều khiển từ xa một cách linh hoạt, đáp ứng yêu cầu đào tạo cơ bản trong môi trường sản xuất thông minh.

2.2. Các mô-đun chính của hệ CIM

2.2.1. Trạm phay CNC

Một máy phay CNC ba trục Alecop (Model: Supernova) cũ không còn hoạt động (Hình 2a) được tái sử dụng bằng cách thay thế hệ thống điều khiển gốc bằng mạch điều khiển CNC Bob Mach3 USB (Hình 2b) [8]. Phần mềm Mach3 (Hình 2c) cài đặt trên máy tính cho phép chuyển đổi một máy tính cá nhân thông thường thành hệ thống điều khiển CNC hoàn chỉnh [9]. Mã G-code có thể được lập trình trực tiếp trên giao diện Mach3 hoặc nhập từ tệp G-code có sẵn để điều khiển các chuyển động của máy CNC.

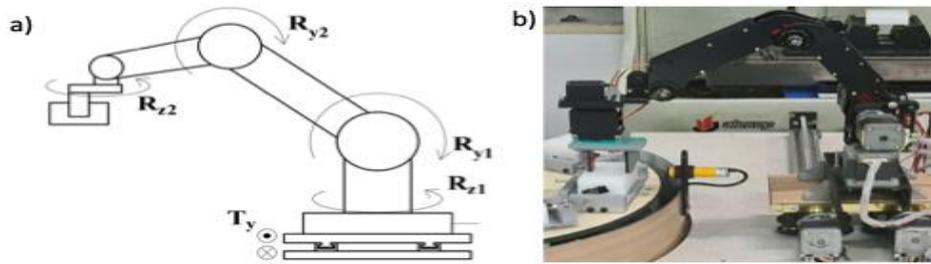


Hình 2. Trạm phay CNC. a) Máy phay CNC 3 trục; b) Mạch CNC Bob Mach3 USB; c) Giao diện Mach3

2.2.2. Cánh tay robot 4 bậc tự do

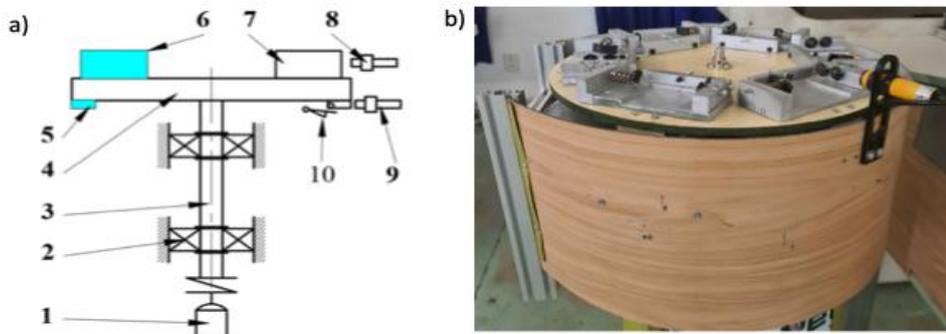
Sơ đồ nguyên lý và cánh tay robot hoàn thiện được trình bày trong Hình 3a và 3b.

Cánh tay robot có 4 bậc tự do ($R_{z1}, R_{y1}, R_{y2}, R_{z2}$) và một bậc tự do phụ mở rộng (T_y) được tích hợp để thực hiện quá trình chuyển phôi giữa bàn xoay cấp phôi đến máy CNC và quá trình gắp sản phẩm sau gia công đặt lên băng tải phân loại. Chức năng của 4 bậc tự do cụ thể: R_{z1} là chuyển động quay quanh trục Z tại khớp đế giúp mở rộng vùng làm việc theo phương ngang, R_{y1} là chuyển động quay quanh trục Y tại khớp vai giúp điều chỉnh khoảng cách làm việc theo phương ngang, R_{y2} là chuyển động quay quanh trục Y tại khớp khuỷu giúp kiểm soát vị trí và độ cao của đầu gắp, R_{z2} là chuyển động quay quanh trục Z tại khớp cổ tay giúp định hướng chi tiết đúng vị trí mong muốn khi gắp đặt, T_y) chuyển động tịnh tiến theo trục Y của toàn bộ để robot nhằm mở rộng vùng thao tác. Trong đó 05 động cơ bước model KH42KM2R015D (03 động cơ cho R_{z1}, R_{y1}, R_{y2} và 02 động cơ cho T_y), và 02 động cơ servo là loại MG996R (01 động cơ cho R_{z2}) và 01 động cơ cho việc kẹp phôi).



Hình 3. Cánh tay robot. a) Sơ đồ nguyên lý; b) Cánh tay robot thực tế

2.2.3. Bàn xoay cấp phôi



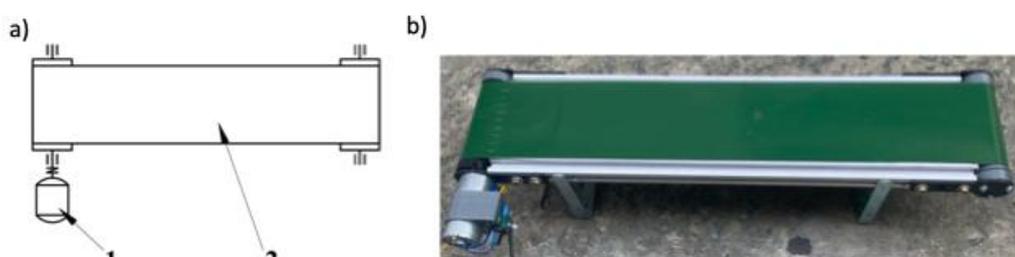
Hình 4. Bàn xoay cấp phôi. a. Sơ đồ nguyên lý; b. Bàn xoay thực tế

Sơ đồ nguyên lý và bàn xoay hoàn thiện được thể hiện trong Hình 4a và 4b. Các bộ phận chính trong sơ đồ Hình 4a gồm: động cơ bước (1), ổ bi (2), trục xoay (3), mặt bàn xoay (4), tấm màu (5) dùng phân biệt 2 loại phôi, phôi loại 1 (6), phôi loại 2 (7), cảm biến tiệm cận (8) xác nhận có hay không có phôi trên bàn, cảm biến màu sắc (9) xác định loại phôi 1 và 2, công tắc hành trình (10) định vị để dừng bàn xoay cấp phôi cho cánh tay robot tại vị trí Home xác định. Trong đó, cảm biến tiệm cận E3F DS30P1, cảm biến màu TCS3200, và công tắc hành trình V-156-1C25 là được sử dụng. Vì là mô hình đào tạo nên phôi gia công sử dụng nhựa PE có khối lượng riêng 950 kg/m^3 . Bàn cấp phôi có đường kính 400 mm, chứa 06 phôi với kích thước 02 loại phôi là $60 \times 50 \times 30 \text{ mm}$ và 70

x 50 x 30 mm. Tổng khối lượng gồm bàn xoay, 06 đồ gá kẹp phôi, trục dẫn và 06 phôi làm tròn là 6,5 kg. Ổ bi đỡ trục là loại UC201, đường kính trung bình đi qua các viên bi lăn của ổ là 31 mm. Chọn hệ số ma sát lăn $\mu_r = 0,01$, chọn số vòng quay trục $n = 16$ vòng/phút. Mô men xoắn trục cần thiết để quay bàn xoay tính toán là 0,01 Nm, công suất là trục tương đương gần 0,02 W. Chọn động cơ bước dẫn động trục xoay model KH42KM2R015D có mô men xoắn 0,2 Nm.

2.2.4. Băng tải

Hệ băng tải (Hình 5) nhận sản phẩm từ cánh tay robot và vận chuyển sản phẩm đến thùng chứa. Trong đó, (1) là động cơ DC giảm tốc 24V 320RPM JGB37 có gắn điều tốc PWM Dc 5v-35v 5A, (2) là băng tải.

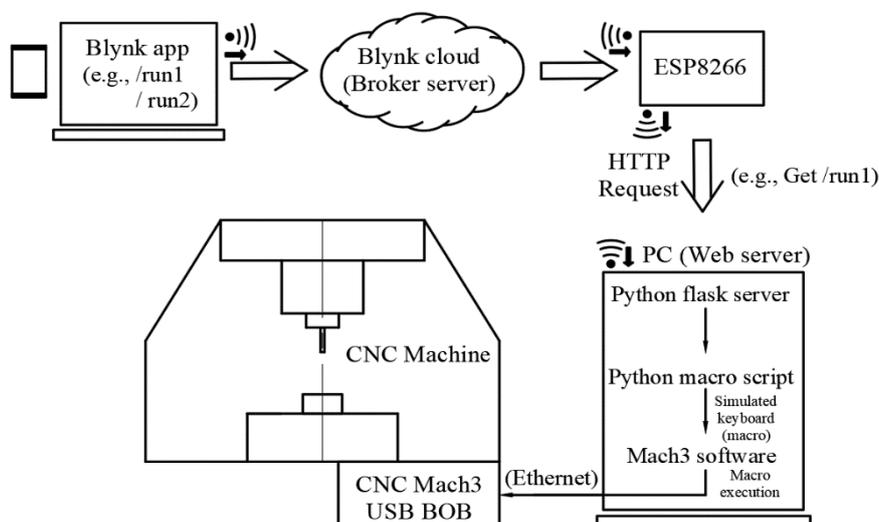


Hình 5. Hệ băng tải. a. Sơ đồ nguyên lý; b. Băng tải thực tế

3. Thiết kế điều khiển hệ CIM

3.1. Điều khiển trạm phay CNC

Hình 6 minh họa sơ đồ điều khiển máy CNC từ xa thông qua ứng dụng Blynk dựa trên nền tảng IoT. Hệ thống bao gồm bốn khối chức năng chính: ứng dụng Blynk (Blynk app) trên thiết bị di động, máy chủ đám mây Blynk (Blynk server), vi điều khiển wifi ESP-8266 và máy tính điều khiển (Web Server) kết nối trực tiếp với máy CNC thông qua bộ điều khiển CNC Mach3 USB BOB. Sử dụng giao thức truyền thông MQTT/Pub-Sub (Message Queuing Telemetry Transport/ Publisher- Subscriber).

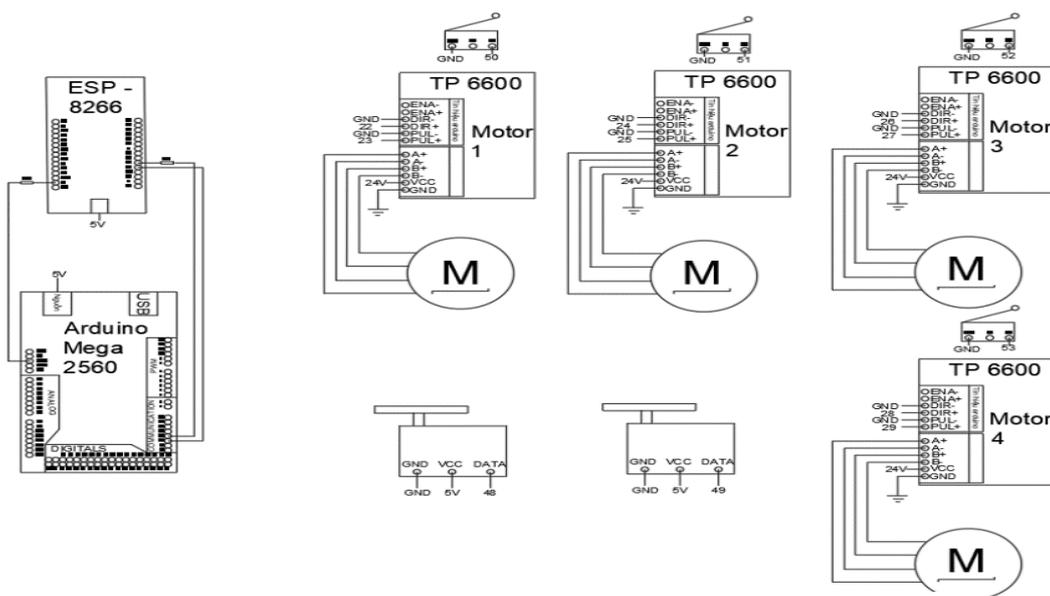


Hình 6. Sơ đồ điều khiển trạm phay CNC từ xa

Đầu tiên, ứng dụng Blynk app đóng vai trò là giao diện người dùng (Publisher) gửi lệnh điều khiển (ví dụ: /run1 – chạy gia công chi tiết 1, hoặc /run2 – chạy gia công chi tiết 2) đến Blynk cloud (Máy chủ trung gian/Broker server). Blynk Cloud đóng vai trò trung gian quản lý và chuyển tiếp dữ liệu giữa người dùng và thiết bị IoT. Vi điều khiển wifi ESP-8266 đóng vai trò như Subscriber và cấu hình như một cổng IoT. ESP-8266 giải mã lệnh điều khiển và chuyển đổi nó thành một yêu cầu HTTP tương ứng (ví dụ: yêu cầu GET /run1 HTTP/1.1 Host: <địa chỉ IP của Web server>) và gửi đến máy tính. Để máy tính tiếp nhận yêu cầu HTTP, ta cần cài đặt thư viện Flask và chạy file mã nguồn server.py trên Python để biến máy tính thành một Web server. Khi nhận được yêu cầu từ ESP-8266, Flask server kích hoạt thực thi một tập lệnh Python macro tương ứng. Tập lệnh này có chức năng mô phỏng thao tác bàn phím (Simulated keyboard macro), gửi trực tiếp các lệnh điều khiển đến phần mềm Mach3. Phần mềm Mach3 phân tích và thực thi macro, đồng thời tạo ra các tín hiệu điều khiển chuyển động. Các tín hiệu này được truyền qua cổng Ethernet đến bộ điều khiển Mach3 USB BOB, mạch Mach 3 trực tiếp điều khiển chuyển động của các trục và cơ cấu chấp hành máy CNC.

Để điều khiển máy CNC, mạch Mach3 USB BOB được chọn vì các ưu điểm: (1) Mach3 được dùng phổ biến trong công nghiệp nhỏ vừa và trong giáo dục, có cộng đồng người dùng lớn và tài liệu hướng dẫn phong phú, trong khi LinuxCNC lại yêu cầu kiến thức sâu về hệ điều hành Linux và cấu hình hệ thống; (2) Mach3 có khả năng tích hợp mạng, hỗ trợ lập trình Macro mạnh mẽ và cơ chế mô phỏng giao thức đầu vào, cho phép kết nối linh hoạt với Web Server (Flask Python) để phát triển các giải pháp IoT và tự động hóa phức tạp, vượt trội hơn GRBL; (3) Mach3 có chi phí thấp và khả năng can thiệp sâu vào giao thức điều khiển điều mà các bộ điều khiển chuyên dụng (hệ thống đóng) không thể.

3.2. Điều khiển cánh tay robot 4-DoF



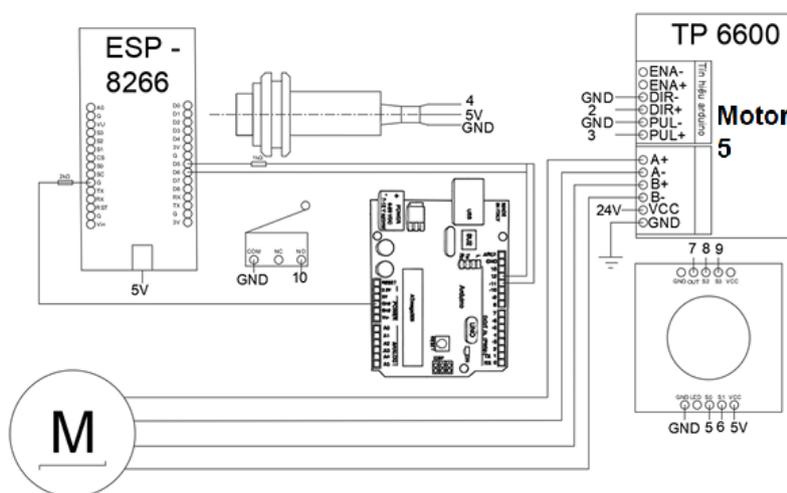
Hình 7. Sơ đồ kết nối phần cứng điều khiển cánh tay robot

Cánh tay robot 4 bậc tự do (4-DoF) được điều khiển bằng vi điều khiển Arduino mega 2560 [13], kết nối với mô đun wifi ESP-8266 thông qua chuẩn UART. Sơ đồ kết nối của cánh tay robot được thể hiện trong Hình 7.

Lập trình điều khiển cánh tay robot trong môi trường Arduino IDE. Các công tắc hành trình được tích hợp để xác định vị trí gốc và giới hạn an toàn. Bốn driver TB6600 sử dụng khuếch đại tín hiệu điều khiển cho 05 động cơ bước, trong đó driver 4 được dùng để điều khiển 2 động cơ dẫn động trượt để cánh tay robot theo T_y , để đảm bảo đồng tốc. Hai động cơ servo MG996R điều khiển trực tiếp thông qua chân PWM của Arduino mega [15, 16]. Mặc dù MG996R có độ rơ và độ chính xác thấp, nhưng có chi phí tối ưu và đủ khả năng thực hiện các thao tác gấp/đặt vật khối lượng nhẹ và điều khiển đơn giản thông qua thư viện Servo tiêu chuẩn của Arduino. Độ chính xác vị trí do các bậc tự do của cánh tay robot đảm nhiệm. Mặt khác, độ không chính xác của nó còn tạo cơ hội để sinh viên nghiên cứu các phương pháp bù trừ lỗi bằng phần mềm, nâng cao giá trị thực nghiệm của đề tài.

3.3. Điều khiển bàn xoay cấp phôi

Hệ thống điều khiển của bàn xoay cấp phôi (Hình 8) được thiết kế nhằm định vị chính xác và phân loại phôi. Bộ điều khiển trung tâm sử dụng vi điều khiển Arduino Uno, kết nối với mô đun wifi ESP-8266 thông qua chuẩn UART.



Hình 8. Sơ đồ kết nối phần cứng điều khiển bàn xoay cấp phôi

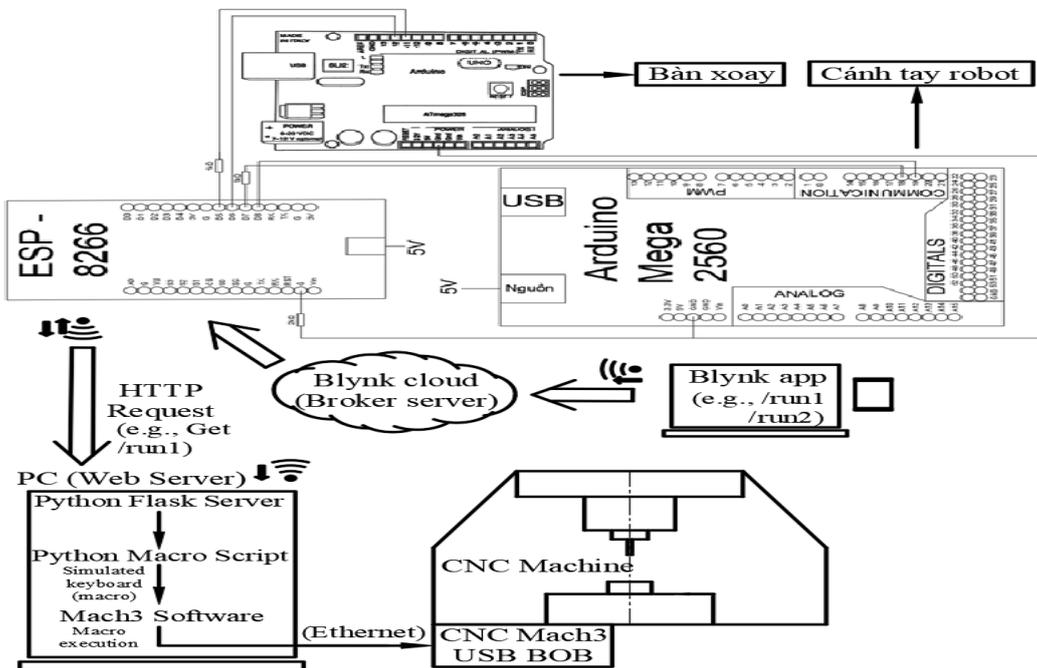
Driver TB6600 sử dụng để khuếch đại tín hiệu điều khiển cho động cơ bước (Motor 5). Cảm biến tiệm cận E3F-DS30P1 dùng để phát hiện sự có mặt của phôi [17]; Cảm biến màu TCS3200 chức năng phân loại tự động các loại phôi [18]; Công tắc hành trình V-156-1C25 [19] được sử dụng để xác định vị trí gốc Home. Bàn xoay có đường kính là 400 mm, chứa 6 phôi và quay với tốc độ $n = 16$ vòng/phút, nên thời gian xoay (T_x) từ vị trí này sang vị trí kế tiếp để cấp phôi cần 0,625 s. Tuy nhiên, T_x sẽ tăng lên cấp số cộng với hằng số là 0,625 s nếu tại vị trí kế tiếp không có phôi hoặc loại phôi tại đó không đúng loại phôi yêu cầu.

3.4. Tích hợp điều khiển toàn hệ

Hình 9 trình bày sơ đồ điều khiển tích hợp tổng thể cho hệ CIM, trong đó kết hợp truyền thông không dây (Wifi) và có dây (UART) để điều khiển hệ thống CIM. Hệ thống được chia thành 3 lớp điều khiển như sau:

3.4.1. Lớp truyền thông không dây

Hoạt động được khởi tạo ở cấp người dùng thông qua ứng dụng Blynk app (được cài đặt trên PC hoặc thiết bị di động), gửi lệnh đến máy chủ đám mây Blynk cloud. Blynk cloud chuyển tiếp dữ liệu giữa người dùng đến ESP-8266. Mô-đun Wi-Fi ESP-8266 đóng vai trò trung tâm truyền thông và phân phối tín hiệu một cách trình tự (được đề cập ở Mục 3.5) nhằm phối hợp hoạt động của các cụm thiết bị trong hệ CIM.



Hình 9. Sơ đồ điều khiển hệ tích hợp

3.4.2. Lớp điều khiển trung tâm và phân phối tín hiệu

ESP-8266 là điều khiển trung tâm và phân phối tín hiệu đến ba cụm thiết bị riêng biệt:

- *Điều khiển bàn xoay:* ESP-8266 gửi tín hiệu điều khiển đến Arduino Uno qua giao tiếp UART để kích hoạt và gọi phiê gia công, Arduino Uno thực hiện chương trình con để điều khiển bàn xoay đưa loại phiê yêu cầu đến vị trí Home.

- *Điều khiển cánh tay robot:* ESP-8266 gửi tín hiệu đến Arduino Mega 2560 qua giao tiếp UART. Arduino Mega chạy chương trình con điều khiển chuyển động cánh tay robot thực hiện nhiệm vụ gấp phiê tại vị trí bàn xoay đã định và đưa đến bàn ê tô trên máy CNC, mặt khác sau khi gia công xong thì cánh tay sẽ gấp sản phẩm và đặt trên băng tải ứng với từng loại phiê.

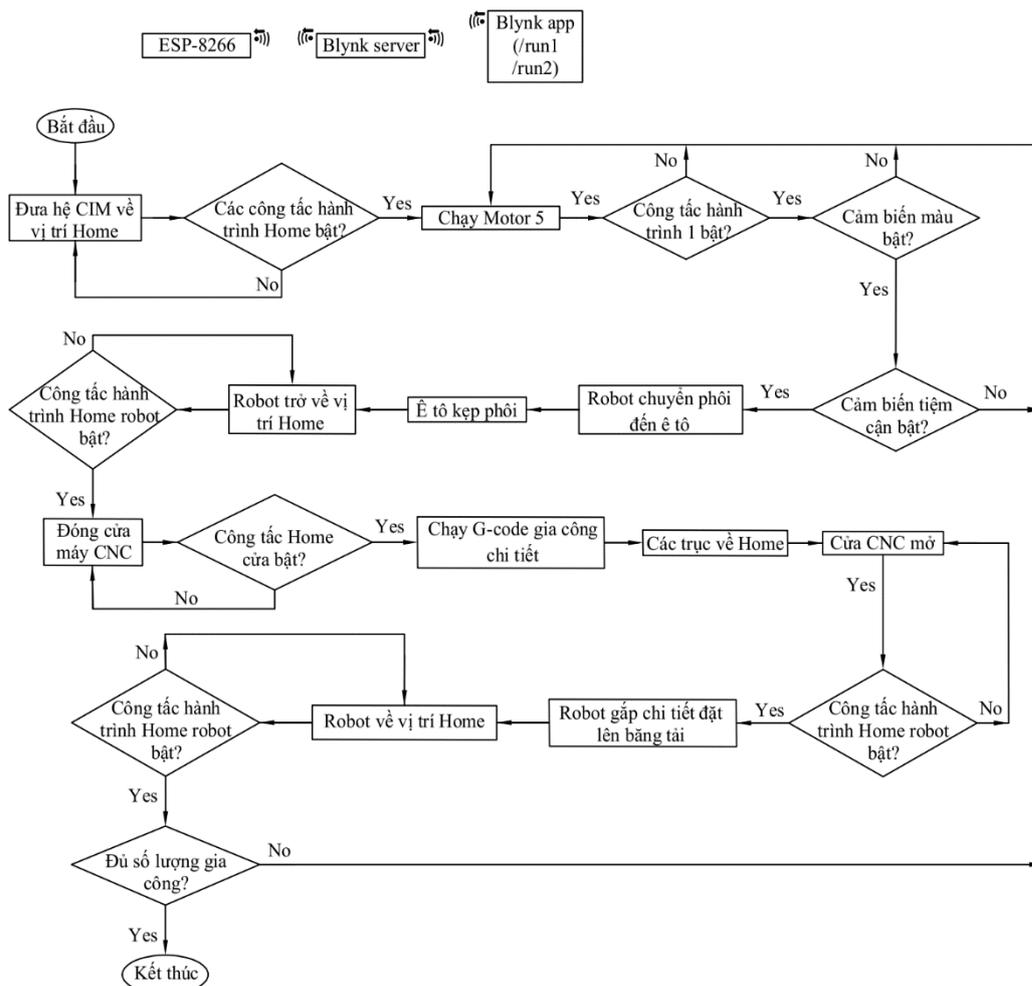
- Điều khiển máy CNC: khi có phôi trên ê tô bàn máy, quá trình gia công CNC bắt đầu, ESP-8266 gửi yêu cầu HTTP không dây (ví dụ: Get /run1 cho sản phẩm 1) đến Python Flask server trên PC (Web Server).

3.4.3. Lớp thực thi trên PC

Web Server đảm nhận giai đoạn thực thi để điều khiển máy CNC. Flask server trên PC thực thi tập lệnh Python Macro có chức năng mô phỏng thao tác bàn phím (Simulated keyboard macro execution) để giao tiếp với phần mềm Mach3. Tuy nhiên, do file Gcode gia công sản phẩm là rất dài, để tránh việc thao tác bàn phím tốn thời gian phải mô tả từng lệnh, một macro file như run_type_1.m1s cho sản phẩm 1 và run_type_2.m1s cho sản phẩm 2 viết bằng VBScript. Như vậy khi Flask server gọi các file trên thì phần mềm Mach3 mở và chạy file G-code trực tiếp. Mach3 giao tiếp với CNC Mach3 USB BOB bằng kết nối Ethernet. Mạch BOB phát xung điều khiển đến các cơ cấu chấp hành của máy CNC để thực hiện gia công chi tiết.

3.5. Thuật toán điều khiển hệ CIM

Lưu đồ thuật toán điều khiển hệ thống CIM được trình bày chi tiết trong Hình 10.



Hình 10. Lưu đồ thuật toán điều khiển hệ CIM

Hệ thống CIM được điều khiển từ xa thông qua ứng dụng Blynk trên nền tảng IoT. Khi người dùng kích hoạt chương trình, Blynk Cloud chuyển tiếp lệnh qua ESP-8266 đến các vi điều khiển Arduino. Chu trình bắt đầu bằng việc xác lập vị trí gốc Home cho toàn hệ thống. Tiếp theo, trạm cấp phôi kích hoạt động cơ số 5 để đưa phôi vào vị trí kiểm tra. Phôi phải trải qua cơ chế xác nhận ba bước: công tắc hành trình, cảm biến tiệm cận (xác nhận sự hiện diện) và cảm biến màu (phân loại đúng loại phôi yêu cầu). Nếu một trong các điều kiện không thỏa mãn, động cơ số 5 tiếp tục đưa phôi tiếp theo vào. Khi phôi thỏa mãn, cánh tay robot sẽ gấp phôi và đặt lên ê tô bàn máy CNC. Robot lập tức trở về vị trí Home (được xác nhận bằng công tắc hành trình), kích hoạt đóng cửa an toàn và gửi lệnh đến Mach3 để bắt đầu chương trình gia công. Sau khi gia công hoàn tất, Mach3 gửi lệnh phản hồi để mở cửa an toàn. Robot gấp sản phẩm đã gia công và phân loại đến băng tải 1 hoặc 2 tùy theo loại sản phẩm, sau đó trở về vị trí gốc. Chu trình sẽ lặp lại cho đến khi đủ số lượng sản phẩm yêu cầu. Toàn bộ các hệ thống giao tiếp tuân tự thông qua dòng lệnh code điều khiển. Về cơ chế an toàn cho hệ thống, một nút vật lý dừng khẩn cấp được bố trí trên hệ CIM để ngắt nguồn điều khiển và một nút Stop trên Blynk app gửi tín hiệu ngắt tức thời đến ESP-8266 để dừng ngay vòng lặp. Nếu ESP-8266 mất kết nối với Blynk (hoặc mạng Wi-Fi), nó sẽ ngừng gửi/nhận lệnh, đồng thời kích hoạt cảnh báo cục bộ (nháy LED).

4. Chế tạo, lắp ráp và vận hành thử nghiệm hệ CIM

4.1. Chế tạo và lắp ráp hệ CIM



Hình 11. Hệ CIM sau khi được lắp ráp

Hình 11 là hệ thống CIM sau khi được chế tạo và lắp ráp hoàn chỉnh, đáp ứng như mô hình thu nhỏ của dây chuyền sản xuất tự động. Hệ thống được thiết kế thể hiện các chức năng cốt lõi hệ CIM, bao gồm trung tâm gia công tự động, cơ cấu cấp phôi tự động, cơ cấu gấp sản phẩm tự động và khả năng giám sát từ xa. Hệ bao gồm: máy phay CNC (1), bàn xoay cấp phôi (2), cánh tay robot (3), cửa an toàn (4), ê-tô (5), băng tải phân loại (6) và (7), camera giám sát hệ thống từ xa (8). Trong hệ trên, tầm hoạt động của cánh tay

robot (không tính khoảng tịnh tiến T_y) là 450 mm, tầm di chuyển của riêng trục T_y là 400 mm, khoảng cách tâm robot đến tâm bàn xoay là 500 mm, khoảng cách tâm robot (tại vị trí cuối hành trình T_y) đến vị trí gá phôi trên ê tô là 400 mm.

4.2. Vận hành hệ CIM

Các cụm thiết bị trong hệ thống được đánh giá riêng biệt và kiểm tra tổng hợp sau khi tích hợp toàn bộ hệ thống. Sai lệch góc quay vị trí bàn được quyết định bởi sai số tại vị trí mà công tắc “đóng” để chuyển tiếp điểm từ OFF sang ON. Dung sai vị trí đóng mở của V-156-1C25 là $\pm 1,2$ mm [19], vị trí đặt công tắc hành trình cách tâm quay của bàn là 200 mm, nên sai số góc lớn nhất bởi được xác định trong khoảng $0,7^\circ$.

Sai số vị trí điểm trung tâm tay gắp của robot (TCP – tool center point) trong mặt XOY là ± 10 mm theo mọi hướng. Sai số này là do hiện tượng mất đồng bộ (trượt bước) của động cơ. Nguyên nhân cụ thể là trong quá trình tăng/giảm tốc, quán tính và khối lượng của các khâu tay máy tạo ra mô-men cản động vượt quá mô-men kéo tối đa, gây trượt bước; khi tay máy dừng, mô-men giữ thấp cũng là nguyên nhân gây dịch chuyển vị trí tĩnh; điều khiển vòng hở khiến hệ thống không thể hiệu chỉnh các sai số tích lũy. Do đó, sai số vị trí tổng ± 10 mm nếu không đưa hệ tay máy về vị trí Home trong một chu trình hoạt động. Để khắc phục sai số vị trí tích lũy, giải pháp đưa ra là hiệu chỉnh tay máy về vị trí Home định kỳ, tuy không loại bỏ hoàn toàn sai số nhưng giúp giảm sai số tích lũy sau mỗi chu kỳ làm việc giảm xuống còn ± 3 mm. Việc hiệu chỉnh này được tích hợp vào lưu đồ thuật toán điều khiển ở Hình 10, để đảm bảo độ chính xác được duy trì ở mức tối đa cho mỗi chu trình làm việc. Cụ thể, cánh tay robot được lệnh đi về vị trí tham chiếu (Home) sau mỗi nhiệm vụ khởi động, gắp phôi và gắp sản phẩm.

Bảng 1 trình bày giá trị đo đặc giao tiếp từ Blynk app đến ESP-8266 ($\Delta 1$), độ trễ thực thi lệnh điều khiển từ ESP-8266 đến USB BOB ($\Delta 2$) và độ ổn định hệ thống chạy liên tục trong 2 giờ vận hành ($\Delta 3$) được tiến hành đo lặp lại sau 10 lần. Cụ thể, phương pháp ghi thời gian tự động Timestamping được sử dụng để đo độ trễ giao tiếp từ Blynk app đến ESP-8266. Giao thức Network time protocol dùng để đồng bộ hóa thời gian giữa Blynk Server và ESP8266. Thời gian gửi lệnh T_g được gắn kèm vào dữ liệu gửi đi từ App, và ESP8266 sẽ ghi lại thời gian nhận T_n ngay khi lệnh đến ESP-8266. Độ trễ $\Delta 1$ là hiệu số giữa T_g và T_n . Tiến hành tương tự khi đo độ trễ $\Delta 2$ thực thi lệnh điều khiển từ ESP-8266 \rightarrow Wi-Fi \rightarrow Flask Server \rightarrow Mach3 \rightarrow USB BOB.

Để kiểm tra khả năng vận hành ổn định của hệ thống ($\Delta 3$), hệ thống được thực nghiệm liên tục 2 giờ tương ứng 18 chu kỳ hoạt động gia công phẳng bề mặt, và thực hiện lặp lại 10 lần. Kết quả $D3$ trong Bảng 1 là liệt kê số chu kỳ hệ thống bị dừng. Nguyên nhân dừng hệ thống là do: Blynk còn nhiều hạn chế khi ứng dụng vào một hệ thống CIM có khối lượng công việc lớn và yêu cầu môi trường chuyên biệt, sự ảnh hưởng của nhiễu WiFi, nguy cơ nghẽn Server Blynk Cloud, và ESP-8266 dễ bị nhiễu. Để nâng cao độ ổn định và giảm thiểu thời gian dừng, có thể xem xét thay thế Blynk bằng các ứng dụng hoặc phần mềm chuyên dụng hơn cho việc điều khiển hệ CIM, đồng thời

chuyển sang sử dụng mạng LAN nội bộ (ví dụ: Modbus/TCP qua mạng nội bộ) thay vì phụ thuộc vào mạng Internet và Cloud Server, nhằm đảm bảo khả năng kết nối và độ tin cậy của hệ thống.

Bảng 1. Giá trị thực nghiệm độ trễ và ổn định của hệ thống

STT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta 1$	0,763	1,467	1,161	0,665	1,769	0,962	1,564	1,268	0,864	1,361
$\Delta 2$	0,832	0,457	0,901	0,509	0,644	0,306	0,803	1,158	0,755	1,059
$D3$	1	1	0	2	1	3	0	2	0	1

Kết quả thu được $\Delta 1 = 1,184 \pm 0,366$ (s), $\Delta 2 = 0,742 \pm 0,268$ (s), và $\Delta 3 = (93,89 \pm 5,52)$ %.

5. Kết luận

Nghiên cứu này đã thiết kế, lắp ráp và thử nghiệm thành công một Hệ thống sản xuất tích hợp bằng máy tính (CIM) quy mô nhỏ tích hợp công nghệ IoT cơ bản phục vụ mục tiêu đào tạo. Hệ CIM được xây dựng từ máy phay CNC cũ và các linh kiện chi phí thấp, kết hợp kiến trúc điều khiển hỗn hợp dựa trên các nền tảng mã nguồn mở (Arduino, ESP-8266) và phần mềm thương mại (Mach3), mang lại một giải pháp linh hoạt và hiệu quả về chi phí. Hệ thống đã chứng minh khả năng vận hành tuần tự ổn định với độ ổn định gần $(93,89 \pm 5,52)$ %. Mô hình CIM này vẫn đáp ứng được các yêu cầu chức năng cốt lõi của một hệ sản xuất thông minh và trở thành một mô hình thực hành hiệu quả trong giảng dạy.

Mặc dù vậy hệ thống còn tồn tại các hạn chế kỹ thuật như sai số vị trí TCP của cánh tay robot và độ trễ truyền thông do sử dụng giao tiếp UART/HTTP. Để cải thiện, trong thời gian tới cần chuyển sang điều khiển vòng kín sử dụng encoder để nâng cao độ chính xác cơ học. Về mặt hệ thống IoT và truyền thông, cần nâng cấp mô-đun ESP-8266 lên ESP32-DevKitC và chuyển sang giao thức truyền thông công nghiệp như Modbus/TCP hoặc CAN bus để giảm độ trễ và tăng cường độ ổn định mạng. Đồng thời các cảm biến ngoại vi cần được thêm vào hệ để giám sát trạng thái và chẩn đoán lỗi sớm.

Lời cảm ơn: Bài báo này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng với đề tài có mã số T2024-02-54.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Kagermann, H., Anderl, R., Gausemeier, J., Schuh, G., & Wahlster, W. (Eds.). (2016). *Industrie 4.0 in a Global Context: strategies for cooperating with international partners*. Herbert Utz Verlag.
- [2]. Lee, E. A. (2008, May). *Cyber physical systems: Design challenges*. In 2008 11th

- IEEE international symposium on object and component-oriented real-time distributed computing (ISORC) (pp. 363-369). IEEE.
- [3]. Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, 3, 18-23.
- [4]. Yang, H., Kumara, S., Bukkapatnam, S. T., & Tsung, F. (2019). The internet of things for smart manufacturing: A review. *IIEE transactions*, 51(11), 1190-1216.
- [5]. Coito, T., Firme, B., Martins, M. S., Costigliola, A., Lucas, R., Figueiredo, J., ... & Sousa, J. M. (2022). Integration of industrial IoT architectures for dynamic scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 171, 108387.
- [6]. Yang, F., & Gu, S. (2021). Industry 4.0, a revolution that requires technology and national strategies. *Complex & Intelligent Systems*, 7(3), 1311-1325.
- [7]. Wang, B., Tao, F., Fang, X., Liu, C., Liu, Y., & Freiheit, T. (2021). Smart manufacturing and intelligent manufacturing: A comparative review. *Engineering*, 7(6), 738-757.
- [8]. BuildYourCNC, "Mach3 USB Interface Board," [Online]. Available: <https://buildyourcnc.com/products/>. [Accessed July 06, 2025].
- [9]. ArtSoft, "Mach3 CNC Control Software," [Online]. Available: <https://www.machsupport.com/software/mach3/>. [Accessed July 06, 2025].
- [10]. Blynk IoT Platform, "Official Documentation," [Online]. Available: <https://docs.blynk.io>. [Accessed July 07, 2025].
- [11]. Espressif Systems, "ESP8266EX Datasheet," [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf. [Accessed July 15, 2025].
- [12]. Python Software Foundation, "Flask Documentation," [Online]. Available: <https://flask.palletsprojects.com>. [Accessed July 15, 2025].
- [13]. Arduino, "MEGA2560 Datasheet," [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000067-datasheet.pdf>. [Accessed July 23, 2025].
- [15]. Bulkman3d, "TB6600 Stepper Motor Drive," [Online]. Available: <https://bulkman3d.com/wp-content/uploads/2019/06/>. [Accessed July 24, 2025].
- [16]. Handsontec, "MG996R Metal Gear Servo Motor," [Online]. Available: https://www.handsontec.com/dataspecs/motor_fan/-MG996R.pdf. [Accessed July 24, 2025].
- [17]. Eletrodex, "E3F Series," [Online]. Available: https://eletrodex.org/eletrodex/Loja_Tray/Datasheets/. [Accessed July 25, 2025].
- [18]. Texas Advanced Optoelectronic Solutions Inc., "TCS3200, TCS3210

programmable color light-to-frequency converter," [Online]. Available: <https://www.mouser.com/catalog/>. [Accessed July 25, 2025].

- [19]. Omron Electronics., "V-156-1C25 Datasheet," [Online]. Available: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/826800/OMRON/V-156-1C25.html>. [Accessed July 26, 2025].

DESIGN AND ASSEMBLY OF AN IOT-ENABLED CIM SYSTEM FOR EDUCATIONAL PURPOSES

Tran Minh Sang¹, Tran Duc Thang¹, Dinh Duc Hanh¹

ABSTRACT

This study presents the design and assembly of an IoT-integrated Computer-Integrated Manufacturing (CIM) system intended for educational purposes. The novelty of this system lies in its hybrid control structure which utilizes low-cost components, enabling students to understand and practice the basic level integration of embedded programming, electronics, and mechanics. The CIM system comprises a workpiece feeding station, a robotic arm, a CNC milling station, and a conveyor belt for product transport. An ESP-8266 Wi-Fi module provides the IoT functionality, allowing for the synchronized sequential operation of the CIM system and establishing a wireless connection for remote operation and monitoring. Operational results indicate that the communication latency from the Blynk app to the ESP-8266, from the ESP-8266 to CNC Mach3, and the overall system operational stability are $(1,184 \pm 0,366)$ s, $(0,742 \pm 0,268)$ s, and $(93,89 \pm 5,52)$ %, respectively. Although the system still exhibits several limitations regarding equipment, communication standards, and stability according to industrial standards, it nonetheless fulfills the requirements for practical teaching in courses related to smart manufacturing systems.

Keywords: *Computer-Integrated Manufacturing (CIM), Internet of Things (IoT), CNC, robotic arm.*



¹Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng; Email: ddhanh@dut.udn.vn