

TỰ ĐỘNG HÓA TRONG NÔNG NGHIỆP: CƠ HỘI VÀ THÁCH THỨC TÍCH HỢP ROBOT VÀ MÁY MÓC TRONG CANH TÁC

Trần Thị Kim Ngà¹, Đào Duy Vinh¹, Lê Quang Hiền¹
Phan Trọng Nghĩa¹, Hồ Văn Nghĩa¹, Cao Đức Lợi¹

TÓM TẮT:

Nông nghiệp đóng vai trò cốt lõi trong bảo đảm an ninh lương thực và phát triển bền vững toàn cầu, nhưng đang phải đối mặt với nhiều thách thức như thiếu hụt lao động, biến đổi khí hậu và nhu cầu gia tăng về sản phẩm chất lượng cao. Trong bối cảnh đó, tự động hóa với sự hỗ trợ của robot, máy móc thông minh, trí tuệ nhân tạo (AI) và Internet vạn vật (IoT) nổi lên như một xu hướng tất yếu nhằm nâng cao năng suất, tối ưu hóa quản lý tài nguyên và giảm thiểu tác động môi trường. Bài báo này thực hiện một khảo sát tổng quan về robot và máy móc trong nông nghiệp, bao gồm robot gieo hạt, thu hoạch, chăm sóc và chăn nuôi, cũng như máy kéo tự động, hệ thống tưới thông minh, thiết bị bay không người lái và các công nghệ hỗ trợ như thị giác máy tính, mạng học sâu, cảm biến, IoT và phân tích dữ liệu lớn. Bên cạnh việc hệ thống hóa các ứng dụng tiêu biểu, nghiên cứu phân tích cơ hội, thách thức và định hướng nghiên cứu tương lai của tự động hóa nông nghiệp, đồng thời bài báo cũng trình bày một số nghiên cứu được thực hiện tại Khoa Cơ khí Công nghệ, Trường Đại học Nông Lâm Thành phố Hồ Chí Minh.

Từ khóa: Internet vạn vật (IoT), máy móc tự động, nông nghiệp chính xác, nông nghiệp bền vững, robot nông nghiệp, tự động hóa nông nghiệp.

AUTOMATION IN AGRICULTURE: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES – INTEGRATING ROBOTS AND MACHINERY IN FARMING

ABSTRACT:

Agriculture plays a crucial role in ensuring global food security and sustainable development, yet it faces numerous challenges such as labor shortages, climate change, and the increasing demand for high-quality products. In this context, automation supported by robotics, smart machinery, artificial intelligence (AI), and the Internet of Things (IoT) has emerged as an inevitable trend to enhance productivity, optimize resource management, and minimize environmental impacts. This paper provides a comprehensive survey of robotic and machinery technologies in agriculture, including seeding, harvesting, crop-care, and livestock robots, as well as autonomous tractors, smart irrigation systems, drones, and supporting technologies such as computer vision, deep learning, sensor, IoT, and big data analytics. In addition to systematizing representative applications, the study analyzes the opportunities and benefits of automation, while also presenting several research projects on agricultural automation conducted at the Faculty of Mechanical Technology, Nong Lam University, Ho Chi Minh City.

Keywords: Agricultural automation, agricultural robotics, autonomous machinery, Internet of Things (IoT), precision agriculture, sustainable agriculture.

1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, biến đổi khí hậu, sự già hóa lực lượng lao động nông thôn, quá trình đô thị hóa, cùng nhu cầu ngày càng cao về an toàn thực phẩm đã đặt ra nhiều thách thức cho các hệ thống

canh tác truyền thống [1–3]. Theo [4], các phương pháp canh tác cũ không còn đáp ứng được nhu cầu ngày càng gia tăng, buộc nông dân phải lạm dụng thuốc trừ sâu độc hại. Hệ quả là sản xuất nông nghiệp bị ảnh hưởng nghiêm trọng, đất đai dần thoái hóa và mất đi độ màu mỡ vốn có. Trong

¹Khoa Cơ khí – Công nghệ, Trường Đại học Nông Lâm Tp. Hồ Chí Minh

*E-mail: ttknga@hcmuaf.edu.vn

bối cảnh đó, tự động hóa trong nông nghiệp, đặc biệt là việc tích hợp robot và máy móc thông minh vào canh tác, được xem là giải pháp tất yếu nhằm tái định hình nền nông nghiệp hiện đại. Các công nghệ này bao gồm robot, máy móc hiện đại, trí tuệ nhân tạo (AI) và Internet vạn vật (IoT) [5–6], góp phần nâng cao năng suất, hiệu quả và tính bền vững. Như [7] chỉ ra, các ứng dụng như máy móc tự hành, máy bay không người lái (UAV) hay nhà kính thông minh đã mang lại những cải thiện rõ rệt về năng suất, giảm sử dụng thuốc trừ sâu và nước tưới, đồng thời khắc phục tình trạng thiếu hụt lao động.

Sự phát triển nhanh chóng của tự động hóa nông nghiệp đã thu hút sự quan tâm nghiên cứu từ nhiều nhóm tác giả trên thế giới. Kirtan Jha và cộng sự [4] khảo sát việc ứng dụng IoT, truyền thông không dây, học máy, trí tuệ nhân tạo và học sâu trong nông nghiệp, tập trung vào giải quyết các vấn đề bệnh cây, quản lý sâu bệnh, tưới tiêu và quản lý nước. Nghiên cứu này cũng đề xuất hệ thống nhận dạng và tưới tiêu tự động dựa trên IoT. Trong [8], các tác giả nhấn mạnh IoT như một mạng lưới giao tiếp máy-máy, đóng vai trò quan trọng trong giám sát nhà kính, quản lý đất, sâu bệnh và tự động điều khiển, từ đó tối ưu hóa phân bón và cung cấp hệ thống cảnh báo sớm. Nghiên cứu [9] tổng quan các tiến bộ và thách thức của robot nông nghiệp, hướng tới giải quyết vấn đề gia tăng dân số, đô thị hóa và thiếu hụt lao động kỹ năng. Ứng dụng của robot bao gồm chuẩn bị đất, gieo trồng, xử lý cây, thu hoạch, ước tính năng suất và phân tích kiểu hình. Các ví dụ nổi bật là robot Cäsar (bón phân), UAV AGRAS MG-1P (phun thuốc chính xác), robot diệt cỏ Oz, Dino, Ted, AgriRobot, cũng như các robot thu hoạch như Vegebot

(rau diếp) và Amaran (dưa).

Trong [10], nhóm tác giả tập trung vào UAV giám sát đồng ruộng, theo dõi cây trồng và phun phân bón chính xác. Ngoài ra, các bộ điều khiển thao tác được thiết kế đa dạng phục vụ canh tác và thu hoạch, cùng hệ thống phân tích dữ liệu hình ảnh. Công nghệ RFID được ứng dụng trong gieo hạt nhằm truy xuất chất lượng và hỗ trợ trồng trọt, trong khi thị giác máy tính giúp nhận diện hàng cây, phân biệt cây trồng/cỏ dại. Hệ thống tưới thông minh dựa trên IoT, Raspberry Pi và cảm biến pH được giới thiệu nhằm tối ưu hóa quản lý nước và lựa chọn cây trồng phù hợp. Một khảo sát khác [11] tập trung vào máy kéo tự động và việc tích hợp GPS tiên tiến (Precision GPS, RTK, DGPS). Học máy được ứng dụng trong phát hiện bệnh cây và dự đoán năng suất, trong khi cảm biến đa phổ, Li-DAR và công nghệ hợp nhất dữ liệu hỗ trợ giám sát đồng ruộng thời gian thực. Các ứng dụng nổi bật bao gồm gieo trồng chính xác, giám sát dịch hại và quản lý trang trại. Nghiên cứu [6] cũng chỉ ra vai trò nổi bật của học máy và học sâu trong phân loại cây trồng, phát hiện bệnh lá, thu hoạch rau củ quả, và phân biệt cỏ dại. Các thuật toán học máy như SVM, ANN, Random Forest được dùng phổ biến, trong khi mạng nơ ron tích chập mang lại độ chính xác vượt trội trong nhận diện hình ảnh. Theo [12], công nghệ thị giác máy tính ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong nông nghiệp như giám sát tăng trưởng cây trồng, phòng trừ sâu bệnh, thu hoạch tự động, kiểm tra chất lượng nông sản, quản lý trang trại, và giám sát đất nông nghiệp bằng UAV. Thị giác máy tính giúp phát hiện thiếu dinh dưỡng, đếm côn trùng, phun thuốc trừ sâu chính xác, cũng như hỗ trợ robot thu hoạch dưa chuột, cherry, táo với độ chính

xác cao. Trong khâu kiểm tra chất lượng, công nghệ này cho phép phân loại không phá hủy đối với cà rốt, chanh, khoai tây, cà chua, việt quất. Trong khi đó, nghiên cứu [13] khảo sát tương tác người-robot (HRI) trong nông nghiệp, tập trung vào hiệu suất phối hợp giữa con người và robot, mức độ tin cậy, nhận thức tình huống và thiết kế giao diện. Các ứng dụng bao gồm robot phun thuốc bán tự động, hệ thống định vị trong nông nghiệp chính xác, và cảm biến phát hiện trạng thái nhận thức của người vận hành. Các chiến lược HRI đã chứng minh khả năng cải thiện hiệu quả thu hoạch dựa so với phương pháp thủ công hay hoàn toàn tự động.

Tổng thể, các nghiên cứu trên cho thấy ngành cơ điện tử và ngành điều khiển – tự động hóa giữ vai trò quan trọng trong phát triển các giải pháp nông nghiệp hiện đại. Việc tích hợp cơ khí, điện, điện tử, cảm biến, điều khiển và trí tuệ nhân tạo để phát triển robot và máy móc thông minh có khả năng tự động hoặc bán tự động. Các hướng nghiên cứu nổi bật bao gồm robot gieo hạt, chăm sóc và thu hoạch; hệ thống điều khiển tự hành cho máy kéo và UAV; ứng dụng thị giác máy tính và học máy trong phân loại cây trồng/cỏ dại; và tích hợp IoT cho giám sát môi trường canh tác. Sự phát triển mạnh mẽ này không chỉ thúc đẩy năng suất, chất lượng và tính bền vững của nông nghiệp mà còn góp phần định hình xu thế nông nghiệp thông minh, phù hợp với yêu cầu phát triển bền vững trong bối cảnh biến đổi khí hậu và khan hiếm lao động.

2. CÔNG NGHỆ TRONG TỰ ĐỘNG HÓA NÔNG NGHIỆP

2.1. Robot trong nông nghiệp

a. Robot gieo hạt

Robot gieo hạt nhằm thay thế lao động thủ công và có thể giảm chi phí lao động tới 30% [14]. Việc áp dụng kỹ thuật gieo hạt chính xác giúp tiết kiệm từ 17% đến 40% lượng giống so với gieo thủ công, đồng thời nâng năng suất lên đến 20% [15]. Tại các quốc gia như Mỹ, Nhật Bản, Trung Quốc và Ấn Độ, robot gieo hạt đã được nghiên cứu và triển khai từ các mô hình nhỏ gọn phục vụ hộ nông dân cho đến máy gieo hạt tự hành quy mô công nghiệp [16–18]. Công nghệ cốt lõi của robot gieo hạt thường kết hợp GPS, cảm biến định vị và thị giác máy tính để xác định vị trí gieo, cùng với cơ cấu lấy hạt cơ khí hoặc hút chân không đảm bảo độ chính xác về khoảng cách và mật độ [19]. Một số mô hình hiện đại còn tích hợp AI và IoT, cho phép điều chỉnh độ sâu và mật độ gieo theo điều kiện đất và giống cây [20]. Ngoài ra, giải pháp gieo hạt bằng drone đã cho thấy hiệu quả vượt trội trên cánh đồng quy mô lớn [21].

b. Robot thu hoạch

Robot thu hoạch hướng đến việc thay thế lao động thủ công trong thu hoạch trái cây và rau củ. Theo Droukas [22], các hệ thống này thường sử dụng cảm biến và thị giác máy tính để nhận diện và định vị quả. Trong thu hoạch có chọn lọc, nghiên cứu [23] chỉ ra nhiều thách thức liên quan đến thiết kế cơ cấu cắt/gấp, lập kế hoạch chuyển động và điều khiển trong môi trường cây trồng phức tạp. Thêm vào đó, nghiên cứu [24] chứng minh rằng phương pháp robot tiếp cận quả bằng đầu gấp, sau đó đẩy quả theo hướng nhất định kết hợp tạo lực cắt, có thể đạt tỷ lệ thành công trên 98% và tỷ lệ hư hại dưới 1% khi điều kiện phù hợp. Mặc dù công nghệ đã đạt nhiều tiến bộ, song các yếu tố như chi phí, độ bền, và

khả năng hoạt động trong điều kiện thực tế như ánh sáng thay đổi, tán lá che phủ, địa hình phức tạp vẫn là thách thức cần giải quyết [25].

c. Robot chăm sóc cây trồng

Robot chăm sóc cây trồng đảm nhận các nhiệm vụ như giám sát sức khỏe cây, phát hiện sâu bệnh, bón phân, cắt tỉa lá và diệt cỏ, giúp giảm lao động thủ công và hạn chế sử dụng phân bón, thuốc bảo vệ thực vật dư thừa. Các robot này tích hợp khả năng di chuyển tự động giữa các luống cây, nhận diện trạng thái cây nhờ cảm biến hình ảnh (RGB, ảnh siêu phổ, LiDAR...) và thuật toán học máy để đưa ra quyết định phù hợp. Chẳng hạn, robot chăm sóc dâu tây có khả năng phát hiện lá bệnh và loại bỏ để ngăn ngừa lây lan [26]. Về di động, robot cần khả năng định vị chính xác và tránh chướng ngại vật. Đối với robot diệt cỏ, định vị, nhận dạng và cơ cấu cắt là yếu tố then chốt [27]. Các thách thức bao gồm sự đa dạng của giống cây, biến động môi trường ngoài trời, tán lá che phủ gây khó cho cảm biến, cùng với chi phí cao.

d. Robot phục vụ chăn nuôi

Robot phục vụ chăn nuôi có nhiều ứng dụng, từ cho ăn tự động, vắt sữa, giám sát đến quản lý đàn vật nuôi. Nghiên cứu [28] đã giới thiệu một robot tự hành cho ăn, sử dụng cảm biến siêu âm và hồng ngoại để điều hướng và phân phối thức ăn theo lịch trình định sẵn. Trong chăn nuôi bò sữa, hệ thống robot đẩy thức ăn và vắt sữa đã được thương mại hóa, giúp giảm nhân công, hạn chế lãng phí và cải thiện năng suất [29-30]. Trong ngành gia cầm, robot thu gom trứng có khả năng nhận diện màu và phân loại trứng mà không gây hư hại [31], trong khi robot cho ăn được tối ưu hóa đường đi nhằm tiết kiệm năng lượng [32]. Gần đây,

robot bốn chân cũng được thử nghiệm để giám sát đàn trên đồng cỏ, học thích ứng với địa hình và theo dõi sức khỏe vật nuôi [33].

2.2. Hệ thống thông minh và cơ giới hóa

a. Máy kéo tự động

Máy kéo tự động có khả năng vận hành độc lập nhờ GPS, RTK, cảm biến lidar và thị giác máy tính. Các thuật toán điều khiển và học máy giúp định hướng chính xác, tránh chướng ngại vật và thực hiện các công việc nông nghiệp từ cày, xới, gieo hạt, đến bón phân, phun thuốc với độ chính xác cao. Theo [34], máy kéo tự hành giúp giảm chi phí nhân công, tăng hiệu quả nhiên liệu và độ chính xác trong sản xuất. Ngoài ra, chúng có thể hoạt động liên tục, tối ưu năng suất mùa vụ [35].

b. Hệ thống tưới thông minh

Tưới tiêu là yếu tố quyết định năng suất cây trồng, đặc biệt trong bối cảnh khan hiếm nước do biến đổi khí hậu. Hệ thống tưới thông minh sử dụng IoT, AI và cảm biến để xác định nhu cầu nước và điều khiển tưới chính xác. Nghiên cứu [36] cho thấy hệ thống này giúp tiết kiệm 30–40% lượng nước so với tưới truyền thống. Nghiên cứu [37] tại Philippines cũng chứng minh hiệu quả cải thiện canh tác lúa nước. Tuy nhiên, chi phí cao, độ bền cảm biến ngoài thực địa và sự phụ thuộc vào mạng ổn định là thách thức cần khắc phục.

c. Thiết bị bay không người lái

Drone ngày càng đóng vai trò quan trọng trong nông nghiệp nhờ khả năng giám sát, bản đồ hóa và phun xịt chính xác. Drone trang bị camera đa phổ và AI có thể phân tích tình trạng sinh trưởng, phát hiện bệnh do thiếu dinh dưỡng hay hạn hán. Theo

[38], sử dụng drone giúp giảm lượng hóa chất và hạn chế rủi ro cho nông dân. Nghiên cứu [39] còn tích hợp học sâu để điều khiển drone phun chính xác tại khu vực cần thiết. Tuy nhiên, drone nông nghiệp vẫn gặp hạn chế về tải trọng, thời gian bay, ảnh hưởng thời tiết và chi phí đầu tư [40].

2.3. Các công nghệ hỗ trợ

Ngoài robot và máy móc thông minh, sự thành công của nông nghiệp số phụ thuộc vào các công nghệ hỗ trợ, đóng vai trò nền tảng trong kết nối, xử lý dữ liệu và tối ưu hóa toàn bộ hệ thống sản xuất.

a. Thị giác máy tính và Trí tuệ nhân tạo

Thị giác máy tính và AI là công cụ không thể thiếu trong nhận diện cây trồng, phát hiện bệnh hại và hỗ trợ ra quyết định. Nghiên cứu [41] phát triển nhà kính khí canh thông minh với AI và IoT để kiểm soát tưới tiêu và nhận diện bệnh thực vật. Tương tự, [39] cho thấy AI trên drone giúp phân biệt cây trồng và cỏ dại, từ đó phun thuốc chính xác, giảm chi phí và ô nhiễm môi trường.

b. IoT và cảm biến

IoT là hạ tầng quan trọng để thu thập dữ liệu thời gian thực về độ ẩm, nhiệt độ, ánh sáng, khí hậu từ đồng ruộng và thiết bị. Nghiên cứu [37] chứng minh IoT cải thiện đáng kể hiệu quả tưới tiêu lúa. Đồng thời, [34] nhấn mạnh vai trò cảm biến lidar, camera và radar trong máy kéo tự hành để đảm bảo an toàn. Nhờ IoT, toàn bộ chuỗi sản xuất có thể được giám sát và tối ưu theo thời gian thực.

c. Dữ liệu lớn và phân tích dự báo

Khối lượng dữ liệu khổng lồ từ cảm biến, UAV và hệ thống viễn thám đòi hỏi phân tích dữ liệu lớn và dự báo thông minh. Nghiên cứu [42] đã triển khai thành công

hệ thống dữ liệu lớn ở Morocco để dự báo hạn hán và tối ưu tưới. Tương tự, [43] chỉ ra rằng dữ liệu lớn có thể dự báo năng suất, phát hiện bất thường và hỗ trợ chiến lược quản lý mùa vụ. Đây là công cụ không chỉ hữu ích cho nông dân, mà còn quan trọng trong hoạch định chính sách nông nghiệp ở cấp quốc gia.

3. CƠ HỘI VÀ LỢI ÍCH CỦA TỰ ĐỘNG HÓA NÔNG NGHIỆP

Việc tích hợp robot và máy móc tự động trong nông nghiệp mang lại nhiều cơ hội và lợi ích quan trọng, đặc biệt trong bối cảnh nhu cầu lương thực toàn cầu ngày càng gia tăng và nguồn lực lao động nông thôn suy giảm. Trong bối cảnh đó, tự động hóa trở thành một giải pháp chiến lược nhằm tối ưu hóa sản xuất, nâng cao năng suất và đáp ứng nhu cầu an ninh lương thực bền vững.

Một trong những lợi ích rõ rệt nhất của tự động hóa là giảm sự phụ thuộc vào lao động thủ công trong nông nghiệp. Các nghiên cứu cho thấy việc áp dụng công nghệ tự động có thể giúp giảm đáng kể chi phí lao động trong các công tác như nhổ cỏ, thu hoạch, vận hành máy móc, đồng thời vẫn duy trì hoặc nâng cao năng suất sản xuất. Ví dụ robot cộng tác với người co-robotic weeding giúp giảm thời gian lao động và chi phí cho việc nhổ cỏ; máy trồng cây nhỏ tự động tăng năng suất lao động [44, 45]. Điều này đặc biệt quan trọng khi lực lượng lao động trẻ tại nông thôn đang chuyển dịch sang các ngành nghề phi nông nghiệp. Đồng thời, việc giảm nhu cầu lao động trực tiếp cũng tạo cơ hội để nguồn nhân lực tham gia vào các công việc có giá trị cao hơn như phân tích dữ liệu, vận hành thiết bị tự động, quản lý chuỗi cung ứng số.

Tự động hóa mang lại lợi ích tài chính thông qua giảm chi phí vận hành, tăng

năng suất và sử dụng hiệu quả tài nguyên. Máy kéo tự động, như Yanmar AG1100, giúp giảm tới 40% chi phí vận hành nhân công với độ chính xác điều hướng dưới 6 cm, hạn chế thất thoát gieo trồng và thu hoạch [46]. Phun thuốc và phân bón bằng UAV giúp giảm 40–50% lượng sử dụng, tiết kiệm khoảng 120–180 USD/ha mỗi năm đối với cây lương thực chính [47, 48]. Một hệ thống tưới tiêu tự động (AIS) sử dụng mạng cảm biến không dây (WSN) và các mô-đun GPRS nhằm tối ưu hóa lượng nước dùng cho cây trồng đã được phát triển trong nghiên cứu [49]. Kết quả cho thấy, so với hệ thống tưới truyền thống, AIS giúp giảm tới 90% lượng nước sử dụng. Nhà kính thông minh ứng dụng trí tuệ nhân tạo (AI) trong điều khiển khí hậu có khả năng giảm 15–25% mức tiêu thụ năng lượng, đồng thời duy trì sự ổn định về năng suất. Bên cạnh đó, hệ thống điều khiển PID với độ chính xác nhiệt độ $\pm 0,1$ °C góp phần nâng cao sản lượng các loại cây trồng cao cấp như cà chua và dâu tây thêm 12–18%, từ đó cải thiện đáng kể doanh thu trên thị trường [50].

Bên cạnh đó, tự động hóa còn mang lại cơ hội nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên và bảo vệ môi trường. Robot gieo hạt, phun thuốc và hệ thống cảm biến có khả năng xác định chính xác vị trí cây trồng, từ đó giúp giảm lượng phân bón và thuốc bảo vệ thực vật sử dụng [51]. Dự án RHEA [52] phát triển xe tự hành và UAV để kiểm soát cỏ dại, dịch hại chính xác và thân thiện môi trường. Các xe tự hành được trang bị cảm biến tiên tiến và thiết bị phun/diệt cỏ, trong khi UAV gắn camera đa phổ để lập bản đồ cỏ dại. Hoạt động phối hợp qua hệ thống quản lý tập trung giúp giảm tới 75% thuốc bảo vệ thực vật, đồng thời nâng cao an toàn và hiệu quả trong nông

ng nghiệp chính xác. Đồng thời, quản lý tưới cây cà chua dựa vào cảm biến độ ẩm đất và IoT đã làm giảm lượng nước tưới khoảng 30% so với phương pháp tưới truyền thống mà vẫn duy trì năng suất ổn định [53]. Các giải pháp này không chỉ giảm chi phí sản xuất mà còn góp phần hạn chế phát thải khí nhà kính.

Bên cạnh hiệu quả kinh tế và môi trường, tự động hóa còn giúp nâng cao chất lượng và giá trị thương mại của nông sản. Nghiên cứu [54] áp dụng công nghệ robotics, cảm biến, IoT, AI giúp cải thiện chất lượng nông sản, từ sức khỏe cây trồng, độ đồng đều sản phẩm, đến nâng cao giá trị thu được. Những thành quả bao gồm giảm hao hụt đầu vào, giảm lỗi sản phẩm, và sản phẩm đạt những tiêu chuẩn cao hơn về an toàn, hình thức, dinh dưỡng. Nghiên cứu [55] đề xuất mô hình hai giai đoạn được đề xuất áp dụng học máy và học chuyển giao trong nông nghiệp. Giai đoạn đầu sử dụng thuật toán học máy để dự báo cây trồng dựa trên dữ liệu thời tiết, phân tích đất và nhu cầu phân bón, thuốc trừ sâu. Giai đoạn hai dùng học chuyển giao để nhận diện cây non, sâu hại và bệnh lá cây, đạt độ chính xác trung bình 95–98%. Hệ thống hỗ trợ nông dân ra quyết định kịp thời, qua đó nâng cao năng suất mùa vụ. Kết quả cho thấy hệ thống có thể giúp tăng cả năng suất lẫn chất lượng sản phẩm bằng cách tối ưu hóa các yếu tố đầu vào.

Cuối cùng, tự động hóa nông nghiệp mở ra cơ hội thúc đẩy đổi mới sáng tạo và hình thành hệ sinh thái công nghệ mới. Sự kết hợp giữa robot, AI, IoT và dữ liệu lớn cho phép phát triển các mô hình canh tác thông minh, hỗ trợ ra quyết định dựa trên dữ liệu và dự báo chính xác hơn. Điều này không chỉ thu hút đầu tư từ các doanh ng-

hiệp công nghệ mà còn khuyến khích sự hợp tác giữa các viện nghiên cứu, trường đại học và doanh

4. THÁCH THỨC VÀ HẠN CHẾ CỦA TỰ ĐỘNG HÓA TRONG NÔNG NGHIỆP

Mặc dù tự động hóa trong nông nghiệp mang lại nhiều tiềm năng to lớn trong việc nâng cao năng suất, hiệu quả và tính bền vững, nhưng quá trình triển khai và ứng dụng công nghệ này vẫn đối mặt với nhiều thách thức và hạn chế. Các rào cản chủ yếu có thể được phân thành bốn nhóm: chi phí đầu tư, kỹ năng vận hành, vấn đề dữ liệu và rào cản chính sách cũng như mức độ chấp nhận của nông dân.

Thứ nhất, chi phí đầu tư cao là một trong những rào cản lớn nhất đối với việc ứng dụng tự động hóa. Đầu tư ban đầu cho robot, máy móc tự động, cảm biến, hệ thống điều khiển và tích hợp công nghệ đòi hỏi nguồn vốn đáng kể, đặc biệt gây khó khăn cho các trang trại nhỏ và vừa. Ngoài chi phí mua sắm, các khoản chi cho bảo trì, cập nhật phần mềm cũng trở thành gánh nặng lâu dài. Nghiên cứu ở Romania chỉ ra rằng chi phí cao của thiết bị chính xác là rào cản được khoảng 39% người tham gia khảo sát lựa chọn [56]. Tương tự, một nghiên cứu tổng quan về robotics và UAVs cũng khẳng định chi phí đầu tư ban đầu là thách thức bên ngoài quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến quyết định chấp nhận công nghệ [57].

Thứ hai, thiếu kỹ năng vận hành và bảo trì cũng là hạn chế đáng kể. Các hệ thống tự động hóa đòi hỏi kỹ năng kỹ thuật cao, bao gồm kiến thức về robot, trí tuệ nhân tạo, cảm biến, lập trình, bảo trì và phân tích dữ liệu. Tuy nhiên, nhiều nông dân chưa được đào tạo hoặc thiếu nguồn hỗ trợ kỹ

thuật cần thiết. Bên cạnh đó, sự thiếu hụt nguồn nhân lực chất lượng cao trong việc vận hành và duy trì các hệ thống này tiếp tục là một thách thức đáng kể [58]. Ngoài ra, khó khăn trong việc tích hợp đa công nghệ (robot, IoT, cloud, edge computing, phần mềm từ nhiều nhà sản xuất) gây ra vấn đề về tính tương thích và khả năng liên kết. Nghiên cứu [59] chỉ ra rằng sự khác biệt về định dạng và nguồn lưu trữ dữ liệu khiến việc tích hợp trở nên phức tạp và kém hiệu quả.

Thứ ba, các vấn đề về dữ liệu bao gồm quyền riêng tư, khả năng tương tác và kiểm soát dữ liệu. Nông dân lo ngại dữ liệu trang trại có thể bị khai thác sai mục đích hoặc chia sẻ không kiểm soát. Nghiên cứu [60] cho thấy nỗi lo về quyền riêng tư làm nhiều nông dân do dự trong việc chia sẻ dữ liệu. Về khả năng tương tác, sự đa dạng trong định dạng dữ liệu và giao thức truyền thông khiến các hệ thống khó tích hợp. Kiến trúc tham chiếu Twin-Hub đề xuất việc quản lý đồng bộ quyền truy cập dữ liệu, tiêu chuẩn truy xuất và sự đồng ý của người dùng để đảm bảo minh bạch và liên kết hiệu quả giữa các dịch vụ [61].

Cuối cùng, các rào cản về chính sách và sự chấp nhận của nông dân cũng đóng vai trò quan trọng. Yếu tố nhân khẩu học như tuổi tác, trình độ học vấn, thu nhập, quy mô trang trại, cùng với thái độ và niềm tin của nông dân vào lợi ích của công nghệ đều ảnh hưởng trực tiếp đến quyết định chấp nhận. Nghiên cứu [62] cho thấy mặc dù nông dân hứng thú với công nghệ mới, nhưng việc áp dụng thực tế bị hạn chế bởi giá cả, sự phức tạp và niềm tin vào lợi ích. Bên cạnh đó, việc thiếu các tiêu chuẩn an toàn, bảo hiểm rủi ro và ưu đãi tài chính cũng là rào cản đáng kể.

5. ĐỊNH HƯỚNG NGHIÊN CỨU TRONG TƯƠNG LAI

Ở Việt Nam, ứng dụng tự động hóa trong nông nghiệp đã được triển khai trong các mô hình nông nghiệp công nghệ cao, các trang trại quy mô lớn và hệ thống nhà kính. Một số nghiên cứu điển hình cho thấy việc kết hợp cảm biến, IoT với UAV giúp giám sát điều kiện đất, thời tiết và sức khỏe cây trồng, từ đó hỗ trợ tối ưu hóa hoạt động tưới tiêu, bón phân và quản lý sâu bệnh. Trong bối cảnh nông nghiệp Việt Nam đang bước vào giai đoạn chuyển đổi mạnh mẽ theo hướng hiện đại, bền vững và thông minh, việc nghiên cứu và ứng dụng robot cùng các giải pháp tự động hóa cần được đẩy mạnh hơn nữa. Một số định hướng nghiên cứu nổi bật có thể kể đến:

- Phát triển giải pháp phù hợp với quy mô nhỏ lẻ và địa hình phân mảnh: Khác với các quốc gia có nền nông nghiệp quy mô công nghiệp, đa số hộ nông dân tại Việt Nam sở hữu diện tích canh tác nhỏ, ruộng đất phân tán và địa hình đa dạng. Do đó, các nghiên cứu cần tập trung vào việc thiết kế robot và máy móc nhỏ gọn, linh hoạt, chi phí hợp lý nhưng vẫn đảm bảo hiệu quả trong các hoạt động thu hoạch, tưới tiêu và quản lý cây trồng.

- Tích hợp AI, Robotics và IoT cho nông nghiệp chính xác: Sự kết hợp giữa AI, cảm biến và IoT sẽ là nền tảng để xây dựng hệ thống canh tác thông minh, có khả năng giám sát môi trường, dự báo dịch bệnh, tối ưu hóa tưới tiêu và bón phân, qua đó nâng cao năng suất và chất lượng sản phẩm.

- Tăng cường khả năng học hỏi và thích nghi của robot: đặc thù sản xuất nông nghiệp ở Việt Nam là đa dạng về địa hình, khí hậu thay đổi nhanh và nhiều loại cây trồng đặc thù. Do đó, robot cần được trang

bị khả năng học hỏi liên tục từ dữ liệu thực tế và tự điều chỉnh để thích nghi với các điều kiện sản xuất khác nhau.

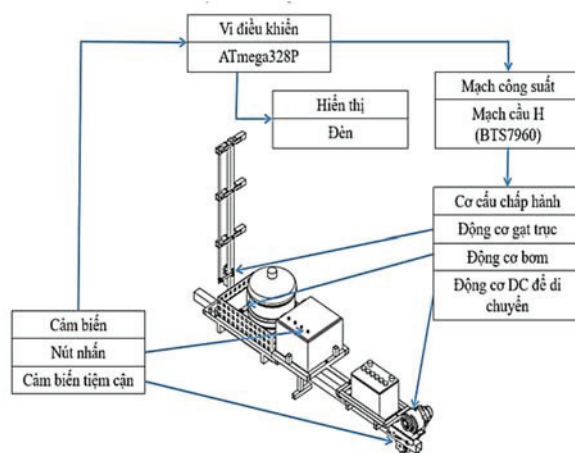
- Ứng dụng Blockchain trong truy xuất nguồn gốc nông sản: trong bối cảnh hội nhập quốc tế, yêu cầu minh bạch chuỗi cung ứng ngày càng cao. Việc kết hợp dữ liệu thu thập từ hệ thống robot với công nghệ blockchain sẽ giúp nâng cao năng lực truy xuất nguồn gốc, tăng giá trị thương hiệu và đáp ứng tiêu chuẩn xuất khẩu.

- Hướng tới mô hình “Nông nghiệp 5.0”: Tương lai của nông nghiệp Việt Nam không chỉ dừng lại ở cơ giới hóa và tự động hóa, mà sẽ tiến tới sự hợp tác thông minh giữa con người – robot – AI. Định hướng này đòi hỏi sự phối hợp liên ngành giữa công nghệ thông tin, cơ điện tử, nông học và quản lý chuỗi cung ứng nhằm hình thành một hệ sinh thái nông nghiệp bền vững, năng suất cao và thân thiện với môi trường.

- Cuối cùng, định hướng nghiên cứu cần gắn chặt với vấn đề biến đổi khí hậu và phát triển bền vững. Các hệ thống tự động hóa phải được thiết kế để thích ứng với các hiện tượng thời tiết cực đoan như hạn hán, ngập úng hay xâm nhập mặn, đồng thời giảm thiểu tác động tiêu cực đến môi trường.

6. MỘT SỐ NGHIÊN CỨU TỰ ĐỘNG HÓA TRONG NÔNG NGHIỆP

Tự động hóa trong nông nghiệp là một trong những hướng nghiên cứu được triển khai tại bộ môn Cơ Điện tử và Tự động hóa. Một số đề tài về robot trong nhà lưới bao gồm thiết kế, chế tạo robot phun thuốc trong nhà lưới như Hình 1 nhằm giảm lượng thuốc sử dụng và tránh ảnh hưởng đến sức khỏe con người.



a. Sơ đồ chức năng

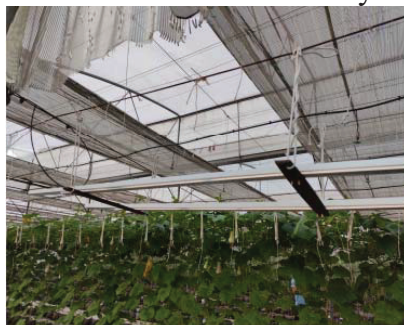


b. Mô hình chế tạo

Hình 6.1. Mô hình rô-bốt di chuyển trên ray và phun thuốc

Một số robot khác trong nhà lưới cũng được nghiên cứu như robot chạy trên ray với các chức năng như chăm sóc sức khỏe cây

trồng, thu thập ảnh của quả để truy xuất nguồn gốc nông sản, đo các thông số như nhiệt độ, độ ẩm như Hình 6.2.



a. Hệ thống ray trong nhà màng

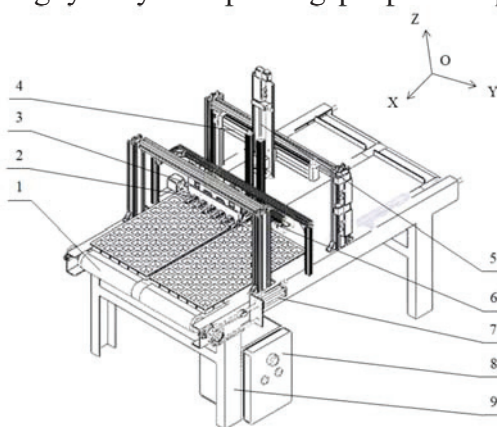


b. Robot thực tế

Hình 6.2. Robot chạy trên ray trong nhà lưới

Nghiên cứu mô hình ghép cà chua trên khay dựa trên nguyên lý của phương pháp

ghép thủ công truyền thống được thực hiện, kết quả mô hình như Hình 6.3.



a. Sơ đồ cấu tạo máy ghép cà chua



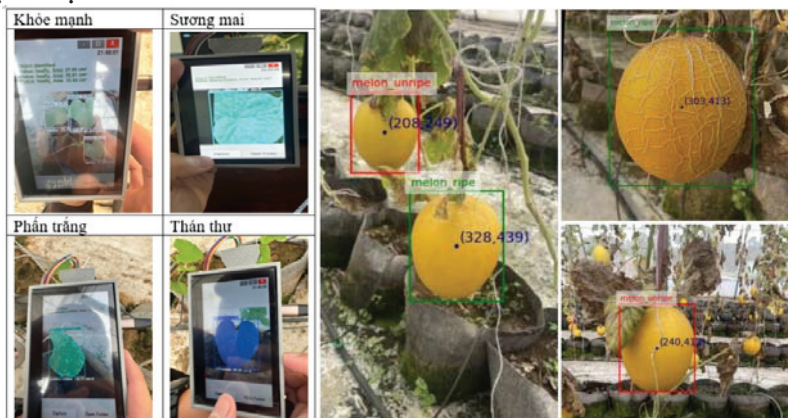
b. Mô hình chế tạo

1. Băng tải; 2. Bộ phận kẹp định vị thân cây; 3. Bộ phận cuốn ống cao su; 4. Bộ trượt trục Y; 5. Bộ trượt trục Z; 6. Bộ kẹp; 7. Bộ truyền băng tải; 8. Tủ điều khiển; 9. Khung

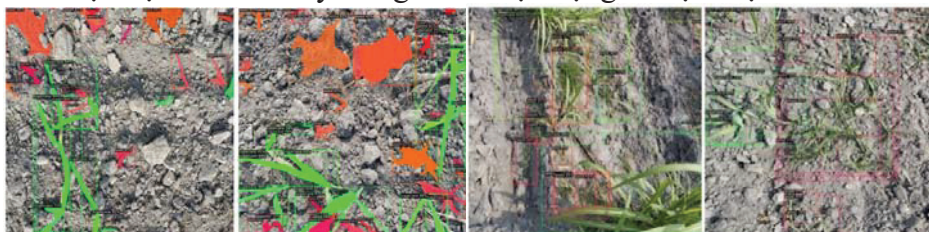
Hình 6.3. Mô hình máy ghép cà chua

Về lĩnh vực thị giác máy tính và AI, một số nghiên cứu cũng được như Hình 6.4 bao gồm phát hiện các bệnh trên lá cây trồng, nhận dạng và định vị trí trái dưa lưới cho

robot thu hoạch, phát hiện cỏ dại trong canh tác mía được thực hiện với cánh đồng mía tại Tây Ninh, kết quả nhận dạng với hai mô hình Faster R-CNN và mô hình Mask R-CNN.



a. Phát hiện bệnh trên lá cây trồng b. Nhận dạng và định vị trí trái dưa lưới

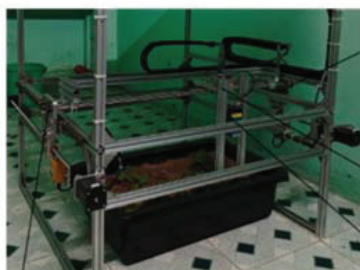


c. Phát hiện cỏ trong mía dùng Mask R-CNN d. Phát hiện cỏ trong mía dùng Faster R-CNN

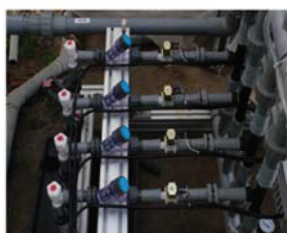
Hình 6.4. Một số nghiên cứu về thị giác máy tính trong nông nghiệp

Một số nghiên cứu liên quan đến chăm sóc tự động cây trồng trên khay được thực hiện từ khâu gieo hạt (Hình 6.5a). Trong quá trình phát triển, cây trồng được quan sát và lưu ảnh bởi camera có thể di chuyển nhờ các cơ cấu định vị tọa độ tự động (Hình 6.5b). Một số tính năng tự động có thể thực hiện trên mô hình gồm: giám sát sự sinh trưởng của cây qua hình ảnh, phân biệt cây trồng và cỏ dại để tiêu diệt cỏ dại bằng tia laser, đếm số cây đã sinh trưởng và phát triển trong khay...

Hệ thống chăm phân cho cây trồng được chế tạo và thử nghiệm. Lượng phân dạng lỏng được điều chỉnh lưu lượng và phối trộn vào đường ống tưới theo nguyên lý Venturi (Hình 6.6a). Toàn bộ quá trình được điều khiển tự động, đo lường và giám sát bởi bộ điều khiển trung tâm (Hình 6.6b). Áp suất trong đường ống được kiểm soát bởi cảm biến áp suất (Hình 6.6c).



a. Khâu gieo hạt tưới b. Cơ cấu định vị tọa độ tự động
Hình 6.5. Thiết bị chăm sóc cây trồng trên khay tự động



a. Đường ống tưới b. điều khiển tự động c. Kiểm soát áp suất đường ống

Hình 6.6. Thiết bị châm phân tự động

Hệ thống đo lường và giám sát các yếu tố sinh thái trong mô hình sản xuất nông nghiệp thông minh được phát triển. Mạch thực hiện chức năng đo các thông số nhiệt độ, độ ẩm, ánh sáng, nồng độ... và truyền dữ liệu từ xa

về bộ lưu trữ thông qua mạng LoRa. Hệ thống được áp dụng để theo dõi các yếu tố sinh trưởng và phát triển của cây trồng tại nông trại và trong nhà màng như Hình 6.7.



a. Bộ phát b. Bộ nhận

Hình 6.7. Mạch truyền thu thập và truyền dữ liệu không dây

7. KẾT LUẬN

Bài báo đã cho thấy với sự kết hợp giữa robot, máy móc thông minh và các công nghệ hỗ trợ, đang mở ra cơ hội lớn cho nông nghiệp hiện đại. Những tiến bộ này không chỉ giúp nâng cao năng suất và chất lượng nông sản mà còn hỗ trợ quản lý tài nguyên hiệu quả, giảm chi phí lao động và giảm thiểu tác động tiêu cực đến môi trường. Tuy nhiên, để hiện thực hóa tiềm năng, ngành nông nghiệp cần vượt qua nhiều rào cản như chi phí đầu tư cao, thiếu hụt nhân lực có kỹ năng, thách thức trong tích hợp đa công nghệ, cũng như các vấn đề liên quan đến dữ liệu và chính sách. Tương lai của nông nghiệp sẽ phụ thuộc vào khả năng hợp tác đa ngành giữa các nhà nghiên cứu, doanh nghiệp và chính phủ nhằm phát triển những giải pháp khả thi, linh hoạt và bền vững. Việc tích hợp thành công robot và máy móc trong canh tác sẽ là bước tiên quan trọng hướng tới nền nông nghiệp 5.0, nơi công nghệ đóng vai trò trung tâm trong việc đảm bảo an ninh lương thực toàn cầu và phát triển bền vững.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Jha, K., Doshi, A., Patel, P., & Shah, M. (2019). *A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence*. Artificial Intelligence in Agriculture, 2, 1-12.
2. Kim, W. S., Lee, W. S., & Kim, Y. J. (2020). *A review of the applications of the internet of things (IoT) for agricultural automation*. Journal of Biosystems Engineering, 45(4), 385-400.
3. Oliveira, L. F., Moreira, A. P., & Silva, M. F. (2021). *Advances in agriculture robotics: A state-of-the-art review and challenges ahead*. Robotics, 10(2), 52.
4. Kulkarni, A. A., Dhanush, P., Chetan, B. S., Gowda, C. T., & Shrivastava, P. K. (2020, February). *Applications of automation and robotics in agriculture industries; a review*. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 748, No. 1, p. 012002). IOP Publishing.
5. Hossain, M. S., Rahman, M., Rahman, A., Kabir, M. M., Mridha, M. F., Huang, J., & Shin, J. (2025). *Automatic navigation and self-driving technology in agricultural machinery: A state-of-the-art*

systematic review. IEEE Access.

6. Saleem, M. H., Potgieter, J., & Arif, K. M. (2021). *Automation in agriculture by machine and deep learning techniques: A review of recent developments*. Precision Agriculture, 22(6), 2053-2091.

7. Araújo, S. O., Peres, R. S., Barata, J., Lidon, F., & Ramalho, J. C. (2022). *Characterising the Agriculture 4.0 Landscape—Emerging Trends, Challenges and Opportunities*. Agronomy 2021, 11, 667.

8. Kim, W. S., Lee, W. S., & Kim, Y. J. (2020). *A review of the applications of the internet of things (IoT) for agricultural automation*. Journal of Biosystems Engineering, 45(4), 385-400.

9. Oliveira, L. F., Moreira, A. P., & Silva, M. F. (2021). *Advances in agriculture robotics: A state-of-the-art review and challenges ahead*. Robotics, 10 (2), 52.

10. Kulkarni, A. A., Dhanush, P., Chetan, B. S., Gowda, C. T., & Shrivastava, P. K. (2020, February). *Applications of automation and robotics in agriculture industries; a review*. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 748, No. 1, p. 012002). IOP Publishing.

11. Hossain, M. S., Rahman, M., Rahman, A., Kabir, M. M., Mridha, M. F., Huang, J., & Shin, J. (2025). *Automatic navigation and self-driving technology in agricultural machinery: A state-of-the-art systematic review*. IEEE Access.

12. Tian, H., Wang, T., Liu, Y., Qiao, X., & Li, Y. (2020). *Computer vision technology in agricultural automation—A review*. Information processing in agriculture, 7(1), 1-19.

13. Reddy, R. (2022). *Innovations in agricultural machinery: Assessing the impact of advanced technologies on farm efficiency*. Journal of Artificial Intelligence and Big Data, 2(1), 10-31586.

14. Vahdanjoo, M., Gislum, R., & Sørensen, C. A. G. (2023). *Operational, economic, and environmental assessment of an agricultural robot in seeding and weeding operations*. AgriEngineering, 5(1), 299-324.

15. Dhillon, G. S., Baarda, L., Gretzinger, M., & Coles, K. (2022). *Effect of precision*

planting and seeding rates on canola plant density and seed yield in southern Alberta. Canadian Journal of Plant Science, 102(3), 698-709.

16. Alhassan, E. A., Adewumi, A. D., & OKPODJAH, B. (2018). *Development of a self-propelled multi-crop two rows precision planter: A new design concept for the metering mechanism*. International Journal of Mechanical Engineering and Technology.

17. Ding, Y., Yang, L., Zhang, D., Cui, T., Li, Y., Zhong, X., ... & Ding, Z. (2021). *Novel low-cost control system for large high-speed corn precision planters*. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 14(2), 151-158.

18. *Modelling and Analysis of Seeding Robot for Row Crops*. In: Advances in Mechanical Engineering, Springer, 2020.

19. *The Development of an Air Suction Precision Seed-Metering Device for Rice Plot Breeding*. Agronomy, 15(7), 2025.

20. Li, J. et al. *Application of Artificial Intelligence and IoT in Precision Agriculture: A Review*. IEEE Access, 2021.

21. Li, H. et al. *Design and experiment of a UAV precision seeding system for rice*. Computers and Electronics in Agriculture, 2020.

22. Droukas, L., Doulgeri, Z., Tsakiridis, N. L., Triantafyllou, D., Kleitsiotis, I., Mariolis, I., ... & Bochtis, D. (2023). *A survey of robotic harvesting systems and enabling technologies*. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 107(2), 21.

23. Rajendran, V., Debnath, B., Mghames, S., Mandil, W., Parsa, S., Parsons, S., & Ghalamzan-E, A. (2024). *Towards autonomous selective harvesting: A review of robot perception, robot design, motion planning and control*. Journal of Field Robotics, 41(7), 2247-2279.

24. Zhang, J., Kang, N., Qu, Q., Zhou, L., & Zhang, H. (2024). *Automatic fruit picking technology: A comprehensive review of research advances*. Artificial Intelligence Review, 57(3), 54.

25. Spagnuolo, M., Todde, G., Caria, M., Furnitto, N., Schillaci, G., & Failla, S. (2025). *Agricultural Robotics: A Technical Review Addressing Challenges in Sustainable Crop Production*. Robotics, 14(2), 9.

26. Ahmed, A., Agarwal, R., Srikar, G., Rose, N., & Maini, P. (2025). *SARAL-Bot: Autonomous Robot for Strawberry Plant Care*. arXiv preprint arXiv:2506.06798.
27. Lytridis, C., & Pachidis, T. (2024). *Recent advances in agricultural robots for automated weeding*. AgriEngineering, 6(3), 3279-3296.
28. Uzedhe, G. O., Akinloye, B. O., & Febaide, I. C. (2023). *Development of an animal farm robotic feeding system*. Tropical Journal of Science and Technology, 4(1), 14-22.
29. Romano, E., Brambilla, M., Cutini, M., Giovinnazzo, S., Lazzari, A., Calcante, A., ... & Bragaglio, A. (2023). *Increased cattle feeding precision from automatic feeding systems: considerations on technology spread and farm level perceived advantages in Italy*. Animals, 13(21), 3382.
30. Simões Filho, L. M., Lopes, M. A., Brito, S. C., Rossi, G., Conti, L., & Barbari, M. (2020). *Robotic milking of dairy cows: a review*. Semina: Ciências Agrárias, 41(6), 2833-2850.
31. Chang, C. L., Xie, B. X., & Wang, C. H. (2020). *Visual guidance and egg collection scheme for a smart poultry robot for free-range farms*. Sensors, 20(22), 6624.
32. Zhang, Y., Sun, W., Yang, J., Wu, W., Miao, H., & Zhang, S. (2022). *An approach for autonomous feeding robot path planning in poultry smart farm*. Animals, 12(22), 3089.
33. Rodríguez-Lera, F. J., González-Santamarta, M. A., Orden, J. M. G., Fernández-Llamas, C., Matellán-Olivera, V., & Sánchez-González, L. (2024). *Lessons Learned in Quadruped Deployment in Livestock Farming*. arXiv preprint arXiv:2404.16008.
34. Alberto-Rodríguez, A., Neri-Muñoz, M., Ramos-Fernández, J. C., Márquez-Vera, M. A., Ramos-Velasco, L. E., Díaz-Parra, O., & Hernández-Huerta, E. (2020). *Review of control on agricultural robot tractors*. International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics, 11(3), 9.
35. Raj, M., & Prahadeeswaran, M. (2025). *Revolutionizing agriculture: a review of smart farming technologies for a sustainable future*. Discover Applied Sciences, 7(9), 937.
36. Kunt, Y. E. (2025). *Development of a Smart Autonomous Irrigation System Using Iot and AI*. arXiv preprint arXiv:2506.11835.
37. Binayao, R. P., Mantua, P. V. L., Namocatcat, H. R. M. P., Seroy, J. K. K. B., Sudaria, P. R. A. B., Gumonan, K. M. V. C., & Orozco, S. M. M. (2024). *Smart water irrigation for rice farming through the Internet of Things*. arXiv preprint arXiv:2402.07917.
38. Hafeez, A., Husain, M. A., Singh, S. P., Chauhan, A., Khan, M. T., Kumar, N., ... & Soni, S. K. (2023). *Implementation of drone technology for farm monitoring & pesticide spraying: A review*. Information processing in Agriculture, 10(2), 192-203.
39. Singh, E., Pratap, A., Mehta, U., & Azid, S. I. (2024). *Smart agriculture drone for crop spraying using image-processing and machine learning techniques: experimental validation*. IoT, 5(2), 250-270.
40. Kant, J. K., Sripaad, M., Bharadwaj, A., Rajashekhar, V. S., & Sundaram, S. (2023, September). *An Autonomous Hybrid Drone-Rover Vehicle for Weed Removal and Spraying Applications in Agriculture*. In 2023 IEEE International Conference on Agrosystem Engineering, Technology & Applications (AGRETA) (pp. 92-97). IEEE.
41. Narimani, M., Hajiahmad, A., Moghimi, A., Alimardani, R., Rafiee, S., & Mirzabe, A. H. (2021). *Developing an aeroponic smart experimental greenhouse for controlling irrigation and plant disease detection using deep learning and IoT*. In 2021 ASABE Annual International Virtual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
42. Rabhi, L., Falih, N., Afraites, L., & Bouikhalene, B. (2021). *Digital agriculture based on big data analytics: A focus on predictive irrigation for smart farming in Morocco*.
43. Weraikat, D., Šorič, K., Žagar, M., & Sokač, M. (2024). *Data analytics in agriculture: Enhancing decision-making for*

crop yield optimization and sustainable practices. Sustainability, 16(17), 7331.

44. Lowenberg-DeBoer, J., Huang, I. Y., Grigoriadis, V., & Blackmore, S. (2020). *Economics of robots and automation in field crop production*. Precision Agriculture, 21(2), 278-299.

[45]. Bazargani, K., & Deemyad, T. (2024). *Automation's impact on agriculture: opportunities, challenges, and economic effects*. Robotics, 13(2), 33.

[46]. Zhang, L., Zhu, X., Huang, J., Huang, J., Xie, J., Xiao, X., ... & Fang, K. (2022). *BDS/IMU integrated auto-navigation system of orchard spraying robot*. Applied Sciences, 12(16), 8173.

47. Souvanhnakhoomman, S. *Review on application of drone in spraying pesticides and fertilizers*. arXiv 2024, arXiv:2402.00020.

48. Kumar, E.; Saini, A.; Prajapati, A.; Garhwali, S.; Kumar, A. *A comparative study on agriculture drone for monitoring and spraying pesticides*. Pharma Innov. J. 2023, SP-12, 263–267

49. Gutiérrez, J., Villa-Medina, J. F., Nieto-Garibay, A., & Porta-Gándara, M. A. (2014). *Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 63(1), 166–176.

50. Chen, C.-H.; Wu, Y.-C.; Xu, J.-W. *Vertical Smart Greenhouse Planting System*. Sens. Mater. 2025, 37, 1139–1151

51. Balaska, V., Adamidou, Z., Vryzas, Z., & Gasteratos, A. (2023). *Sustainable crop protection via robotics and artificial intelligence solutions*. Machines, 11(8), 774.

52. Gonzalez-de-Santos, P.; Ribeiro, A.; Fernandez-Quintanilla, C.; Lopez-Granados, F.; Brandstötter, M.; Tomic, S.; Pedrazzi, S.; Peruzzi, A.; Pajares, G.; Kaplanis, G.; et al. *Fleets of Robots for Environmentally-Safe Pest Control in Agriculture*. Precis. Agric. 2017, 18, 574–614.

53. Dong, Y., Werling, B., Cao, Z., & Li, G. (2024). *Implementation of an in-field IoT system for precision irrigation management*. Frontiers in Water, 6,

1353597.

54. Padhiary, M., Kumar, A., & Sethi, L. N. (2025). *Emerging technologies for smart and sustainable precision agriculture*. Discover Robotics, 1(1), 6.

55. Bilal, A., Liu, X., Long, H., Shafiq, M., & Waqar, M. (2023). *Increasing crop quality and yield with a machine learning-based crop monitoring system*. Comput Mater Continua, 76(2), 2401-2426.

56. Petre, I. M., Boşcoianu, M., Iagăru, P., & Iagăru, R. (2025). *Unmanned Agricultural Robotics Techniques for Enhancing Entrepreneurial Competitiveness in Emerging Markets: A Central Romanian Case Study*. Agriculture, 15(18), 1910.

57. Degieter, M., De Steur, H., Tran, D., Gellynck, X., & Schouteten, J. J. (2023). *Farmers' acceptance of robotics and unmanned aerial vehicles: A systematic review*. Agronomy Journal, 115(5), 2159-2173.

[58]. Lemay, M. A., & Boggs, J. (2024). *Determinants of adoption of automation and robotics technology in the agriculture sector—A mixed methods, narrative, interpretive knowledge synthesis*. PLOS Sustainability and Transformation, 3(11), e0000110.

59. López-Morales, J. A., Martínez, J. A., & Skarmeta, A. F. (2020). *Digital transformation of agriculture through the use of an interoperable platform*. Sensors, 20(4), 1153.

60. Zafar, O., Gonzalez, R. S., Wilkins, G., Morales, A., & Ayday, E. (2024). *Privacy-Preserving Data Linkage Across Private and Public Datasets for Collaborative Agriculture Research*. arXiv preprint arXiv:2409.06069.

61. Falcão, R., Matar, R., Rauch, B., Elberzhager, F., & Koch, M. (2023). *A reference architecture for enabling interoperability and data sovereignty in the agricultural data space*. Information, 14(3), 197.

62. Degieter, M., De Steur, H., Tran, D., Gellynck, X., & Schouteten, J. J. (2023). *Farmers' acceptance of robotics and unmanned aerial vehicles: A systematic review*. Agronomy Journal, 115(5), 2159-2173.

Ngày nhận bài: 03/10/2025