DOI: 10.31276/VJST.65(10DB).30-34

Các phương pháp nâng cao an toàn cho robot cộng tác người - máy

Nguyễn Văn Thưởng*, Trần Xuân Thịnh, Giang Mạnh Khôi

Viện Ứng dụng Công nghệ, 25 Lê Thánh Tông, phường Phan Chu Trinh, quận Hoàn Kiếm, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 23/6/2023; ngày chuyển phản biện 26/6/2023; ngày nhận phản biện 19/7/2023; ngày chấp nhận đăng 21/7/2023

Tóm tắt:

Trong thời gian gần đây, các nghiên cứu về robot đã dần chuyển hướng tập trung vào nghiên cứu các đặc điểm của sự hợp tác giữa con người và robot trong các ứng dụng sản xuất công nghiệp, nhằm kết hợp độ chính xác và sức mạnh của robot với khả năng nhận thức và tính linh hoạt của con người. Với mục đích này, một thế hệ robot mới, được gọi là robot cộng tác, hay cobots được ra đời. Đặc điểm của cobots là làm việc cộng tác cùng con người mà không có rào chắn vật lý, do đó tính an toàn của con người luôn được đặt lên hàng đầu. Trong bài báo này, các tác giả trình bày tổng quan các phương pháp nâng cao an toàn cho robot cộng tác người - máy, đồng thời đề xuất một số hướng phát triển trong tương lai, nhằm không những đảm bảo sự an toàn mà còn nâng cao hiệu suất làm việc của cobots.

Từ khóa: **an toàn, cobots, cộng tác, robot cánh tay, robot công nghiệp.**

Chỉ số phân loại: **2.3**

Research on methods of improving safety for collaborative robot

Van Thuong Nguyen*, Xuan Thinh Tran, Manh Khoi Giang

National Center for Technological Progress, 25 Le Thanh Tong Street, Phan Chu Trinh Ward, Hoan Kiem District, Hanoi, Vietnam

Received 23 June 2023; revised 19 July 2023; accepted 21 July 2023

Abstract:

Recently, robotics research has gradually shifted its focus to studying the characteristics of human-robot cooperation in industrial production applications in order to combine the precision and power of robots with human perception and flexibility. For this purpose, a new generation of robots, known as collaborative robots, or cobots, was born. The characteristic of cobots is to work collaboratively with humans without physical barriers, so human safety is always a top priority. In the scope of this research, the authors provide a synthesis of methods to improve safety for collaborative robots. Then, the authors suggest some future development directions in order to not only ensure safety but also improve the working efficiency of cobots.

Keywords: **arm robot, cobots, collaborative, industrial robot, safety.**

Classification number: **2.3**

1. Đặt vấn đề

Trong những năm trước, robot chủ yếu được hình thành để làm việc một mình trong môi trường có cấu trúc cao, thay thế con người thực hiện các hoạt động lặp đi lặp lại, nguy hiểm hoặc đòi hỏi độ chính xác cao. Trong bối cảnh như vậy, robot hoạt động tách biệt khỏi con người bằng các hàng rào an toàn. Tuy nhiên, mặt hạn chế của robot là thiếu tính linh hoạt và khả năng thích ứng giống như con người. Do đó trong thời gian gần đây, các nghiên cứu về robot đã dần chuyển hướng tập trung vào nghiên cứu các đặc điểm của sự hợp tác giữa con người và robot trong các ứng dụng sản xuất công nghiệp, nhằm kết hợp độ chính xác và sức mạnh của robot với khả năng nhận thức và tính linh hoạt của con người. Trong môi trường làm việc này, con người có thể làm việc song song với các robot trong khoảng cách gần, mà không bị giảm đi sự an toàn hoặc hiệu quả [1]. Với mục đích này, một thế hệ robot mới, được gọi là robot cộng tác, hay cobots được ra đời. Cobots được thiết kế không nhất thiết để nâng cao kỹ năng của người điều hành hay thay thế con người, mà là để tập trung vào các hoạt động lặp đi lặp lại, nhằm giúp người điều hành có thể tập trung vào các nhiệm vụ khó.

Do đặc tính chia sẻ không gian làm việc chung, khi nghiên cứu và phát triển cobots, sự an toàn của con người phải là yếu tố được xem xét đầu tiên. Robot phải có phản ứng khi có vật thể lạ, hoặc va chạm với vật thể, con người trong quá trình làm việc. Bên cạnh đó, không gian làm việc của robot phải được giám sát. Phản ứng có thể ở các mức độ khác nhau tùy vào hệ thống và yêu cầu làm việc. Về mặt an toàn, cần cảnh báo bằng âm thanh và ánh sáng báo động và dừng robot. Các hệ thống tiên tiến hơn có thể cung cấp tính năng điều khiển tuân thủ - điều chỉnh chuyển động bằng cách đẩy nó theo cùng hướng với hướng của lực tác động.

*Tác giả liên hệ: Email: thuongbkhn94@gmail.com

Hiện nay, một trong những tính năng đang được quan tâm nhiều nhất đó là loại bỏ toàn bộ va chạm mà vẫn đạt hiệu quả làm việc bằng cách điều chỉnh quỹ đạo chuyển động. Trong bài báo này, chúng tôi đưa ra khảo sát các phương pháp đảm bảo an toàn cho robot cộng tác người - máy, từ đó đề xuất một số hướng phát triển nghiên cứu trong tương lai, nhằm không những đảm bảo sự an toàn mà còn nâng cao hiệu suất làm việc của cobots [1].

2. Các phương pháp nâng cao an toàn cho cobots

Trong các ứng dụng cobots, tính an toàn luôn được đặt lên hàng đầu. Do đó, các công bố nghiên cứu về tính an toàn cũng chiếm số lượng lớn trong các công trình nghiên cứu về cobots nói chung. Các phương pháp chính để nâng cao tính an toàn cho cobots bao gồm: phương pháp tránh va chạm, phát hiện va chạm và hoạch định chuyển động.

2.1. Tránh va chạm

Các biện pháp an toàn dựa vào việc tránh va chạm chủ yếu dựa trên các thuật toán dự đoán trước ý định của con người, với các phương pháp tiếp cận: học máy; sử dụng các cảm biến; giám sát tốc độ và khoảng cách; giới hạn công suất và lực cho phép cobots dừng hoặc sửa đổi quỹ đạo của nó trước khi va chạm.

2.1.1. Phương pháp học máy: Việc dự đoán các chuyển động của con người có khả năng dẫn đến va chạm có thể đạt được bằng các kỹ thuật dựa trên học tập, ví dụ sử dụng mạng nơ-ron (Neural network - NNs), mạng nơ-ron tuần hoàn (Recurrent neural network - RNNs). X. Yu và cs (2019) [2] đề xuất một mô hình học máy hoàn chỉnh cho an toàn cobots, trong đó việc học của robot không chỉ được áp dụng cho nhận biết ý định chuyển động của con người mà còn cho nhận biết trở kháng của con người, được ước tính theo thời gian thực bằng phương pháp RBFNNs và phương pháp bình phương nhỏ nhất, tương ứng. Trong nghiên cứu ngày, các tác giả đã giới thiệu một phương pháp học sử dụng RNNs nhằm mục đích dự đoán chuyển động của tất cả các tác nhân trong một không gian làm việc nhất định. Hiệu suất của mô hình học đã được đánh giá là có thể ngăn chặn va chạm và lập kế hoạch hành động cho robot một cách chính xác hơn so với các phương pháp khác [2]. Một kỹ thuật khác để dự đoán chuyển động của con người trong dây chuyền sản xuất, kết hợp giữa RNNs và mô hình động học ngược được giới thiệu bởi R. Liu và cs (2021) [3]. Trong đề xuất này, một mô hình được sử dụng để dự đoán chuyển động của cổ tay, trong khi một mô hình khác được mở rộng để dự đoán cho cả cánh tay. Trong nghiên cứu của H. Liu và cs (2021) [4] đã đề xuất một phương pháp dựa trên nhận thức ngữ cảnh, kết hợp giữa một mô-đun cảm biến va chạm và một thuật toán hiệu chỉnh cảm biến. Một thuật toán học máy sau đó được triển khai để xác định tư thế của người vận hành trong quá trình lắp ráp.

2.1.2. Sử dụng cảm biến: Trong kỹ thuật này, các hệ thống điều khiển đa cảm biến được sử dụng để tránh va chạm bằng cách phát hiện sự hiện diện của con người và đánh giá trong thời gian thực khoảng cách giữa robot và đối tượng trong không gian làm việc. S.A. Hovhannisyan và cs (2022) [5] đã đề xuất một phương pháp điều khiển để tránh vật cản tĩnh và động trong thời gian thực sử dụng cảm biến tiệm cận loại kép được phát triển để đánh giá khoảng cách. Một sơ đồ hoạch định quỹ đạo và phương pháp lực ảo cũng được các tác giả trình bày để kiểm chứng thực nghiệm. N. Nikolakis và cs (2019) [6] trình bày đề xuất tập trung vào hệ thống vật lý mạng (Cyber - physical system - CPS). Theo đó, hệ thống điều khiển vòng kín, dựa trên sự gần gũi giữa con người và robot được triển khai để cho phép đánh giá độ an toàn và đảm bảo tránh va chạm. Các cảm biến quang học cũng được đưa vào trong hệ thống CPS để giám sát không gian làm việc và đánh giá khoảng cách giữa con người và robot.

2.1.3. Giám sát tốc độ và khoảng cách: Z. Liu và cs (2020) [7] đã đề xuất một phương pháp đánh giá rủi ro động nhằm giảm thiểu nó bằng cách sử dụng thuật toán suy giảm độ dốc. F. Ferraguti và cs (2020a) [8] đề xuất một thuật toán điều khiển dựa trên tối ưu hóa, trong đó sự khác biệt giữa gia tốc đầu vào và lệnh điều khiển được giảm thiểu.

2.1.4. Giới hạn công suất và lực: Gia tốc và vận tốc con người có thể được tính bằng một ngân hàng các bộ lọc Kalman. Trong F. Ferraguti và cs (2020b) [9] đã cung cấp một phương pháp điều khiển hoạt động như một bộ lọc, nhằm giới hạn công suất và lực của robot khi an toàn bị đe dọa.

2.2. Phát hiện va chạm

Đôi khi tiếp xúc với đối tượng khác là bắt buộc trong các nhiệm vụ của cobots. Do đó, các phương pháp phát hiện va chạm dựa trên học máy, cảm biến và tối ưu hóa phi tuyến được phát triển để đáp ứng nhu cầu này.

2.2.1. Phương pháp học máy: Cũng giống như phương pháp tránh va chạm, trong phát hiện va chạm, các kỹ thuật sử dụng học máy cũng được sử dụng nhiều nhất. Y.J. Heo và cs (2019) [10] đã đề xuất một phương pháp dựa trên cách tiếp cận học sâu, có khả năng giám sát và nhận ra bất kỳ va chạm nào. Một mạng nơ-ron phức hợp được sử dụng để đạt được cả độ nhạy cao đối với va chạm và độ nhạy thấp đối với cảnh báo sai. K.M. Park và cs (2021) [11] thiết kế hai phương pháp phát hiện va chạm dựa trên máy vectơ hỗ trợ (Support vectơr machine - SVM) và mạng nơ-ron tích chập (Convolutional neural network - CNNs). Các phép đo dòng điện của động cơ cùng với mô hình động học của robot và bộ quan sát động lượng bắt buộc được thực hiện để phát hiện các ngưỡng va chạm, từ đó điều chỉnh thủ công cho mỗi khớp robot.

2.2.2. Sử dụng cảm biến: E. Mariotti và cs (2019) [12] đã đề xuất sử dụng một cảm biến lực/mo-men xoắn (F/T) 6D ở bộ hiệu ứng cuối cùng với thông tin động học đầu vào.

Tính năng phát hiện lực của cảm biến này giúp ngăn ngừa va chạm ngẫu nhiên và tránh các tiếp xúc ngoài ý muốn trong quá trình chuyển động của robot. Để phát hiện các điểm tiếp xúc trên robot và đánh giá các lực tiếp xúc được trao đổi, E. Magrini và cs (2017) [13] đã triển khai một thuật toán xử lý đồ họa song song (GPU) theo dõi trong thời gian thực khoảng cách động giữa robot và các chướng ngại vật di chuyển trong môi trường.

2.2.3. Tối ưu hoá phi tuyến: Khác với các cách tiếp cận trên, phương pháp tiếp cận phát hiện va chạm dựa trên tối ưu hóa phi tuyến có ràng buộc [14], trong đó việc thay đổi tốc độ của robot được xây dựng bằng cách sử dụng chỉ số nguy hiểm và thuật toán di truyền mã hóa tối ưu (ERGA) được sử dụng để đảm bảo an toàn cho người vận hành.

2.3. Hoạch định chuyển động

Trong các ứng dụng cộng tác, hoạch định quỹ đạo cho phép giảm thiểu rủi ro có thể xảy ra với người điều hành. Hoạch định chuyển động cho cobots có thể được phát triển dựa trên các phương pháp tiếp cận như học máy, tối ưu hóa phi tuyến, hay điều khiển tuân thủ.

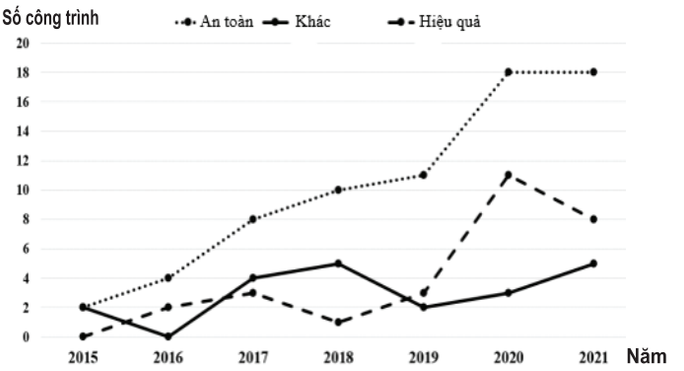
2.3.1. Tối ưu hóa phi tuyến: Hầu hết các công việc liên quan đến việc lập quỹ đạo đều như một vấn đề tối ưu hóa có giới hạn, trong khi đó, các yêu cầu về an toàn ISO phải được tuân thủ để đảm bảo sự an toàn trong sản xuất. A. Oleinikov và cs (2021) [15] đề xuất cách tiếp cận điều khiển dự báo mô hình phi tuyến để lập kế hoạch thời gian thực dựa trên các đặc tả giám sát tốc độ và khoảng cách cho các ứng dụng công nghiệp. Trong C. Sloth và cs (2018) [16] trình bày một phương pháp tính toán vận tốc quỹ đạo an toàn theo các yêu cầu ISO/TS 15066 để tránh va chạm giữa người và robot, bằng cách tối ưu hóa một đa thức liên quan đến vật thể tĩnh kết hợp với tìm kiếm theo đường cho các cơ thể chuyển động.

2.3.2. Học máy: M. Costanzo và cs (2021) [17] đã trình bày một ý tưởng dựa trên giám sát tốc độ và khoảng cách. Cụ thể, an toàn thông qua dự đoán được kết hợp với an toàn thông qua kiểm soát bằng cách kết hợp theo dõi khoảng cách và dự đoán hành động của con người với các khu vực an toàn và giám sát tốc độ để tránh va chạm có thể xảy ra. Các tác giả đã triển khai mạng CNN kết hợp thông tin về không gian và nhiệt để phát hiện con người và phương pháp tiếp cận logic mờ nâng cao để mở rộng tốc độ robot bằng cách theo dõi khoảng cách người - robot trong thời gian thực. Hoạch định quỹ đạo thời gian tối thiểu được trình bày bởi A. Palleschi và cs (2021) [18], trong đó an toàn được đảm bảo bằng cách sử dụng mô-đun an toàn và mô-đun đánh giá an toàn. Ở mỗi chu kỳ hoạt động, các chuyển động tốc độ cao được khôi phục ngay sau khi vấn đề an toàn được giải quyết.

2.3.3. Điều khiển tuân thủ: Để thay thế cho các phương pháp tiếp cận tối ưu hóa, B. Maric và cs (2020) [19] đã đề xuất một phương pháp luận để chuyển trực tiếp kinh nghiệm của con người sang robot thông qua hệ thống điều khiển hợp tác dựa trên kiểm soát tuân thủ động lực học chuyển tiếp (FDCC). Mô hình này được thiết kế để khai thác kinh nghiệm của người vận hành, sau đó áp dụng để lập quỹ đạo cho robot. Tương tự, X. Zhao và cs (2021) [20] đề xuất một phương pháp dựa trên học tập củng cố (Reinforcement learning - RL) với một công cụ ước tính nguy cơ để cân bằng giữa việc bám quỹ đạo và theo dõi chuyển động của con người.

3. Hướng phát triển trong nghiên cứu nâng cao an toàn và hiệu quả cho cobots

Để tổng hợp về xu hướng nghiên cứu cobots trong những năm qua, S. Proia và cs (2022) [1] đưa ra biểu đồ phân tích số lượng các công trình nghiên cứu đã được công bố liên quan đến các lĩnh vực chính: an toàn, hiệu quả và nội dung khác (hình 1).

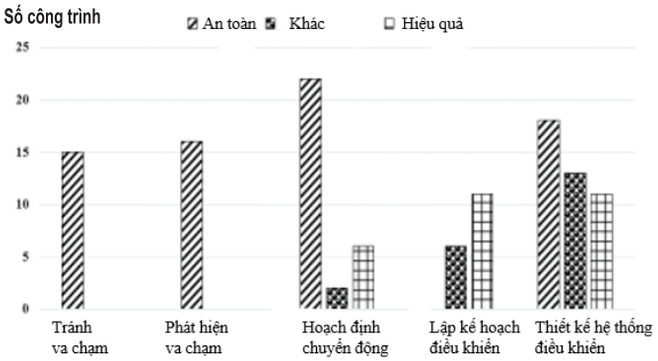


Hình 1. Xu hướng các công trình nghiên cứu về cobots từ năm 2015.

Từ biểu đồ hình 1 có thể thấy được vấn đề an toàn ngay từ đầu đã được quan tâm đầu tiên, tăng mạnh trong giai đoạn 2019-2020 và ổn định trong giai đoạn 2020-2021, điều này cho thấy việc tìm kiếm một giải pháp cobots an toàn tiếp tục là nhu cầu chính trong ngành công nghiệp số.

Trong những năm qua, số lượng cobots trong sản xuất đã tăng lên theo cấp số nhân trên toàn thế giới để đối phó với sự thay đổi của thị trường. Mục đích cơ bản của ngành công nghiệp số là đạt được đồng thời chất lượng cao và thời gian ngắn nhất, độ chính xác và tính linh hoạt trong công nghiệp. Do đó, số lượng công trình nghiên cứu liên quan đến độ hiệu quả cũng tăng đáng kể và đạt mức cao nhất vào năm 2020.

Để xác định phương pháp tiếp cận nào phổ biến trong những năm qua, S. Proia và cs (2022) [1] cũng đưa ra một biểu đồ khác liên quan đến số lượng các công trình nghiên cứu đại diện cho các phương pháp tiếp cận khác nhau (hình 2).



Hình 2. Số lượng công trình nghiên cứu liên quan đến các phương pháp tiếp cận khác nhau trong giai đoạn 2015-2021.

Từ biểu đồ hình 2 có thể thấy rằng, việc thiết kế các bộ điều khiển tối ưu chiếm ưu thế lớn cho cả hai lĩnh vực an toàn và hiệu quả. Nếu chỉ nhìn vào khía cạnh an toàn, các vấn đề tối ưu hoạch định chuyển động được ưu tiên để phản ứng với những thay đổi đột ngột của môi trường và tránh thương tích cho người vận hành. Các kỹ thuật phát hiện và tránh va chạm cũng chiếm số lượng lớn, tuy nhiên các hướng tiếp cận này chỉ giải quyết được vấn đề an toàn mà không đặt vào bài toán hiệu quả.

Một vấn đề cần lưu ý trong cuộc khảo sát của S. Proia và cs (2022) [1] là chỉ có một số lượng nhỏ các bài báo nhằm mục đích tối ưu hóa nhiều mục tiêu thông qua các phương pháp tiếp cận ở trên. Cụ thể, chỉ có gần 10 công trình nghiên cứu được xây dựng để đảm bảo cả hai mặt an toàn và hiệu quả. Do đó, trong bối cảnh công nghiệp hiện nay, các nghiên cứu cần thiết phải đáp ứng giải quyết cả hai mục tiêu cùng một lúc. Các kỹ thuật cần vừa đảm bảo sự an toàn cho người vận hành, mà vẫn đạt hiệu suất làm việc tốt.

Trong xu thế hiện nay, để hợp tác cùng nhau, con người và robot cần có chung nhãn quan về môi trường làm việc của họ. Điều này yêu cầu một cách thiết yếu rằng cobots cần có một hệ thống kiểm soát dựa vào công cụ và kỹ thuật như cảm biến, tự tổng hợp và phân tích dữ liệu, học sâu, khả năng ra quyết định, thực thi và tối ưu hóa các nhiệm vụ chung một cách an toàn, hiệu quả. Với sự phát triển gần đây về công nghệ đo lường lấy cảm hứng từ sinh học đã giúp các cảm biến có giá thành thấp hơn, nhẹ, cũng như dễ sử dụng trên robot. Các phương pháp dựa trên cảm biến cũng được sử dụng nhiều trong các nhiệm vụ cộng tác nhân sự. 4 loại cảm biến khác nhau (dựa trên âm thanh, cảm ứng, thị giác và khoảng cách) thường được triển khai trong các hệ thống robot mà gần đây chúng thường được kết hợp với thực tế ảo để giảm tính toán của điều khiển và làm cho giao diện trực quan hơn, dễ đọc hơn bởi những người dùng không phải là chuyên gia.

Dựa vào những phân tích kể trên, có thể thấy các phương pháp tiếp cận nhằm giúp cải thiện không chỉ tính an toàn mà còn làm tăng hiệu suất của cộng tác con người - robot sẽ còn được phát triển trong thời gian tới. Hơn nữa, sự phổ biến và hỗ trợ mạnh mẽ từ các cảm biến (âm thanh, thị giác, khoảng cách) sẽ là công cụ đắc lực để tìm ra các giải pháp mới cho ngành công nghiệp số.

Một hướng tiếp cận nghiên cứu phổ biến trong những năm trở lại đây là hoạch định quỹ đạo chuyển động của robot trong môi trường có thể thay đổi. Hai vấn đề phổ biến trong hướng tiếp cận này đó là khả năng nhận biết môi trường và đáp ứng của robot. Một mặt, cần phải nhận biết đầy đủ chướng ngại vật có thể có của môi trường xung quanh và nguy cơ va chạm của chúng. Nếu không có sự nhìn nhận đúng đắn về các vật thể rủi ro có thể xảy ra hoặc ý định di chuyển của chúng, robot sẽ khó có thể phản ứng đầy đủ với những thay đổi của môi trường. Hai là, việc tính toán đúng thời gian và chính xác các vị trí chướng ngại vật phụ thuộc vào khả năng tính toán của hệ thống ghi nhận sự thay đổi môi trường. Các hệ thống này thường dựa trên máy ảnh 3D hoặc cảm biến phạm vi phải chụp và xử lý càng nhanh càng tốt. Do đó, sức mạnh tính toán của các hệ thống nhận dạng là một yếu tố quan trọng của các nỗ lực phản ứng tránh va chạm. Bất kỳ thất bại hoặc chậm trễ nào đều có thể dẫn đến một tình huống rủi ro. Việc biết chính xác môi trường và những thay đổi của chúng đều trở nên vô nghĩa trừ khi hệ thống phản hồi đúng lúc. Tùy thuộc vào rủi ro cho phép, tình huống và cấu hình của robot, các phản ứng nhanh hơn sẽ được yêu cầu.

Để cho phép các thuật toán điều khiển tránh va chạm cho các hệ thống sản xuất công nghiệp, thời gian xử lý dữ liệu theo yêu cầu của ứng dụng và độ chính xác yêu cầu của ứng dụng phải được cân bằng. Nếu không, hệ thống sẽ không thể phản ứng trong thời gian thực với những thay đổi bất ngờ trong môi trường xung quanh của robot, dẫn đến các tình huống mà sự an toàn của người vận hành bị xâm phạm. Do đó, một nghiên cứu về phương pháp hoạch định chuyển động tránh va chạm đáp ứng thời gian thực là rất quan trọng trong thời điểm này. Kết quả của nghiên cứu không chỉ nâng cao khả năng an toàn, mà còn làm tăng hiệu suất làm việc của môi trường cộng tác.

Trong nghiên cứu sắp tới, nội dung nghiên cứu về nâng cao tính hiệu quả và an toàn cho robot cộng tác sử dụng phương pháp hoạch định quỹ đạo động đáp ứng thời gian thực dựa trên thị giác máy học sẽ được triển khai. Mục tiêu của nghiên cứu này là nâng cao đồng thời cả tính hiệu quả và an toàn cho cobots, sử dụng phương pháp hoạch định quỹ đạo động với sự trợ giúp của các cảm biến thị giác. Với khả năng đáp ứng thay đổi của môi trường trong thời gian thực, kết quả nghiên cứu dự kiến sẽ mang lại một giải pháp phù hợp cho các cobots thực tế trong sản xuất hiện nay.

4. Kết luận

Trong sản xuất công nghệ cao ngày nay, cộng tác người - máy được sử dụng để tăng năng suất, tính linh hoạt và khả năng sinh lời. Thời gian sản xuất có thể được giảm gần một nửa khi sử dụng cobots thay vì chỉ sử dụng công nhân. Do

đó, cần thiết để phát triển những nghiên cứu nhằm không chỉ đảm bảo sự an toàn mà còn nâng cao hiệu suất làm việc cho robot. Nội dung nghiên cứu này trình bày tổng quan các phương pháp nâng cao an toàn cho robot cộng tác người - máy, từ đó đưa ra hướng nghiên cứu phát triển tiềm năng trong thời gian tới.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được hỗ trợ một phần bởi đề tài nghiên cứu ứng dụng và phát triển công nghệ cấp quốc gia giai đoạn 2021-2024: "Nghiên cứu, thiết kế, chế tạo, tích hợp thiết bị robot cắt kim loại sử dụng bức xạ fiber laser". Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] S. Proia, R. Carli, G. Cavone (2022), "Control techniques for safe, ergonomic, and efficient human-robot collaboration in the digital industry: A survey", *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **19(3)**, pp.1798-1819, DOI: 10.1109/TASE.2021.3131011.

[2] X. Yu, W. He, C. Xue, et al. (2019), "Adaptive neural admittance control for collision avoidance in human-robot collaborative tasks", *Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, **2**, pp.7574-7579, DOI: 10.1109/IROS40897.2019.8967720.

[3] R. Liu, C. Liu (2021), "Human motion prediction using adaptable recurrent neural networks and inverse kinematics", *IEEE Control Syst. Lett.*, **5(5)**, pp.1651-1656, DOI: 10.1109/LCSYS.2020.3042609.

[4] H. Liu, L. Wang (2021), "Collision-free human-robot collaboration based on context awareness", *Robotics and Computer - Integrated Manufacturing*, **67**, DOI: 10.1016/j.rcim.2020.101997.

[5] S.A. Hovhannisyan, H.A. Gasparyan, S.S. Agaian, et al. (2022), "AED-Net: A single image dehazing", *IEEE Access*, **10**, pp.12465-12474, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3144402.

[6] N. Nikolakis, V. Maratos, S. Makris (2019), "A cyber physical system (CPS) approach for safe human-robot collaboration in a shared workplace", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **56(3)**, pp.233-243, DOI: 10.1016/j.rcim.2018.10.003.

[7] Z. Liu, X. Wang, Y. Cai, et al. (2020), "Dynamic risk assessment and active response strategy for industrial human-robot collaboration", *Comput. Ind. Eng.*, **141**, DOI: 10.1016/j.cie.2020.106302.

[8] F. Ferraguti, C.T. Landi, S. Costi, et al. (2020a), "Safety barrier functions and multi-camera tracking for human-robot shared environment", *Robot. Auton. Syst.*, **124**, DOI: 10.1016/j.robot.2019.103388.

[9] F. Ferraguti, M. Bertuletti, C.T. Landi, et al. (2020b), "A control barrier function approach for maximizing performance while fulfilling to ISO/TS 15066 regulations", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, **5(4)**, pp.5921-5928, DOI: 10.1109/LRA.2020.3010494.

[10] Y.J. Heo, D. Kim, W. Lee, et al. (2019), "Collision detection for industrial collaborative robots: A deep learning approach", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, **4(2)**, pp.740-746, DOI: 10.1109/LRA.2019.2893400.

[11] K.M. Park, J. Kim, J. Park, et al. (2021), "Learning-based real-time detection of robot collisions without joint torque sensors", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, **6(1)**, pp.103-110, DOI: 10.1109/LRA.2020.3033269.

[12] E. Mariotti, E. Magrini, A.D. Luca (2019), "Admittance control for human-robot interaction using an industrial robot equipped with a F/T sensor", *2019 Int. Conf. Robot. Automat.*, pp.6130-6136, DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793657.

[13] E. Magrini, A.D. Luca (2017), "Human-robot coexistence and contact handling with redundant robots", *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, pp.4611-4617, DOI: 10.1109/IROS.2017.8206331.

[14] C.C. Chan, C. Tsai (2020), "Collision-free speed alteration strategy for human safety in human-robot coexistence environments", *IEEE Access*, **8**, pp.80120-80133, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2988654.

[15] A. Oleinikov, S. Kusdavletov, A. Shintemirov, et al. (2021), "Safety-aware nonlinear model predictive control for physical human-robot interaction", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, **6(3)**, pp.5665-5672, DOI: 10.1109/LRA.2021.3083581.

[16] C. Sloth, H.G. Petersen (2018), "Computation of safe path velocity for collaborative robots", *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, **5(1)**, pp.6142-6148, DOI: 10.1109/IROS.2018.8594217.

[17] M. Costanzo, G.D. Maria, G. Lettera (2021), "A multimodal approach to human safety in collaborative robotic workcells", *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, **19(2)**, pp.1-15, DOI: 10.1109/TASE.2020.3043286.

[18] A. Palleschi, M. Hamad, S. Abdolshah, et al. (2021), "Fast and safe trajectory planning: Solving the cobot performance/safety trade-off in human-robot shared environments", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, **6(3)**, pp.5445-5452, DOI: 10.1109/LRA.2021.3076968.

[19] B. Maric, A. Mutka, M. Orsag (2020), "Collaborative human-robot framework for delicate sanding of complex shape surfaces", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, **5(2)**, pp.2848-2855, DOI: 10.1109/LRA.2020.2969951.

[20] X. Zhao, T. Fan, Y. Li, et al. (2021), "An efficient and responsive robot motion controller for safe human-robot collaboration", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, **6(3)**, pp.6068-6075, DOI: 10.1109/LRA.2021.3088091.