TẠP CHÍ CÔNG NGHỆ VÀ THIẾT KẾ
https://jtd.ueh.edu.vn

TRÍ TUỆ NHÂN TẠO VẬT LÝ, SỰ KẾT NỐI TRÍ TUỆ NHÂN TẠO VÀ HỆ THỐNG VẬT LÝ ĐỂ TẠO RA THẾ HỆ TỰ HÀNH TIẾP THEO TRONG CÁCH MẠNG CÔNG NGHIỆP 5.0

PHYSICAL AI: BRIDGING ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND PHYSICAL SYSTEMS FOR NEXT-GENERATION AUTONOMY IN INDUSTRY 5.0

GS.TS. Nguyễn Trường Thịnh*,[1]
[1]*Đại học Kinh tế Thành phố Hồ Chí Minh*

Ngày nhận: **16/06/2026** | Ngày nhận bản sửa: **07/07/2026** | Duyệt đăng: **11/07/2026**

Tóm tắt

Trí tuệ nhân tạo (AI) đã đạt được những thành công đáng kể trong học, nhận thức và ra quyết định dựa trên dữ liệu. Tuy nhiên, hầu hết các hệ thống AI hiện có vẫn chủ yếu bị giới hạn trong môi trường số và khả năng tương tác tự hành với thế giới vật lý còn hạn chế. Sự xuất hiện của AI vật lý (Physical AI) giải quyết hạn chế này bằng cách tích hợp AI với các hệ thống vật lý cho phép các tác nhân thông minh nhận thức, suy luận, học hỏi và hành động trong môi trường thực tế năng động. AI vật lý là sự kết hợp đa ngành từ những tiến bộ trong robot, hệ thống vật lý-mạng (cyber-physical systems - CPS), trí tuệ hiện thân (Embodied intelligence), bản sao kỹ thuật số (Digital twins), mô hình nền tảng và điều khiển tự hành (Autonomous control) để hỗ trợ khả năng tự hành thế hệ tiếp theo. Nghiên cứu này cung cấp một cái nhìn toàn diện về khái niệm, sự phát triển, các công nghệ hỗ trợ và ý nghĩa công nghiệp của AI vật lý. Đầu tiên, nghiên cứu phân tích nền tảng lý thuyết của AI vật lý và mối quan hệ của nó với các lĩnh vực liên quan, bao gồm AI, robot học và hệ thống vật lý-mạng. Thứ hai, vai trò của AI vật lý trong việc hỗ trợ Công nghiệp 5.0 được thảo luận, đặc biệt lấy con người làm trung tâm, tính bền vững,

Abstract

Artificial Intelligence (AI) has achieved remarkable success in data-driven learning, perception, and decision-making; however, most existing AI systems remain largely confined to digital environments and exhibit limited capability for autonomous interaction with the physical world. The emergence of Physical AI addresses this limitation by integrating artificial intelligence with physical systems, enabling intelligent agents to perceive, reason, learn, and act within dynamic real-world environments. As a multidisciplinary paradigm, Physical AI combines advances in robotics, cyber-physical systems, embodied intelligence, digital twins, foundation models, and autonomous control to support next-generation autonomy. This review provides a comprehensive examination of the concept, evolution, enabling technologies, and industrial significance of Physical AI. First, the study analyzes the theoretical foundations of Physical AI and its relationship to related domains, including AI, robotics, and cyber-physical systems. Second, the role of Physical AI in supporting Industry 5.0 is discussed, with particular emphasis on human-centricity, sustainability,

* Tác giả liên hệ.
Email: thinhnt@ueh.edu.vn;
Trích dẫn bài viết: Nguyễn Trường Thịnh (2026). Trí tuệ nhân tạo vật lý, sự kết nối trí tuệ nhân tạo và hệ thống vật lý để tạo ra thế hệ tự hành tiếp theo trong cách mạng công nghiệp 5.0. *Tạp chí Công nghệ và Thiết kế,* 1(1), 13–32.

khả năng phục hồi và sự hợp tác thông minh giữa con người và máy móc. Thứ ba, các thành phần công nghệ chính, bao gồm hệ thống cảm biến, nhận thức đa phương thức, mô hình nền tảng, mô hình thế giới, bản sao kỹ thuật số, trí tuệ biên và tác động tự động, được xem xét một cách có hệ thống. Bài báo cũng xem xét các vấn đề quan trọng liên quan đến an toàn, độ tin cậy, khả năng giải thích và sự hợp tác giữa con người và AI vật lý. Cuối cùng, các thách thức nghiên cứu chính và hướng đi tương lai được xác định, bao gồm AI vật lý đa năng, các mô hình nền tảng thể hiện, học tập liên tục, chuyển giao từ mô phỏng sang thực tế và các hệ thống tự hành đáng tin cậy. Các phát hiện cho thấy AI vật lý có tiềm năng trở thành công nghệ nền tảng cho các hệ sinh thái tự hành trong tương lai bằng cách kết nối trí tuệ tính toán và tương tác với thế giới vật lý. Bài đánh giá này cung cấp một quan điểm thống nhất để hỗ trợ nghiên cứu trong tương lai và đẩy nhanh sự phát triển của các hệ thống tự hành thông minh, thích ứng và an toàn.

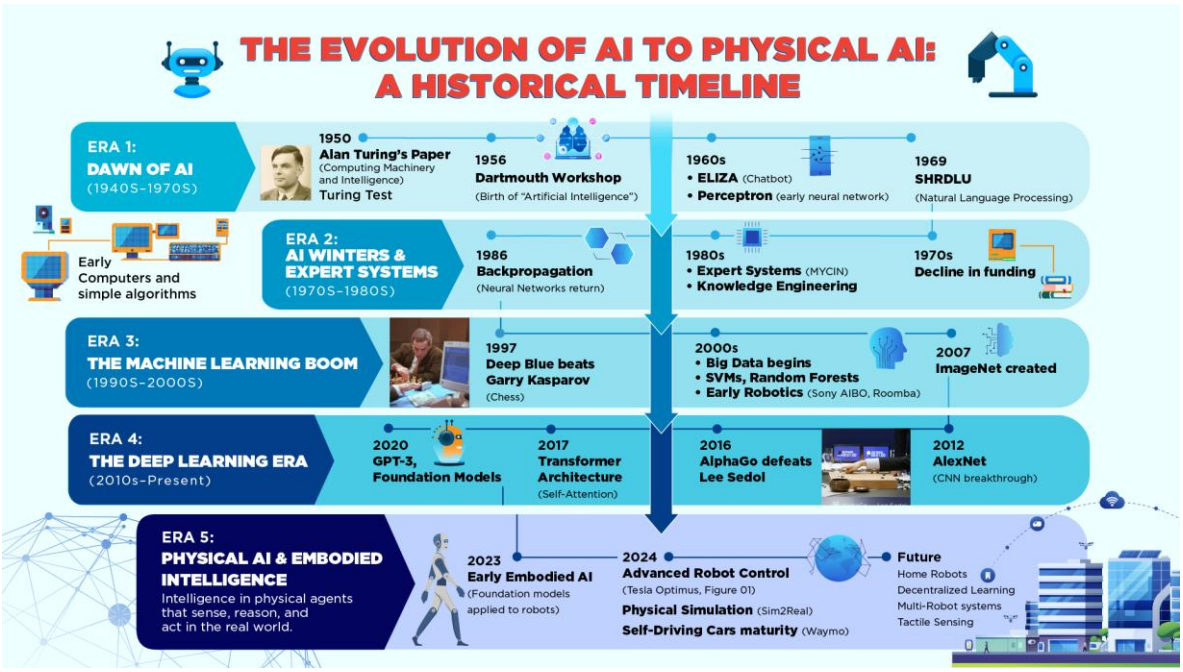
Từ khóa: Ai vật lý; Cách mạng Công nghiệp 5.0; Ai hiện thân; Hệ thống tự hành; Hợp tác con người và AI.

resilience, and intelligent human–machine collaboration. Third, key technological components, including sensing systems, multimodal perception, foundation models, world models, digital twins, edge intelligence, and autonomous actuation, are systematically reviewed. The paper also examines critical issues related to safety, trustworthiness, explainability, and human–Physical AI collaboration. Finally, major research challenges and future directions are identified, including general-purpose Physical AI, embodied foundation models, continual learning, sim-to-real transfer, and trustworthy autonomous systems. The findings indicate that Physical AI has the potential to become a foundational technology for future autonomous ecosystems by bridging computational intelligence and physical-world interaction. This review provides a unified perspective to support future research and accelerate the development of intelligent, adaptive, and safe autonomous systems.

Keywords: Physical AI, Industry 5.0, Embodied Intelligence, Autonomous Systems, Human–AI Collaboration.

1. Giới thiệu

AI đã trở thành một công nghệ mang tính chuyển đổi, định hình lại các ngành công nghiệp, nền kinh tế và xã hội thông qua khả năng xử lý dữ liệu, học các mẫu và hỗ trợ ra quyết định thông minh [1-4]. Những tiến bộ gần đây trong học máy, học sâu, thị giác máy tính, xử lý ngôn ngữ tự nhiên và AI tạo sinh đã mở rộng đáng kể khả năng của các hệ thống thông minh [5-8]. Đặc biệt, các mô hình nền tảng như mô hình ngôn ngữ lớn (Large Language Models - LLM), mô hình ngôn ngữ thị giác (Vision-Language Models - VLM) và hệ thống AI đa phương thức (multimodal AI systems) đã chứng minh kết quả đáng kể trong nhận thức, suy luận và tạo ra tri thức [9-11]. Mặc dù đạt được những thành tựu này, hầu hết các hệ thống AI vẫn chủ yếu bị giới hạn trong môi trường số, nơi trí thông minh được thể hiện thông qua phân tích tính toán và tương tác ảo [12-14]. Khả năng nhận thức, hiểu và hành động tự chủ của AI trong môi trường vật lý phức tạp vẫn còn hạn chế, từ đó tạo ra khoảng cách giữa trí thông minh số và khả năng tự hành trong thế giới thực [15-16]. Việc triển khai ngày càng nhiều các công nghệ tự động trong sản xuất, chăm sóc sức khỏe, vận tải, logistics, nông nghiệp và cơ sở hạ tầng thông minh đã làm nổi bật nhu cầu về các hệ thống thông minh có khả năng hoạt động trực tiếp trong thế giới vật lý [17-22]. Khác với môi trường ảo, môi trường vật lý được đặc trưng bởi sự không chắc chắn, tương tác động, thông tin không đầy đủ và các yêu cầu an toàn nghiêm ngặt. Các hệ thống thông minh hoạt động trong môi trường như vậy phải liên tục nhận biết môi trường xung quanh, diễn giải thông tin theo ngữ cảnh, đưa ra quyết định thích ứng và thực hiện các hành động phù hợp trong thời gian thực. Những yêu cầu này đã thúc đẩy sự ra đời của AI vật lý (Physical AI), một mô hình đang phát triển tích hợp AI với các hệ thống vật lý để cho phép tương tác tự động với môi trường thế giới thực (**Hình 1**).



Hình 1. Lịch sử phát triển từ AI đến AI vật lý.

AI vật lý có thể được hiểu là sự kết hợp của AI, robot, hệ thống vật lý-mạng, AI hiện thân, bản sao kỹ thuật số và công nghệ điều khiển tự hành [23-26]. Trong khi AI truyền thống chủ yếu tập trung vào tính toán dựa trên dữ liệu và hỗ trợ ra quyết định, thì AI vật lý mở rộng trí tuệ vượt ra ngoài các môi trường số bằng cách kết hợp sự thể hiện vật lý và tương tác môi trường. Thông qua cảm biến tiên tiến, nhận thức đa phương thức, suy luận nhận thức, học tập và tác động tự động, hệ thống AI vật lý có thể thực hiện các hoạt động vòng kín liên tục thích ứng với các điều kiện môi trường thay đổi. Những khả năng như vậy cho phép các tác nhân thông minh không chỉ phân tích thông tin mà còn ảnh hưởng và thao tác các quá trình vật lý một cách an toàn và hiệu quả.

Sự phát triển công nghệ đã thúc đẩy cho sự xuất hiện của AI vật lý. Những tiến bộ trong công nghệ cảm biến như: thị giác máy, LiDAR, radar, cảm biến xúc giác và thiết bị đeo đã nâng cao khả năng của máy móc trong việc thu thập thông tin thời gian thực từ môi trường phức tạp [27-29]. Đồng thời, các mô hình nền tảng đã giới thiệu các khả năng mạnh mẽ cho việc suy luận, lập kế hoạch và hiểu biết đa phương thức. Học tăng cường (Reinforcement learning), học tự giám sát (self-supervised learning) và các phương pháp dựa trên mô hình toàn cục (world-model-based) đã cải thiện khả năng của các tác nhân tự động học hỏi từ tương tác và thích ứng với sự không chắc chắn. Bên cạnh đó, công nghệ bản sao số đã cho phép tạo ra các mô hình ảo của tài sản và quy trình vật lý, từ đó cho phép các hệ thống thông minh mô phỏng, dự đoán và tối ưu hóa các hành động trước khi thực hiện trong môi trường thế giới thực. Từ đó những công nghệ này cung cấp nền tảng cho các hệ thống tự động thế hệ tiếp theo có khả năng tích hợp nhận thức, tư duy và hành động. Tầm quan trọng của AI vật lý đóng vai trò đặc biệt và khá rõ ràng trong cuộc cách mạng công nghiệp 5.0 [27-29]. Không giống như cách mạng công nghiệp 4.0 tập trung chủ yếu vào tự động hóa, kết nối và tối ưu hóa dựa trên dữ liệu, Cuộc cách mạng công nghiệp 5.0 nhấn mạnh tính lấy con người làm trung tâm, tính bền vững và khả năng phục hồi. Các hệ thống công nghiệp hiện đại ngày càng yêu cầu các máy móc thông minh có thể cộng tác với người lao động, thích ứng với các yêu cầu sản xuất năng động và hỗ trợ các hoạt động bền vững. AI vật lý giải quyết những nhu cầu này bằng cách cho phép các hệ thống thông minh hiểu bối cảnh vật lý, tương tác an toàn với con người và đưa ra các quyết định tự chủ trong môi trường phức tạp. Ngoài lĩnh vực sản xuất, AI vật lý được kỳ vọng sẽ đóng vai trò quan trọng trong robot y tế, giao thông tự hành, nông nghiệp chính xác, hệ thống năng lượng thông minh và cơ sở hạ tầng đô thị thông minh. Mặc dù tiềm năng rất lớn, việc phát triển và triển AI vật lý vẫn phải đối mặt với một số thách thức. Các hệ thống tự hành hoạt động trong môi trường vật lý phải đáp ứng các yêu cầu nghiêm ngặt về an toàn, độ tin cậy, tính mạnh mẽ và khả năng giải thích. Khoảng cách giữa mô phỏng và thực tế tiếp tục cản trở việc chuyển giao các hành vi đã học từ môi trường huấn luyện ảo sang các ứng dụng trong thế giới thực. Ngoài ra, các mối lo ngại liên quan đến an ninh mạng, đạo đức, trách nhiệm giải trình và tuân thủ quy định vẫn là những rào cản đáng kể đối với việc áp dụng rộng rãi. Do đó, đảm bảo sự hợp tác hiệu quả giữa con người và máy móc cũng như duy trì niềm tin của công chúng là những cân nhắc thiết yếu đối với các hệ thống AI vật lý trong tương lai.

Mặc dù nghiên cứu liên quan đến robot, trí tuệ hiện thân, hệ thống vật lý-mạng, bản sao kỹ thuật số và các mô hình nền tảng đã mở rộng nhanh chóng, thì khái niệm về AI vật lý vẫn còn phân tán trên nhiều lĩnh vực. Các nghiên cứu hiện có thường tập trung vào các công nghệ hoặc lĩnh vực ứng dụng cụ thể, dẫn đến thiếu các quan điểm thống nhất về cấu trúc, công nghệ hỗ trợ và tác động

xã hội của nó. Do đó, cần có một đánh giá toàn diện để tổng hợp kiến thức hiện tại và xác định các hướng nghiên cứu trong tương lai. Bài báo này nhằm mục đích cung cấp một đánh giá có hệ thống về AI vật lý như một mô hình mới nổi cho khả năng tự chủ thế hệ tiếp theo. Cụ thể, bài báo xem xét sự phát triển của AI vật lý, phân tích vai trò của nó trong việc hỗ trợ Công nghiệp 5.0, xem xét các công nghệ và thành phần hệ thống chính, thảo luận về sự hợp tác lấy con người làm trung tâm và các cân nhắc về an toàn, đồng thời xác định các thách thức và cơ hội nghiên cứu chính. Bằng cách cung cấp một quan điểm thống nhất về AI vật lý, bài đánh giá này tìm cách hỗ trợ nghiên cứu trong tương lai và đẩy nhanh sự phát triển của các hệ thống thông minh có khả năng tương tác đáng tin cậy và tự chủ với thế giới vật lý.

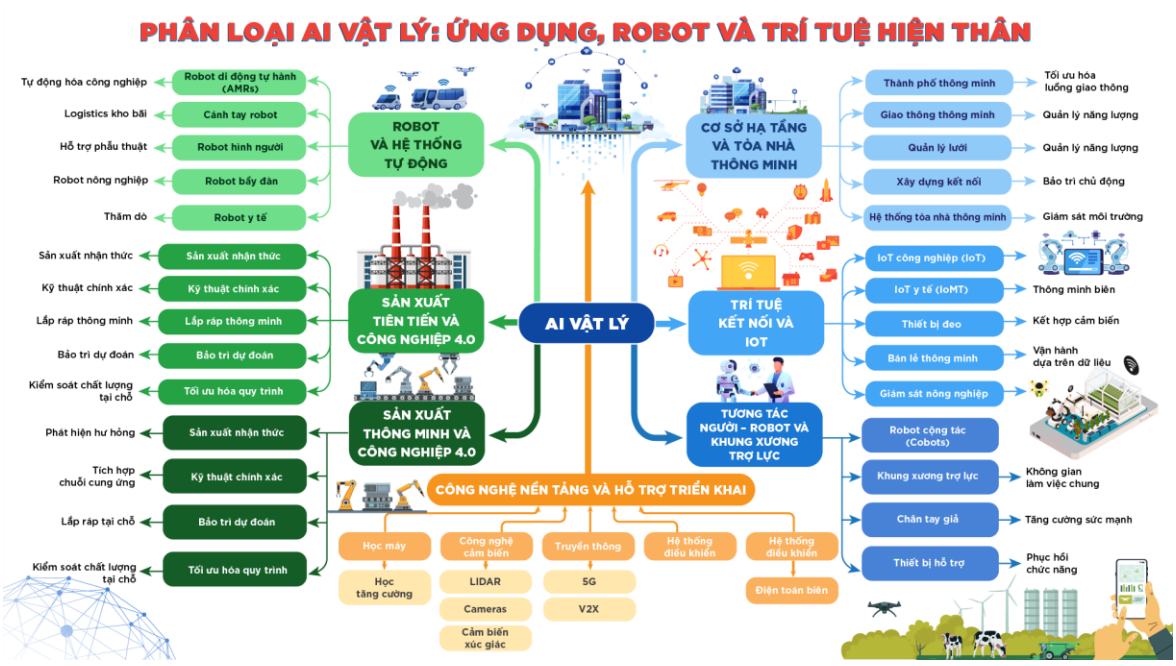
2. Tổng quan nghiên cứu

Khái niệm AI vật lý xuất hiện từ sự kết hợp của một số lĩnh vực nghiên cứu bao gồm AI, robot, hệ thống vật lý - mạng, trí tuệ hiện thân, bản sao kỹ thuật số và hệ thống tự động [23, 30, 25]. Mặc dù thuật ngữ AI vật lý chỉ được chú ý đáng kể trong những năm gần đây, nhưng nền tảng lý thuyết và công nghệ của nó có thể được nghiên cứu từ hàng thập kỷ nỗ lực nhằm cho phép máy móc thông minh nhận thức, suy luận và tương tác với thế giới vật lý. Do đó, để hiểu AI vật lý, cần phải xem xét toàn diện sự phát triển của các ngành liên kết này và những đóng góp của chúng cho các hệ thống tự động thế hệ tiếp theo [30]. AI ban đầu tập trung vào suy luận dựa trên biểu tượng và hệ thống chuyên gia dựa trên quy tắc, trong đó sự thông minh được thể hiện thông qua các cấu trúc kiến thức rõ ràng và cơ chế suy luận logic [31-32]. Mặc dù các phương pháp này đã đạt được thành công trong môi trường có cấu trúc, nhưng khả năng thích ứng hạn chế và gặp khó khăn với sự không chắc chắn và các kịch bản phức tạp trong thế giới thực. Sự xuất hiện của học máy và học sâu đã biến đổi AI bằng cách cho phép các hệ thống học trực tiếp từ dữ liệu [33-35]. Mạng thần kinh sâu đã chứng minh hiệu suất vượt trội trong nhận dạng hình ảnh, xử lý giọng nói, hiểu ngôn ngữ tự nhiên và phân tích dự đoán, dẫn đến việc ứng dụng rộng rãi trong nhiều ngành công nghiệp. Gần đây hơn, các mô hình nền tảng và AI tạo sinh đã mở rộng hơn nữa khả năng của AI bằng cách hỗ trợ suy luận nâng cao, hiểu biết đa phương thức và tương tác giống con người. Tuy nhiên, bất chấp những thành tựu này, hầu hết các hệ thống AI vẫn chủ yếu là môi trường số, với khả năng tương tác tự chủ hạn chế với môi trường vật lý năng động. Song song đó, các nghiên cứu về robot đã tìm cách phát triển các máy móc có khả năng cảm nhận, định hướng và thao tác cầm nắm các vật thể trong thế giới thực. Khi robot công nghiệp truyền thống đạt được độ chính xác và độ tin cậy cao trong môi trường sản xuất có cấu trúc nhưng thường phụ thuộc vào môi trường lập trình trước và các điều kiện hoạt động cố định. Do đó, chúng thiếu tính linh hoạt cần thiết cho môi trường không có cấu trúc và thay đổi nhanh chóng. Những tiến bộ trong học máy, học tăng cường và nhận thức robot đã cải thiện đáng kể khả năng tự chủ của robot bằng cách cho phép các hệ thống học hỏi từ kinh nghiệm và thích ứng với những thay đổi của môi trường. Những phát triển này đã đóng góp trực tiếp vào sự phát triển của Trí tuệ nhân tạo vật lý bằng cách tích hợp trí tuệ nhận thức với hiện thân vật lý và hành động tự chủ như trong **Bảng 1** và **Hình 2**.

Bảng 1.
So sánh AI, AI hiện thân, CPS và AI vật lý

Đặc tính	AI	Ai hiện thân	CPS	AI vật lý
Nhận dạng	✓	✓	✓	✓
Học	✓	✓	Giới hạn	✓
Tác động vật lý	✗	✓	✓	✓
Tự hành	Trung bình	Cao	Trung bình	Rất cao
Hợp tác với con người	Giới hạn	Trung bình	Trung bình	Cao

Một yếu tố quan trọng đóng vai trò quan trọng trong AI vật lý là CPS. CPS tích hợp trí tuệ tính toán, mạng lưới truyền thông, công nghệ cảm biến và các quy trình vật lý để tạo ra các hệ thống kết nối có khả năng giám sát và điều khiển các hoạt động trong thế giới thực. Công nghệ CPS đã được ứng dụng rộng rãi trong sản xuất, vận tải, chăm sóc sức khỏe, hệ thống năng lượng và thành phố thông minh. Tuy nhiên, nhiều cấu trúc CPS truyền thống phụ thuộc nhiều vào các mô hình điều khiển được xác định trước và cơ chế quyết định dựa trên luật, từ đó dẫn đến hạn chế khả năng thích ứng linh hoạt trong môi trường năng động cao. Do đó, việc tích hợp AI vào CPS đã trở thành một hướng nghiên cứu chính cho phép tạo ra các hệ thống vật lý thông minh hơn, thích ứng hơn và tự chủ hơn, có thể phản ứng hiệu quả với sự không chắc chắn và các điều kiện hoạt động thay đổi. Khái niệm về trí tuệ hiện thân cũng đóng một vai trò quan trọng trong việc định hình AI vật lý. Không giống như các mô hình AI thông thường coi trí thông minh chủ yếu là một quá trình tính toán, thì AI vật lý nhấn mạnh sự tương tác giữa một tác nhân, cơ thể vật lý của nó và môi trường. Nghiên cứu về robot nhận thức thể hiện cho thấy hành vi thông minh xuất hiện thông qua các vòng lặp nhận thức - hành động - phản hồi liên tục chứ không phải chỉ thông qua lý luận tính toán riêng lẻ. Quan điểm này nhấn mạnh tầm quan trọng của tương tác vật lý, học tập cảm giác vận động và thích ứng môi trường trong việc phát triển các hệ thống thông minh. Do đó, trí thông minh hiện thân cung cấp nền tảng lý thuyết cho AI vật lý bằng cách nhấn mạnh rằng nhận thức và hành động vật lý có mối liên hệ mật thiết với nhau.



Hình 2. Phân loại AI vật lý theo ứng dụng, robot và hiện thân.

Những tiến bộ trong khoa học và công nghệ trong thời gian gần đây của các mô hình nền tảng đã thúc đẩy sự phát triển của AI vật lý. Các mô hình ngôn ngữ quy mô lớn đã chứng minh khả năng suy luận, lập kế hoạch, biểu diễn tri thức và tương tác ngôn ngữ tự nhiên. Tương tự, các mô hình thị giác -ngôn ngữ đã cho phép tích hợp việc hiểu biết hình ảnh cũng như văn bản, trong khi các mô hình thị giác - ngôn ngữ - hành động đã bắt đầu kết nối nhận thức đa phương thức với điều khiển robot. Các mô hình này ngày càng được khám phá như những công cụ nhận thức cho các hệ thống tự động có khả năng diễn giải hướng dẫn, tạo ra kế hoạch hành động và thích ứng với các nhiệm vụ mới với việc đào tạo lại tối thiểu. Những phát triển như vậy thể hiện một bước tiến đáng kể hướng tới các hình thức trí tuệ vật lý tổng quát và linh hoạt hơn.

Công nghệ bản sao kỹ thuật số đã nổi lên như một yếu tố then chốt khác cho phép phát triển AI vật lý. Bản sao kỹ thuật số là một mô hình ảo đại diện cho một tài sản, quy trình hoặc môi trường vật lý liên tục đồng bộ hóa với dữ liệu thế giới thực. Bằng cách kết hợp mô phỏng, giám sát và phân tích dự đoán, bản sao kỹ thuật số cung cấp cho các hệ thống thông minh khả năng đánh giá các hành động thay thế và tối ưu hóa hoạt động trước khi thực hiện các thay đổi trong thế giới vật lý. Việc tích hợp AI với bản sao kỹ thuật số đã tạo điều kiện thuận lợi cho các ứng dụng như bảo trì dự đoán, sản xuất thông minh, hậu cần tự động và quản lý cơ sở hạ tầng. Hơn nữa, các bản sao kỹ thuật số hỗ trợ phát triển và xác thực các hệ thống tự động bằng cách thu hẹp khoảng cách giữa mô phỏng và thực tế, một trong những thách thức lớn trong nghiên cứu AI vật lý. Một đánh giá về các tài liệu gần đây cho thấy sự quan tâm ngày càng tăng đối với các công nghệ liên quan đến AI vật lý. Các xu hướng nghiên cứu cho thấy sự chú ý ngày càng tăng đối với AI hiện thân, các mô hình nền tảng robot, các tác nhân tự động, bản sao kỹ thuật số, trí tuệ biên và sự hợp tác giữa người và robot. Những nghiên cứu này cùng nhau chứng minh sự nhận thức ngày càng tăng rằng các hệ thống thông minh trong tương lai phải tích hợp nhận thức, tư duy, học tập và hành động trong môi trường vật lý. Tuy nhiên, các tài liệu hiện có vẫn còn rời rạc, hầu hết các nghiên cứu tập trung vào các công nghệ hoặc lĩnh vực ứng dụng cụ thể hơn là xem xét AI vật lý như một mô hình thống nhất. Kết quả là vẫn

chưa có định nghĩa, cấu trúc hoặc phân loại nào được chấp nhận rộng rãi cho Ai vật lý. Một số khoảng trống nghiên cứu vẫn còn rõ ràng. Thứ nhất, ranh giới khái niệm của AI vật lý thường không rõ ràng, dẫn đến sự không nhất quán trong thuật ngữ và cách giải thích. Thứ hai, những nỗ lực hạn chế đã được dành cho việc phát triển các khung tích hợp kết hợp cảm biến, nhận thức, tư duy, ra quyết định và điều khiển thành một kiến trúc mạch lạc. Thứ ba, những thách thức liên quan đến an toàn, khả năng giải thích, độ tin cậy và tuân thủ quy định vẫn chưa được giải quyết đầy đủ, đặc biệt đối với các hệ thống tự động hoạt động trong môi trường an toàn quan trọng. Thứ tư, mặc dù đã có những tiến bộ đáng kể trong AI và robot, nhưng các vấn đề như khan hiếm dữ liệu, chuyển giao từ mô phỏng sang thực tế, học tập liên tục và hợp tác giữa người và máy vẫn tiếp tục cản trở việc triển khai quy mô lớn. Cuối cùng, các tiêu chuẩn và phương pháp đánh giá chuẩn hóa để đánh giá hiệu suất của AI vật lý vẫn còn chưa được phát triển đầy đủ. Nhìn chung, các tài liệu hiện có cho thấy AI vật lý đang nổi lên như một mô hình đa ngành mở rộng ra ngoài AI và robot truyền thống bằng cách cho phép các hệ thống thông minh tương tác tự động với thế giới vật lý. Sự hội tụ của những tiến bộ trong AI, robot, hệ thống vật lý mạng (CPS), trí tuệ thể hiện, các mô hình nền tảng và bản sao kỹ thuật số đã tạo ra những cơ hội chưa từng có cho khả năng tự chủ thế hệ tiếp theo. Tuy nhiên, lĩnh vực này vẫn đang ở giai đoạn phát triển ban đầu, đòi hỏi sự rõ ràng hơn về mặt khái niệm, các khung chuẩn hóa và các nỗ lực nghiên cứu toàn diện. Những quan sát này nhấn mạnh sự cần thiết của một đánh giá có hệ thống nhằm tổng hợp kiến thức hiện tại, xác định các thành phần công nghệ chính và vạch ra các hướng nghiên cứu trong tương lai cho AI vật lý.

3. Cách mạng Công nghiệp 5.0 và AI vật lý

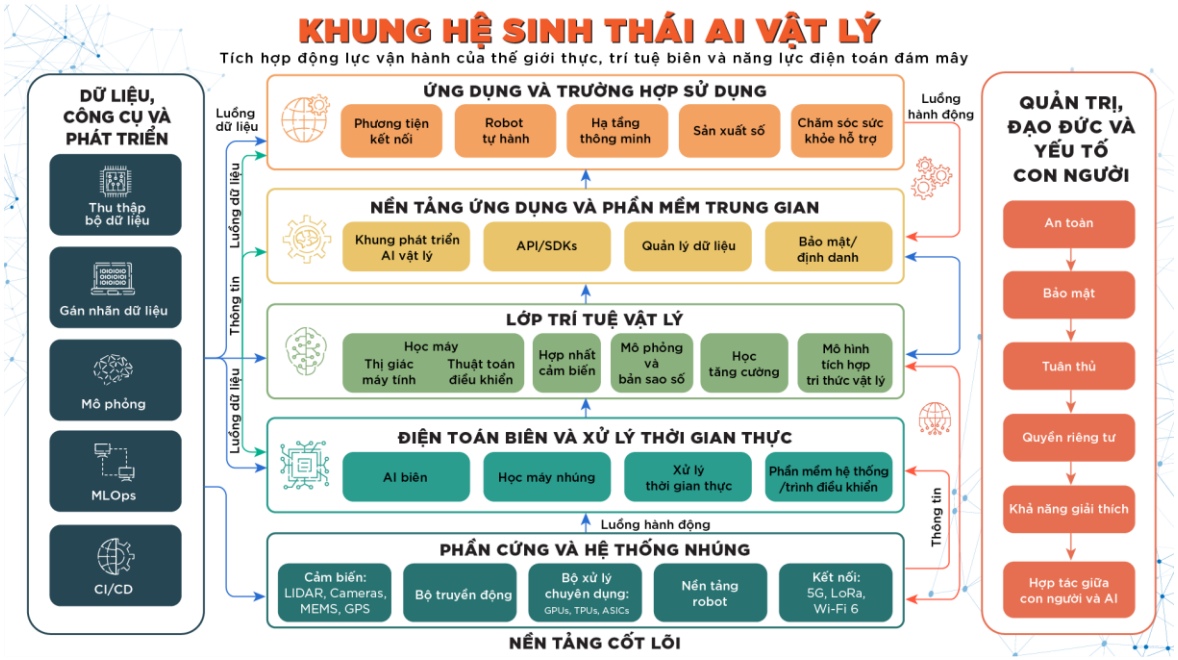
Cách mạng công nghiệp 5.0 đại diện cho giai đoạn tiếp theo trong sự phát triển công nghiệp, vượt ra ngoài mô hình tự động hóa của cuộc Cách mạng Công nghiệp 4.0 hướng tới một hệ sinh thái sản xuất lấy con người làm trung tâm, bền vững và kiên cường hơn. Cuộc cách mạng công nghiệp 5.0 tìm cách cân bằng giữa tiến bộ công nghệ với sự sáng tạo của con người, tính bền vững môi trường và khả năng phục hồi của tổ chức. Sự chuyển đổi này được thúc đẩy bởi sự bất ổn ngày càng tăng của thị trường, nhu cầu tùy chỉnh sản phẩm, hạn chế về nguồn lực, thách thức về lực lượng lao động và sự phức tạp ngày càng tăng của các hệ thống công nghiệp. Do đó, các ngành công nghiệp hiện đại đòi hỏi các công nghệ thông minh không chỉ có khả năng tự động hóa các quy trình mà còn có khả năng thích ứng với môi trường năng động, cộng tác với người lao động và đưa ra các quyết định tự động trong thời gian thực. Những yêu cầu này đã định vị AI vật lý như một công nghệ then chốt để hiện thực hóa tầm nhìn của cuộc Cách mạng Công nghiệp 5.0. Một đặc điểm cơ bản là sự nhấn mạnh vào sự hợp tác giữa con người và máy móc hơn là thay thế con người. Các hệ thống tự động hóa truyền thống rất hiệu quả trong các nhiệm vụ lặp đi lặp lại và có cấu trúc nhưng thường thiếu tính linh hoạt và hiểu biết theo ngữ cảnh cần thiết cho các môi trường phức tạp và thay đổi. Các hệ thống sản xuất hiện đại ngày càng liên quan đến sản xuất tùy chỉnh, dây chuyền lắp ráp linh hoạt và điều chỉnh hoạt động thường xuyên mà không thể quản lý hiệu quả chỉ bằng các quy tắc được định sẵn. AI vật lý giải quyết những hạn chế này bằng cách tích hợp các khả năng cảm biến, nhận thức, suy luận, học tập và điều khiển tiên tiến vào các hệ thống vật lý thông minh. Thông qua tương tác liên tục với môi trường, hệ thống AI vật lý có thể diễn giải thông tin theo ngữ cảnh, thích ứng với các điều kiện thay đổi và cộng tác hiệu quả với người vận hành. Khả năng này cho phép chuyển đổi từ tự động hóa cứng nhắc sang môi trường sản xuất thông minh và thích ứng, nơi con người và máy móc bổ sung cho nhau những điểm mạnh.

Khi sự phức tạp ngày càng tăng của các hoạt động công nghiệp càng làm nổi bật nhu cầu về AI vật lý. Môi trường sản xuất hiện đại bao gồm các mạng lưới máy móc, cảm biến, robot, bản sao kỹ thuật số, chuỗi cung ứng và người lao động được kết nối với nhau, tạo ra khối lượng lớn dữ liệu không đồng nhất. Quản lý sự phức tạp như vậy đòi hỏi nhiều hơn các hệ thống điều khiển truyền thống và các phương pháp tối ưu hóa tĩnh. AI vật lý cho phép ra quyết định thông minh bằng cách xử lý thông tin đa phương thức, dự đoán trạng thái hệ thống trong tương lai và tự động phản hồi các thay đổi hoạt động. Bằng cách tích hợp nhận thức, tư duy và hành động vật lý trong một khuôn khổ vòng kín, hệ thống Physical AI có thể tối ưu hóa quy trình sản xuất, phát hiện các bất thường, dự đoán sự cố thiết bị và cải thiện hiệu quả hoạt động tổng thể. Những khả năng này đặc biệt quan trọng để đạt được sự linh hoạt và khả năng phục hồi cần thiết trong môi trường công nghiệp năng động cao.

Một động lực chính khác thúc đẩy việc áp dụng AI vật lý là nhu cầu ngày càng tăng về hiệu chỉnh hàng loạt và sản xuất cá nhân hóa. Người tiêu dùng hiện nay mong muốn các sản phẩm được thiết kế riêng theo nhu cầu và sở thích cụ thể, buộc các nhà sản xuất phải vượt ra ngoài các chiến lược sản xuất hàng loạt truyền thống. Các hệ thống tự động hóa thông thường thường yêu cầu lập trình lại và can thiệp thủ công rộng rãi khi yêu cầu sản xuất thay đổi, hạn chế khả năng hỗ trợ sản xuất tùy chỉnh cao. AI vật lý cho phép linh hoạt hơn bằng cách cho phép các hệ thống thông minh tìm cách học hỏi, thích ứng và cấu hình lại các quy trình sản xuất một cách tự động. Robot được trang bị khả năng nhận thức và học tập tiên tiến có thể nhận biết sự khác biệt trong sản phẩm, điều chỉnh hoạt động sản xuất và cộng tác với công nhân để đạt được các mục tiêu sản xuất tùy chỉnh. Kết quả là AI vật lý hỗ trợ phát triển các hệ thống sản xuất linh hoạt có khả năng duy trì năng suất trong khi đáp ứng sự đa dạng sản phẩm ngày càng tăng. Công nghệ bản sao kỹ thuật số củng cố hơn nữa vai trò của AI vật lý trong hệ sinh thái Cách mạng Công nghiệp 5.0. Khi được tích hợp với Ai vật lý, bản sao kỹ thuật số trở thành nền tảng thông minh cho mô phỏng, dự đoán, tối ưu hóa và hỗ trợ ra quyết định tự động. Hệ thống AI vật lý có thể sử dụng bản sao kỹ thuật số để đánh giá các hành động thay thế, dự đoán kết quả tiềm năng và tối ưu hóa các chiến lược vận hành trước khi thực hiện quyết định trong môi trường thực tế. Khả năng này giúp giảm rủi ro vận hành, cải thiện việc sử dụng tài nguyên và nâng cao hiệu suất hệ thống. Các ứng dụng như bảo trì dự đoán, kiểm soát chất lượng, lập kế hoạch sản xuất và quản lý năng lượng chứng minh giá trị của việc kết hợp AI vật lý với công nghệ bản sao kỹ thuật số để đạt được hoạt động công nghiệp thông minh và hiệu quả hơn. Tính bền vững là một trụ cột trung tâm khác của Cách mạng Công nghiệp 5.0 và cũng là động lực quan trọng cho sự phát triển của AI vật lý với hệ sinh thái như **Hình 3**. Các ngành công nghiệp đang phải đối mặt với áp lực ngày càng tăng để giảm tiêu thụ năng lượng, giảm thiểu phát sinh chất thải và cải thiện hiệu quả sử dụng tài nguyên trong khi vẫn duy trì khả năng cạnh tranh. Các phương pháp tối ưu hóa truyền thống thường gặp khó khăn trong việc phản ứng linh hoạt với các điều kiện môi trường và vận hành thay đổi. Ai vật lý giải quyết những thách thức này bằng cách cho phép giám sát liên tục, ra quyết định thích ứng và tối ưu hóa theo thời gian thực. Các hệ thống thông minh có thể xác định những điểm không hiệu quả, dự đoán nhu cầu bảo trì, tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng và hỗ trợ các chiến lược sản xuất có trách nhiệm với môi trường. Thông qua quản lý tài nguyên tự động và dựa trên dữ liệu, AI vật lý đóng góp trực tiếp vào sự phát triển công nghiệp bền vững và các mục tiêu rộng lớn hơn của sản xuất xanh.

Tầm quan trọng của khả năng phục hồi cũng ngày càng trở nên rõ ràng trong những năm gần đây do những gián đoạn toàn cầu ảnh hưởng đến chuỗi cung ứng, hệ thống sản xuất và cơ sở hạ tầng quan trọng với yêu cầu khả năng của các hệ sinh thái công nghiệp trong việc dự đoán, chống chịu và phục hồi sau các sự kiện bất ngờ. AI vật lý tăng cường khả năng phục hồi bằng cách cho phép giám sát tự động, phân tích dự đoán, lập kế hoạch thích ứng và ra quyết định phi tập trung. Các tác nhân thông minh có thể phát hiện các bất thường, đánh giá rủi ro và phối hợp các phản hồi trên các hệ thống phân tán trong thời gian thực. Những khả năng như vậy cho phép các tổ chức duy trì tính liên tục hoạt động, giảm thời gian ngừng hoạt động và cải thiện khả năng phản ứng với các điều kiện thay đổi. Do đó, AI vật lý đóng vai trò quan trọng trong việc tăng cường khả năng thích ứng và tính mạnh mẽ của các hệ thống công nghiệp trong tương lai.

Mặc dù có tiềm năng đáng kể, việc triển khai AI vật lý trong Công nghiệp 5.0 vẫn còn liên quan đến một số thách thức. Đảm bảo an toàn và độ tin cậy trong sự hợp tác giữa con người và máy móc, bảo vệ hệ thống khỏi các mối đe dọa an ninh mạng, giải quyết các vấn đề đạo đức và đạt được khả năng ra quyết định tự động đáng tin cậy là những vấn đề quan trọng cần được nghiên cứu thêm. Ngoài ra, việc tích hợp các công nghệ không đồng nhất trên các lĩnh vực vật lý và kỹ thuật số đặt ra những thách thức đáng kể về kỹ thuật và tổ chức. Tuy nhiên, những tiến bộ liên tục trong AI, robot, công nghệ cảm biến, bản sao kỹ thuật số và điện toán biên tiếp tục thúc đẩy sự phát triển của các giải pháp AI vật lý. Tóm lại, Công nghiệp 5.0 đòi hỏi các hệ thống thông minh có khả năng kết hợp tính tự chủ, khả năng thích ứng, tính bền vững và sự hợp tác lấy con người làm trung tâm. AI vật lý cung cấp nền tảng công nghệ để đạt được những mục tiêu này bằng cách tích hợp các khả năng AI tiên tiến với các hệ thống vật lý và tương tác trong thế giới thực. Thông qua khả năng nhận thức, suy luận, học hỏi và hành động trong môi trường năng động, AI vật lý cho phép phát triển các hệ sinh thái công nghiệp bền vững, có khả năng phục hồi và hợp tác. Do đó, nó ngày càng được công nhận là công nghệ cốt lõi để hỗ trợ quá trình chuyển đổi sang các hệ thống tự động thế hệ tiếp theo và hiện thực hóa Công nghiệp 5.0.

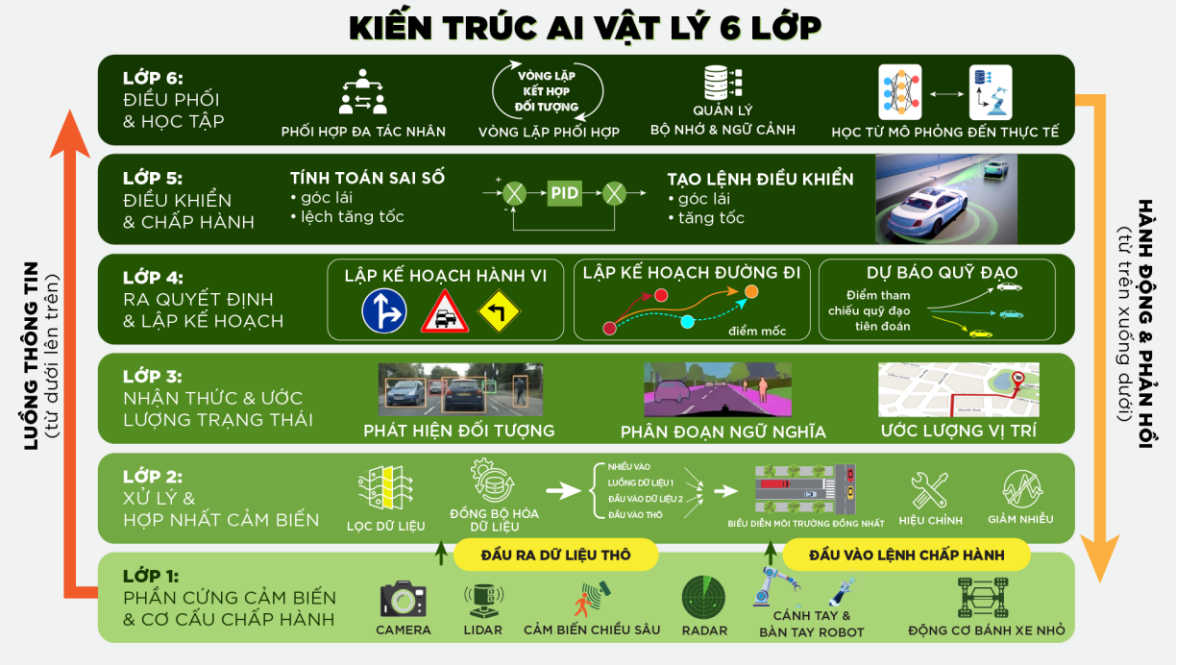


Hình 3. Hệ sinh thái của AI vật lý.

4. Thành phần và công nghệ hình thành AI vật lý

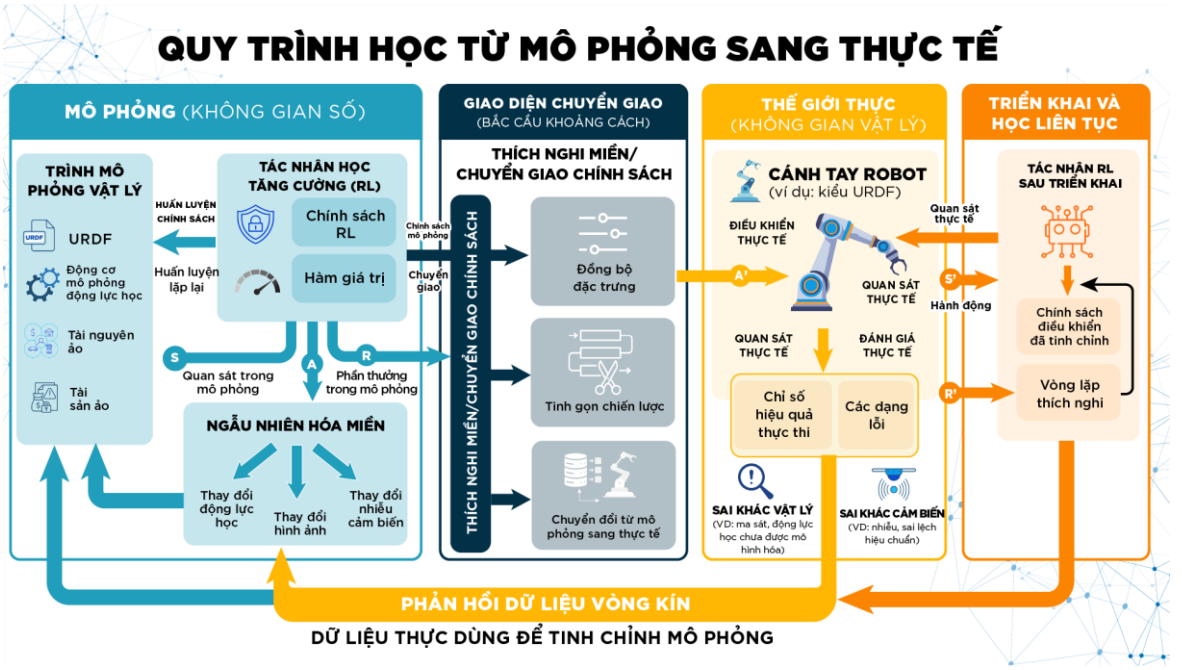
Các hệ thống AI vật lý được xây dựng dựa trên kiến trúc công nghệ đa tầng, tích hợp cảm biến, nhận thức, tư duy, học tập, ra quyết định và điều khiển vật lý vào một khuôn khổ tự chủ thống nhất (**Hình 4**). AI vật lý đòi hỏi sự kết hợp chặt chẽ giữa trí tuệ tính toán và tương tác với thế giới thực. Sự tích hợp này cho phép các tác nhân thông minh nhận thức môi trường năng động, suy luận về trạng thái vật lý, lập kế hoạch hành động phù hợp và liên tục thích ứng thông qua phản hồi. Do đó, hệ sinh thái công nghệ của AI vật lý bao gồm các công nghệ cảm biến tiên tiến, hệ thống nhận thức đa phương thức, mô hình nền tảng, mô hình thế giới, học tăng cường, bản sao kỹ thuật số, điện toán biên và cơ chế điều khiển tự động.

Nền tảng của AI vật lý nằm ở lớp cảm biến, nơi cung cấp thông tin thời gian thực về môi trường vật lý. Các hệ thống AI vật lý hiện đại dựa trên nhiều loại cảm biến khác nhau như camera RGB và độ sâu, LiDAR, radar, đơn vị đo quán tính (IMU), cảm biến xúc giác, cảm biến lực/moment, micro và cảm biến sinh học đeo trên người. Các thiết bị này thu thập thông tin bổ sung về vật thể, chuyển động, hình học không gian, lực tiếp xúc, âm thanh và trạng thái của con người. Vì môi trường vật lý vốn dĩ nhiễu loạn và không chắc chắn, nên việc kết hợp cảm biến đa phương thức đã trở thành một khả năng quan trọng. Bằng cách kết hợp các luồng cảm biến không đồng nhất, các hệ thống AI vật lý có thể đạt được khả năng nhận thức mạnh mẽ hơn, cải thiện tính dự phòng và khả năng phục hồi tốt hơn trước các lỗi cảm biến hoặc nhiễu loạn môi trường. Những tiến bộ trong camera dựa trên sự kiện và cảm biến nhúng công suất thấp đã cải thiện hơn nữa khả năng phản hồi và hiệu quả của các hệ thống tự động thời gian thực. Lớp nhận thức chuyển đổi dữ liệu cảm biến thô thành các biểu diễn có ý nghĩa của môi trường. Các thuật toán thị giác máy tính thực hiện các tác vụ như phát hiện đối tượng, phân đoạn ngữ nghĩa, ước tính tư thế, hiểu cảnh và theo dõi hình ảnh, cho phép máy móc nhận biết và định vị các thực thể liên quan trong môi trường phức tạp. Đồng thời, các kỹ thuật định vị và lập bản đồ đồng thời (Simultaneous Localization And Mapping - SLAM) cho phép các hệ thống di động xây dựng bản đồ không gian trong khi ước tính vị trí của chính chúng. Các mô hình nhận thức đa phương thức ngày càng tích hợp thông tin thị giác, không gian, thính giác và xúc giác để đạt được sự hiểu biết ngữ cảnh phong phú hơn. Những tiến bộ gần đây trong học sâu đã cải thiện đáng kể độ chính xác nhận thức, nhưng vẫn còn những thách thức trong việc xử lý các vật cản, điều kiện ánh sáng thay đổi, cảnh động và các kịch bản ngoài phạm vi phân phối thường gặp trong các triển khai thực tế.



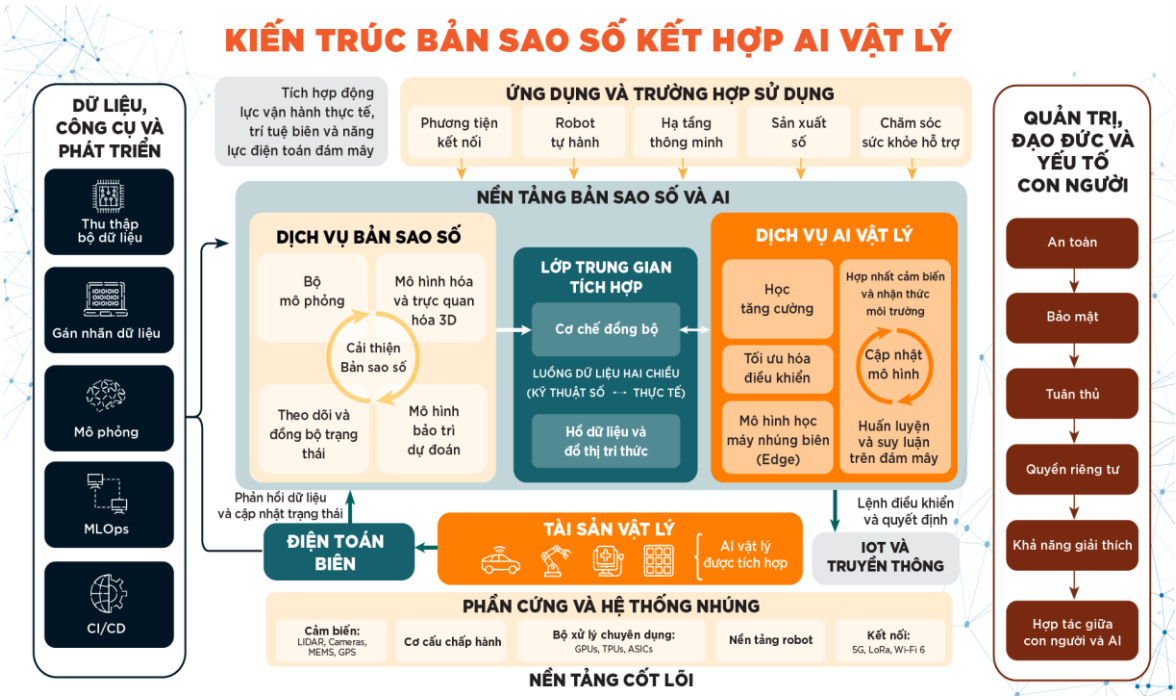
Hình 4. cấu trúc AI vật lý 6 lớp.

Trên lớp nhận thức, lớp nhận thức cung cấp khả năng suy luận, lập kế hoạch và hiểu biết ngữ cảnh ở cấp độ cao hơn như **Hình 5**. Một sự phát triển quan trọng gần đây trong lĩnh vực này là sự xuất hiện của các mô hình nền tảng, bao gồm các mô hình ngôn ngữ lớn, mô hình ngôn ngữ - thị giác và mô hình hành động - ngôn ngữ - thị giác. Các mô hình ngôn ngữ lớn đóng góp khả năng suy luận, phân tích nhiệm vụ, tuân theo hướng dẫn và giao tiếp giữa người và máy, trong khi các mô hình ngôn ngữ-thị giác cho phép hiểu biết chung về thông tin hình ảnh và văn bản. Các mô hình hành động - ngôn ngữ - thị giác mở rộng các khả năng này đến tương tác vật lý bằng cách kết nối kiến thức đa phương thức với điều khiển robot. Trong lĩnh vực robot, các mô hình nền tảng ngày càng được sử dụng như những công cụ nhận thức đa năng, có khả năng diễn giải các chỉ dẫn bằng ngôn ngữ tự nhiên, suy luận mục tiêu nhiệm vụ, tạo ra kế hoạch hành động và thích ứng hành vi trong các môi trường khác nhau. Sự chuyển đổi từ lập trình chuyên biệt cho từng nhiệm vụ sang suy luận tổng quát dựa trên trải nghiệm thực tế thể hiện một bước tiến quan trọng hướng tới các hệ thống AI vật lý có khả năng mở rộng.



Hình 5. Cấu trúc học từ mô phỏng đến thực tế.

Một thành phần trung tâm của các cấu trúc AI vật lý tiên tiến là mô hình toàn cục, cung cấp một biểu diễn nội tại của môi trường vật lý và dự đoán các trạng thái tương lai do các hành động có thể xảy ra. Mô hình toàn cục kết hợp nhận thức, bộ nhớ, mô hình động lực học và mô phỏng để cho phép ra quyết định dự đoán. Bằng cách học cấu trúc nhân quả và vật lý của môi trường, các mô hình này cho phép các tác nhân tự động đánh giá các chiến lược thay thế trước khi hành động. Mạng thần kinh dựa trên nền tảng vật lý và các bộ mô phỏng khả vi tiếp tục nâng cao khả năng này bằng cách kết hợp các định luật vật lý vào các quy luật học tập. Các cơ chế như vậy rất cần thiết cho các nhiệm vụ yêu cầu lập kế hoạch dài hạn, thao tác, điều hướng và tương tác trong điều kiện không chắc chắn. Các cơ chế học tập và thích ứng tạo thành một trụ cột cốt lõi khác của AI vật lý. Học có giám sát vẫn quan trọng đối với các nhiệm vụ nhận thức, nhưng các hệ thống vật lý tự động ngày càng dựa vào học tăng cường, học tự giám sát và học liên tục. Học tăng cường cho phép các tác nhân học các chính sách điều khiển thông qua tương tác với môi trường và phản hồi phần thưởng, làm cho nó đặc biệt có giá trị đối với robot và điều khiển tự động. Học tăng cường dựa trên mô hình cải thiện hiệu quả lấy mẫu bằng cách sử dụng các mô hình động lực học đã học để mô phỏng các kết quả trong tương lai. Học tự giám sát giảm sự phụ thuộc vào dữ liệu được gắn nhãn bằng cách khai thác cấu trúc trong các quan sát cảm biến, trong khi học liên tục cho phép các hệ thống thích nghi theo thời gian mà không bị quên đột ngột. Những phương pháp này cùng nhau hỗ trợ sự phát triển của các tác nhân tự động có khả năng cải thiện hiệu suất của chúng trong môi trường thay đổi.



Hình 6. Sự kết hợp về mặt cấu trúc của bản sao số và AI vật lý.

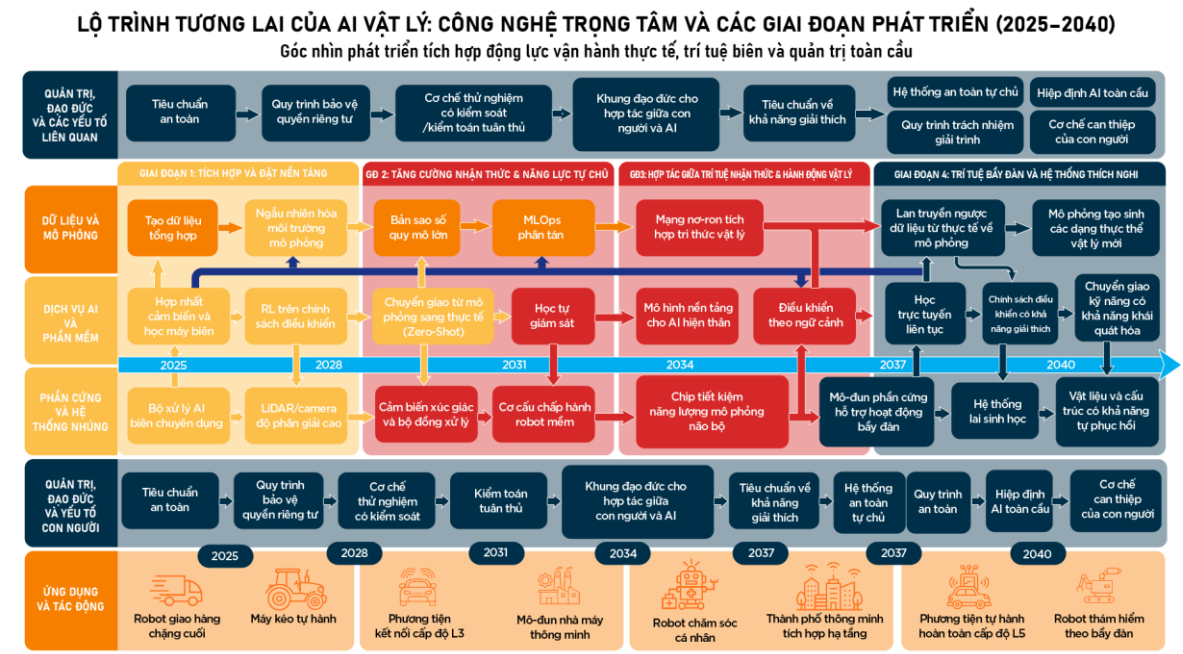
Như trong **Hình 6**, bản sao kỹ thuật số liên tục đồng bộ hóa với đối tác vật lý của nó thông qua dữ liệu cảm biến, cho phép giám sát, mô phỏng, dự đoán và tối ưu hóa theo thời gian thực. Khi được tích hợp với AI, bản sao kỹ thuật số trở thành hệ thống hỗ trợ quyết định chủ động có thể dự báo hành vi của hệ thống, đánh giá các hành động thay thế và tối ưu hóa hoạt động trước khi các thay đổi được áp dụng trong thế giới thực. Trong môi trường công nghiệp, bản sao kỹ thuật số do AI điều khiển hỗ trợ bảo trì dự đoán, tối ưu hóa sản xuất, quản lý năng lượng và phát hiện bất thường. Chúng cũng giúp giảm thiểu khoảng cách giữa mô phỏng và thực tế bằng cách cung cấp các biểu diễn chính xác hơn về các hệ thống vật lý để đào tạo và thử nghiệm các tác nhân tự động. Điện toán biên và trí thông minh thời gian thực là yếu tố thiết yếu để triển khai AI vật lý trong môi trường nhạy cảm về độ trễ. Nhiều ứng dụng như robot cộng tác (CoBot), xe tự hành (Autonomous car) và tự động hóa công nghiệp (Industrial automation) không thể chỉ dựa vào điện toán đám mây do độ trễ giao tiếp, hạn chế băng thông và các vấn đề về độ tin cậy. AI biên cho phép suy luận và ra quyết định trực tiếp trên các thiết bị nhúng gần nguồn dữ liệu, giảm độ trễ và cải thiện khả năng phản hồi. Kiến trúc cộng tác đám mây-biên tiếp tục cân bằng giữa điều khiển thời gian thực cục bộ với đào tạo tập trung, phân tích quy mô lớn và tối ưu hóa cấp độ đội ngũ. Những tiến bộ trong phần cứng AI chuyên dụng, bao gồm GPU, TPU, bộ xử lý trung tâm và bộ tăng tốc công suất thấp, đã làm cho AI vật lý thời gian thực ngày càng khả thi trong môi trường hạn chế tài nguyên. Lớp hành động khép kín vòng lặp nhận thức-hành động bằng cách thực hiện các quyết định thông qua các bộ truyền động vật lý. Điều này bao gồm các bộ điều khiển robot, nền tảng di động, máy bay không người lái, xe tự hành, máy móc công nghiệp và các thành phần cơ sở hạ tầng thông minh. Hệ thống điều khiển tự động kết hợp lập kế hoạch chuyển động, tối ưu hóa quỹ đạo, điều khiển thích ứng và ổn định phản hồi để đạt được hoạt động chính xác và an toàn. Các kỹ thuật phối hợp đa tác nhân cho phép các nhóm robot hoặc hệ thống tự động cộng tác trong các nhiệm vụ chung như hậu cần kho hàng, kiểm tra theo đàn hoặc sản xuất phân tán. Điều quan trọng là, việc tạo ra hành động trong AI vật lý không chỉ đơn thuần là

phản ứng; nó được định hướng bởi sự hiểu biết theo ngữ cảnh, suy luận dự đoán và các chính sách đã học được để thích ứng với những thay đổi của môi trường. Cuối cùng, bảo mật, an toàn và độ tin cậy là những thành phần xuyên suốt ảnh hưởng đến mọi lớp của kiến trúc Ai vật lý. Bởi vì các hệ thống này tương tác trực tiếp với thế giới vật lý, nên các sự cố có thể gây ra những hậu quả nghiêm trọng về hoạt động, kinh tế hoặc an toàn. Cần có các cơ chế an ninh mạng mạnh mẽ để bảo vệ các cảm biến, kênh liên lạc và hệ thống điều khiển khỏi các cuộc tấn công độc hại và giả mạo dữ liệu. Giám sát thời gian thực, phát hiện bất thường, dự phòng và các cơ chế an toàn giúp duy trì độ tin cậy trong điều kiện không chắc chắn. Các kỹ thuật AI có thể giải thích và các quy trình ra quyết định minh bạch ngày càng quan trọng để xây dựng lòng tin của con người, đặc biệt là trong các ứng dụng cộng tác và an toàn quan trọng. Cùng nhau, các công nghệ và thành phần này tạo thành nền tảng của các hệ thống AI vật lý có khả năng tương tác thông minh, thích ứng và tự chủ với các môi trường vật lý phức tạp.

5. Định hướng nghiên cứu tương lai của AI vật lý

Mặc dù đã đạt được những tiến bộ nhanh chóng trong AI, robot, CPS và công nghệ tự động, AI vật lý vẫn là một lĩnh vực nghiên cứu mới nổi với nhiều thách thức và cơ hội chưa được giải quyết. Những nỗ lực nghiên cứu trong tương lai có thể sẽ tập trung vào việc phát triển các hệ thống thông minh hơn, dễ thích nghi hơn, đáng tin cậy hơn và có khả năng mở rộng hơn, có thể hoạt động tự động trong môi trường vật lý phức tạp. Một trong những hướng đi triển vọng nhất là phát triển các hệ thống AI vật lý đa năng có thể thực hiện nhiều nhiệm vụ khác nhau trên nhiều lĩnh vực mà không cần lập trình hoặc đào tạo lại chuyên sâu cho từng nhiệm vụ. Các hệ thống tự động hiện nay thường được thiết kế cho các ứng dụng hẹp và thể hiện khả năng khái quát hóa hạn chế khi tiếp xúc với môi trường không quen thuộc. Những tiến bộ trong các mô hình nền tảng, học chuyển giao và học đa phương thức được kỳ vọng sẽ tạo điều kiện thuận lợi cho việc tạo ra các hệ thống AI vật lý linh hoạt hơn, có khả năng hiểu các ngữ cảnh phức tạp, thích ứng với các tình huống mới và thực hiện nhiều nhiệm vụ vật lý khác nhau.

Hình 7 trình bày lộ trình phát triển tiềm năng của AI vật lý đến năm 2040 theo quan điểm đề xuất của tác giả, được tổng hợp từ các xu hướng nghiên cứu hiện nay về trí tuệ nhân tạo, robot học, hệ thống vật lý - mạng, bản sao kỹ thuật số và Công nghiệp 5.0. Lộ trình này được xem như một khung tham chiếu khái niệm, không phải là dự báo đã được kiểm chứng thực nghiệm. Một hướng nghiên cứu quan trọng trong tương lai là tích hợp các mô hình nền tảng quy mô lớn vào các hệ thống tự hành có khả năng tương tác với môi trường vật lý. Mặc dù các mô hình ngôn ngữ lớn và mô hình nền tảng đa phương thức đã chứng minh khả năng suy luận và lập kế hoạch đáng kể trong môi trường kỹ thuật số, nhưng việc ứng dụng chúng trong các hệ thống vật lý vẫn còn ở giai đoạn đầu. Nghiên cứu trong tương lai hướng đến kết hợp các mô hình này với nhận thức thời gian thực, mô hình hóa thế giới và điều khiển robot để hỗ trợ việc ra quyết định tự động trong môi trường động. Các mô hình thị giác - ngôn ngữ -hành động, mô hình nền tảng có hình thể và kiến trúc dựa trên mô hình thế giới được kỳ vọng sẽ đóng vai trò quan trọng trong việc thu hẹp khoảng cách giữa suy luận nhận thức cấp cao và thực thi vật lý cấp thấp. Những phát triển như vậy cuối cùng có thể góp phần hiện thực hóa các hình thức trí tuệ có hình thể tổng quát hơn và có khả năng thúc đẩy mục tiêu dài hạn về AI tổng quát trong môi trường vật lý.



Hình 7. Lộ trình tương lai của AI vật lý (2025–2040)

Việc cải thiện hiệu quả học tập và khả năng thích ứng cũng vẫn là một thách thức lớn đối với AI vật lý. Nhiều hệ thống hiện có yêu cầu khối lượng lớn dữ liệu huấn luyện và tài nguyên tính toán rộng lớn, hạn chế việc triển khai thực tế của chúng. Nghiên cứu trong tương lai sẽ hướng vào học tập tự giám sát, học tập liên tục, học tập ít mẫu và các kỹ thuật học tập tăng cường cho phép các hệ thống tự động học tập hiệu quả từ dữ liệu hạn chế và tương tác trong thế giới thực. Hơn nữa, việc thu hẹp khoảng cách giữa mô phỏng và thực tế vẫn là ưu tiên hàng đầu. Mặc dù môi trường mô phỏng và bản sao kỹ thuật số cung cấp các nền tảng có giá trị để đào tạo các tác nhân tự động, việc chuyển giao các hành vi đã học sang môi trường thực tế vẫn gặp khó khăn do sự không chắc chắn của môi trường và sự không chính xác của mô hình. Các kỹ thuật thích ứng miền tiên tiến, học tập dựa trên vật lý và khung mô phỏng thích ứng có thể giúp giải quyết những hạn chế này và cải thiện hiệu suất triển khai trong thế giới thực.

AI vật lý lấy con người làm trung tâm cũng sẽ vẫn là một lĩnh vực nghiên cứu trọng điểm. Khi các hệ thống tự động ngày càng được tích hợp vào nơi làm việc và cuộc sống hàng ngày, nghiên cứu trong tương lai phải tập trung vào việc cải thiện sự hợp tác giữa con người và máy móc, sự tin tưởng và tính minh bạch. AI vật lý có thể giải thích được, quyền tự chủ chia sẻ và các cơ chế tương tác thích ứng giữa con người và AI sẽ rất cần thiết để đảm bảo sự hợp tác hiệu quả giữa con người và các hệ thống thông minh. Ngoài ra, các cân nhắc về đạo đức, cơ chế trách nhiệm giải trình và khung pháp lý phải phát triển song song với những tiến bộ công nghệ để đảm bảo việc triển khai có trách nhiệm và được xã hội chấp nhận. Do đó, nghiên cứu về các yếu tố con người, sự chấp nhận của người dùng và việc ra quyết định hợp tác sẽ đóng vai trò quan trọng trong việc định hình tương lai của AI vật lý. An toàn, bảo mật và khả năng phục hồi dự kiến sẽ ngày càng trở nên quan trọng khi các hệ thống AI vật lý đạt được mức độ tự chủ cao hơn. Các hệ thống trong tương lai phải có khả năng hoạt động đáng tin cậy trong môi trường không chắc chắn và đòi hỏi an toàn cao, đồng thời chống lại các cuộc tấn công mạng, lỗi cảm biến và gián đoạn hoạt động bất ngờ. Điều này sẽ đòi hỏi những tiến bộ

trong AI đáng tin cậy, xác minh chính thức, giám sát thời gian thực, phát hiện bất thường và các chiến lược điều khiển an toàn. Hơn nữa, việc phát triển các tiêu chuẩn, phương pháp đánh giá và khung chứng nhận được tiêu chuẩn hóa sẽ rất cần thiết để đánh giá hiệu suất và độ tin cậy của các hệ thống AI vật lý trên các lĩnh vực ứng dụng khác nhau.

Cuối cùng, tính bền vững và hiệu quả năng lượng đang nổi lên như những ưu tiên nghiên cứu quan trọng. Các hệ thống AI vật lý trong tương lai không chỉ nên cải thiện năng suất và tính tự chủ mà còn góp phần vào hoạt động có trách nhiệm với môi trường và tiết kiệm tài nguyên. Việc tích hợp tối ưu hóa dựa trên AI với sản xuất bền vững, quản lý năng lượng thông minh và các nguyên tắc kinh tế tuần hoàn có thể nâng cao đáng kể tác động xã hội của AI vật lý. Nhìn chung, tương lai của AI vật lý nằm ở sự hội tụ của trí tuệ tiên tiến, hiện thân vật lý, thiết kế lấy con người làm trung tâm và đổi mới bền vững. Giải quyết những thách thức nghiên cứu này sẽ là nền tảng để hiện thực hóa tầm nhìn về các hệ thống tự động thế hệ tiếp theo có khả năng tương tác thông minh, an toàn và đáng tin cậy với thế giới vật lý. Nghiên cứu này trình bày hệ thống hóa AI vật lý như một hướng nghiên cứu liên ngành, kết nối trí tuệ nhân tạo, robot học, hệ thống vật lý - mạng, bản sao kỹ thuật số và Công nghiệp 5.0. Trên cơ sở tổng hợp các nghiên cứu hiện có, bài báo làm rõ đặc trưng cốt lõi của AI vật lý, bao gồm khả năng cảm nhận môi trường, suy luận theo ngữ cảnh, học từ tương tác, ra quyết định tự chủ và điều khiển trong vòng kín cảm biến - quyết định - hành động. Bên cạnh đó, bài báo đề xuất một khung nhìn tổng hợp về hệ sinh thái công nghệ và lộ trình phát triển tiềm năng của AI vật lý, qua đó góp phần phân biệt khái niệm này với các hướng tiếp cận gần gũi như AI hiện thân, robot thông minh, hệ thống vật lý - mạng và bản sao kỹ thuật số.

6. Kết luận

AI vật lý đại diện cho một mô hình chuyển đổi giúp thu hẹp khoảng cách giữa AI và các hệ thống vật lý, cho phép các tác nhân thông minh nhận thức, suy luận, học hỏi và hành động tự chủ trong môi trường thực tế. Bài viết này đã xem xét sự phát triển của AI vật lý từ các lĩnh vực liên quan, bao gồm AI, robot, hệ thống mạng vật lý, trí tuệ thể hiện và bản sao kỹ thuật số, làm nổi bật tầm quan trọng ngày càng tăng của nó trong việc hỗ trợ các hệ thống tự động thế hệ tiếp theo. Từ những nội dung trên cho thấy AI vật lý đóng vai trò là yếu tố then chốt thúc đẩy Cách mạng Công nghiệp 5.0 bằng cách tạo điều kiện thuận lợi cho sự hợp tác lấy con người làm trung tâm, ra quyết định thích ứng, khả năng phục hồi hoạt động và phát triển công nghiệp bền vững. Nghiên cứu này đã xem xét các thành phần công nghệ chính làm nền tảng cho AI vật lý bao gồm các hệ thống cảm biến tiên tiến, nhận thức đa phương thức, mô hình nền tảng, mô hình thế giới, bản sao kỹ thuật số, trí tuệ biên và cơ chế điều khiển tự động. Nhìn về phía trước, những tiến bộ liên tục trong các mô hình nền tảng, trí tuệ hiện sinh, sự hợp tác giữa con người và AI, và các hệ thống tự động đáng tin cậy được kỳ vọng sẽ thúc đẩy sự phát triển của AI vật lý. Khi các công nghệ này phát triển, AI vật lý sẽ đóng vai trò ngày càng quan trọng trong việc định hình các hệ sinh thái thông minh, kiên cường và bền vững trong các ứng dụng công nghiệp, chăm sóc sức khỏe, giao thông vận tải và xã hội.

Tài liệu tham khảo

[1] Abbas Khan, Muhammad, et al. "Impact of artificial intelligence on the global economy and technology advancements." Artificial general intelligence (AGI) security: Smart applications and sustainable technologies. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. 147–180.

[2] Gowri, K., et al. "Artificial Intelligence: Transforming Society." International Journal of All Research Education & Scientific Methods 13 (2025): 2.

[3] Mossavar-Rahmani, Farhang, and Bahman Zohuri. "Artificial intelligence at work: Transforming industries and redefining the workforce landscape." Journal of Economics & Management Research 5.2 (2024): 2–4.

[4] Butt, Junaid Sattar. "AI-driven economies: How artificial intelligence (AI) is reshaping business administration and decision-making." Acta Universitatis Danubius. Œconomica 20.6 (2024): 106–120.

[5] Storey, Veda C., et al. "Generative artificial intelligence: Evolving technology, growing societal impact, and opportunities for information systems research." Information Systems Frontiers (2025): 1–22.

[6] Andreoni, Martin, et al. "Enhancing autonomous system security and resilience with generative AI: A comprehensive survey." IEEE Access 12 (2024): 109470–109493.

[7] Pescapè, Antonio. "Exploring the current state and future potential of generative artificial intelligence using a generative artificial intelligence." Mind, Body, and Digital Brains. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. 37–56.

[8] Qian, Wenhan, et al. "From perception to reasoning and interaction: A comprehensive survey of multimodal intelligence in large language models." Authorea Preprints (2025).

[9] Liang, Chia Xin, et al. "A comprehensive survey and guide to multimodal large language models in vision–language tasks." Computation 14.6 (2026): 125.

[10] Chen, Zheyi, et al. "Evolution and Prospects of Foundation Models: From Large Language Models to Large Multimodal Models." Computers, Materials & Continua 80.2 (2024).

[11] Liang, Zijing, et al. "A survey of multimodel large language models." Proceedings of the 3rd international conference on computer, artificial intelligence and control engineering. 2024.

[12] Ray, Partha Pratim. "Physical AI: bridging the sim-to-real divide toward embodied, ethical, and autonomous intelligence." Machine Learning for Computational Science and Engineering 2.1 (2026): 1.

[13] Sajadieh, Seyed Mohammad Mehdi, and Sang Do Noh. "From simulation to autonomy: Reviews of the integration of artificial intelligence and digital twins." International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 12.5 (2025): 1597–1628.

[14] Acharya, Deepak Bhaskar, Karthigeyan Kuppan, and B. Divya. "Agentic AI: Autonomous intelligence for complex goals—A comprehensive survey." IEEe Access 13 (2025): 18912–18936.

[15] Braun, Tomasz. "Liability for artificial intelligence reasoning technologies–a cognitive autonomy that does not help." Corporate Governance: The International Journal of Business in Society (2025).

[16] Nechesov, Andrey, Ivan Dorokhov, and Janne Ruponen. "Virtual cities: from digital twins to autonomous AI societies." IEEE access 13 (2025): 13866–13903.

[17] Sumanth Kamath, Manoj Kumar. "9 Intelligent solutions for future smart industries." Industry 5.0: A New Revolution Through Human-Centric Solution 17 (2025): 129.

[18] Gumzej, Roman. Intelligent Logistics Systems for Smart Cities and Communities. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2021.

[19] Bathla, Gourav, et al. "Autonomous vehicles and intelligent automation: Applications, challenges, and opportunities." Mobile information systems 2022.1 (2022): 7632892.

[20] Licardo, Josip Tomo, Mihael Domjan, and Tihomir Orehovački. "Intelligent robotics—A systematic review of emerging technologies and trends." Electronics 13.3 (2024): 542.

[21] Phiri, Thom. "Adaptive and Autonomous Systems in Advanced Computing A Future of Self-Optimizing Technologies." Journal of Advanced Computing Systems 3.5 (2023): 1–12.

[22] Singh, Hardial. "Artificial intelligence and robotics transforming industries with intelligent automation solutions." Available at SSRN 5267868 (2020).

[23] Thakur, Atul, et al. "Physical artificial intelligence for powering the next revolution in robotics." Journal of Computing and Information Science in Engineering 25.12 (2025): 120809.

[24] Li, Junfei, and Simon X. Yang. "Digital twins to embodied artificial intelligence: Review and perspective." Intelligence & Robotics 5.1 (2025): 202–227.

[25] Radanliev, Petar, et al. "Digital twins: artificial intelligence and the IoT cyber-physical systems in Industry 4.0." International Journal of Intelligent Robotics and Applications 6.1 (2022): 171–185.

[26] Broo, Didem Gurdur. "Physical AI in cyber-physical systems: from digital to embodied industrial agents." Journal of Industrial Information Integration (2025): 101038.

[27] Lou, Shanhe, et al. "Human-cyber-physical system for industry 5.0: A review from a human-centric perspective." IEEE Transactions on Automation Science and Engineering 22 (2024): 494–511.

[28] Passalacqua, Mario, et al. "Human-centred AI in industry 5.0: a systematic review." International Journal of Production Research 63.7 (2025): 2638–2669.

[29] Passalacqua, Mario, et al. "Human-centred AI in industry 5.0: a systematic review." International Journal of Production Research 63.7 (2025): 2638–2669.

[30] Ray, Partha Pratim. "Physical AI: bridging the sim-to-real divide toward embodied, ethical, and autonomous intelligence." Machine Learning for Computational Science and Engineering 2.1 (2026): 1.

[31] Bhuyan, Bikram Pratim, et al. "Rule-based systems and expert systems." Neuro-Symbolic Artificial Intelligence: Bridging Logic and Learning. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. 63–85.

[32] Mehra, Aditya. "Hybrid AI models: Integrating symbolic reasoning with deep learning for complex decision-making." Journal of Emerging Technologies and Innovative Research 11.8 (2024): f693–f695.

[33] Rane, Nitin Liladhar, et al. "Machine learning and deep learning for big data analytics: A review of methods and applications." Partners Universal International Innovation Journal 2.3 (2024): 172–197.

[34] Agrawal, Kushagra, and Nisharg Nargund. "Deep learning in industry 4.0: transforming manufacturing through data-driven innovation." International conference on distributed computing and intelligent technology. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024.

[35] Razzaq, Kamran, and Mahmood Shah. "Machine learning and deep learning paradigms: From techniques to practical applications and research frontiers." Computers 14.3 (2025): 93.