

戦略プロポーザル

フィジカル AI システムの 研究開発

～身体性を備えた AI とロボティクスの融合～

STRATEGIC PROPOSAL

Physical AI System

—Integration of Embodied AI and Robotics—



研究開発戦略センター（CRDS）は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立つて行う公的シンクタンクの一つで、文部科学省を主務省とする国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）に属しています。

CRDSは、科学技術分野全体像の把握（俯瞰）、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

公的な科学技術研究は、個々の研究領域の振興だけでなく、それらの統合によって社会的な期待に応えることが重要です。「戦略プロポーザル」が国の政策立案に活用され、科学技術イノベーションの実現や社会的な課題の解決に寄与することを期待しています。

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧ください

<https://www.jst.go.jp/crds/>

エグゼクティブサマリー

本プロポーザルは、AIとロボティクスの融合によって実現されるフィジカルAIの研究開発を推進し、実環境に適応可能なロボット技術の革新を図り、日本がロボティクス分野における国際競争力と社会的意義を維持・向上させるための研究開発戦略を示すものである。「フィジカルAI」とは、センサーやアクチュエーターなどの物理的な機構を通じて環境と相互作用し、得られた入力と動作の結果に基づいて知能を獲得・発達させる、身体性を備えた人工知能を指す。この知能を中核に、行動・学習・判断を自律的に実行するAIロボット、および、これを支える運用環境を含む統合システム全体を、本プロポーザルでは「フィジカルAIシステム」と定義する。フィジカルAIシステムは、非身体的なAIを主対象とする従来のサイバー空間中心型AIとは異なる、物理的かつ社会的な制約の下で、実世界におけるタスクの遂行や人間との協働に適応することが求められる。労働現場、日常生活、災害対応、高齢者支援など、人の暮らしに直結する領域において、AI技術を実用的かつ持続的に活用するためには、身体性を備えた知能の導入が不可欠である。このようなフィジカルAIは今後のロボティクスの技術基盤としての中心的な役割を担うことになると考えられる。なお、本プロポーザルでは、フィジカルAIシステム全体の方角を見据えつつ、AIロボットを対象を絞り、その研究開発戦略を提案する。

フィジカルAIシステムに求められる能力と価値を体系的に整理するために、本プロポーザルでは、AIロボットを起点として将来の技術発展の方向性を三つに定式化した。具体的には、タスク遂行の高度化、環境への適応性、および、人との共生の三方向である。これらの方向性に対応してAIロボットが発揮すべき価値特性を示し、それぞれの応用領域を想定したロボット像を提示している(図)。

【タイプP】多様な実世界タスクを自律的に学習し、正確に遂行する能力(Performance性)を備えたAIロボット。産業分野における高精度作業や職人技の再現を可能にし、医療・点検・サービスなどへの展開を通じて、人手不足や技能継承の課題に資する。【タイプH】人間の意図や動作を理解し、相互作用を通じて学習・適応する能力(Humanoid性)を備えたAIロボット。介護や生活支援、教育など、人との協働が不可欠な領域において、補助や共同作業を通じて自然な共生環境を構築する。【タイプA】過酷かつ変動する実環境において安定して動作する能力(Adaptive性)を備えたAIロボット。農業、建設、災害対応、インフラ点検などの屋外作業を含む、人間にとって作業が困難な環境における代替・支援を担う。

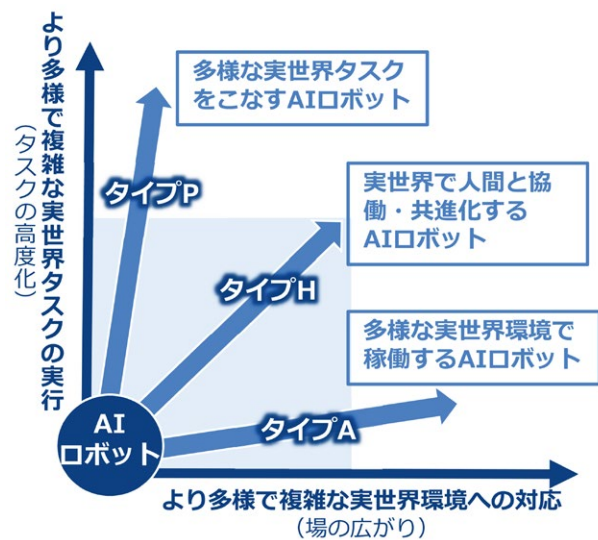


図 3 AIロボットが発揮すべき価値の方向性

P・H・Aは、AIロボットに求められる価値の三方向であり、排他的な分類ではなく、AIロボットにおいては複合的に発現される。

21世紀に入り、ロボット技術はAI技術の進展による恩恵を大きく受けてきた。2010年代には、機械学習や深層学習による画像認識・音声認識技術の向上により、ロボットの知覚能力が飛躍的に進化した。2020年代に入ると、生成AIや基盤モデルの導入が進み、言語、画像、動作といったマルチモーダルな情報を統合的に処理することで、ロボットの行動計画や動作生成が可能となってきている。米国Google社（以下、Google）や米国OpenAI社（以下、OpenAI）などのソフトウェア企業は、マルチモーダルな基盤モデル

を活用し、実世界におけるロボットの動作制御に展開し始めている。これに続き、米国や中国ではハードウェア企業や公的機関が二足・四足ロボットへの応用を進め、工場や物流現場での実証を開始している。産業界と学术界の研究者・技術者が、ソフトウェアとハードウェアを横断しながら、環境適応性、リアルタイム性、コスト、安全性といった実用化の課題に取り組む動きが加速している。

一方、日本では、産業用ロボット分野において市場と技術力を有しているものの、生成AIのロボット適用では米国や中国に後れを取っている。現場や実環境に根ざした日本のハードウェア技術が、海外で加速するAIロボットの進展に対して、優位性を確保し続けられるかには懸念がある。フィジカルAIの真価である、実世界における課題への適応力を活かすことで、今後も優位性を維持することが期待されるが、対応の遅れは致命的となる。

こうした状況を踏まえ、本プロポーザルでは、以下の四つの研究開発課題の推進を提案する。

1. 実世界で適応的に動けるフィジカルAIの開発。エッジでの実行を考慮したリアルタイム性や消費電力の課題を克服し、タスク・現場状況・身体の個別性に応じて適応的に動作できるAIとハードウェアの統合を図る。
2. 身体性を備えた知能の解明。身体構造と知能の関係や感覚フィードバック、身体化された認知を多角的かつ構成論的に研究し、認知発達ロボティクスの視点から知能の獲得過程を解明する。
3. 人に安全なフィジカルAIシステム。リスクアセスメントを取り入れた設計により、障害に対するフォールトトレランスやリカバリー機能を備えた、信頼性の高いシステムを構築し、安全ガイドラインやバイデザインの研究も進める。
4. 社会・経済的影響に関する人文・社会科学研究。システムへの安心感、プライバシー、社会とのインタラクション、責任分配など、社会に適用する上での課題を人間との共存度や研究段階に応じて整理し、政策対応と学術研究を促進する。

これらの研究開発を効果的に進めるには、基礎研究の推進、社会・経済的影響の評価、オープンプラットフォームの整備、実環境を模した競技会の四つのアクティビティを連携させる共創の場を築くことが不可欠である。分野横断の研究体制と標準化された実験基盤、現場起点の社会ニーズを反映する評価フレームワークを整備し、基礎研究から社会実装への移行を円滑化することが求められる。中立的な支援機関・研究機関・学会・産業コンソーシアムなど多様な関係主体が連携し、制度的枠組みの下で研究を継続的に支える体制を構築することが重要である。

フィジカルAIの研究開発は、製造、介護、教育、交通、環境、災害対応などの分野で、労働力不足の補完や作業負担の軽減、生産性の向上に資する。また、身体性を備えた知能の研究は、ロボット技術にとどまらず、人間の知能理解にも貢献し、学術的発展の基盤形成にもつながる。本プロポーザルは、フィジカルAIの研究開発を推進し、ロボットの実環境適応能力の向上を図ることで、日本がロボット技術分野における国際的な位置づけを強化するための基盤の整備を目指すものである。とりわけ、身体性を備えた知能の研究を深めることで、サイバー空間主体のAIでは解決が難しい課題へ対応を補完し、新たな技術的展開につながる可能性もある。これらの取り組みにより、ロボットの社会実装の適切な進展を促し、産業競争力の強化および社会課題の構造的解決に貢献することが期待される。

Executive Summary

This proposal presents a strategic framework for strengthening research and development (R&D) of Physical AI, which emerges from the integration of AI and robotics. The objective is to advance robot technologies capable of adapting to real-world environments, thereby enhancing Japan's international competitiveness and societal relevance in the robotics domain. "Physical AI" refers to embodied artificial intelligence that acquires and develops intelligence through direct interaction with the physical environment via components such as sensors and actuators. We define a "Physical AI system" as a comprehensive system consisting of an AI robot that autonomously performs actions, learning, and decision-making, along with its supporting operational infrastructure. Unlike conventional cyber-centric AI systems, Physical AI systems must operate under physical and social constraints, enabling task execution and human-robot collaboration in the real world. In areas directly tied to people's lives—such as labor, caregiving, disaster response, and aging society support—embodied intelligence is essential for the practical and sustainable deployment of AI. Physical AI is expected to play a central role as the foundation for future robotics.

To systematically organize the capabilities and value required of Physical AI systems, this proposal defines three directions for future technological development from the perspective of AI robots:

- (1) enhancement of task execution,
- (2) adaptability to diverse environments, and
- (3) coexistence with humans.

Figure illustrates the corresponding value axes and representative AI robot configurations.

- Type P (Performance): AI robots capable of autonomously learning and accurately performing a wide variety of real-world tasks. These systems contribute to addressing labor shortages and skill transfer challenges by enabling precise industrial operations, replicating expert techniques, and expanding into fields such as healthcare, inspection, and services.
- Type H (Humanoid): AI robots with the capacity to understand human intentions and actions, and to learn and adapt through interaction. These systems build natural collaborative environments and play vital roles in domains where human

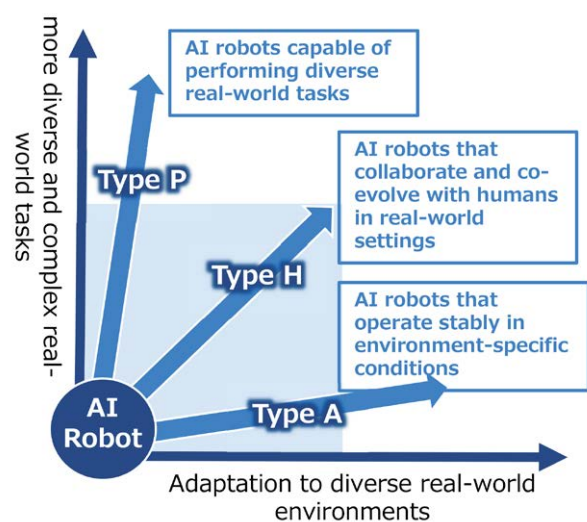


Fig. Three Value Directions for AI Robots

P, H, and A represent three value axes required of AI robots. They are not mutually exclusive categories, but directions that can be simultaneously embodied.

cooperation is essential, including caregiving, daily assistance, and education.

- **Type A (Adaptive):** AI robots with robust capabilities to operate stably in harsh and dynamically changing environments. They are intended for deployment in outdoor tasks, agriculture, construction, disaster response, and infrastructure inspection, where human labor is difficult or dangerous.

Since the early 21st century, robotics has rapidly evolved through advancements in AI. In the 2010s, the adoption of machine learning and deep learning significantly improved perceptual capabilities such as image and speech recognition. In the 2020s, foundation models and generative AI have enabled the integrated processing of multimodal information—including language, vision, and motor actions—allowing robots to perform planning and generate behaviors. Leading software companies such as Google and OpenAI have begun applying multimodal foundation models to real-world robot control. Following this, hardware companies and public agencies in the U.S. and China have extended these models to bipedal and quadrupedal robots, initiating field demonstrations in factories and logistics. This has spurred cross-sector collaboration among researchers and engineers in software and hardware, addressing challenges such as environmental adaptability, real-time performance, cost, and safety.

Meanwhile, although Japan retains technological strength and market presence in industrial robotics, it lags behind the U.S. and China in applying generative AI to robotics. Japan’s hardware excellence, grounded in real-world practice, now faces the test of maintaining its comparative advantage amidst rapidly advancing AI robotics abroad. Whether Japan can leverage the true strength of Physical AI—real-world adaptability—depends on timely and strategic response. Delay could prove critical.

Based on this context, the proposal identifies the following four core R&D challenges:

1. Development of adaptive Physical AI for real-world operation

Integrating AI and hardware to dynamically respond to tasks, environments, and robot-specific constraints, while overcoming challenges of real-time execution and energy efficiency at the edge.

2. Understanding embodied intelligence

Investigating the relationship between physical structure and intelligence, sensory feedback, and embodied cognition through constructive approaches rooted in cognitive developmental robotics.

3. Safety and trust in Physical AI systems

Establishing reliable systems through design incorporating risk assessment, fault tolerance, and recovery capabilities, along with safety guidelines and “by design” approaches.

4. Humanities and social science research on socio-economic impacts

Addressing social concerns such as safety perception, privacy, human-AI interaction, and responsibility allocation, and promoting interdisciplinary research and policy coordination based on the system’s stage of development and degree of integration with society.

To effectively address these challenges, four complementary activities are essential:

- (1) promoting basic research,
- (2) evaluating socio-economic impacts,
- (3) building open research platforms, and
- (4) organizing competition-based testbeds simulating real-world conditions.

It is critical to establish a collaborative ecosystem supported by interdisciplinary research structures, standardized experimental environments, and evaluation frameworks reflecting real-world needs. Neutral support organizations, academic societies, research institutes, and industrial consortia must cooperate under institutional frameworks to sustain long-term R&D.

Physical AI R&D is expected to contribute to labor augmentation, workload reduction, and productivity enhancement across manufacturing, caregiving, education, transportation, environmental monitoring, and disaster response. Moreover, studies on embodied intelligence not only advance robotics, but also deepen our understanding of human cognition and serve as a foundation for academic development. Through promoting Physical AI and enhancing robots' adaptability to real-world environments, this proposal aims to establish a strategic foundation for strengthening Japan's global leadership in robotics. Particularly, deepening research on embodied intelligence may address limitations inherent in cyber-based AI and unlock new directions for technological innovation. These efforts are expected to accelerate the real-world implementation of robots and contribute to industrial competitiveness and societal well-being.

目次

1	研究開発の内容	1
2	研究開発を実施する意義	3
2.1	現状認識および問題点	3
2.1.1	背景と問題提起	3
2.1.2	AI研究とロボティクス研究	5
2.1.3	AIロボットに関する国際動向	6
2.1.4	日本の主な研究開発プログラム	8
2.1.5	ロボティクス研究におけるプラットフォームの現状	9
2.1.6	ロボット関連の競技会の現状	10
2.1.7	AIやロボットの社会的受容性に関する取り組み	11
2.2	社会・経済的効果	12
2.3	科学技術上の効果	13
	コラム：ロボットはなぜ簡単なことが難しいのか？ ーモラベックのパラドックス再考ー	14
3	具体的な研究開発課題	16
3.1	フィジカルAIシステムに関する研究開発課題	16
3.1.1	実世界で適応的に動けるフィジカルAIの開発	17
3.1.2	身体性を備えた知能の解明に向けた研究	19
3.1.3	安全なフィジカルシステム	22
3.2	社会・経済的影響に関する人文・社会科学研究課題	23
4	研究開発の推進方法および時間軸	28
4.1	オープンプラットフォームの整備と活用	28
4.2	現場・現実タスクを目指した競技会の推進	30

- 4.3 研究開発の推進方法と推進の時間軸 31
 - (1) 戦略的研究体制の構築 31
 - (2) 社会実装に向けた共創の場 32
 - (3) 日本のとるべき戦略 ロボットを作る国からAIロボットを活かす国へ ... 33
- 付録1 検討の経緯 35
- 付録2 国内外の状況 38
 - 付録2.1 各国の主な研究開発プログラム 38
 - 付録2.2 AIロボットの研究力 42
 - 付録2.3 ロボットの社会的経済的影響に関わる研究活動動向 45
- 付録3 用語集 49
- 参考文献 52

1 | 研究開発の内容

本プロポーザルは、AIとロボティクスの融合によって実現されるフィジカルAIの研究開発を推進し、実環境に適応可能なロボット技術の革新を図るものである。フィジカルAIとは、物理的な機構を通じて環境と直接相互作用し、変化する状況の中で柔軟に対応しながら、タスクを確実に遂行する能力を持つ「身体性を備えた人工知能」を指す。この知能を搭載し、行動・学習・判断を自律的に行うロボットおよびその運用環境を含めたシステム全体を「フィジカルAIシステム」と定義する。フィジカルAIシステムは、産業用ロボット、人型ロボット、自動運転車、スマートファクトリーなどを含むが、本プロポーザルでは、その中でも知能・身体性・自律性の統合が顕著であり、将来的な社会実装の幅が広く見込まれる人型ロボット（以下「AIロボット」と呼ぶ）を主要な対象とし、これらの研究開発戦略を提案する。

フィジカルAIシステムの目指すべき方向性を整理するにあたり、本プロポーザルではAIロボットが実世界において発揮すべき価値の方向性として、タイプP・H・Aの三つに定式化した。これらはいずれも「人間の役に立つAIロボット」として、社会的有用性の高い応用を想定したものであり、実際のAIロボットはこれら複数の特性を統合的に備えることが前提となる。

【タイプP】多様な実世界タスクを自律的に学習し、正確に遂行できる性能特性（Performance性）を重視する方向性。産業分野での高精度作業や職人技の再現に加え、医療・点検・サービス分野などへの応用拡大が期待される。

【タイプH】人間の意図や動作を理解し、相互作用を通じて学習・適応する能力（Humanoid性）を重視する方向性。協働や補助が求められる介護・生活支援・教育といった領域において、自然な人間との共生を実現する。

【タイプA】多様かつ過酷な環境に柔軟に適応し、安定して動作できる適応能力（Adaptive性）を重視する方向性。農業、建設、災害対応などの屋外作業にて、人間にとって作業が困難な環境における実用化を想定する。

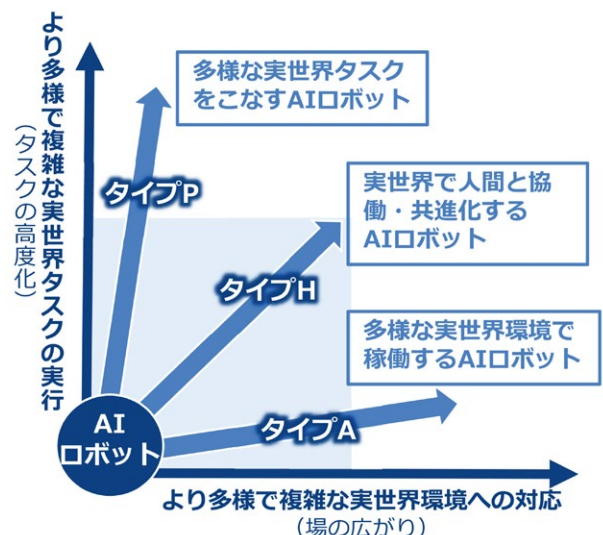


図1-1 AIロボットが発揮すべき価値の方向性

P・H・Aは、AIロボットに求められる価値の三方向であり、いずれかに分類されるものではなく、複合的に発現される。

現行のAIロボット技術には、実世界への適応に関して次のような問題がある。

- (1) **多様な実世界タスクへの対応（巧緻性）** 変化する環境下で、未知の状況においても安定的にタスクを遂行することができない。ロボットには、形状や材質が異なる物体を扱ったり、多様な道具を使いこなしたり、タスクごとに異なる操作方法を柔軟に学習・切り替える能力が求められる。しかし、現行の制御アルゴリズムや学習モデルでは、対象物のわずかな違いや状況の変化に対して動作が破綻しやすい。
- (2) **多様な実行環境への対応（頑健性）** 実行環境の多様性に対し、未知・未整備な状況でも安定した動作を確保できない。ロボットが屋外で移動したり作業を行ったりする場合、地形の凹凸、濡れた路面、強風、照明条件の変化など、あらゆる外的要因が影響を及ぼす。現在のロボットは、実験室など整備された環境下では高精度に動作するが、予測不能な変化がある状況下では誤作動や停止を招きやすい。

- (3) **人間との安全な協働（協調性）** 人とロボットが同じ空間で作業する際に、相手の意図や動作を即時に察知し、衝突を回避しながら柔軟に動作を調整することができない。現状のロボットは、人間の表情や姿勢から意図を読み取る精度が不十分であり、また急な動きや想定外の接触に対して柔軟な反応ができない。

上記の問題を解決するために、取り組むべき研究開発課題を示す。

1. **実世界で適応的に動けるフィジカルAIの開発（3.1.1）** 実世界の状況変化に応じて柔軟に動作できるAIモデルの構築を目指す。従来のように個別の作業に対して動作を細かく作り込む方式ではなく、現場のタスクや状況、ロボットの身体的な特性に応じて自律的に調整できる仕組みが必要である。リアルタイム性や消費電力を考慮し、個別の作り込みに依存しない、高度な知覚と制御を統合した適応的制御系を開発する。
2. **身体性を備えた知能の解明（3.1.2）** ロボットの柔軟な知的行動を実現するためには、身体を持つことで形成される知能の原理を理解する必要がある。身体構造と感覚フィードバックが知能の形成に与える影響を、構成論的な視点から研究する。また、異なる身体構造を持つロボット間の比較を通じて、身体性と知能の関係性に関する一般的な構造の理解を目指す。発達ロボティクスの知見を活用し、環境との相互作用から知能がどのように形成されるかを明らかにする。
3. **安全なフィジカルAIシステム（3.1.3）** 不確実な状況においても、安全かつ信頼性の高い動作を実現するため、リスク予測・回避・回復の技術を開発する。セーフティ・バイ・デザインの考え方に基づくシステム設計も併せて進める。不安全性ガイドラインや設計原則も含めて検討を進める。
4. **社会・経済的影響に関する人文・社会科学研究（3.2）** フィジカルAIの社会実装に向け、安心・プライバシー・責任分配といった倫理的・制度的課題を整理し、受容性向上に資する政策的・学術的連携を進める。また、AIと人間の目的整合性（アライメント）の確保や、安心して利用できる社会環境の構築に資する研究も併せて実施する。フィジカルAIの社会実装に向け、安心・プライバシー・責任分配といった倫理的・制度的課題を整理し、受容性向上に資する政策的・学術的連携を進める。

研究開発の推進にあたっては、以下の三つの方法を重点的に採用する。

- (1) **オーブンプラットフォームの整備と活用（4.1）** 汎用的かつ低コストなハードウェア・ソフトウェア環境の提供により、異分野研究者の参入を促すとともに、研究成果の再現性と相互比較を可能にする基盤を整備する。
- (2) **現場・現実を想定した競技会の推進（4.2）** 実環境に近いタスクを設定した競技会形式により、要素技術の統合や総合的能力の評価を可能にし、技術の社会実装への移行を加速する。
- (3) **共創の場の活用と推進（4.3）** 基礎研究、社会・経済的影響評価、プラットフォーム、競技会の4活動を相互補完的に連携させる共創の場を形成し、研究成果と社会ニーズの循環を促進する。

2 | 研究開発を実施する意義

本章では、フィジカルAIシステムのうち、AIロボットに関する研究開発の必要性和戦略的意義を明確化する。研究開発課題を具体化するにあたっては、まず社会的・技術的背景を把握し、国内外の動向を概観し、現時点で顕在化している構造的課題を抽出する。さらに、こうした技術の発展がもたらす社会・経済的影響および科学技術上の波及効果についても合わせて検討する。

2.1 現状認識および問題点

2.1.1 背景と問題提起

フィジカルAIシステムに求められる実世界適応能力とその社会的意義を明確にするために、本プロポーザルでは将来に向けた技術の進化方向を三つの視点から整理し、それに対応するAIロボットの将来像を三つのタイプとして定式化した（図2-1参照）。具体的には、実世界でのタスク遂行能力の高度化、環境変化への適応性、人間との共生の三方向を重視し、それぞれに対応するタイプP・A・Hを示す。これらのタイプは、AIロボットを分類する枠組みではなく、技術の発展を通じて実現されるべき価値の方向性を表している。実際のAIロボットは、これらのいずれか一つに限定されるのではなく、複数の価値を統合的に備えることが想定される。

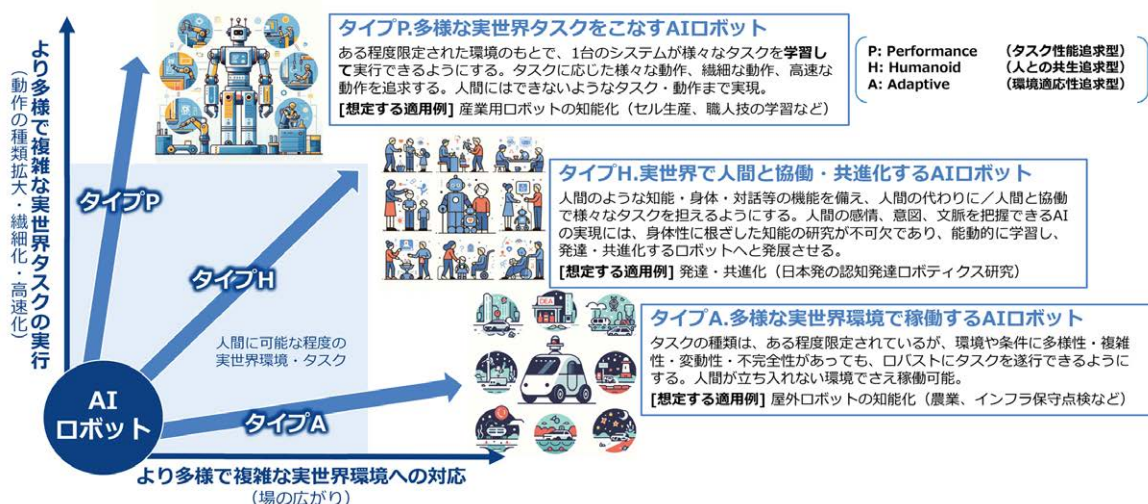


図2-1 AIロボットの技術発展と価値の方向性 (P・H・A)

タイプP (Performance)、H (Humanoid)、A (Adaptive) は、AIロボットを相互排他的に分類するものではなく、それぞれが備えるべき価値の方向性を示している。実際のAIロボットは、技術の進展によりこれら複数の特性を複合的に実装することが想定される。

【タイプP (Performance)】多様な実世界タスクを自律的に学習・遂行できる能力を備えたAIロボット。高精度作業や職人技の再現を可能とし、産業分野にとどまらず、サービス、医療、点検作業などへの展開により、人手不足や技能継承の課題解決に資する。

【タイプH（Humanoid）】人間の動作・意図を理解し、相互作用を通じて学習・適応するAIロボット。介護、生活支援、教育など、人との協働が本質的に求められる領域において、人間との自然な協働環境を形成する。

【タイプA（Adaptive）】過酷・変動環境に対応し、安定した動作を実現するAIロボット。農業、建設、災害対応、インフラ点検などの屋外作業を含む、人間の作業が困難な環境において、実用性と信頼性を兼ね備えたシステムの確立を目指す。

フィジカルAIシステムは、AIが物理的な身体機能を獲得することで、デスクワークから現場作業まで、さまざまな労働市場において自動化と効率化を進め、生産性向上と同時に社会経済活動全般に大きな波及効果をもたらす。

このような展望を踏まえ、本プロポーザルでは、フィジカルAIに求められる三つの価値方向（図2-1）に対応して、各タイプ（Performance・Humanoid・Adaptive）について、現時点における実用レベル、研究レベル、将来的な目標レベルを整理した（表2-1）。この整理により、現在の技術的制約や未解決の課題が可視化され、今後の研究開発における重点領域を検討する基盤となる。

表 2-1 各タイプの現状の実用レベル、研究レベル、目標レベルの比較

タイプ	現状の実用レベル	現状の研究レベル	最終的な目標レベル
P Performance	タスク毎の作り込み - 比較的に単純な作業のみ実行可能 - タスク毎に個別プログラミングが必要 実用例 - 自動車製造ラインの溶接ロボット - 半導体製造でのウェハ搬送ロボット	タスク毎の事前学習 - 個別タスクの模倣学習と強化学習 - 熟練者技能の学習 研究事例 - 日DENSO WAVE社のAI模倣学習 - 米Google社 RT-1/RT-2	多様な実世界タスクをこなすシステム 1台でさまざまなタスクを実行 - 繊細で複雑な操作、高速な操作を追求 事例：汎用型組立ロボット - 車種やモデルごとに異なる部品の組み立てを1台のロボットで対応
H Humanoid	単機能サービスロボット - 限定環境での安全性に配慮した作業 - 限定的話題や定型の対話 実用例 - 飲食店における配膳ロボット - 病院における搬送ロボット	対話的サービスロボット - タスクに応じた行動計画推論 - 自由対話による指示理解・説明 研究事例 - 米Figure AI社 Figure 01 - 米Google社 PaLM-SayCan	実世界で人間と協働・共進化するシステム - 人間同様の知能・身体・対話能力 - 能動的に学習し発達する 事例：サービスアシスタントロボット - 家事やサービス業などで人間の作業を能動的に支援
A Adaptive	専用機による作業 - 固定または平坦な環境での移動 - 人間による機器の遠隔操作 実用例 - 建設現場における重機ロボット - 農業における収穫ロボット	限定環境で働くフィールドロボット - 不整地対応ロコモーション - 移動とマニピュレーションの統合 研究事例 - 米Agility Robotics社 Digit - スイスETH Zurich大 ANYmal C	多様な実世界環境で稼働するシステム - 多様・複雑・無限定な環境への頑強性 - 環境変化や想定外への適応 事例：フィールドロボット - 農業やインフラ保守、災害現場など高負荷／危険な作業を人間に代わってこなす

さらに、表2-1をもとに各タイプに共通する技術課題を横断的に抽出した結果、実世界への適応という観点から、以下の三つの問題が明確となった。本プロポーザルでは、これらの問題に対応する研究開発課題について、第3章にて提案を行う。

- (1) 多様な実世界タスクへの対応（巧緻性）
- 変化する環境下で、未知の状況においても安定的にタスクを遂行することができない。ロボットには、形状や材質が異なる物体を扱う、多様な道具を使いこなす、タスクごとに異なる操作方法を柔軟に学習・切り替える能力が求められる。しかし、現行の制御アルゴリズムや学習モデルでは、対象物のわずかな違いや状況の変化に対して動作が破綻しやすい。例えば、「衣類をきれいにたたむ」「複数の部品を組み合わせる」といった作業は依然として困難である。
- (2) 多様な実行環境への対応（頑健性）
- 実行環境の多様性に対し、未知・未整備な状況でも安定した動作を確保できない。ロボットが屋外で移動したり作業を行ったりする場合、地形の凹凸、濡れた路面、強風、照明条件の変化など、あらゆる外的要因が影響を及ぼす。現在のロボットは、実験室など整備

された環境下では高精度に動作するが、予測不能な変化がある状況下では誤作動や停止を招きやすく、「段差を乗り越える」「物陰から対象を見つけ出す」などのタスクを安定的にこなすことが難しい。

- (3) **人間との安全な協働（協調性）** 人とロボットが同じ空間で作業する際に、相手の意図や動作を即時に察知し、衝突を回避しながら柔軟に動作を調整することができない。現状のロボットは、人間の表情や姿勢から意図を読み取る精度が不十分であり、また急な動きや想定外の接触に対して柔軟な反応ができない。例えば「重い荷物を一緒に持ち上げる」「介助動作で体を支える」といった作業において、安全性と信頼性を同時に確保することは未解決の課題である。

2.1.2 AI研究とロボティクス研究

21世紀に入りロボット技術はAI技術の進展による恩恵を大きく受けてきた。2010年代には、機械学習と深層学習のロボットへの適用が進み、画像認識や音声認識などの視覚・聴覚情報処理において高精度化が実現され、特定のタスクでは人の判断と同等、あるいはそれを上回る性能が確認されるようになった。

深層学習の導入が進むことになったきっかけは、2012年のILSVRCである。ILSVRCは大規模画像データセットImageNetを用いた画像認識コンペティションである。（中略）Hintonらは一般物体認識タスクで1位を獲得した。しかも、従来法がエラー率26%だったのに対してエラー率17%と、深層学習の適用によって一気に約10%もの飛躍的な精度向上を達成し、画像認識・機械学習の研究者らに衝撃を与えた。その後、深層学習はさらに改良と多層化が進み、2015年には人間レベルの精度（5.1%）を超えて、エラー率3.57%となった。2016年に2.99%、2017年に2.25%とさらに改善されつつも、精度はほぼ飽和状態に至った。なお、2015年以降は中国勢が1位を取っている。

（出典：人工知能研究の新潮流 2025 ～基盤モデル・生成AIのインパクトと課題～^[1]）

2020年代に入ると、基盤モデルと生成AIの適用が進み、大規模言語モデルと画像・動作情報を組み合わせることで、ロボットの行動計画や動作生成が可能になった。これにより、従来は、緻密なすり合わせが不可欠だったタスクの自動化の可能性が高まった。

PaLM-SayCanは、Googleとロボット開発会社Everyday Robots（EDR）の共同研究プロジェクトである。2022年8月に発表されたシステムでは、自然言語による曖昧な要求に対して、その要求に対して何ができるか、ロボットが行動を選択して実行することが示された。（中略）RT-1（Robotics Transformer 1）は、PaLM-SayCanと同様にGoogleとEDRの共同研究プロジェクトとして、2022年12月に発表された。ロボット実機を用いたトランスフォーマー大規模学習によって、深層学習ベースのロボット動作生成の汎用性を高めた。（中略）シミュレーションではなく実機で大規模学習を行ったトランスフォーマー型モデルによって、ロボット動作生成の汎用性が高められた先進事例として注目される。

（出典：人工知能研究の新潮流 2025 ～基盤モデル・生成AIのインパクトと課題～^[1]）

このように、実機を用いた大規模学習によって得られた汎用モデルは、従来の個別設計に比してスケーラブルかつ柔軟な動作生成を可能にしており、ロボット研究開発は新たな転換点に差しかかっている。特に、GoogleやOpenAIなどのソフトウェア企業が、マルチモーダルデータを学習したロボット基盤モデルを構築し、実世界での行動生成を開始したことが契機となった。

さらに、米国や中国では、ハードウェア企業や公的研究機関が、これらの基盤モデルを応用した二足・四足ロボットを開発し、工場の生産ラインや物流現場において基本動作の実証に取り組んでいる。これにより、産業界と学术界の研究者が、ソフトウェアとハードウェアの境界を越えて、環境適応性、リアルタイム性、安全性、コストといった実用上の課題に対して統合的に取り組む動きが広がりつつある。

今後は、こうした基盤モデルに環境モデルや予測的知能を統合することによって、実世界の課題解決に貢献する「人間の役に立つAI」ロボットの実現が期待されている。

2.1.3 AIロボットに関する国際動向

現在、AIロボットの開発は世界各国で加速しており、社会課題への対応、労働環境の改善、知能の身体化といった複数の技術的潮流が並行して進行している。国内外の主要なAIロボットを表2-2にまとめた。物理環境への適応性、対人インタラクション、特定作業への特化といった観点から、各国のロボット開発には共通点と地域的な差異が認められる。

表2-2ではヒューマノイド型ロボットを中心に上げているが、実際には多くの企業が四足歩行型ロボットの開発も並行して進めている。これらは主に、安定性や地形対応性を重視した設計であり、災害対応や警備、物流などの分野で実用化が進んでいる。中国のUnitree社、米国のBoston Dynamics社などが代表的な例である。

米国では、FigureやDigitに代表されるように、製造や物流などの産業用途に対応した二足歩行型AIロボットの開発が進んでいる。物体把持や歩行安定性といった身体能力に加え、人とのやり取りへの対応も重視されている。また、Boston Dynamics社のAtlasは、もともと身体制御性能に優れていたが、近年はAIベースの判断機能を統合し、障害物回避や作業計画の自律性を高めている。加えて、Google出身の研究者によるスタートアップ（Physical Intelligence社）が、ソフトウェア基盤の汎用化を志向し、ロボットの柔軟性と適応性の向上を目指している点も注目される。さらに、電気自動車（EV）メーカーのTesla社は、Optimusの開発を通じて、EVとロボットに共通する制御・電源・AI技術を活用し、工場内作業への実装を進めている。

欧州では、ノルウェーやスイス、英国を中心に、実環境や家庭内での活用を想定したロボットの開発が進められている。1X Technologies社のEVEやNEOは警備や家事支援といった日常的作業に対応し、ETHチューリッヒ大学のANYmalは不整地や階段など複雑な地形での自律行動を実現している。英国Engineered Arts社のAmecaは、人間らしい表情や自然な対話に特化したロボットであり、主に研究開発や展示用途で活用されている。

中国では、Unitree社やFourier社、UBTECH社など複数の企業が、人型ロボットの量産・展開を進めており、研究・教育・介護・製造などの分野に向けた多用途展開を志向している。中でもFourier社のGR-1はオープンソース設計により、国際的な開発者コミュニティの参加を可能としている。これらに加え、理想汽車社などのEVメーカーが、人型ロボットの分野への本格的な参入を開始している。米国テスラ社によるOptimusの開発動向がこうした展開を後押ししていると見られる。また、中国では四足歩行型や外骨格型など、物理的身体性を備えたAI技術の実装が進んでいる。

日本においては、社会課題の解決に向けたAIロボットの開発が顕著である。内閣府のムーンショット型研究開発事業のもとでは、災害対応・インフラ復旧・協調作業を対象とした複数台ロボットシステムの実装が進められている他、Preferred Robotics社のカチャカのように身の回りの作業の効率化に寄与するロボットも登場している。また、大阪大学の石黒浩教授らによるジェミニノイド型アンドロイドは、人間に酷似した外見と対話能力を備え、対人インタラクション研究の一環として開発されている。

総じて、AIロボットの開発は「人間との協働」「実環境での実行」「用途ごとの特化」といった方向性に沿って多様化が進んでおり、各国の技術基盤と社会的ニーズに応じた展開が見られる。こうした傾向は、フィジカ

ルAIの活用領域が実世界へと広がる中で、今後の研究開発戦略を構想する上での基盤的な参照点となる。

表 2-2 国内外の主要な最新 AI ロボット¹

国名	ロボット名	企業	特徴	活用分野
米国	Optimus	Tesla 社	EV 開発で培った AI、バッテリー、モーター、制御技術に応用した人型ロボット。工場内作業を想定し、持続的な自律動作を目指す。	製造、物流、将来的には家庭や介護などへの応用も想定
米国	Figure 01/02	Figure AI 社	人型の二足歩行ロボットで、5 本指を使って物をつかみ、運べる。人とのやり取りも可能。	製造、倉庫、小売、出荷など
米国	Atlas（新世代）	Boston Dynamics 社	高度な身体制御とセンサー統合を持つ二足歩行ロボット。2024 年モデルでは AI ベースの判断機能を搭載し、障害物回避や動作計画の自律性が高まっている。	製造、物流、建設、災害対応、実環境での作業支援など
米国	Digit	Agility Robotics 社	二足歩行の自律ロボットで、階段の昇り降りや物の運搬ができる。3 本指のグリップ（つかむ機能）を持つ。	物流、建設、農業、災害対応、介護
米国	π 0 パイゼロ	Physical Intelligence 社	2024 年に Google の研究者が独立して作ったスタートアップが、新しいロボット用のソフトウェア（基盤モデル）を開発。ロボットはこれまでよりも幅広い作業ができ、よりスムーズに動けるようになる。	（記述なし）
ノルウェー	EVE / NEO	1X Technologies 社	EVE は実環境向け、NEO は家庭向けに開発された人型ロボット。遠隔操作と自律行動を組み合わせ、警備や巡回、家事支援などへの応用を目指す。NEO は掃除や整理などの反復作業に対応する。	警備、インフラ監視、施設巡回警備、家庭内作業支援など
スイス	ANYmal	ETH チューリッヒ大	四足歩行ロボットで、不整地や階段の移動が可能。レーザーセンサーやカメラで環境を認識し、自律的に行動できる。強化学習を活用し、動作の最適化が可能。	災害救助、産業点検、学術研究、宇宙探査など
英国	Ameca	Engineered Arts 社	人間らしい表情や滑らかな動作を実現する対話型アンドロイド。実世界での作業遂行能力は限定的だが、人間との自然な対話や表情表現に特化し、対話インターフェース研究に活用されている。	研究開発、対話型 AI の検証、展示・イベント、メタバース・デジタル領域での人間とのインタラクション
中国	G1	Unitree 社	プログラムを書き換えて、いろんな用途に使えるロボット。価格は約 600 万円と、ヒューマノイドとしては比較的手に入れやすい。	研究機関や企業で用途に合わせたカスタマイズが可能
中国	GR-1	Fourier 社	たくさん生産できる量産型ヒューマノイドロボット。AI で会話ができ、オープンソースなので世界中の開発者が改良可能。	研究や教育、病院での介護・リハビリ支援、工場での作業など幅広い分野で活躍

¹ 表に掲載されている一部の対話型アンドロイド（例：Ameca、ジェミノイドなど）は、実世界での移動・作業機能は限定的であるが、人との自然な対話やインタラクションの研究において先進的な取り組みと位置づけられる。これらは、タイプ H（人との共生・共進化）に関わる重要な研究対象として含めている。

中国	Walker / 天行者	UBTECH Robotics 社	視覚・聴覚・触覚センサーを備えた人型ロボットで、移動、物体操作、対話が可能。研究用途向けモデルは比較的安価に提供されている。	製造、物流、教育、研究、接客、展示
日本	ジェミノイド/アンドロイド	大阪大学・ATR（石黒浩研究室）	人間に酷似した外見と動作を持つ対話型アンドロイド。主に人間理解やインタラクション研究に用いられ、自律性や作業能力は限定的。	研究開発、対話実験、芸術展示、公共空間での対話応用など
日本	カチャカ	Preferred Robotics 社	スマホや音声操作で荷物を運ぶ自律ロボット。専用収納と連携し、家庭やオフィスの効率化をサポート。	工場、倉庫、飲食店、病院、家庭など
日本	協働AIロボット	ムーンショットプロジェクトにて開発	ムーンショットプロジェクト目標3「多様な環境に適応しインフラ構築を革新する協働AIロボット」にて開発中の自律型の建設・災害復旧ロボット。人間と複数台の重機型ロボットが協力して作業を進めるシステムを構築。	河川氾濫や地震などの災害復旧、インフラ整備を効率化し、安全な社会を目指す。
日本	AIREC	Tokyo Robotics 社	ムーンショットプロジェクト目標3「一人に一台一生寄り添うスマートロボット」向けに開発されたコンパクトで軽量な人型ロボット。安定した歩行と多関節アームによる柔軟な動作が可能で、主に研究・開発用途に向けた設計。	研究開発、教育、実環境での基礎実験など

半導体およびAIチップの分野では、エッジデバイスやロボット本体上で動作可能な計算資源の小型化・高効率化が競争領域となっている。米国 NVIDIA 社（以下、NVIDIA）は、Jetson シリーズなどのエッジ推論向けチップと、それに対応する軽量なディープラーニングフレームワーク（TensorRT、Isaac ROS など）を展開しており、ロボティクス実装を意識した開発が進んでいる。また、ロボット学習や動作計画の基盤となるシミュレーション環境についても、物理モデルの高精度化と演算速度の高速化が進展している。米カーネギーメロン大学（CMU）では、Genesis などの高速物理シミュレーターの研究開発が進められており、これまで困難とされた高次元の物理環境を短時間で模擬可能とする技術が検証されている。こうした基盤技術の進展は、フィジカルAIを搭載したロボットの開発・検証を加速させるとともに、実装環境とのリアルタイムな相互作用に耐える設計の実現可能性を広げつつある。

2.1.4 日本の主な研究開発プログラム

わが国におけるロボット研究に対する支援は、2015年に内閣府日本経済再生本部が策定したロボット新戦略のもと、ロボットの要素技術について中核的な技術の開発、各応用分野の現場ニーズに基づく研究開発等が推進されてきた。実用化段階に対しては重点的に行われている一方で、基礎研究に対する支援は手薄である。ロボット関連の主要な研究開発プログラムを技術成熟度レベル(TRL)²でまとめた図2-2を見ると、基礎・基盤的な技術に対応するTRL1からTRL5までに該当するプログラムが少ないことが分かる。

現在、多くの要素技術は依然としてTRL（技術成熟度レベル）3～5にとどまっており、実環境での安定した運用や社会実装に向けては、TRL6～7への移行を視野に入れた取り組みが求められている。その実現には、

2 技術成熟度レベル（TRL: Technology Readiness Level）は、新しい技術がどの程度実用化に近づいているかを評価する指標。特に研究開発プロジェクトの進捗管理や投資判断の基準として広く活用されている。

実環境を模した競技会型の研究開発や、基盤モデルやデータ収集のためのオープンプラットフォームの整備など、技術成熟を加速させる仕組みの構築が重要となる。

また、科学技術振興機構（JST）や新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）による比較的大規模な支援プログラムが2024年に一定の区切りを迎えた現在、AIとロボティクスの融合によって生まれる新たな研究領域に対し、戦略的かつ統合的な支援体制を整備する必要がある。特に重要なのは、フィジカルAIの発展に向け、応用研究のみならず、身体性を備えた知能に関する基礎研究を含めた新たな融合的取り組みを進めることである。本プロポーザルの第3章および第4章では、こうした課題に対する具体的な研究開発課題と推進方法について詳述する。



図2-2 日本で実施されている主な研究開発プログラム（年度別）（2024年度現在）

ロボット関連の主要な研究開発プログラムを技術成熟度レベル（TRL）で整理した。プログラムの到達レベルに関してはCRDSが独自に整理・評価したものであり全てのサブテーマを網羅するものではない。

2.1.5 ロボティクス研究におけるプラットフォームの現状

フィジカルAIの研究開発を加速させるには、実環境に対応したロボットの設計・実装・検証を容易に行える共通の研究基盤の整備が不可欠である。異分野の研究者が参加しやすく、研究成果の再現性と比較可能性を確保できるオープンプラットフォームの構築は、分野融合型の研究推進において特に重要となる。

現在、ソフトウェアプラットフォームとしてはROS 2を中心とした基盤が産業・研究分野で広く活用されており、リアルタイム性や分散性への対応も進んでいる。また、GoogleのRT-Xや東京大学のHSRT-Xなど、ロボット基盤モデルに関する大規模なデータ収集プロジェクトも開始されている。加えて、トヨタ自動車（トヨタ）のHSRやDigitなどの実ロボットが、国内外で研究用途に供されている例も見られる。近年では、NVIDIAのProject GR00TやAIロボット協会（AIROA）のように、基盤モデルのオープン化を推進する動きも顕在化している。

一方で、こうした取り組みの進展にもかかわらず、以下のような構造的課題が依然として存在している。第一に、ハードウェアのオープン化が不十分であり、商用機体の多くが仕様や設計情報を公開していないことから、自由な改造や再設計が困難となっている。第二に、企業製プラットフォームやシミュレーション環境においても、外部研究者がアクセス可能な情報や機能に制限があり、研究の再現性や比較可能性を損なっている。

第三に、異分野の研究者にとって、ロボット制御環境や開発インターフェースは専門的ハードルが高く、参入に対する心理的・技術的障壁が依然として大きい。

さらに、特定のロボットや環境が標準化される一方で、それに依存した研究が集中し、研究内容の画一化や新規性の低下を招く懸念もある。プラットフォームの整備は、単にツールを共有することにとどまらず、研究の多様性・再現性・展開性を支える基盤整備の一環として戦略的に位置づける必要がある。

2.1.6 ロボット関連の競技会の現状

基礎研究から応用研究への橋渡しを強化する上で、ロボティクス分野における競技会は重要な役割を果たしてきた。競技会は、特定のタスクを設定し、ハードウェアを実際に動かす形式を通じて、個別の要素技術の統合、ロボット全体の実行能力、現場での運用適性などを評価する機会を提供している。

これまでに、RoboCup、World Robot Summit (WRS)、DARPA Challenge、Amazon Robotics Challengeなど、多様な競技会が開催されてきた。これらの競技会は、災害対応、家庭支援、物流、製造、インフラ保守といった実社会に関係する分野を題材とし、研究者に対して現実的なタスクを課すことにより、技術の現場適応力を引き出す役割を担ってきた。

- **ロボカップ (RoboCup)** (主催: RoboCup Federation)
 - ➡ サッカーリーグ (自律型ロボットによる試合)
 - ➡ ロボカップ@Home (家庭環境でのサービスロボットタスク)
 - ➡ レスキューロボットリーグ (災害救助を想定した競技)
 - ➡ インダストリアルリーグ (産業用途のロボット開発競技)
- **World Robot Summit (WRS)** (主催: 経済産業省・NEDO など)
 - ➡ フューチャーコンビニエンスストアチャレンジ (コンビニでの自律ロボット活用)
 - ➡ モノづくりロボットチャレンジ (製造業向けのロボット技術開発)
 - ➡ 過酷環境F-REI チャレンジ (災害やインフラ点検を想定した競技)
- **DARPAのロボットチャレンジ** (主催: 米国防高等研究計画局 (DARPA))
 - ➡ DARPA Urban Challenge (自律走行車による市街地ナビゲーション)
 - ➡ DARPA Robotics Challenge (災害対応ロボットの試験)
 - ➡ DARPA Subterranean Challenge (地下環境での自律ロボット探索)

しかしながら、競技会の活用にはいくつかの課題が顕在化している。第一に、課題設定が実環境の社会課題と完全には一致しておらず、競技会の成果がそのまま実用化に直結しにくいという点がある。第二に、競技会の多くが短時間のデモンストレーションにとどまり、長期運用時の信頼性、耐久性、即応性といった観点の検証が不十分である。第三に、競技環境自体が制御された実験室的空間に偏っており、実際の屋外環境や複雑な状況での実装に対する知見が得られにくい。

加えて、競技会と産業界・自治体などの社会実装の担い手との連携が限定的であるため、競技結果の技術移転や商業化につながりにくく、社会実装への導線として弱いという課題もある。また、参加にかかる機材や人的資源の負担が大きく、初学者や中小研究機関の参加機会が限定される構造も、競技会の発展性を制約している。

競技会は、技術デモンストレーションにとどまらず、実装現場と研究者、企業、自治体をつなぐオープンな実証インフラとして機能しうる存在である。したがって、競技課題の設計、評価軸、共有制度の在り方を抜本的に見直す時期に来ていると考えられる。

2.1.7 AIやロボットの社会的受容性に関する取り組み

わが国におけるロボットの社会的受容性に関する取り組みは、これまで主に対人サービスロボット、福祉介護ロボット、道路交通支援ロボット等、具体的な社会実装のフィールドを対象とした安全対策や標準化の枠組みで進められてきた（表S2-3参照）。特に、NEDOによる「革新的ロボット研究開発基盤構築事業」では、産業用ロボットの国際競争力強化を目的とした要素技術の標準化が重点的に推進されている。

一方、欧米では2000年代以降、AIやロボットが社会や人類の未来に与える影響について、学術機関を中心とする学際的な枠組みで継続的な研究が行われてきた（表S2-4参照）。法学、哲学、心理学、社会学、経済学等の人文・社会科学分野と、工学、数理、情報学等の理工系分野の連携により、研究センターの設立と運営が進展している。そこでは、以下のような主題が焦点として扱われている。

- 新興技術による恩恵とリスクのバランス
- 格差拡大など労働市場と雇用構造に与える影響
- 人権、自由・民主主義・平等、公平性といった普遍的価値への影響
- 透明性、説明責任（アカウンタビリティ）など、技術や研究開発のブラックボックス化の回避
- 自律性を持つ人工知能やロボットに対する懸念

これに対し、わが国には以下のような解決すべき問題が残されている。

（1）制度的支援の不足

AIやロボットの基礎研究段階における社会・経済的影響に関する研究については、科学研究費補助金（科研費）等による個別的な支援にとどまっており、戦略的な研究開発ファンディングプログラムへの組み込みが不十分である。

（2）研究成果と技術開発の乖離

社会・経済的影響に関する研究成果が、AIやロボットの技術開発に体系的に反映される仕組みが整備されておらず、倫理的・法的・社会的課題（Ethical, Legal and Social Issues: ELSI）への対応が研究開発の現場と連携していない。

（3）学際的かつ持続的な研究体制の未整備

欧米に見られるような、研究センター等を中核とした社会的影響に関する持続的かつ分野横断的な研究体制が、日本国内では依然として脆弱である。

（4）研究と制度・倫理設計の接続不足

基礎研究段階からの制度的・倫理的視点の統合、すなわち「バイデザイン³」の実践が十分に定着しておらず、社会実装フェーズでの制度対応が事後的・追従的となりがちである。

以上の点を踏まえると、フィジカルAIシステムの社会・経済的影響に関する研究において、わが国は学術的知見と技術開発の連携を強化し、基礎研究段階からの「バイデザイン」的取り組みを支援する制度的な整備が必要である。

3 バイデザイン（by Design）とは、特定の機能、品質、原則などを、後工程で追加・修正するのではなく、初期の設計段階から意図的に組み込む考え方やアプローチ。例えば、セキュリティ、プライバシー保護、安全性、アクセシビリティなどを設計段階から織り込むことを指す。

2.2 社会・経済的效果

フィジカルAIシステムの研究開発を推進することで、実環境に適応するロボット技術が革新される。ロボットが活用される場が広がり、産業用ロボットにとどまらず、多様な環境で活躍する汎用ロボットの実現が期待される。これにより、高齢化社会における労働力不足の解消や生産性の向上に寄与し、日本の社会課題の解決につながる。また、日本独自の技術を活かしたロボットソリューションの開発が進み、国際競争力の向上に貢献することが見込まれる。

以下、本節では、社会・経済的效果を、AIロボットの活用によるもの、それを含むフィジカルAIシステムの活用によるものに分けて論じる。ここで「AIロボット」は、センサーやアクチュエーターを備え、物理環境で自律的に知覚・判断・動作を行うロボットを指す。一方「フィジカルAIシステム」は、AIロボットを中核としつつ、これを支えるセンサーネットワーク、通信インフラ、データ処理基盤、環境設計等を統合した、実世界適応型の知能システム全体を指す。

(1) AIロボットの活用による効果

フィジカルAIシステムの技術発展の方向性として挙げた三つのタイプのうち、社会・経済的效果が最も効果的と思われるのは、人がいる環境で動作するサービスロボット（協働ロボット）である。2023年における協働ロボットの世界市場は約2215億円で、2022年比で約1.17倍伸びを示しており、2028年には約7754億円と、約4倍に拡大することが見込まれている^[2]。

実環境に柔軟に対応できるフィジカルAIシステムのコア技術の研究開発に取り組むことで、協働ロボットのイノベーション成果が生まれ、さまざまな応用分野で期待されるロボットの社会実装をいち早く実現できる。そのことにより、市場予測を上回る市場拡大を実現し、わが国の産業競争力の向上に寄与する。

日本の少子高齢化の進展に伴い見込まれる労働人口の減少を踏まえると、各産業分野の労働生産性を高めることは、わが国の喫緊の課題である。実環境に柔軟に対応できるロボットを製造現場に大幅に導入することで、従来の産業用ロボットでは代替できなかった、労働集約的で生産性が低い作業、過重な労働等から人間を解放できる。これによって人手不足を補い、人材を高付加価値分野で活かしていくことが可能となる。

また、超高齢社会に移行しつつあるわが国では、自立高齢者の家庭内での生活支援、外出・社会参加の促進、要介護高齢者の介護のための労働力確保も大きな課題である。厚生労働省の試算によれば、2019年度比で、2025年度には32万人、2040年度には69万人の介護人材が不足するとのことである^[3]。経済産業省と厚生労働省では、「ロボット技術の介護利用における重点分野」を定め（2012年策定、2014年・2017年・2024年改訂）^[4]、2013年度から開発支援を行っている。ここに挙げられている「介護ロボット」は、現在の技術で実現が可能な物理的な接触を必要としないコミュニケーションロボットや、介護者の動作を補助するパワードスーツなどである。実環境に柔軟に対応できるロボットが実現できれば、高齢者の家事を代行するロボットや、人と直接接触する介護作業もできるロボットの実現につながる。

教育分野においても、AIロボットは大きな変革をもたらす。AIロボットは、センサーや音声認識、自然言語処理を通じて生徒の表情や発話、操作の様子をリアルタイムに解析し、学習状況や理解度を即時に推定することができる。このような即応的フィードバック能力に加え、蓄積されたデータをもとに個々の学習履歴や興味に応じた指導方略を柔軟に調整できる点が、従来のデジタル教材や教育支援ツールにはない特長である。学習支援ロボット（AIロボット）を少人数グループごとに配置することで、生徒ごとにカスタマイズされた教育を継続的に提供することが可能となり、学習効果の最大化が期待される。

さらに、わが国で多発している地震・火山噴火、風水害、土砂災害に対し、ロボットを活用したいという要望には現状では十分に応えられていない。災害現場という究極的な開かれた環境で作業を達成できるロボットを実現することで、二次災害被害の軽減、早期の復旧・復興に資する。また、放射線環境下での作業

を伴う原子力施設の廃炉作業など、人が立ち入ることが困難な現場においても、AIロボットの活用が期待される。

これらの応用は、AIロボット単体の機能に加え、ネットワーク連携や遠隔監視等を含むフィジカルAIシステム全体の設計と運用の高度化とも深く関わっており、今後の技術融合の方向性を示すものである。

(2) フィジカルAIシステムの導入による効果

フィジカルAIシステムは、スマート交通インフラや自律移動体との協調により、交通システム全体の最適化に寄与する。とりわけ、物理空間での動的状況をリアルタイムに認識・判断し、環境に応じた柔軟な対応を実現する能力は、移動体の安全制御や信号調整支援といった分野で重要な役割を果たす。こうしたフィジカルAIの導入は、自動運転車を含む次世代交通システムの高度化に向けた基盤技術となりうる。実際、フォーチュンビジネスインサイトによれば、自動運転車市場は2030年までに13兆6,324億米ドルに達すると予測^[5]されており、こうした成長領域におけるフィジカルAIの役割は今後ますます拡大すると見込まれる。

環境のモニタリングや保護活動にも貢献する。例えば、フィジカルAIシステムが自然保護区や海洋に配備されることで、リアルタイムのデータ収集と分析により、環境状態の把握が容易になり、状況に応じて適切なタイミングで人の介入の必要性を通知することで、速やかに対応策を講じることができる。

一方、フィジカルAIシステムの社会実装に伴い、法的課題や倫理的問題も浮上する。例えば、自動運転車が事故を起こした場合の責任の所在や、フィジカルAIシステムが人間の指示に従わず重大な被害をもたらした場合の対応など、法的な枠組みが必要である。プライバシーの保護やデータの取り扱いに関する規制も重要である。倫理的問題としては、フィジカルAIシステムが人間の代わりに意思決定を行う際の透明性や公平性、バイアスの排除などが挙げられる。

フィジカルAIシステムの社会実装には、受容性の向上と制度整備の両面からの取り組みが不可欠である。人々にとって安全かつ安心な利用を可能にするには、適切なルール設計と、それを支える社会的基盤に関する研究の進展が鍵となる。これらの課題について3.2節にて具体的に論じる。

2.3 科学技術上の効果

フィジカルAIシステムの研究開発は、AIとロボティクスの融合によって新たな学術領域を切り拓き、分野横断的な知の創出を促進する。特に、実世界対応を重視する基盤モデルの研究を通じて、学術・技術の両面にわたる波及効果に加え、研究コミュニティの活性化も期待される。

AI研究では、物理環境に基づく学習と推論、少数データからの継続学習、自律的な知識獲得、エッジAIによるリアルタイムな適応が進展している。これにより、単なるサイバー空間での推論にとどまらず、実世界での状況変化に即応する知能の実現が可能になる。

ロボット研究においても、人間の曖昧な指示や状況に応じた適切な行動の選択、明示的な指示がなくても判断して動作できる能力、複数ロボットによる協調動作などが進みつつある。こうした動作能力の獲得は、知能が身体性に根ざして形成されるという観点から、従来の機能分離的なアプローチでは得られない革新性をもたらす。

これらの進展は、AIとロボティクスの融合による新たな科学的挑戦を促す。例えば、人間の感情や意図、文脈を理解し共生できるAIシステムの構築、物理環境とのリアルタイムな相互作用に基づく高信頼・高適応型AIの実現が求められている。また、AI、認知科学、哲学、神経科学などを横断する次世代融合研究の推進も、今後の重点領域とされる。

フィジカルAIは、身体を通じて環境と相互作用することで、汎用性・柔軟性・リアルタイム性の高い知能

システムの実現を可能にし、人工物における新たな知能創出の枠組みを提示する。この意味で、身体と知能の不可分性を軸とした構成論的アプローチが、学術研究のフロンティアを広げる鍵となる。

AIとロボティクスの融合への期待の高まりを裏付けるように、関連する学術論文は近年急増している（付録2.2 AIロボットの研究力参照）。例えば、「ロボット×人工知能」に該当する論文数は2014年から2024年にかけて約4倍に増加しており、特に「生成モデル」を含む研究は2022年以降急増している。これは、基盤モデルを活用した実環境対応型AIロボットの研究が国際的に活性化していることを示すものであり、フィジカルAIの研究が新たな潮流の一角を形成していることを裏付ける。

さらに、プラットフォーム整備や競技会形式の導入により、ロボット研究への参入障壁が緩和され、標準的な物差しに基づいた評価の普及が進む。特に、若手研究者を中心に企業も巻き込んだ新たなコミュニティ形成が始まっており、多分野の人材を結集する次世代育成の基盤が整いつつある。

フィジカルAIの進展は、基盤技術の深化とともに、身体性と知能の関係に着目した知識創出、異分野融合、人材育成が相互に循環する持続的な科学技術イノベーションの礎となる。

2

研究開発を実施する意義

コラム

ロボットはなぜ簡単なことが難しいのか？ —モラベックのパラドックス再考—

モラベックのパラドックスとは、「ロボットにとって、人間が難しいと感じる知的な課題（チェスや数学）は容易だが、簡単だと思える身体的作業（物をつかむ、歩くなど）は難しい」という現象を指す。この現象は、ロボット研究や人工知能（AI）開発の本質的な課題を明らかにするとともに、人間の認知や知性の本質に関わる問いを投げかけた。1988年、米国のロボティクス研究者のハンス・モラベックは、著書『Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence』^[6]で、人間の脳が進化の過程で無意識に獲得した感覚運動的な能力（歩行や把握など）は複雑で高度であり、後から意識的に獲得した抽象的な知能（推論や論理）の実現は機械にとっては容易であると主張した。

モラベックのパラドックスには、発表当初から今日に至るまで、さまざまな議論がある。ロドニー・ブルックス^[7]は、ロボットが知性を獲得するには「物理的な身体を通じた環境との相互作用が不可欠」であると、従来の論理的知性の定義そのものを批判した（身体性の議論）。例えば、彼の提唱した包摂アーキテクチャーは、環境との直接的な相互作用に基づくロボット制御を目指した。ヒューバート・ドレイファス（1992年著書「What Computers Still Can't Do」^[8]）は、直観や感覚運動能力の複雑さが機械的に再現できるというモラベックの前提そのものに懐疑的であり、機械的複製は困難だとした（哲学的批判）。ルーシー・サッチマン^[9]は、人間の知能を個別の能力の集合ではなく、社会的文脈や相互作用の中でとらえる必要性を強調した（社会的相互作用論的批判）。

一方で、認知心理学者のスティーブン・ピンカー^[10]は、パラドックスの考え方そのものに賛同し、「人間が簡単だと感じるからこそ、AIにとって実現困難な課題

である」と、その妥当性を認めている。また、ヤン・ルカン^[11]らも同様にモラベックの問題設定は妥当としつつ、深層学習技術の登場により、この問題が徐々に解決可能になりつつあると書いている。

これらの批判・支持の論争から、モラベックのパラドックスが今日のロボットやAI研究の根本課題を内包していることが分かる。近年、ロボティクスやAIの分野では、「ロボット基盤モデル」や「生成AI」、また「身体性」の考え方に基づく新しいアプローチが注目されている。これらは従来の記号論的なAIモデルではなく、実世界での物理的相互作用を前提とし、環境や身体との密接な相互作用の中で知能を形成するモデルである。これらの研究はまさにモラベックの指摘した問題の克服に向けた具体的な取り組みであり、画像認識や運動制御の分野で実用化が進んでいる。

モラベックのパラドックスは、AIロボットが直面する課題の本質を明確に示し、30年以上にわたり多くの研究者に影響を与え続けてきた。今後も身体性や社会的文脈を考慮したAIロボティクス研究が発展することで、「簡単なことほど難しい」というパラドックスを克服する道筋が見えてくるだろう。こうした議論は、今後のロボット政策やAI研究の方向性を決定づける重要な指針となる。

3 | 具体的な研究開発課題

3.1 フィジカルAIシステムに関する研究開発課題

21世紀に入り、ロボット技術はAIの進展とともに大きく変容してきた。2010年代には、機械学習や深層学習の導入によって視覚・聴覚情報の処理精度が飛躍的に向上し、画像認識や音声認識などの領域で、人間と同等またはそれを上回る性能が一部で達成された。2020年代に入ると、基盤モデルや生成AIの発展により、大規模言語モデルと画像・動作情報の統合を通じた行動計画や動作生成が可能となり、従来は詳細な設計を要したロボットタスクの自律化が現実味を帯びつつある。現在では、ロボット領域に特化した基盤モデルの研究も進展しており、環境モデルやシミュレーション基盤を活用することで、知能・身体性・対話能力を統合的に備えたAIロボットの実現が視野に入りつつある。

本プロポーザルでは、AIとロボティクスの融合によって実現されるフィジカルAIを、サイバー空間中心のAIとは異なる、実世界の課題解決を可能とする中核技術と位置づけている。将来像を展望するため、本プロポーザルでは、タスク遂行の高度化、環境への適応性、および、人との共生という三つの進化方向を設定した(2.1節参照)。

これらの方向性に対して、実用レベル、研究レベル、目標レベルの観点から横断的な分析を行い、現時点で顕在化している問題を以下の3点に整理した。第一に、多様な実世界タスクへの対応に不可欠な「巧緻性の確保」、第二に、動作環境の変化や非定型状況への対応力としての「頑健性の向上」、第三に、人間との安全な協働を実現するための「安心・安全設計の確立」である。本章では、これらの問題に対応するために取り組むべき研究開発課題の全体像を表3-1に示す。表3-1では、フィジカルAIシステムにおいて取り組むべき重要な研究開発課題を左欄に、また、それらを通じて5年から10年後に実現すべき目標像を右欄に分けた。本節では、左欄に示した各研究課題の背景、技術的要請、実装の方向性について検討した。

表 3-1 フィジカルAIシステムにおける解決すべき研究開発課題

取り組むべき重要な研究開発課題	5年後、10年後の達成目標の例
3.1.1 実世界で適応的に動けるフィジカルAIの開発 ● ロボット基盤モデル ● 大規模マルチモーダルデータ学習 ● 模倣学習によるマニピュレーションの高度化	実行能力の獲得（運動・知覚・シミュレーション） ● 実世界における高速・軽量のロボット基盤モデルの構築 ● 多様な環境や身体に対応可能なロボット基盤モデルの整備（データ収集基盤、人間行動データ等を含む） ● Sim2Real/Real2Simを活用した実行性能評価と行動生成の汎化手法の確立
3.1.2 身体性に基づく知能の解明に向けた研究 ● 二重過程理論による知能モデル ● 予測符号化理論（能動的推論） ● 世界モデルに基づく身体性と制御理論 ● ロボット基盤モデルに適した効率的な推論システム	身体性知能の理解と構築（理論的枠組み） ● 多様な身体構造に対応可能な汎用的基盤モデルと制御アーキテクチャの設計 ● 知覚・計画・制御の連携を実現する知能アーキテクチャの構築（システム1/2、予測符号化、世界モデル等の統合） ● エッジ実装を見据えた軽量高速な推論構造と省電力制御基盤の整備（リザバコンピューティング含む）
3.1.3 人に安全なフィジカルAIシステム ● 安全な強化学習（Safe RL） ● オープンワールドにおけるAIの研究	社会的受容と安全性（人間との共生） ● 危険・未知への対応力を備えたSafe RLのフレームワーク確立 ● OOD検出、信頼度推定、説明可能性を統合したオープンワールドAIアーキテクチャの開発 ● 実環境における安全性・受容性の動的評価とアップデート可能な安全設計指針の提案

三つの研究開発課題は、フィジカルAIを構成する知能・身体・環境インタラクションと、それらの社会実装に必要な要素を相補的にカバーするものである。3.1.1では、ロボットが実環境で多様なタスクを遂行するための「実行能力の獲得」に関する課題を扱い、知覚・判断・運動の統合による行動生成の高度化を目指す。3.1.2では、身体性が知能の形成に与える影響を構成論的に探究し、「身体的知能の理解と構築」に資する理論的・基礎的知見の創出を図る。3.1.3では、「社会的受容と安全性の確保」に向けて、実世界での協働・共生を前提としたリスク設計、運用思想、制度的対応の在り方を対象とする。これら三つの課題は、並行して研究開発を進める必要があり、それぞれの成果が他の課題の進展を支える技術的・制度的基盤となる。

3.1.1 実世界で適応的に動けるフィジカルAIの開発

本項では、ロボットが実世界で多様なタスクを柔軟かつ確実に遂行するために必要な「実行能力の獲得」に向けた研究開発課題について論じる。AIとロボティクスの融合によって知覚・判断・運動を統合することにより、環境の変化に対応可能な実行能力を実現することが目標である。従来のロボットが可能な動作は、事前に定義されたルールや限定的なセンサー情報に基づく動作範囲にとどまっていたが、今後は未経験の状況下でも行動を適応的に選択できる能力が求められる。本節ではこの課題に対し、(a) 汎用的な行動生成を支えるロボット基盤モデル、(b) 実世界の多様な経験を支えるマルチモーダル学習環境、(c) 統合的な制御と推論を可能とするアーキテクチャーの三つの観点から技術的要件と研究動向を整理する。これらは相互に密接に関連しており、特に(b)は(a)(c)の両者にとって学習資源として不可欠な基盤である。これらの要素技術は、フィジカルAIが実世界において柔軟かつ汎用的に学習・適応するための機械学習に適したプラットフォームを構成する中核であり、その整備は今後の知能インフラ構築に直結する課題である。

(a) ロボット基盤モデル

ロボット基盤モデルとは、実世界においてロボットが環境に適応しながら動作するための汎用的AIモデルであり、視覚・言語・行動の統合処理を通じて、特定のタスクに限定されない柔軟な対応能力を実現することを目的とする。フィジカルAIへの実装においては、物理環境の制約を踏まえたモデル設計が求められ、物理モデルを内部に組み込んだ基盤モデルや複数モデルの統合的設計が鍵となる。

とりわけ注目されるのが、視覚・言語・行動の各モダリティを統合したVLA (Vision-Language-Action) モデルである。Google DeepMindが開発したRT-2は、Web上の知識と実機ロボットによる操作知識を統合し、自然言語による指示に従って行動を生成する能力を実証している^[12]。また、同様の方向性で構築されたRT-Xでは、複数のロボットプラットフォームに対応する共通のモデル設計と、学習済みモデルの再利用性の検証が進められている^[13]。加えて、ロボットの構造や可動域など身体的制約を考慮し、環境との物理的相互作用を反映した身体化VLAモデルの研究も進んでおり、実装面での現実適合性を高めるアプローチとして注目される。近年の例として、3D視覚・言語・行動を統合した世界モデルである3D-VLAが提案されており、3次元環境におけるフィジカルな行動計画のための基盤構築として位置づけられる^[14]。

さらに、国内でも同様の取り組みが進展している。第42回日本ロボット学会学術講演会(RSJ2024)のチュートリアルでは、実ロボット応用を念頭に置いた基盤モデルの現状と課題が整理されており、身体構造や環境特性に応じたモデル設計の重要性が強調されている^[15]。こうした議論は、ロボットが実環境で汎用的に動作するための知能インフラとしての基盤モデルの方向性を示している。加えて、既存のAIモデル群を進化的に統合する手法として、モデルマージ技術^[16]の開発も進展しており、複雑なタスクを直感的かつ柔軟に遂行するアーキテクチャーの実現が模索されている。

現状の達成レベルと今後に向けた挑戦課題：現時点では、視覚・言語・動作を統合した基盤モデルが限定環境下で動作する事例が現れており、動作の汎用性や多様な指示解釈の初期的な実現は達成されつつある。

一方で、異なる身体構成や環境条件におけるモデルの移植性・適応性は依然として限定的である。今後は、世界モデルや環境予測を組み込んだスケーラブルな知能アーキテクチャーを構築し、身体やセンサー構成の違いを越えて汎用的に動作できる基盤モデルの確立が求められる。

(b) 大規模マルチモーダルデータ学習

実世界でのタスク遂行能力を高めるためには、視覚、言語、音声、行動など、異なる情報モダリティを統合的に学習できるマルチモーダルデータ基盤の整備が不可欠である。ロボットが多様な環境や状況に柔軟に対応するためには、大規模かつ多様な学習データの整備と、それを活用したモデル構築の両面での取り組みが必要である。

GoogleのRTシリーズは、こうしたマルチモーダル学習の先駆的事例である。RT-1（2022年）は、13体の実機ロボットによって13万エピソードに及ぶデータを収集し、700以上のタスクに対応可能なモデルを構築した。RT-2（2023年）では、Web上のテキスト・画像データと実機データを統合することで、未知タスクへの汎用的応用を実現した。また、RT-Xでは33機関による最大規模のデータセット構築が進められており、複数ロボットプラットフォームへの対応や学習済みモデルの再利用性と転移性の向上が期待されている。国内ではトヨタの生活支援ロボットHSRを活用したHSRT-Xプロジェクトが2024年に始動し、生活支援ロボットの実環境データに基づく日本発の基盤モデル構築が試みられている。

このようなマルチモーダルデータの収集・活用に加え、近年では、人間の動作観察に基づく模倣学習が注目されている。人間が自然に行う日常行動や作業の様子を、ビデオ映像やセンサーデータとして記録・分析し、ロボットがこれを模倣・学習する手法は、学習の多様性と現実性を高める上で有効である。特に、Mobile ALOHAのようなアームマニピュレーションに特化した人間動作デモの蓄積は、実機学習とシミュレーションの中間的手法として有望である。

また、シミュレーション環境と実環境を相互に接続するSim2Real/Real2Sim技術の活用も進んでおり、現実環境でのデータ収集が制限される条件下での有効な学習支援手段として位置づけられている。近年では、Sim2Realギャップを埋めるために、ドメインランダム化や高精度レンダリングを用いた高忠実度シミュレーションと、少量の実データによる補正を組み合わせた学習戦略が有効であることが示されている。例えば、視覚や力覚の高精度シミュレーターを用いて収集された模倣データに基づき、最小限の実機デモで動作ポリシーを実行可能にする手法や、言語情報を用いてシミュレーションと現実の視覚的ギャップを橋渡すマルチモーダル表現学習が提案されている。これらの手法は、物理的環境での試行コストを大幅に削減し、実用的なSim2Realの実現に寄与することが期待できる。

なお、米国や中国においては、大規模なロボット実験群と学習データの蓄積基盤を前提とした研究開発が進展しているが、日本では現場環境や資源面の制約から、同様のスケールを実現することは容易ではない。このため、少量の実環境データから高い汎化性能を引き出すための手法開発が、戦略的に重要な研究課題となる。シミュレーションによるデータ補完、事前学習済みモデルの活用、転移学習やメタ学習などの技術は、データ制約下でも有効な学習インフラを構築する上で重要な選択肢となる。

現状の達成レベルと今後に向けた挑戦課題：模倣学習や自己教師あり学習を中心とした学習環境は整備されつつあり、一部の研究では複数のモダリティを扱う試みも始まっている。しかし、それらの統合と汎化の枠組みは十分に確立されておらず、特に情報の非対称性や時系列の整合性を扱う技術は未成熟である。今後は、モダリティを横断した共通表現と学習基盤の確立に加え、複数機関でのデータ共有と再利用を可能にする標準化された枠組みの整備が不可欠である。

(c) 模倣学習によるマニピュレーションの高度化

産業用ロボットの分野では、コンプライアンス制御や力覚フィードバック技術を用いた高度なマニピュレー

ションがすでに実現されており、特定の反復タスクに対して高い精度と効率を達成している。しかしながら、これらのシステムは、個別の動作環境や対象物に最適化された設計・プログラミング・パラメータ調整に大きく依存しており、動的環境や非定型なタスクへの適応には限界がある。このような課題に対し、同等の能力を機械学習によって汎用的かつ自律的に実現することは、技術的困難を伴う領域である。

高度なマニピュレーション能力を機械学習により実現するためには、人間の熟練動作を模倣させる枠組みと、強化学習による性能向上の組み合わせが有効である。少数の例から操作スキルを学習可能とする少数ショット模倣学習や、自己教師あり学習による特徴抽出手法の活用により、データ効率と適応力の両立が図られている。

この分野では、環境や対象物の不確実性、人間との協調を前提とした柔軟な把持・操作能力が求められ、データ制約下での学習インフラの整備が鍵となる。近年の研究では、スモールデータ環境下での学習効率向上を目的としたメタ学習や少数ショット模倣学習の導入が進んでおり、メタ強化学習によりわずかな試行から異なる環境条件に迅速に適応する手法や、Transformerベースのモデルによる複数操作タスクの統一的学習が報告されている^{[17],[18]}。また、2D視覚情報と言語情報に基づく事前学習済み特徴を3D空間に蒸留し、わずか数件のデモンストレーションから把持・配置を可能にする手法も登場している^[19]。

現状の達成レベルと今後に向けた挑戦課題：定型タスクにおける模倣学習によるスキル獲得は実証されており、一定の再現性と動作精度が達成されている。ただし、こうしたスキルを場面や状況に応じて柔軟に再構成・再利用する能力にはいまだ限界がある。今後は、階層的スキル表現と行動計画モジュールとの連携を通じて、複数動作を組み合わせた連続的な動作の生成や、状況に応じた動作の動的切り替えを実現し、構成的汎用性と適応性の両立を図る仕組みの開発が求められる。

3.1.2 身体性を備えた知能の解明に向けた研究

本項では、AIとロボティクスの融合によって構築される「身体性知能（Embodied Intelligence）」に関する理論および構成的な研究開発課題を取り上げる。ここでいう身体性知能とは、身体と環境との相互作用を通じて形成される知能の全般を指し、人間や動物が持つ自然的な知能と、人工物に実装される知能の双方にあてはまる概念である。フィジカルAIはこの身体性知能の工学的実装の一形態とも言える。

節では、身体性知能の実現にあたって重要となる構成要素の一つとして、「世界モデル」の概念に着目する。これは、ロボットが身体構造や感覚運動のループを通じて、環境の構造や変化を内在化し、予測・推論・行動選択を行うための枠組みである。世界モデルは、知能の柔軟な適応や汎用的な行動生成を支える仕組みとして、近年多くの研究の対象となっている。

以下では、こうした世界モデルに基づく知能構築に向けて、(d)～(g)の四つの視点から構成課題を検討する。すなわち、知能資源を状況に応じて配分する二重過程理論、感覚と行動の予測的統合を担う予測符号化、環境ダイナミクスに対応した制御構造、そしてリアルタイム推論を可能にする実行基盤である。

(d) 二重過程理論による知能モデル

人間の認知を説明する理論として、直感的・無意識的・習慣的な「速い思考」（システム1）と、論理的・系列的・意識的・言語的な「遅い思考」（システム2）の2系統から構成される二重過程理論（Dual Process Theory）^[20]が知られている。AIにおいては、経験に基づいた即応的な情報処理を担うシステム1と、抽象化されたモデル・知識を参照した熟考的な情報処理を担うシステム2から成ると考え、システム2で能動的・選択的に情報を取りに行けば学習データ量が減り、資源効率や論理推論能力を改善されうる（図3-1）。現行のAIモデルは、主としてシステム2に対応した計画・推論機能を担っているが、フィジカルAIにおいては、環境への即時的な反応や運動制御といったシステム1的な処理の重要性が増している。ロボット制御において

は、上位の行動計画を生成AIや強化学習が担い、対象との接触以降の低レイヤ制御を従来型の制御が担当するという分担構造が、応答性と精密性を両立する実装として注目されている。

このような構成に関して、基盤モデルと制御系の統合による模倣学習の安定化を目指した研究も始まっている。例えば、筑波大学の境野翔による提案（図3-2）では、上位のVLAが出力する手先軌道を下位の制御器が模倣学習によって追従する階層構造を取り、上位の意図と下位の高速制御を接続する構成が示されている^[21]。この際、記憶依存の少ない単純な制御モデルの方が安定した運動生成に有効であるという知見が得られており、基盤モデルと制御アーキテクチャーの協調設計が今後の課題として指摘されている。

現状の達成レベルと今後に向けた挑戦課題：システム1とシステム2を分離した知能モデルの枠組みは提案されており、それぞれを担う個別機構の実装例も見られるが、全体として統合的かつ動的な切り替えを実現するには至っていない。今後は、システム1とシステム2の機能を単に分離するのではなく、両者の情報処理を連携させたハイブリッド構造の在り方について、より柔軟な設計の検討が必要である。その際に、抽象的な目標や行動計画を担う上位モデルと、個別の環境状態に即した動作を担う下位モデルの間で、情報の接続や相互変換をどのように実現するかは今後の重要な検討課題となる。また、上位の処理単位を状況に応じて柔軟に分化させていく方法や、下位で得られた知覚・運動データを自動的に抽象レベルへと対応づける枠組みの検討も、選択肢の一つとして挙げられる。

（e）予測符号化理論（能動的推論）

予測符号化理論（Predictive Coding）^[22]は、観測と予測の差分（予測誤差）を最小化する原理により、知覚・運動・行動を統一的に説明する枠組みである。AIロボットが環境との相互作用を通じて、自己と外界の状態を同時に更新・生成し、目的に応じて行動を選択する過程をモデルとして注目されている。

本理論に基づく知能構成では、ロボットは自らの行動結果を予測し、それが観測結果と異なる場合に内部モデルを更新する。この過程を通じて、環境の構造や他者の振る舞いに関する世界モデル（World Model）を形成し、未知環境に対する適応性や柔軟性を獲得する。観測困難な事象や部分的に隠れた状態に対しても、仮説的推論と行動選択が可能となる点において、従来型のプログラムの知能とは異なる動的な適応性が期待できる。

こうした予測的世界モデルの構築と活用は、近年、強化学習や大規模シミュレーションとの統合によって加速されており、Sim2RealやReal2Simの枠組みと接続する取り組みが進んでいる。特に、日本発の研究領

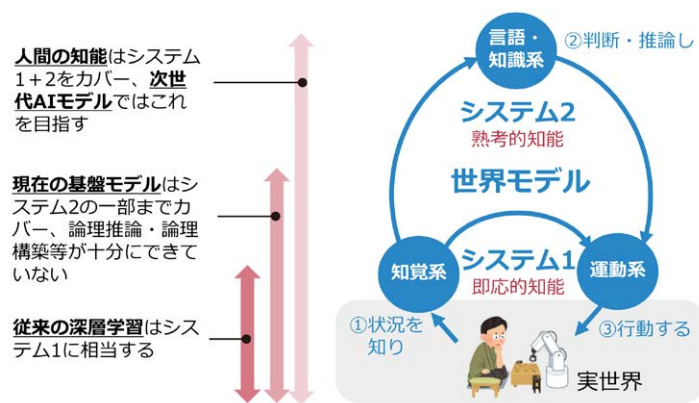


図3-1 システム1とシステム2

人工知能研究の新潮流 2025 ～基盤モデル・生成 AI のインパクトと課題～, CRDS-FY2024-RR-07を一部改変

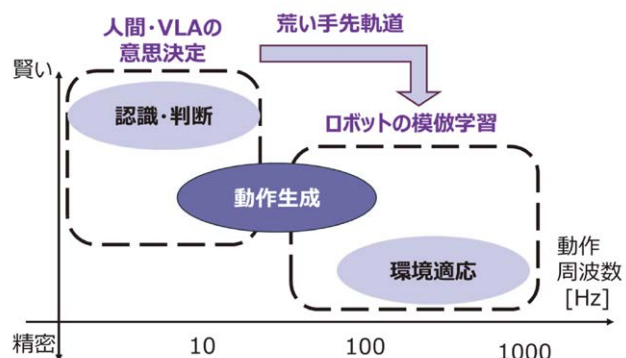


図3-2 手先軌道で制御可能な模倣学習の確立

「制御と学習の統合による再現性の高い動作生成モデル」
科学技術未来戦略ワークショップ報告書 フィジカルAIシステム,
CRDS-FY2024-WS-07

域である認知発達ロボティクス^[23]では、予測符号化や自由エネルギー原理、能動的学習に基づく知能の発達過程が再現されつつある。また、早稲田大学による深層予測学習型制御の研究では、感覚—運動信号に基づく予測学習により、事前の設計に依存しない汎用的な発達の知能の構築が試みられている^[24]。

現状の達成レベルと今後に向けた挑戦課題：予測符号化理論に基づく感覚と行動の統合モデルは提案され、局所的な感覚予測や誤差最小化に基づく行動調整の枠組みは実装されつつあるが、それが計画や学習と有機的に統合された実時間制御系として機能するには至っていない。今後は、行動計画と感覚処理の双方向性を強化する構成原理の明確化、複雑な時間的階層構造の取り扱い、ならびにシミュレーションと現実環境間の整合性確保といった応用面での拡張が重要な課題となる。なお、予測符号化に基づく知能発達は、ゼロからの段階的な学習を前提とするため長時間を要する可能性もある。実用化を見据えた今後の課題としては、既存の基盤モデルや事前学習済みモデルとの統合的なアーキテクチャーの設計も併せて検討する必要がある。

(f) 世界モデルに基づく身体性と制御理論

上に述べた予測符号化や世界モデルに基づく知能構成の理論的基盤を受けて、それをロボットの身体構造と制御系に実装するためのアーキテクチャー的課題に焦点を当てる。知覚・推論・計画と運動制御との統合により、身体性知能を具体的に動作させるための枠組みとして、環境ダイナミクスへの即応的適応や構造的柔軟性の実現が重要である。

フィジカルAIが実世界の複雑な環境で自律的に動作するためには、ロボットの身体特性と環境の動的変化に対応可能な制御構造の整備が不可欠である。従来の制御系は、特定のタスクや環境を想定して設計されており、状況が変化した場合の適応性に制約があった。今後は、事前の作り込みを最小限に抑え、身体特性を活かしながら動的に適応する能力の確保が課題となる。

この観点から、日本電気株式会社（NEC）による研究では、ロボットが観測情報から環境の因果構造を推定し、シミュレーション環境と実環境の知見を統合することで、未知状況への適応可能な制御システムを構築している^[25]。また、認知発達ロボティクスの視点では、ロボットが身体と環境の相互作用を通じて自律的に制御構造を形成・発達させていくプロセスが探究されており、感覚運動信号の予測学習と組み合わせることで、個別のプログラムに依存しない制御の柔軟性向上が期待されている。

近年注目されているDreamerアーキテクチャーは、ロボットが環境の動態を内部的に予測・想像（dreaming）することで、実機での試行を最小限に抑えながら効率的に行動方針を獲得する手法として位置づけられている。中でも、Danijar HafnerらによるDreamerV3^[26]は、単一のアルゴリズムと固定されたハイパーパラメータにより、Atariゲームや視覚ベースの連続制御など多様なタスクにおいて高い性能を実現した。この成果は、世界モデルによる汎用的強化学習の可能性を示すものとして注目されており、以後の研究に大きな影響を与えている。現在では、Sim2Real転移、階層的タスク分解、大規模言語モデルとの融合、安全性や頑健性への対応といった方向で発展が続いており、フィジカルAIにおける知能の汎用化と応用拡大に寄与する基盤技術として期待されている。

現状の達成レベルと今後に向けた挑戦課題：剛体力学やモデルベースの制御理論を土台とした設計手法は確立されており、限られた環境下では高精度な制御が実現されている。今後の課題は、力学モデルの非線形性や不確実性を含んだ環境に対して、ロバストかつデータ効率の高い制御系を実現することであり、特に可変構造の環境における動的安定性と学習可能性の両立が焦点となる。

(g) ロボット基盤モデルに適した効率的な推論システム

身体性知能の構築を現実のロボットに実装するためには、リアルタイムで動作可能な推論システムと、これを支えるハードウェア基盤の整備が不可欠である。特に、フィジカルAIの現場展開においては、エッジデバ

イス上での省電力かつ高効率な処理が求められる。

そのために、NVIDIA Grace Blackwell SuperchipやAxelera AIのMetis AIPU、IntelのLoihi2など、次世代エッジAIチップが活用されつつある。これらは、低ビット演算やスパイクニューラルネットワーク、局所学習などを通じて、学習および推論の高速化と消費電力の抑制を両立させるものである。さらに、時系列入力に対する高速な反応を低演算コストで実現する手法として、リザーバーコンピューティングが注目されている。特に、物理系をリザーバーとして用いるアプローチは、推論構造と身体構造の融合を通じて、エネルギー効率の高い身体性知能の実装に資する技術として位置づけられる。

現状の達成レベルと今後に向けた挑戦課題：マルチモーダル入力に対応した大規模モデルの推論アーキテクチャーは設計されつつあり、オフライン処理環境における応答性や精度の面では一定の成果が見られている。しかし、フィジカルAIに求められる実時間性、低電力性、再構成性といった要件を全て満たすには至っていない。今後は、エッジ環境での高頻度な入出力に耐える軽量高速な推論構造を設計するとともに、モデル圧縮や選択的実行、専用ハードウェアとの協調設計を通じた全体最適化が課題となる。複雑な推論処理とリアルタイム制御の両立を図るためには、演算資源の効率的配分と知能処理の階層化を見据えた実装戦略の検討が求められる。

3.1.3 安全なフィジカルシステム

システムの安全性の問題は、ロボットに特有の課題ではなく、人工知能や自動運転車、医療機器など、広範な物理システムに共通する基本的要請である。これらの分野では、すでに多くの安全設計や検証に関する知見が蓄積されてきた。本項では、こうした先行知見を踏まえつつ、AIとロボティクスの融合によって実現されるフィジカルAIに特有の課題に焦点を当てる。特に、強化学習など機械学習ベースのAIシステムは、原理的に100%の動作保証が困難であるため、設計・検証・運用の各段階において、安全性と信頼性を一貫して確保する技術体系の構築が不可欠である。

従来のロボット安全設計は、主に「閉じた環境（closed world）」における動作を前提としており、物理的隔離や事前定義された制約条件のもとで安全性を確保してきた。しかし、実環境で人と協働することを前提とするフィジカルAIでは、「開かれた環境（open world）」における不確実性への対応が不可避となる。これに対し、以下の二つの観点から重点的な研究開発が必要である。

(h) 安全な強化学習（Safe RL）

フィジカルAIが未知の環境で自律的に学習を行うには、行動中に安全性を損なうことなく、最適な方策を探索できる仕組みが必要である。これに対し、制御理論に基づく物理的予測と、強化学習に基づく行動最適化の統合による安全な強化学習（Safe Reinforcement Learning: Safe RL）が有効なアプローチとされる。Safe RL（Safe Reinforcement Learning）とは、強化学習エージェントが報酬の最大化を追求する過程において、同時に安全制約を満たすことを目的とする手法である。現在、さまざまなアプローチが提案されているが、ロボット制御や自動運転などの分野では、シミュレーション環境や限定的な実環境において一定の成果が示されつつある。また、安全性評価のための指標やベンチマーク環境の整備も進み、概念実証（PoC）レベルでの取り組みも始まっている。

Brunkeら^[27]は、こうした安全な学習の枠組みを、①環境モデルを学習しつつ制御性能と安全性を両立する「学習ベース制御」、②強化学習にリスク評価や制約充足機能を組み込む「安全志向強化学習」、③学習済み方策の動作を形式的に検証・認証する「方策の安全認証」の三つに分類しており、安全学習に関する体系的な技術マップを示している。

現状の達成レベルと今後に向けた挑戦課題：強化学習による行動獲得の技術は進展しているが、安全性制約下での学習効率確保や、実機環境における安全な試行の実現には限界がある。また、トレードオフ関係にある安全性と性能の最適化においては、明確な調整原理が確立されていない。さらに、現行の安全設計は経験的な実証に依存する傾向があり、数学的に安全性を保証する仕組みは未整備である。今後は、

- 安全性と学習効率の調整が可能な汎用的フレームワークの整備
- 物理的環境下のリスクシナリオを事前に学習・生成する環境モデルの構築
- 倫理的・社会的な受容性を踏まえた設計指針の明確化

が重要な課題である。

(i) オープンワールドにおけるAIの研究

フィジカルAIが直面する環境は、事前に全てのリスクや対象が把握できるとは限らない。このため、未知や分布外入力（Out-of-Distribution: OOD）に対しても適切に応答できるAIの構築が求められている。DietterichはIJCAI-24における講演^[28]において、オープンワールドAIが直面する本質的課題——未知事象の検出、信頼性推定、モデルの更新可能性——を指摘し、従来の閉世界的前提に基づくAI手法との根本的違いを指摘した。従来の安全設計が既知のハザードへのロバスト性に焦点を当てていたのに対し、今後は未知の状況への適応性が鍵となる。

現在、研究が進められている技術要素として、

- OOD検出やオープンセット認識による未知入力の検出
- 反事実的推論による事故シナリオの生成
- 不確実性推定による信頼度に応じた行動制御

が挙げられる。

現状の達成レベルと今後に向けた挑戦課題：現時点では、分布外入力や未知事象に対する個別の技術は確立しつつあるものの、それらをリアルタイムで統合し、継続的な信頼性評価と行動方策の更新を可能とするアーキテクチャーは未成熟である。今後の課題としては、

- 未知入力に対する頑健性の確保と自律的行動の抑制
- 修正機構の設計・信頼度推定と行動選択を結びつける制御原理の開発
- 学習を通じた行動変化が人にとって予測可能かつ受容可能であるための説明性・透明性の確保

が重要となる。

3.2 社会・経済的影響に関する人文・社会科学研究課題

本節では、フィジカルAIシステムの研究開発を推進する上で必要となる研究環境・制度基盤の整備に関する課題を扱う。特に、AIとロボティクスの融合によって実現されるAIロボットの開発に必要な共通プラットフォーム、データ・シミュレーション環境、制度的支援、人材育成など、技術と社会の両面にわたる基盤構築の方向性を示す。第2章で指摘したように、わが国の従来の取り組みは、安全対策や標準化に重点が置かれてきた一方で、学際的かつ持続的な社会影響研究の制度的整備、ならびに研究開発現場との有機的な連携については未成熟である。

新興技術（Emerging Technology）の社会的受容性を踏まえた研究開発の在り方の検討は、倫理的・法的・社会的課題（Ethical, Legal and Social Issues: ELSI）と責任ある研究・イノベーション（Responsible

Research and Innovation: RRI) 等を通して実施されている。技術の社会実装までのスピードが速い現代においては、新たな技術が社会に与える影響を分析しリスク管理を主眼とする ELSIに加え、目指すべき社会像、価値観から鑑みて研究開発プロセスを設計する RRIの視点を取り入れることで、一層社会実装に近づけることができると考える。ELSIやRRIを考慮せずに研究開発を進めた場合、長年にわたる成果が社会に受け入れられないまま終わるおそれがある。仮に普及に至ったとしても、その後に問題が顕在化し、後戻りが困難な状況に陥る可能性も否定できない。フィジカルAIシステムの社会的受容性を確保するには、ELSIとRRIの双方を統合的に取り入れた枠組みの構築が不可欠である。^[29]

本プロポーザルで対象とするフィジカルAIシステムは、現実世界や環境を理解し、それらに基づいて判断・行動できる能力を備え、人間との共生を目指すものである。このような特性から、ELSIおよびRRIを考慮した研究開発が求められる。基礎研究の初期段階から「バイデザイン」の視点を導入し、社会的・倫理的課題への対応を組み込んだ研究開発の実践が重要である。

フィジカルAIシステムは、AIとロボットの双方の技術的特性を包含するため、個別の観点だけでなく、共通する課題の整理も必要となる。表3-2に示すように、AIとロボットには、受容性、透明性、公平性、プライバシー、責任分配、雇用影響といった共通の課題が存在し、それぞれに特有のリスクや倫理的論点も併せて検討が必要である。また、図3-3は、フィジカルAIシステムに特有のELSI/RRI課題の全体像を俯瞰するものであり、今後の制度設計や社会的議論の基盤となることを想定している。

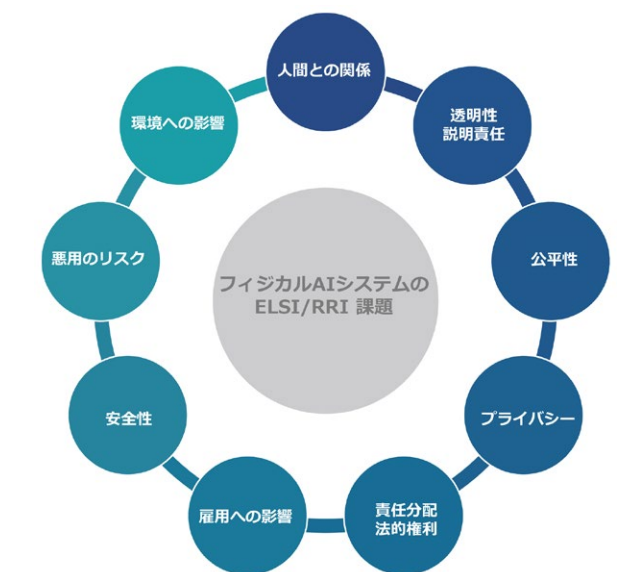


図3-3 フィジカルAIシステムのELSI/RRIの課題

表 3-2 AIとロボットのELSI/RRIの課題例一覧

	AIとELSI/RRI	ロボットとELSI/RRI
共通課題	・ 人間との関係（受容性、安心、社会性、人間の心理・感情への影響）	
	・ 説明責任と透明性（意思決定のブラックボックス化、説明可能性）	
	・ 公平性（偏見や差別の回避、バイアス問題）	
	・ プライバシー（意思決定の自律性と監視社会リスク）	
	・ 責任分配と法的権利（リスク分配と損害賠償、法人格、知的財産権）	
	・ 雇用への影響（自動化による失業リスク）	
個別課題	安全性 ・ データの正確性、信頼、品質確保	安全性 ・ 安全性（身体へのリスク） ・ 安全基準の作成、標準化
	悪用のリスク ・ ハルシネーション ・ ディープフェイクや偽情報	悪用のリスク ・ 悪意ある攻撃利用、兵器利用
	環境への影響 ・ 水や電力の消費量	環境への影響 ・ ロボットの素材による環境破壊

本節では、こうした背景を踏まえ、フィジカルAIシステムに関連する人文・社会科学的検討課題のうち、特に実世界での人間との協働を前提とする制度設計・社会的受容に関係の深い「人間との関係」「プライバシー」「責任分配と法的権利」の3点に焦点を当てて論じる。

（1）人間との関係

フィジカルAIシステムの中でもAIロボットの多くは、ユーザーの反応や実環境を分析し、得られた情報をユーザーとのコミュニケーションにフィードバックしていくことが想定される。これにより、システムは人間との相互作用を通じて、行動や振る舞いを適応的に変化させる可能性を持つ。このようなフィジカルAIシステムは、外見や動作、言語表現などにおいて人間に近い特徴を持つことから、擬人化された存在として受け取られる場合がある。擬人化されたシステムが人間の認知や感情、行動に与える影響については、Human-Agent Interaction（HAI）と呼ばれる研究分野で近年活発な議論が進んでいる^[30]。

HAIの研究では、以下のような研究課題が進められている。

- ・ ロボットやAIの身体性（外見）、振る舞い、対話性、自律性などが人間にどう解釈されるかという受容性に関する研究（不気味の谷⁴など、ユーザーの社会的反応を引き出す「人らしさ」、安心感^[31]の要因から心理評価尺度など）
- ・ AIシステムの持つ社会性の在り方に関する研究、擬人化されたシステムと人間とのギャップの研究（人間以上に人間関係を把握するAI、弱さを演出するロボットによる円滑な社会の形成^[32]など）
- ・ AIシステムとのインタラクションによって人間の感情へどのような変化が起こるかという知覚認知システム、社会的反応の解明に関する研究

外形的にも内面的にも擬人化されたフィジカルAIシステムによって、人間の価値観や思想などの内面、また意思決定に対して、プラス、マイナスの両面から影響を与える可能性がある。そのため、擬人化の程度や設計方針が、どのような社会的反応や倫理的課題を引き起こすかについて、科学的根拠に基づく精緻な分析

4 1970年に森政弘が提唱した概念で、人間に似た人工物がある段階を超えて「ほぼ人間らしく」となると、かえって強い違和感や嫌悪感を引き起こす現象。ロボットの外見や動作設計における課題とされる。

が必要である。

(2) プライバシー

フィジカルAIシステムが人間の監督から一定程度独立し、自ら周辺状況を認識、分析、行動することを想定した場合、その過程で個人に関する大量のデータを継続的に取得・蓄積する。特に、介護や医療、家庭用サービスといった分野では、ユーザーの身体情報や生活履歴など、機微なデータが収集される可能性がある。

このような状況では、ユーザーのプライバシー権、肖像権、個人情報に関するデータアクセス権に加え、同意取得や情報セキュリティへの対応といった法的・倫理的配慮が不可欠である。介護ロボットや医療AIなどの実用現場では、すでに実務的観点からの検討が進められている^[33]が、フィジカルAIシステムが広範な公共空間や生活空間に普及することで、新たな課題が浮上する可能性がある。

そのひとつが、利用者が気づかぬうちに情報が収集・活用され、無意識のうちにプライバシーが侵害される可能性である^[34]。例えば、家庭内で使用される商業ロボットが攻撃に対して脆弱であり、ハッキングされてロボットのカメラやセンサーを遠隔操作されるケースが挙げられる。この場合、攻撃者は利用者が気づくことなく家庭内のプライバシー情報を収集することができる。また、一部の家庭用ロボットが新しい環境に導入されると、自動的に全てのアクセス可能なエリアを探索し、収集したデータをメーカーにアップロードすることがある。このデータが利用者の知らない間に外部からアクセスされる可能性も考えられる。さらに、人とのコミュニケーションを重視するロボットが家庭内に導入されることで、利用者は常に監視されているという感覚を持ちやすく、人間のように振る舞うロボットが利用者の行動や会話を記録し、その情報が第三者に渡る可能性がある。また、こうした状況では、利用者の主観的なプライバシー意識と、技術的に収集可能な情報の範囲との間に齟齬が生じうる。さらに、利便性や効率性、安全性の向上と、個人の意思決定の自由や自律性の尊重とをいかに両立させるかについても、設計段階からの慎重な検討が求められる。

加えて、大規模なデータの収集と分析が進み、サービスプロバイダーに個人の多様な情報が蓄積されていく中で、データの活用の在り方によっては、過度な監視社会につながるリスク、悪用されるリスクも存在する。こうした状況を踏まえ、利便性・効率性の向上や治安維持、安全性の確保と、個人の意思決定の自由や自律性とをいかに両立させるかについて、倫理的観点からの検討が求められる。

(3) 法的責任分配と権利

フィジカルAIシステムが社会実装された世界では、システム自ら学習を行い、事前にデザインされた学習結果からは予測できない行動やそれに伴う結果が起こりうる。予想しえなかった事故や損害とそれに伴う補償によって、新たな研究開発を妨げることがないように、システムがもたらす新たなリスクを適切にコントロールするためのルールのある在り方の検討が求められる。

一般的に新たな技術の導入に伴う法的責任分配においては、利用者の責任（不法行為責任）か、開発者、製造者の責任（製造物責任、不法行為責任、債務不履行等）の観点から検討がなされている。例えば、自動運転による事故、医療AIによる誤診・医療過誤、顧客対応AI（金融商品の投資アドバイスなど）の誤情報など、具体的な事故やトラブルが現実には起こりうる場面についてはすでに議論がなされ始めている^[35]。

伝統的な過失責任制度は、加害者がその行為によって、どの程度結果を予測できたかという予見可能性に基づき損害賠償責任を負うが、今後、フィジカルAIシステムが自ら学習する過程で自律的に意思決定するようになると、開発者が全ての行動を予測できるとは限らない。開発者がどの程度まで予見すべきかについて明確な基準がないため、場合によっては研究開発が萎縮してしまい、結果として社会実装が困難となる可能性がある。AI分野においては、法が想定する「予見」と、AIの学習による挙動の複雑さとの差分を補うための

AI 補償基金やAI 保険の検討も始まりつつある⁵。フィジカルAI システムの研究開発を萎縮させることなく、システムがもたらす便益を最大化できるような、柔軟なルールの在り方の検討が求められる。

その他、フィジカルAI システムが自律性を獲得した際に、契約や責任能力といった法的人格を持たせるか、創造物に知的財権（特許権、著作権、商標権等）を認めるのかといった法的権利についての検討も進められている^[36]。

法的責任と権利の制度整備は、フィジカルAI システムの研究開発を萎縮させることなく、技術の社会実装とリスク管理とを両立させるための前提条件である。基礎研究の段階から、制度的・倫理的影響を踏まえた「バイデザイン」の取り組みとして、法制度と研究開発の相互連携が求められる。

人文・社会科学の視点から取り組むべき課題は、こうした個別テーマにとどまらず、研究開発との協調的な枠組みの構築に及ぶ。これらの研究は、人文・社会科学者のみで完結するものではなく、技術開発に関わる研究者や制度設計の担い手と連携し、相互作用を通じて発展させることが求められる。すなわち、ELSI/RRI の観点を、フィジカルAI システムの設計・実装過程に組み込む「バイデザイン」の実践が鍵となる。

すでに諸外国では、大学や研究機関を中心に、学際的な拠点の整備が進められており、先端技術の社会的・倫理的影響評価が一体的に推進されている。わが国においても、東京大学未来ビジョンセンター、大阪大学や中央大学のELSI センター、理化学研究所の人工知能倫理・社会チームなど、学際的研究を担う拠点が形成されつつある。これらの機関が継続的に研究を進めると同時に、研究開発者および資金提供機関との連携体制を確立することで、社会と調和したフィジカルAI の実現が可能となる。

さらに、近年AI 分野で注目されている「AI アライメント^[37]」は、技術が人間の意図・価値・倫理と整合的に機能することを目指す考え方であり、フィジカルAI システムにも同様に適用可能である。AI アライメントは、技術的制御のみならず、ルール形成や文化的調整を含む包括的な枠組みであり、今後のELSI/RRI の具体化において中心的な役割を果たすと考えられる。これにより、社会的信頼を確保しつつ技術の発展を促す制度連携モデルの構築が求められる。

5 EUでは2022年にAIの開発事業者の民事責任に関する指令案が発表されており、AIが関与する損害に対する補償の枠組みが整備されつつある。またデロイトUSによると、AIに起因するリスクは、甚大な経済的損失から死亡に至る可能性もあり、いくつかの企業がAI保険市場に参入していると報告している（A burgeoning 'AI-generated' market: Insurance safeguards against AI risk, 2024, <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/deloitte-insights-magazine/issue-33/ai-insurance-ai-risk.html>）2025年4月時点

4 | 研究開発の推進方法および時間軸

本章では、AIとロボティクスの融合によって実現されるフィジカルAIシステムの研究開発を戦略的に推進するために必要な体制・制度・基盤の整備方策を示す。フィジカルAIシステムの研究開発には、AIとロボティクスの高度な統合が不可欠である。その実現に向けては、第3章で示したように、実世界での柔軟なタスク遂行を可能にするための技術的課題（3.1節）と、社会的受容や倫理、安全性に関する制度的・社会科学的課題（3.2節）に対し、統合的かつ並行して取り組む必要がある。

また第2章で述べたとおり、フィジカルAIの研究を推進するにあたっては、研究基盤そのものに関わる構造的な課題が存在しており、その克服が中長期的な研究展開の前提として必要となる。特に、異分野の研究者にとっての参入障壁、ハードウェアの閉鎖性、データ・仕様の非公開による再現性の欠如、研究の画一化といった問題は、技術開発と並行して解消すべき重要な論点である。また、研究成果を社会実装につなげる枠組みとして注目されているロボット競技会においても、実環境課題との乖離や短期的評価の偏重、競技結果の社会実装の担い手への移転が不十分といった課題が存在する。

こうした状況を踏まえ、本章では研究開発を戦略的かつ効果的に推進するための方法として、以下の2点を提案する。4.1節では、ロボットのソフトウェア・ハードウェア・データ・シミュレーション環境を含めたオープンプラットフォームと共有基盤の整備について論じ、4.2節では、現場や実タスクに即した競技会型の研究開発方式について展望する。

さらに4.3節では、これらの取り組みを持続可能かつ一体的に推進するための体制と時間的枠組みについて論じる。具体的には、基礎研究と応用展開の間をつなぐ研究プログラムの構築、研究成果の社会還元を加速する共創の場の形成、持続可能なファンディングと運営体制の整備などを含む、戦略的かつ段階的な推進方法を提示する。

その際、日本がとるべき方向性として、米国や中国のような物量依存型の汎用AIロボット戦略とは異なり、現場ごとの課題に即した分野特化型のロボットを社会課題解決の文脈で活用し、実用性を重視したアプローチによって国際的な貢献を果たすべきである。本章では、その実現に向けた基礎・基盤研究の在り方について検討する。

本章は、その全体を通じて、フィジカルAIシステムの研究開発が単なる技術開発にとどまらず、社会的課題の解決と国際的な技術競争力の維持・強化の両立を図るための、持続的かつ実効性のある研究開発体制の確立を目指すものである。

4.1 オープンプラットフォームの整備と活用

AIとロボティクスの融合によって実現されるフィジカルAIシステムの研究開発を効果的に推進するには、大学、研究機関、企業の連携による体制強化が不可欠である。特に、知能・身体・制御を横断する融合的な研究特性を踏まえ、分野横断的な連携と研究資源の共有、ならびにAIロボットに特化した中核拠点や連携プラットフォームの整備が求められる。しかるに、第2章でみたように、現在のロボティクス研究においては、要素技術の評価環境やデータ資源の不足、異分野からの参入障壁の高さ、そして研究の再現性や比較可能性を支える共通基盤の未整備といった課題が顕在化している（2.1.4参照）。これらは、フィジカルAIのように複数の分野を横断する新しい研究領域において、基礎研究の促進と応用展開の両面で大きな制約となっている。

フィジカルAIシステム研究において分野融合的な研究体制を強化し、統合システム構築のための理論的基盤を確立するには、ソフトウェア、ハードウェア、データ、シミュレーションを含むオープンプラットフォームの整備が不可欠である。現在、ROS 2、HSR、RT-X、HSRT-X、Project GR00Tなどの先行事例があり、NVIDIAやGoogle、東京大学などが主導する取り組みが進行している。一方で、研究の画一化、異分野研究者の参入障壁、ハードウェアのオープン性の不足、企業製環境の制約といった課題が依然として存在している。

ロボティクス分野における基礎研究を加速するためには、オープンプラットフォームの拡充が不可欠である。本節では、異分野研究者の参入促進、実ロボット研究の強化、シミュレーションと現実環境の統合という三つの観点から、今後のオープンプラットフォームに求められる事項について提言する。

(1) 異分野研究者の参入を容易にするためのソフトウェア基盤の強化

オープンプラットフォームとして広く利用されているROS 2を基盤に、異分野研究者がより容易に実ロボットやシミュレーション環境を活用できるようにするための環境整備が求められる。機械学習ライブラリやシミュレーション環境とのシームレスな統合を進めることで、ROS 2を基盤としたロボット制御システムを高度化することが重要である。特に、実世界の大規模データセットを活用し、深層学習や強化学習の手法と統合することで、より柔軟かつ適応的なロボット動作を実現できる。

また、研究者間の情報共有を促進するため、標準化されたApplication Programming Interface (API)の提供や、クラウドベースのROSエコシステムの拡張が望まれる。加えて、シミュレーション環境と統合した学習用パッケージを提供することで、実ロボットを用いた研究に移行しやすい環境を構築できる。データプラットフォームとロボット基盤モデルの活用は、異分野研究者がロボット研究に参入しやすくする上で不可欠である。例えば、4.1.1に紹介したプラットフォームとモデルを活用することで、研究者はロボットデータを容易に利用し、実ロボットの学習環境にアクセスしやすくなる。また、オープンなデータ共有の枠組みを強化することで、学習済みモデルや動作制御アルゴリズムの再利用が促進され、ロボティクス研究の発展が加速する。

(2) 実ロボット研究の促進のためのオープンハードウェアプラットフォーム開発

多様な研究現場で活用可能なロボットを新規に開発し、オープンなハードウェアプラットフォームとして提供することが求められる。オープンハードウェアプラットフォームの普及には、研究者が容易に入手・改造可能な設計が求められる。そのため、新規開発するロボットは、低コストでの組み立てが可能なモジュール構造を採用し、3Dプリンティングや容易に調達できる汎用部品を活用することで、研究者の自由な改造や拡張を可能とする設計を目指すべきである。

オープンハードウェアプラットフォームの事例として、以下が挙げられる：

- NimbRo-OP2 (独ボン大学、2023年)：研究用ヒューマノイドロボットであり、前世代のNimbRo-OPを改良し、より強化されたセンサーとハードウェア設計を備えている。
- Mobile ALOHA (米スタンフォード大学、2024年)：軽量かつ動的な動作を可能にするリーダーフォロワー型のモバイルマニピュレーションロボットであり、学習環境の充実に貢献している。
- Mevius (東京大学、2023年)：人と協調して作業を行うための高度なヒューマノイドロボットプラットフォームであり、産業応用を見据えた開発が進められている。

これらの取り組みを踏まえ、研究コミュニティ全体として、ソフトウェア・ハードウェア・データ・モデルを含む包括的なオープンプラットフォームの拡充に取り組むことが求められる。これにより、研究の再現性や相互運用性が高まり、分野横断的な基礎研究の推進と実証実験の加速が実現される。

4.2 現場・現実タスクを目指した競技会の推進

第2章で示したとおり、競技会は研究成果の社会実装に向けた橋渡しとして大きな可能性を持つ一方で、実課題との乖離や運用持続性の欠如、評価の限定性といった問題が指摘されている。これらの問題を克服し、AIとロボティクスの融合によって実現されるAIロボットの研究開発と現場ニーズとを接続する場として競技会を再構築するためには、その設計思想と運営手法の見直しが不可欠である。特に以下の観点から改善が指摘されている：

- **実環境課題との乖離**：競技内容が現場のニーズと一致しておらず、実用化に結びつきにくい。
- **再現性の低さ**：実験室的・制御された条件下での競技が多く、複雑な現実環境への対応力を評価しにくい。
- **短時間デモ偏重**：短時間のパフォーマンスが評価されがちであり、長期運用やメンテナンス性の検証が不十分である。
- **実運用シナリオとの乖離**：社会実装の担い手による活用を前提としたタスク設計が不足している。
- **社会実装への導線の不在**：競技結果が産業界や自治体など社会実装の担い手への移転に直結しにくい構造となっている。

競技会は、基礎研究と応用研究の橋渡しを担う実証環境として重要な役割を果たしてきた。RoboCup、DARPAのロボットチャレンジ、WRSなどは、技術の統合評価と社会課題への適用性の検証を可能とする枠組みとして機能している。しかし現在の競技会には、実運用環境との整合性の不足、長期運用の評価欠如、成果の社会実装への導線の弱さ、参加負担の高さといった課題が存在する。現場・現実環境での適用を成功させるためには競技会の改善が必要である。

(1) 実世界の課題により密接に連携した協議会シナリオの策定

競技会の課題設定が実際の社会課題と一致するよう、社会実装の担い手と共同で競技シナリオを策定することが必要である。例えば、物流業界と連携したロボット倉庫作業の競技や、自治体と連携したインフラ点検ロボットの競技を設計することで、実運用に即した技術開発を促進できる。

(2) 「長期運用」「実用化」に適した協議会の評価軸の設定

現状の競技会では短時間のデモに焦点が当てられがちであるが、長時間の連続運用を評価項目に含めることで、耐久性や運用効率の向上が期待できる。また、メンテナンスや運用コストの評価も加えることで、実用化しやすい技術の促進につながる。

(3) 競技結果を産業界・自治体など社会実装の担い手と共有し実用化へとつなげる仕組みの構築

競技会の成果が産業界や自治体で活用されるよう、競技データをデータベース化し、技術移転を支援する仕組みを構築する。また、企業や自治体が競技会の成果を活用できるよう、技術マッチングの場を提供し、商業化への道を開くことが重要である。

(4) 参加負担の軽減と参入障壁の引き下げ

共通のオープンプラットフォームを提供することで、開発コストを削減し、研究者の負担を軽減できる。また、仮想競技（シミュレーション主体）と実環境競技のハイブリッド開催を実施することで、より多くの研究者や企業が参加しやすい環境を整える。

(5) 標準性能試験法の改良と多様化

競技会ごとに異なる評価基準を統一し、物流、農業、災害対応など分野ごとに適した評価手法を開発する。国際標準化を進めることで、異なる競技会間での技術比較が容易になり、技術の発展を促す。

競技会を単なる技術デモの場ではなく、実用化へのステップとして設計することが、今後の重要な方向性となる。併せて、産業界・自治体・研究機関が継続的に連携し、競技会を通じた技術移転と現場導入のフィードバックループを確立することで、フィジカルAIシステムの社会実装に向けた信頼性・有効性の検証が進むことが期待される。

4.3 研究開発の推進方法と推進の時間軸

フィジカルAIシステムの研究開発には、AIとロボティクスの高度な統合が不可欠である。その実現に向けては、第3章で示したように、実世界での柔軟なタスク遂行を可能にするための技術的課題と、社会的受容や倫理、安全性に関する制度的・社会科学的課題に対し、統合的かつ並行して取り組む必要がある。

また第2章で述べたとおり、フィジカルAIの研究を推進するにあたっては、研究基盤そのものに関わる構造的な課題が存在しており、その克服が中長期的な研究展開の前提となる。特に、異分野研究者にとっての参入障壁、ハードウェアの閉鎖性、データ・仕様の非公開による再現性の欠如、研究の画一化といった問題は、技術開発と並行して解消すべき重要な論点である。また、研究成果を社会実装につなげる枠組みとして注目されているロボット競技会においても、実環境課題との乖離や短期的評価の偏重、競技結果の社会実装の担い手への移転が不十分といった課題が存在する。

本節では、こうした状況を踏まえ、AIロボットの研究開発とその社会展開の両面において戦略的かつ効果的な推進を図るための方法について、以下の三つの観点から提案を行う。

(1) 戦略的研究体制の構築

まず、基礎研究を推進するプログラム（例えば、JST戦略的創造研究事業）を立ち上げ、推進することが効果的である。このプログラムにおけるロボットの研究開発には、第3章および第4章1節と2節で述べたように次のような要件を取り入れることが求められる。

- 個別に要素技術研究を推進するのではなく、各要素技術研究が連携して統合したシステムを構築するための研究を推進する
- 統合したシステムに関する理論的基盤の確立を目指す
- 既存のハードウェアプラットフォーム（例えばHSR等）の活用、ロボカップ@home等の既存競技会を課題評価に組み込む
- ロボット工学に加え、人工知能研究、システム工学、認知科学、脳科学、解剖学、数理科学等の分野の連携による融合的研究を推進する

また、フィジカルAIに関連する基礎研究の戦略的展開にあたっては、内閣府の「ムーンショット型研究開発事業」との接続も視野に入れるべきである。同事業は、従来の延長線上にない破壊的イノベーションを目指すものであり、特に「目標1（2050年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現）」および「目標3（2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現）」は、フィジカルAIシステムの理念および応用展望と強く関連している。これらの目標は、現実世界における知能と身体との統合、社会との調和的共生を重視する本提案と高い親和性を有し、対象領域として有望である。

これらの活動は、直線的な順序で進行するものではなく、同時並行かつ相互連携のもとで展開される必要がある。技術開発、社会ニーズ評価、プラットフォーム整備、競技会設計の各アクティビティを有機的に結合し、研究成果が社会実装へと円滑に移行する仕組みを構築することが不可欠である（図4-1、図4-2参照）。

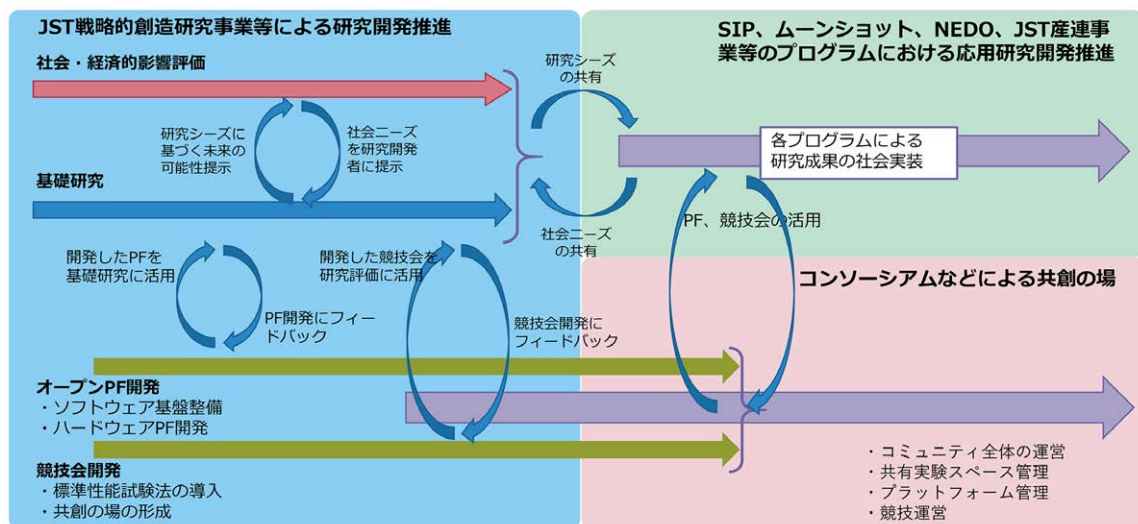


図4-1 研究開発活動の連携構造図

（2）社会実装に向けた共創の場

社会・経済的影響評価に基づく社会ニーズを研究者に提示することで研究開発の方向性に反映するとともに、研究成果から未来の可能性を提示することにより、社会ニーズとの双方向的な接続が可能となる。さらに、競技会やプラットフォームの設計に社会的視点を取り込むことで、現場実装に即した研究開発の推進が期待される。

EUの研究・イノベーションプログラムであるHORIZON 2020（2014～2020）では、調整と支援を行うCoordination and Support Action（CSA）の枠組みが設けられており、分野横断的な専門家による協働のもと、RRIパラダイムの構築やロボット競技会を活用した能力ベンチマークの開発などが行われてきた。これらの事例を参考に、日本においても同様の枠組みの導入を検討すべきである。

また、NEDOやJST産学連携事業等の社会実装に向けたプログラムと接続し、開発したプラットフォームや競技会を活用して、大学・研究機関・企業等が参加する共創的な研究の場を整備・運営していくことが求められる。初期段階では学会や研究会などを中心に議論と試行を進め、成熟化に応じて、共創の場としての恒常的な組織体制を整備していくことが有効である。

このような共創の場には、専任人材による管理運営、運営資金の多元化（基礎研究予算、競争的資金、組合員からの賦課金等）、および中立性・専門性を兼ね備えた調整機関の存在が必要である。具体的には、JSTやNEDOのような研究支援機関、大学・国立研究所、業界コンソーシアム、学会などが連携し、役割分担のもとで機能を担うことが想定される。

また、企業・大学・研究開発法人のいずれにとっても、共創の場への参画は研究資源の補完、技術の成熟、社会実装への橋渡しという観点で大きな意義がある。研究者にとっては、標準化された評価手法や実環境を模した実証フィールドの整備を通じて、研究の再現性や信頼性が高まり、質的向上につながる。企業にとっては、試行的な技術導入や段階的な製品開発の足がかりとなる他、現場で求められる技術要件の把握や人材育成にも寄与する。共創の場は、基礎と応用、研究と実装を結びつける媒介として、イノベーションの加速に不可欠である。

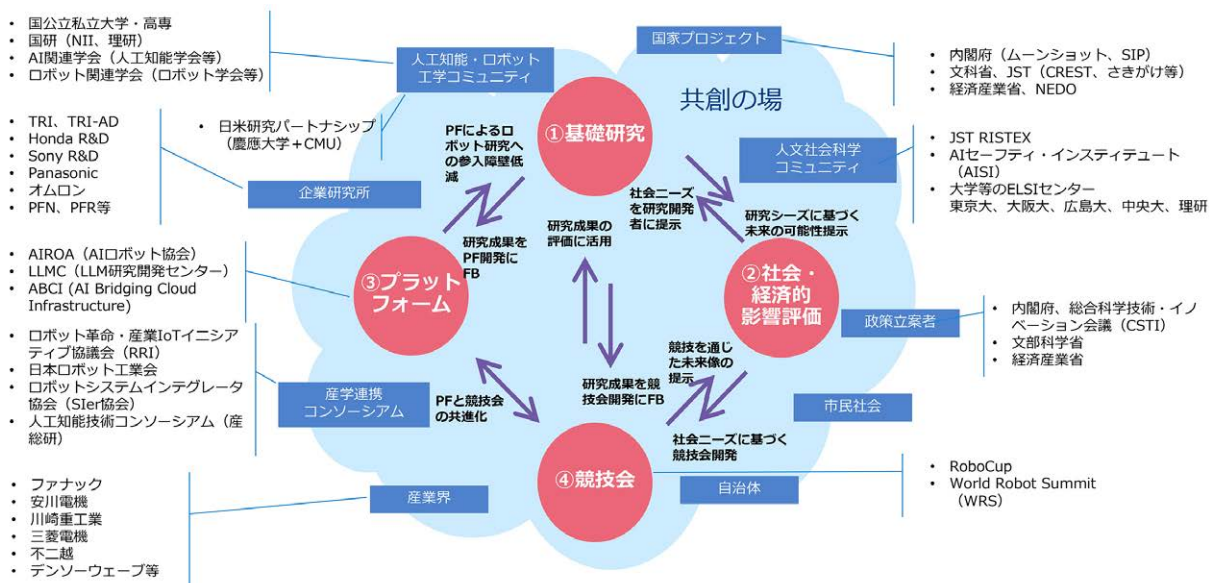


図4-2 共創の場とステークホルダー

（3）日本のとるべき戦略 ロボットを作る国からAIロボットを活かす国へ

米国および中国は、いずれも大規模データを活用し汎用的なAIロボットの開発を推進する物量依存型の戦略を採用しており、それぞれ異なる体制と強みに基づいて国際的な技術覇権を競っている。米国は民間企業を中心とした先端AI技術の開発を強みとし、国家による基礎研究支援と民間投資の連携によって世界の研究潮流を牽引している。一方で中国は、国家主導の統合戦略を通じて、大規模学習と広範な応用を組み合わせることで、特定領域における先行優位を確立しつつある。

これに対して日本は、同様の物量戦略をとることが困難である。一方、長年にわたり蓄積された産業用ロボットの制御・統合技術や、介護・災害対応・農業・インフラ点検といった多様な現場課題への対応経験を有するという独自の強みを持つ。特に、現場での実用性や人との協調性を重視する国民的な価値観は、日本社会に深く根付いており、こうした背景を踏まえた設計思想と制度設計が求められている。

日本が進むべき方向は、汎用性よりも実用性を重視し、各分野の社会課題に即したロボット技術を適所適用する分野特化型アプローチである。この戦略においては、既存の産業技術基盤と高い国民的親和性⁶を活かしつつ、制御・統合・安全・社会受容性を一体として扱うことで、現場実装に即したイノベーションを生み出すことが可能となる。

本プロポーザルは、このような日本独自の強みを最大限に活かし、国際的な技術競争力の維持・強化に資する実践的・基礎的研究の体系化と、その継続的な推進体制の構築を目指すものである。

最後に、基礎研究から社会実装に至るまでを段階的に接続する推進フローを提案する。まず「立ち上げ期」においては、身体性知能に関する基礎理論の深化や、フィジカルAIシステムの要素技術に関する構成論的理解の蓄積が中心課題となる。次に「展開期」では、実環境における技術検証とフィールド実証を通じて、システム全体の性能・信頼性・安全性を評価する段階に移行する。並行して、制度設計・標準化・倫理・社

6 「国民的親和性」とは、日本社会においてロボット技術が比較的自然に受け入れられてきた文化的背景や社会的態度を指す。たとえば、家庭用ロボットやペットロボットの早期普及、アニメ・漫画などにおける親しみやすいロボット像の浸透、高齢者や子どもを対象としたロボット介護・教育支援に対する比較的高い受容性などが挙げられる。こうした社会文化的な土壌は、ロボット技術の現場適用を円滑に進める上で一つの強みとなりうる。

会受容性に関する実証的研究を行い、現実の社会への導入可能性を高めることが必要である。そして「実装準備期」では、これらの成果を競技会や共創フィールドを通じて社会に接続し、制度・市場・人材育成を含む実装環境の整備を一体的に進めることで、継続的・持続的な活用基盤の確立を目指す。

このように、研究と社会実装を切れ目なく接続する3段階の推進フローを推進することで、日本は「ロボットを作る国」から「AIロボットを現場で活かす国」へと転換を遂げ、国際競争力の強化と社会課題の同時解決を両立させる道筋を具体化できる。

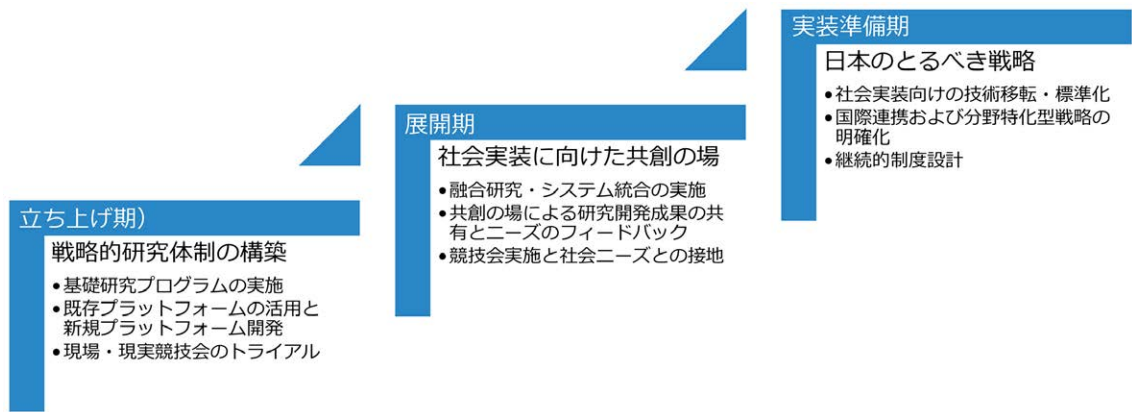


図 4-3 フィジカルAIシステム研究開発の推進フロー

付録1 検討の経緯

科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）では、本プロポーザルに先立ち、2022年8月に戦略プロポーザル『リアルワールド・ロボティクス ～開かれた環境に柔軟に適應するロボティクス学理基盤の創出～』^[38]を発行し、実環境に柔軟に適應できるロボティクスの学理基盤の構築を提言した。しかし、その直後に生成AI ChatGPT 3.5が公開され、AIとロボティクスの関係性が構造的に変化した。この技術的転換により、生成AIをロボティクス研究へどう活用するかが新たな課題として浮上した。CRDSは本プロポーザルの準備を開始した。

まず、戦略プロポーザルの作成に向けて、ファストトラックの検討チーム「Physical Intelligenceチーム」を立ち上げた。その後、チーム名を「フィジカルAIシステム」に変更し、調査・分析・検討を継続した。チームでは、国内外の研究開発動向や技術水準を調べ、そこからスコープを段階的に絞り込んだ。また、提言の方向性を明確にするため、有識者とのインタビューや意見交換も実施した。

CRDSは、検討で得た国際動向や基礎研究課題に関する知見を、文部科学省基礎・基盤研究課が主催する基礎研究振興部会（第14回・第15回）^[39]で報告した。これらの知見は、同省が決定した令和7年度の戦略的創造研究推進事業の戦略目標「実環境に柔軟に対応できる知能システムに関する研究開発」^[40]の検討作業にも情報提供を行った。

さらに、AIとロボティクスの融合によって実現される「フィジカル空間に影響力を持つAI」、すなわちフィジカルAIシステムの今後の可能性について、CRDSが仮説的に整理した方向性を検証するため、科学技術未来戦略ワークショップを開催した。ワークショップでは、技術的課題、研究開発体制や社会実装の在り方など、多角的な観点から議論を実施した。その成果は、2025年3月に報告書として公表した^[41]。

以上の調査・分析の結果と、ワークショップにおける議論などを踏まえて、令和7年4月に本戦略プロポーザルの発行に至った。

専門家へのインタビュー

（50音順、敬称略、所属・役職は実施時点）

浅間 一	東京大学 国際高等研究所 東京カレッジ 特任教授（名誉教授）
飯田 史也	ケンブリッジ大学 工学部 准教授
石川 冬樹	国立情報学研究所アーキテクチャ科学研究系 准教授
磯部 達	Preferred Robotics 代表取締役CEO
市川 類	一橋大学イノベーション研究センター特任教授
尾形 哲也	早稲田大学 理工学術院基幹理工学部表現工学科 教授
岡田 慧	東京大学 大学院情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻 教授
岡田 浩之	東京情報デザイン専門職大学 情報デザイン学部 教授
亀田 達也	明治学院大学 情報数理学部情報数理学科 教授
川原 圭博	東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻 教授
河原塚 健人	東京大学 大学院情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻 特任助教
川村 貞夫	立命館大学 理工学部ロボティクス学科 教授
久保 亮吾	慶應義塾大学 理工学部 教授
小林 泰介	国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系 助教
境野 翔	筑波大学 システム情報系 准教授
末岡 裕一郎	大阪大学 大学院工学研究科 助教
杉原 知道	オムロン株式会社技術・知財本部ロボティクスR&Dセンタ副センタ長

高橋 城志	Preferred Networks
谷口 忠大	京都大学大学院情報学研究科教授
辻 俊明	埼玉大学工学部電気電子物理工学科 准教授
寺田 耕志	Preferred Robotics CTO
堂前 幸康	産業技術総合研究所 人工知能研究センター 実体知能研究チームチーム長
長井 志江	東京大学 ニューロインテリジェンス国際研究機構 特任教授
西尾 理志	東京科学大学工学部 准教授
能見 知弘	トヨタ自動車 未来創生センター R-フロンティア部 主査
原田 達也	東京大学先端科学技術研究センター教授
日高 浩太	NTT 人間情報研究所
深谷 直樹	Preferred Networks
前田 新一	Preferred Networks
松嶋 達也	東京大学 松尾・岩澤研究室 特任研究員
水上 拓也	新潟大学 創生学部 助教
村田 真悟	慶應義塾大学 理工学部 電気情報工学科 准教授
山口高平	神奈川大学 情報学部 教授

CRDS 科学技術未来戦略ワークショップ「フィジカルAIシステム」

1. 概要

日程：2025 年1月26日（日）13:00～16:00

場所：オンライン開催

主催：国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）

2. 開催趣旨

JST 研究開発戦略センター（CRDS）は、科学技術に求められる社会的・経済的なニーズを踏まえ、科学技術の現状を俯瞰し、国として重点的に推進すべき研究領域や課題、その推進方策に関する提言を行っている。この度、この活動の一環として、AIとロボティクス分野の進展において今後重要となるであろう、フィジカル空間での影響力を持つAI（フィジカルAIシステム）に関する研究開発課題とその方向性について議論を行うワークショップを開催した。

フィジカルAIシステムとは、物理的環境と直接相互作用し、人間のように柔軟かつ適応的にタスクを遂行する能力を備えたAIロボットを指す。このシステムは、サイバー空間で成果を上げてきた従来のAI技術とは異なり、実世界での課題解決に向けた新たな価値を創出することを目指している。

本ワークショップでは、フィジカルAIシステムが多様なタスク環境に適応するための基盤モデルの構築、身体性知能の解明に向けた基礎研究、人間との協働作業における安全性や信頼性の確保といった論点についての最新動向を共有する。総合討議では、実世界タスクの遂行能力の限界とその克服、身体性知能の理論的進展と実践的応用、人間とロボットの相互作用に関する社会的・倫理的な課題、さらにAIとロボティクスを包括する研究コミュニティの育成について、参加者が知見を共有し、活発な議論を行った。

3. プログラム（敬称略）

- (1) 挨拶 木村康則（JST CRDS 上席フェロー）
- (2) 趣旨説明 茂木強（JST CRDS フェロー）
- (3) 発表

第一部：実世界で適応的に動けるフィジカルAIの開発

- ・河原塚 健人（東京大学大学院情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻 特任助教）
- ・松嶋 達也（東京大学 松尾・岩澤研究室 特任研究員）
- ・堂前 幸康（産業技術総合研究所 チーム長）

第二部：身体性を備えた知能の解明に向けた研究

- ・村田 真悟（慶應義塾大学 理工学部 電気情報工学科 准教授）
- ・境野 翔（筑波大学 システム情報系 准教授）
- ・小林 泰介（国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系 助教）

第三部：研究開発エコシステム

- ・岡田 浩之（東京情報デザイン専門職大学 情報デザイン学部 教授）
- ・寺田 耕志（Preferred Robotics 社 CTO）

（4）総合討議

（5）閉会

コメンテーター：

- ・尾形 哲也（早稲田大学 理工学術院基幹理工学部表現工学科 教授）
- ・川原 圭博（東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻 教授）
- ・栗原 聡（慶應義塾大学 理工学部 教授）

付録2 国内外の状況

付録2.1 各国の主な研究開発プログラム

(1) 日本の主な研究開発プログラム

2015年に経済産業省によって策定されたロボット新戦略のもと、ロボットの要素技術について中核的な技術の開発、各応用分野の現場ニーズに基づく研究開発等が推進された。ロボットに関する主要な研究開発プログラムについて、応用分野、目標とする技術成熟度レベル（TRL: Technology readiness levels）ごとに一覧表にまとめた。以下に2024年も継続している事業について概要を記す。

NEDO「革新的ロボット研究開発基盤構築事業」2020年度～2024年度

多品種少量生産にも対応可能な産業用ロボットの実現に向け、鍵となる、「ハンドリング関連技術」「遠隔制御技術」「ロボット新素材技術」「汎用動作計画技術」等の要素技術に係る基礎・応用研究について、産業界と大学等研究機関とが協調して推進する研究開発を支援。

SIP⁷第3期「人協調型ロボティクスの拡大に向けた基盤技術・ルールの整備」2023年度～2027年度

HCPS融合人協調ロボティクス（「人」＋「サイバー・フィジカル空間」融合人協調ロボティクス）という新領域の技術開発・社会実装を推進することで、人とテクノロジーが共生・協調して相互に支え合う社会（テクノピアサポート社会）を実現することを目指し、HCPS融合人協調ロボティクスの基盤技術の開発と社会実装技術のさらなる強化を図るための開発を実施している。

ムーンショット型研究開発事業 目標3「自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」2020年度～

ロボットの高度な身体性とAIの自己発展学習を両立するAIロボットの実現に向け、「人が活動することが難しい環境で、自律的に判断し、自ら活動し成長するAIロボット」「自然科学の領域において、自ら思考・行動し、自動的に科学的原理・解法の発見を目指すAIロボットシステム」「人が違和感を持たない、人と同等以上な身体能力を持ち、人生に寄り添って一緒に成長するAIロボット」を2050年に実現することを目指した研究開発を推進している。

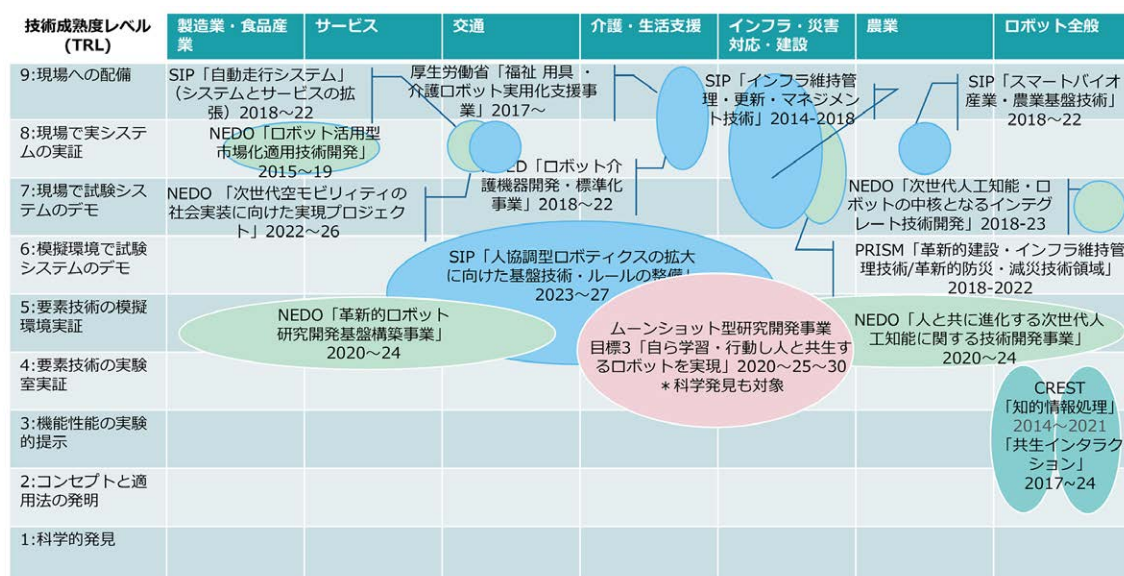


図 S2-1 日本で実施されている主な研究開発プログラム（分野別）（2024年度現在）

ロボット関連の主要な研究開発プログラムを技術成熟度レベル（TRL）で整理した。プログラムの到達レベルに関してはCRDSが独自に整理・評価したものであり全てのサブテーマを網羅するものではない

これらの研究開発プログラムに加え、科研費やJST戦略的創造研究推進事業等において、ロボットに関する基礎研究が実施されている。主な研究開発プログラムを以下に記す。

科研費 新学術領域「人間機械共生社会を目指した対話知能システム学」2019年度～2023年度

意図や欲求を持ち自律的に活動する知能ロボットが、人間との間で、言語を用いながら互いの意図や欲求を理解し合い、共生していく社会の実現を目指し、対話を継続維持するための研究、対話を理解し生成するための研究、ロボット自身の行動決定モデルの構築と相手の行動決定モデルの推定するための研究、ロボット共生社会における社会規範に関する研究を推進している。

科研費 新学術領域「身体－脳の機能不全を克服する潜在的適応力のシステム論的理解（超適応）」2019年度～2023年度

「超適応」プロジェクトは、日本の高齢化に伴う運動機能や高次脳機能の低下に対し、脳－身体システムの適応力を向上させるメカニズムを解明することを目的とする。脳神経科学とシステム工学を融合し、神経ネットワークの再構築や新たな適応プロセスを解析することで、脳機能障害やフレイルの予防・改善策を提案し、健康寿命の延伸に貢献することを目指している。

JSTにおいては、CREST「人間と調和した創造的協働を実現する知的情報処理システムの構築」（2014年度～2021年度）、「人間と情報環境の共生インタラクション基盤技術の創出と展開」（2017年度～2024年度）、未来社会創造事業「超スマート社会の実現」領域（2017年度～2031年度）や、CRONOS（情報通信科学・イノベーション基盤創出）（2024年度～）等においても、ロボット関連の課題が採択され、研究開発が推進されている。

2025年度に開始した新規プログラムとして、JSTでは、CREST「実環境知能システムを実現する基礎理論と基盤技術の創出」（2025年度～2032年度）と、さががけ「実世界知能システムの基盤創出」（2025年度～2030年度）が募集を開始した。また、NEDOでは、「ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業（ロボティクス分野におけるソフトウェア開発基盤構築）」（2025年度～2027年度）および、「先導研究プログラ

ム/新技術先導研究プログラム・フロンティア育成事業」における「II-B1：人への依存度の高い業務の代替、協業を可能とするAI enhanced ヒューマノイドロボットの開発」（2025年度～2027年度）が立ち上がっている。

(2) 米国の主な研究開発プログラム

2024年に米国のロボット工学に関するロードマップ”Roadmap for US Robotics: Robotics for a Better Tomorrow 2024 Edition”^[42]が更新された。過去4年間で国家ロボティクス・イニシアティブ（NRI）が終了し他結果、政府の投資は分散し、米国の長期的な国際競争力が低下するリスクが指摘された。

National Sanitation Foundation（NSF）は、NRIの後継事業として、”Foundational Research in Robotics”（2020～2029）^[43]を始動させた。ロボティクス研究全般にまたがる基盤の提供が目的で、物理的なプラットフォームでの実験的検証が強く求められる。省庁横断ではなくロボティクスおよびAIロボティクスの基礎研究にファンディングする。2024年時点での主なプロジェクトを下表に示す。

表 S2-1 NSF Foundational Research in Robotics の採択テーマ（2024年時点）

採択テーマの分類	具体的な研究内容
人間とロボットのシームレスな統合と協調	AIを活用した人間とロボットの協調作業の実現、タスク遂行における人間とロボットの役割の柔軟な分担、非構造化環境における人間とロボットの協調作業の実現、ハプティクス技術を活用した人間とロボット間の自然なコミュニケーションなど
ロボットの自律性と適応性	タスク遂行におけるロボットの自律性の向上、未知の環境へのロボットの適応能力の向上、不確実な状況下でのロボットの意思決定能力の向上、ロボットの学習と成長能力の向上など
ロボットの操作性と精度	ロボット動作の精度と効率の向上、複雑な操作をこなせるロボットの開発、動的な環境下でのロボット操作の安定性向上、微小な物体や変形可能な物体を操作できるロボットの開発など
ロボットの信頼性と安全性	ロボット動作の安全性向上、ロボット故障の予測と予防、ロボットと人間の安全性を確保できる技術の開発、倫理的なガイドラインに基づいたロボット開発など
ロボットの応用範囲の拡大	アセンブリ作業におけるロボットの活用、農業におけるロボットの活用、医療におけるロボットの活用、災害救援におけるロボットの活用、家庭におけるロボットの活用など

国防高等研究計画局（DARPA）は、ロボットの研究開発におけるブレイクスルーを促すため、”DARPA Grand Challenge”（2004～2007）、”DARPA Robotics Challenge”（2013～2015）等の競技会形式のプログラムを主催している。2019年から2021年にかけて開催された”DARPA Subterranean Challenge”（地下チャレンジ）では、自律ロボットが人間の操作なしに未知の複雑な地下空間を探索することにより、地図の作製や、目標物の発見等が求められており、従来の競技会より、さらに開かれた環境への適応が要求される内容となっている^[44]。

(3) 中国の主な研究開発プログラム

中国は2015年「中国製造2025」、2021年に「第十四次五カ年計画」（2021-2025）を発表し、製造強国によるサプライチェーン強化を明確化した。その中にスマート製造・スマートロボットが含まれる。

国家重点研究開発計画「スマートロボット」（2020～2024）には、基礎先端技術として、編組・折り畳みの原理に基づく一体設計、ロボットの剛柔軟構造と剛性変化技術、生体細胞生物が混在するロボット駆動・制御、バイオニクロボットの群集運動に関わる主要技術、5G通信に基づくマルチロボット技術などさまざまな計画が列挙されている。また、国家重点研究開発計画「スマートロボット」（2022～2024）は、基礎先端技術、共通関連技術、産業用ロボット、医療用ロボット、特殊ロボットなどが含まれる。基礎研究から応

用研究まで含む。これらの計画は、基礎研究から応用研究までを幅広くカバーしており、中国におけるロボット技術の発展を促進することを目的としている。

(4) EUの主な研究開発プログラム

EUの研究・イノベーションの枠組みであるHORIZON Europe(2021～2027)において、「人工知能・データ・ロボティクス」パートナーシップと呼ばれる官民連携の枠組みで長期的な取り組みを進めている。2030年までの予算は26億ユーロである。2024年の公募テーマは下表のとおり。

表 S2-2 EU Horizon Europe「人工知能・データ・ロボティクス」における公募テーマ（2024年）

技術分野	公募テーマ（応用研究）
AI・ロボティクス融合	- AI強化ロボティクスシステムによるスマート製造 - AI、データ、ロボットによるグリーンディールの実現 - AI、データ、ロボットによる職場革命 - ロボット認知能力の限界への挑戦 - 産業最適化のためのAI、データ、ロボット
ロボティクス	- 物理的知能と性能の限界への挑戦 - 主要な分野におけるロボット機能の向上 - 先進的な人間ロボット相互作用によるAI、データ、ロボット分野における産業リーダーシップ - AI駆動自律ロボットの実現に向けた新しいパラダイムとアプローチ
AI	- 信頼できる欧州産AI、データ、ロボット技術の欧州における調整、認識、標準化、採用 - 信頼できるAIを活用したデータの最大化 - 主要な社会課題への対処に信頼できるAIデータとロボット技術を活用した大規模パイロットプロジェクト - 高度な言語技術における自然言語理解と相互作用 - AIの壮大な課題への取り組み - 説明可能で堅牢なAI - 機械と人間の最高の機能を組み合わせた協調型知能
AI × ヒューマンインタラクション	- 機械と人間の最高の部分を組み合わせた協調型知能 - 産業競争力とグリーン転換を促進するAI、データ、ロボット分野における産業リーダーシップ

付録2.2 AIロボットの研究力

AIロボットの研究力について、論文・特許に関する調査を実施した。

ロボット研究におけるAI技術の影響を明らかにするために以下の3種類の集合を定義した⁸。図S2-2に、直近10年に学会で発表された（採択論文）の文献集合の件数と包含関係を示す。

C0⁹：robot* × 人工知能全体

C1¹⁰：robot* × “機械学習・深層学習”

C2¹¹：robot* × “生成モデル”

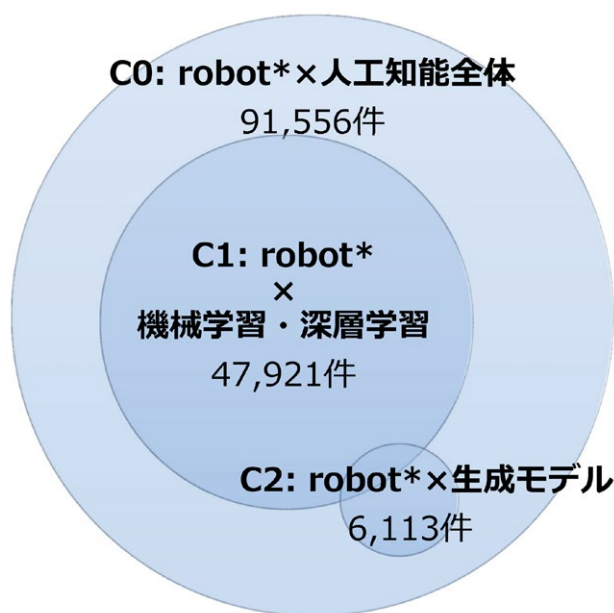


図 S2-2 文献集合の包含関係

なお、robot* は、「robot」で始まる複数の関連語（例：robot、robots、robotics など）を一括して検索するための表記である。検索語の末尾に「*」を付けることで、語尾が異なる複数の語をまとめて対象とすることができる。

論文について、図S2-3にC0、C1、C2のトレンドと、図S2-4に主要国における文献集合ごとのトレンドを示す。主な傾向として、論文数はいずれも増加傾向にあり、C0（AIロボット全体）の伸びはC1（機械学習・深層学習関連）の伸びが牽引しており、生成モデル関連は特に2022年以降急増していることが見て取れる。また、国別動向では、特に、米中の論文数が多く、伸びの立ち上がりも早い。

8 ソース：Scopus API <http://api.elsevier.com> および <http://www.scopus.com> どちらも2025年4月アクセス、文献種：article, review, conference paper, conference review、出版年：2014-2024、検索日：2025/3/24

9 検索キーワード：artificial intelligence, intelligent robot, machine learning, reinforcement learning, deep learning, imitation learning, generative, foundation model, large language model, LLM

10 検索キーワード：machine learning, reinforcement learning, deep learning, imitation learning

11 検索キーワード：generative, foundation model, large language model, LLM, transformer

特許については、LexisNexis社 PatentSight+ を使用し、論文と同じキーワードを用いて特許のタイトル、要約、請求の範囲で複数国に出願された特許を検索した。発明国別の生存特許ファミリーの推移について、[図 S2-5](#) に C0 のトレンドを、[図 S2-6](#) に C2 のトレンドを示す。C0、C2 とも 2019 年以降の伸びが顕著である。C0、C2 とも米国が 1 位である。

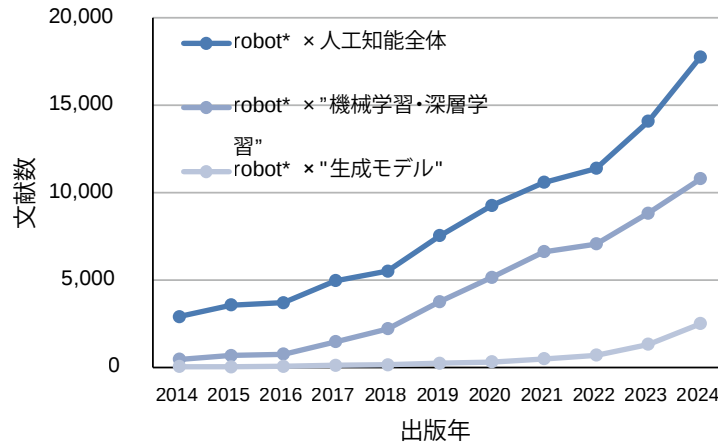


図 S2-3 文献数の年次推移（2024 年の値は 2025 年 3 月時点での暫定値）

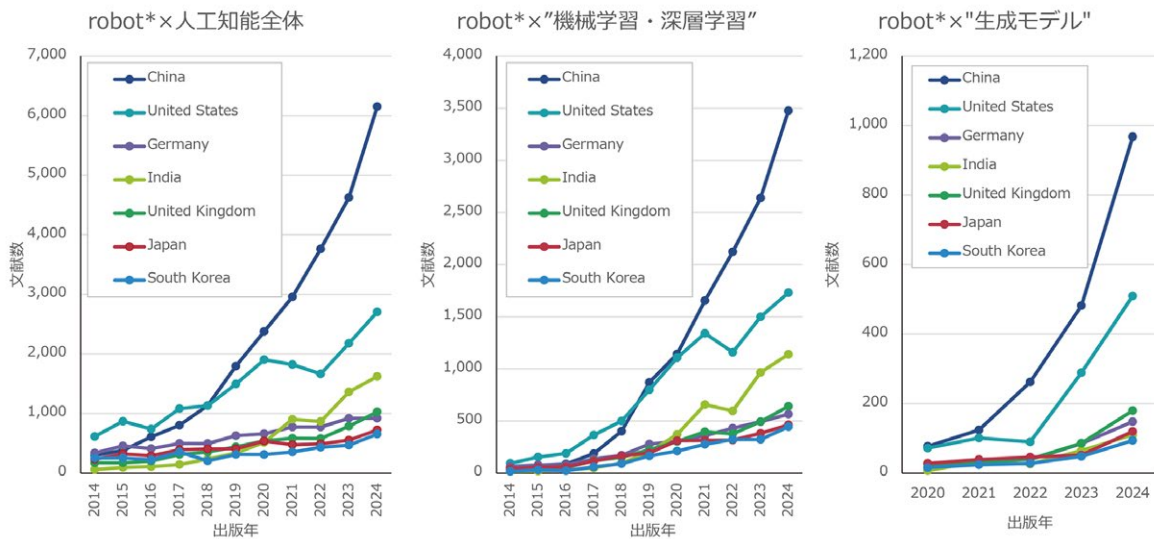


図 S2-4 文献集合ごとの年次推移（2024 年の値は 2025 年 3 月時点での暫定値）

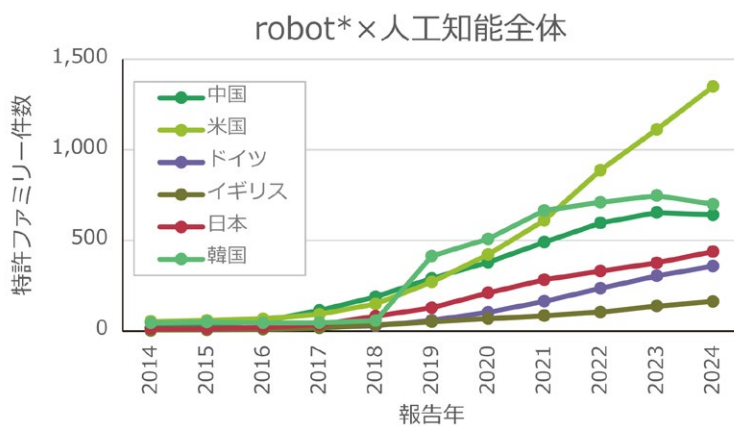


図 S2-5 C0の特許動向

TitleAbstractClaims=((robot*) AND ("artificial intelligence" OR "intelligent robot*" OR "machine learn*" OR "reinforcement learn*" OR "deep learn*" OR "generative" OR "foundation model*" OR "large language model*" OR LLM OR "transformer model"))

※複数国出願限定

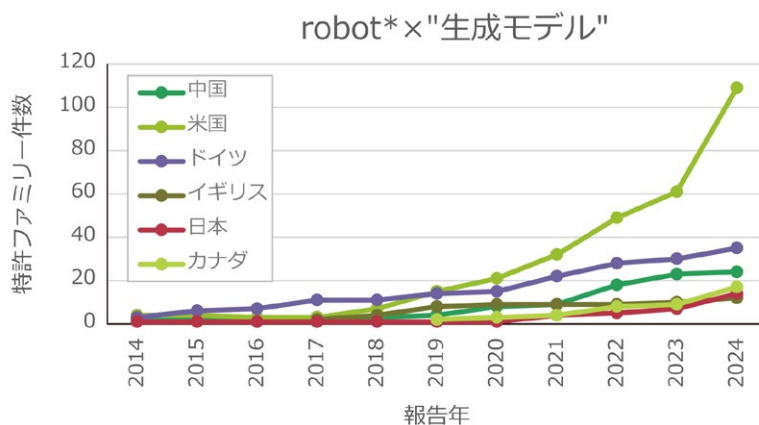


図 S2-6 C2の特許動向

TitleAbstractClaims=(robot* AND ("generative" OR "foundation model*" OR "large language model*" OR LLM OR "transformer model"))

※複数国出願限定

付録2.3 ロボットの社会的経済的影響に関わる研究活動動向

わが国および諸外国で実施されているロボットやAIの社会的経済的影響に関わる研究活動を表S2-3および表S2-4示す。

表 S2-3 日本で実施されているロボットやAIと社会的経済的影響に係る研究活動例

助成機関など	実施内容	年度
JST ムーンショット	ムーンショット目標3：活力ある社会を創る適応自在AIロボット群	2020-
JST 戦略的創造	人の意思決定を操る技術のELSIマッピング作成の企画調査研究課題	2021
JST 戦略的創造	「スマートシティー」の全体論的・個別的ELSIに関する企画調査	2022
JST 戦略的創造	"メタバースが拓く新しいサービスとELSIに関する企画調査	2022
JST-HITE	法・経済・経営とAI・ロボット技術の対話による将来の社会制度の共創	2016-2019
JST-HITE	自律性の検討に基づくなじみ社会における人工知能の法的電子人格	2017-2020
JST-HITE	情報技術・分子ロボティクスを対象とした議題共創のためのリアルタイム・テクノロジーアセスメントの構築	2017-2021
JST-RInCA	萌芽的科学技術をめぐるRRIアセスメントの体系化と実装	2020-2023
JST-RInCA	ELSIを踏まえた自動運転技術の現場に即した社会実装手法の構築	2020-2023
JST-RInCA	研究者の自治に基づく分子ロボット技術のRRI実践モデルの構築	2021-2025
JST-RInCA	人工知能の開発・利用をめぐる自律性および関係性の理論分析と社会実装	2021-2025
JST-RInCA	「共棲ロボット」との親密な関係形成におけるELSIに関する越境型文理融合研究	2023-2027
NEDO	次世代ロボット実用化プロジェクト	2004-2005
NEDO	人間支援型ロボット実用化基盤技術開発	2005-2007
NEDO	サービスロボット市場創出支援事業	2006-2007
NEDO	生活支援ロボット実用化	2009-2013
NEDO	ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト	2017-2022
NEDO	ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト	2017-2022
科研費	人工知能の規範・倫理・制度に関する対話基盤と価値観の創出	2015-2017
科研費	日本型「ロボット共生社会の倫理」のトランスディシプリナリーな探求と国際発信	2016-2020
科研費	メディアクローン攻撃を防御するコミュニケーション系	2016-2021
科研費	ポスト現象学と言語行為論に基づいたコミュニケーションロボットの倫理に関する研究	2018-2021
科研費	エビデンスに基づく介護政策の実証分析	2018-2022
科研費	萌芽技術に対するリスクの認知機構の解明	2018-2022
科研費	技術革新が労働市場に与える影響とそれに伴う最適な政策対応について	2019-2020
科研費	ロボット導入が日本およびアジアの経済成長と雇用に与える影響	2019-2022
科研費	人工知能が浸透した社会を再設計するマルチエージェントシミュレーション立法学の創成	2019-2022
科研費	AIとロボットの社会受容におけるテクノアニミズム概念の有効性の検討と国際比較	2019-2023
科研費	対話知能システムの研究開発および社会実装のための法社会規範の研究	2019-2024
科研費	ロボットメディアによる社会的認知のコントロール：心理・行動の誘導と臨床倫理	2019-2024
科研費	人間機械共生社会を目指した対話知能システム学	2019-2024
科研費	ロボットや人工知能技術などの技術革新が労働市場に与える影響の理論・数量分析	2021-2024

科研費	近未来の介護ロボットの開発と社会実装のための Ethical Platform 構築	2021-2025
科研費	ロボットサービスの実証実験の実践を支援する仕組みの確立	2022-2023
科研費	MCIあるいは認知症のある高齢者に適したロボット対話方式に関する国際比較研究	2022-2024
科研費	医療介護ロボット活用時の訪問看護倫理ガイドラインの作成と有用性の検証	2022-2025
科研費	AI エージェントと協働する人間の「働き方」と法規制の基礎的研究	2022-2026
科研費	スマートグラスAIのためのプライバシー制御技術	2022-2027
科研費	AI やロボット、ビッグデータ等の先端科学技術の社会的受容における尊厳概念の分析	2023-2028
科研費	法科学分野のELSIに関する俯瞰的マップの構築	2024-2026
日本ロボット学会	ロボット考学研究専門委員会	2017-
日本ロボット学会	ロボットの法および倫理に関する研究専門委員会	2021-2021

表 S2-4 国内外で実施されている AI やロボットと社会的経済的影響に係る研究活動例

地域	主体	実施内容	年
欧州	欧州委員会	RoboLaw プロジェクト ロボティクスと法律の関係に焦点を当てたプロジェクト。次世代ロボットが社会実装される際に起こりうる法的・倫理的課題を欧州を中心とするロボット工学者、法学者、哲学者と検討を行ったもの。成果として「ロボティクス規制のガイドライン」(2014)を出している。	2012
	Horizon Europe 2020	SHERPA project スマート情報システム、AIとビッグデータ分析が倫理、人権に及ぼす影響について分析。	2019-2023
英国	オックスフォード大学	Future of Humanity Institute 将来的な技術の開発能力とその影響について、潜在的なリスク評価をシミュレーション等を通じて行う。数学、哲学、社会科学、自然科学など学際的に研究者を採用。以下、四つの研究領域を設ける。 ・マクロ戦略 ・AIの安全性 ・AIガバナンス ・バイオセキュリティ	2005
		Oxford Internet Institute インターネットやデジタル化の社会的影響に関する研究を実施。情報ガバナンスとセキュリティ、プライバシー、情報と倫理・哲学についての研究を主とし、近年はテクノロジーと公平性、フェイクニュースにも焦点を当てている。	2001
		Responsible Technology Institute 新興技術がもたらす社会的課題に着目し、責任ある技術の確立に向けた国際的な研究拠点。 AIと意思決定、自律システムのための責任あるAI、デジタル経済のための責任あるロボティクスなどのプロジェクトがある。	2022
	ケンブリッジ大学	Centre for the Study of Existential Risk 現在または将来の技術によって引き起こされる可能性のある脅威を研究することを目的とする。六つの重点領域として、以下を挙げている。 ・グローバルリスクの科学 ・生物学リスク ・地球環境とリスク ・AIによるリスク ・公平性とグローバルリスク ・テクノロジーリスクマネジメント	2012
		Loverhulme Center for Future of Intelligence AIの可能性を最大限活用し、安全性・透明性を担保するための学際的な研究センター。コンピューターサイエンス、哲学、社会科学など学際的に研究者が集まる。AI技術のフォーサイトからガバナンス、倫理、責任体制の検討、安全性、セキュリティ、リスクなど幅広い研究がなされている。	2016

米国	国家科学技術会議 (NSTC) 科学技術政策局 (OSTP)	Preparing for the Future of Artificial intelligence AIだけでなく ロボットの研究開発に対して23の提言を行う。 ロボティクス分野における倫理的諸問題は、多岐にわたる専門分野が関わり、個人の信仰、宗教、文化などに影響され、ロボットの適用を期待する複雑で多様な状況において適切に対応できるアルゴリズムが必要であると述べられる。	2016
	スタンフォード大学	AI 100 AIが法・経済・社会等にもたらす長期的な影響を学際的に調査。AI研究者の他、意思決定科学、オペレーションズリサーチ、生物学、医学、情報学、倫理学、哲学、心理学、法学など学際的に研究者が参画している。	2016-2021
		the Institute for Human-Centered AI (HAI) 人間中心のAI活用を推進を進める。研究内容は「知能 (intelligence)」「人間機能の拡張」「人間への影響」。人間への影響では、AIと意思決定、監視、AIの誤用等が社会制度、産業構造、経済成長、政治等に与える影響について研究をしている。	2019
		Center for Internet and Society (CIS) スタンフォード大学のロースクール内に設置。テクノロジーと法、AI規制、プライバシー、ロボット法について研究。	2000
		CodeX スタンフォード大学のロースクール内に設置。法学部とコンピューターサイエンス学部との協働運営。法的推論の機械化を扱う計算法を活用して、研究者、弁護士、起業家、技術者が協力してよりよいリーガルテクノロジーの開発を実施。	2013
	ハーバード大学	Berkman Klein Center ハーバード大学内に設置されているサイバースペースの動向および規範、標準を研究し、法的課題を検討する。近年、AIと法、責任ある生成AI—説明責任のある技術ガバナンスに関するプロジェクトを実施。	1998
	ニューヨーク大学	AI Now Institute 私立ニューヨーク大学の研究機関として設置。AIに関する政策研究、社会的影響（特に雇用、プライバシー、差別）に焦点を当てて研究を行っている。	2017
	IEEE	The IEEE Global Initiative on Ethics of Autonomous and Intelligent Systems AI・自律システム開発に関与する関係者が倫理的配慮を行うために教育を受け、テクノロジーが人類の利益のために進歩することを目指す。AI倫理に関するEthically Aligned Design version2報告書をまとめる。報告書では、人権、公平性、透明性、アカウントビリティ、悪用・誤用、プライバシー、安全性、教育、法的位置づけ、幸福等が重要項目として挙がる。	2016-2021
	IEEE	A Roadmap for US Robotics: From Internet to Robotics 2009年に策定を開始した米国のロボットロードマップ。2013年、2016年、2020年に改定。 法的、倫理的、経済的コンテキストのセクションでは、安全、自由、労働への影響、社会的インタラクション、プライバシーとセキュリティの検討が提示されている。	2020
	Henrik I. Christensenを中心に複数の大学が参画	A Roadmap for US Robotics: From Internet to Robotics 2009年に策定を開始した米国のロボットロードマップ。2013年、2016年、2020年に改定。 法的、倫理的、経済的コンテキストのセクションでは、安全、自由、労働への影響、社会的インタラクション、プライバシーとセキュリティの検討が提示されている。	2020

日本	東京大学	東京大学未来ビジョンセンター センター内に技術ガバナンス研究ユニットを設置。技術に関わる多様な技術革新の便益とリスクを俯瞰的に踏まえて行う、技術の社会影響評価（新たなテクノロジー・アセスメント）などの社会意思決定支援の枠組みを研究。	2019
	大阪大学	社会技術共創研究センター（ELSIセンター） 新規科学技術の倫理的・法的・社会的課題（ELSI: Ethical, Legal and Social Issues）に関する総合的かつ学際的な研究・実践組織。	2020
	中央大学	ELSIセンター AI等の科学技術の進化を社会実装するために必要な法制度や倫理観、さらには社会のありようについて追求し、社会のさまざまな課題解決を目指す。	2021
	広島大学	未来共創科学研究本部共創科学基盤センター 新しい科学技術の実装に焦点を当て、倫理的・法的・社会的課題（ELSI）や責任ある研究とイノベーション（RRI）の取り組みを強化	2023
	理化学研究所	革新知能統合研究センター 人工知能倫理・社会チーム、社会におけるAI利活用と法制度チーム 理化学研究所内に設置されたAIと倫理、法に関する研究チーム。人間とAI技術の関係に関する検証、AI倫理を核とした新たな倫理モデルの開発、プライバシー保護技術、人工知能の社会的影響などを実施。	2016

付録3 用語集

用語 / 英語	説明
AI モデル / AI Model	人工知能が機械学習により学習した知識やパターンをもとに、特定のタスクを実行するためのアルゴリズムやシステム。入力データから予測や分類、文章・画像生成などの出力を生成する。代表的なモデルには、ニューラルネット、トランスフォーマー、強化学習などがある。
AI ロボット / AI Robot	物理的な身体（センサー、アクチュエーター、計算資源など）を備え、人工知能（AI）によって環境との相互作用、タスクの実行、状況の認識、行動の選択などを自律的に行うロボット。特に、本プロポーザルでは、単体で動作し、環境との相互作用を通じて自律的にタスクを遂行できるロボットを指す。これには、人型ロボット（全身、上半身、下半身）および四足ロボットが含まれる。
エッジAIチップ / Edge AI Chip	データが生成される現場（エッジ）で、AI処理を行うための専用チップ。低遅延性、プライバシー保護、オフラインでの動作などのメリットがある。
頑健性 / Robustness	不確実な環境や想定外の状況下においても、安定して動作し目的を達成できる能力。環境変化への適応性、ノイズやセンサーの誤差に対する耐性、機械的な故障や部分的な機能停止への対応、予期しないインタラクションへの対処能力など。農業、災害対応などの過酷な環境や、変化が激しい環境での使用に必要とされる。
基盤モデル / Foundation Model	基盤モデルとは、大規模データを事前学習した汎用的なAIモデルであり、特定の目的や状況に依存せず、多様なタスクへの適用が可能である。応用の際には、利用目的に応じて調整や追加学習を行うことで、多様な機能やサービスに適用できる。
強化学習 / Reinforcement Learning	人が行動において、報酬とペナルティーの関係を認識することで、より多くの報酬を得ようと自発的に行動を変容させてゆく行動心理学の理論に基づく学習方式。強化学習に深層学習を導入した方式を深層強化学習と呼ぶ。
協働性 / Collaboration	人間の動作や意図をリアルタイムに把握し、物理的空間を共有しながら、衝突や危険を回避しつつ、補完的・並列的にタスクを遂行できるロボットの能力。人とロボットが同じ空間で作業するため必須な要件である。
巧緻性 / Dexterity	人間が手で行うような複雑で繊細な作業をどれだけ巧みにこなせるかを示す指標。具体的には、多様な物体の操作、繊細な作業、非構造化環境での作業、感覚フィードバックに基づく制御が必要な作業など。ロボットが人間社会でより幅広く活躍するための重要な要素である。
自律性 / Autonomy	外部からの直接的な指示や操作に依存せず、環境情報をもとに状態を把握し、あらかじめ設計された目標や方針に基づいて行動を選択・実行する能力。ロボットやシステムの自律性は、次のように段階的にとらえられる。すなわち、人間が逐次操作する段階（手動操作）、操作を部分的に代替・補助する段階（操作支援）、特定の条件下で一定の判断と動作を行う段階（条件付き自律）、より広範な状況に適応して継続的に動作する段階（高度自律）、そして外部からの入力なしに任務を継続できる段階（完全自律）へと発展する。
深層学習 / Deep Learning	多層ニューラルネットワークを用いた機械学習方式である。特徴量空間上での識別境界だけでなく、特徴量そのものも学習できる点が革新的で、画像認識・音声認識等の分野で従来方式を大きく凌駕する性能を示して注目を浴びた。

身体性 / Embodiment	身体性とは、知能や行動が、物理的な身体を通じた環境との相互作用に基づいて形成されるという認知科学的・工学的概念である。運動能力、感覚フィードバック、物理的制約などが含まれる。
身体性知能 / Embodied Intelligence	身体性を通じて環境と相互作用しながら形成される知能。この概念は、「身体性を有する生物の知能（人間や動物）」と「身体を備えた人工知能（ロボット）」の両方を含む上位概念である。フィジカルAIはこの中の「人工的な身体性知能」に相当する。
生成AI / Generative AI	与えられた入力に対して、自然言語や画像などの新たな出力を生成するAI技術。文章、音楽、画像、動画などを生成可能。
世界モデル / World Model	AIロボットが観測情報に基づき、環境の構造や状態変化を内在的に再構成し、行動の予測・選択・計画に活用するための内部モデルである。部分的な観測しか得られない状況や未知の環境においても、環境を仮想的に再現し、自律的な行動決定を可能にする。
ソフトロボティクス / Soft-robotics	柔軟材料に特有の機械的・電氣的・化学的性質を積極的に利用し、従来の硬いロボットが苦手とする環境への適応を目指すロボティクス分野である。主要な研究テーマは、柔軟性を積極的に利用した新しいロボットの開発、柔軟物体のモデル化や制御、生物システムにおける柔軟性の機能の解明である。
電気自動車（EV） / Electric Vehicle	電気を動力源とする自動車の総称であり、車載バッテリーに蓄えた電力によってモーターを駆動させる。電動化技術、AIによる制御、センサーによる環境認識などの高度化が進展しており、ロボット技術との技術的親和性も高い。
認知発達ロボティクス / Cognitive Developmental Robotics	ロボットが人間のように、身体を通じた環境との相互作用を通じて知能や言語を段階的に獲得する過程を理解・再現しようとする学際的研究分野である。発達心理学、認知科学、神経科学の知見を取り入れ、能動的学習や予測符号化に基づく発達のAIの構築を目的とする。日本において先駆的に展開されてきた。
フィジカルAI / Physical AI	本プロポーザルでは、センサーやアクチュエーターを介して物理環境と直接相互作用し、その過程における入力と出力の結果に基づいて、知的機能を獲得・発達させる人工知能を指す。
フィジカルAIシステム / Physical AI System	物理的な機構（センサー、アクチュエーターなど）を基盤として、環境と相互作用しつつ知能を発達させ、行動、学習、判断を統合的に実行するシステム全体を指す。これには、AIロボットの他、自動運転車、重機、家庭用ロボット、産業用ロボット、スマートハウス、スマートファクトリー、スマートシティ、および宇宙船などが含まれる。
包摂アーキテクチャー / Subsumption Architecture	ロボットの制御を階層構造化し、下位層ではセンサーからの入力に応じて障害物を避けるといった単純な行動を担い、上位層ではロボットの全体目的に沿った制御を行うことで、即時的な対応を可能とする制御の仕組み。
模倣学習 / Imitation Learning	人間の操作や行動の例示に基づいて、ロボットがその振る舞いを模倣的に学習する手法である。従来の報酬設計が困難なタスクに対して有効であり、深層学習との組み合わせにより、高次元かつ複雑な動作の獲得が可能となる。実機による学習、シミュレーション環境での訓練、自己模倣などの手法があり、ロボット基盤モデルやマニピュレーション能力の向上に活用される。
予測符号化 / Predictive Coding	生物は身体や環境からの感覚信号と脳が内部モデルをもとにトップダウンに予測する感覚信号との誤差を最小化するように、内部モデルの更新や環境への働きかけを実行するという外界の認識モデル。脳科学の仮説「自由エネルギー原理」から導出される。

ロボット / Robot

センサーとアクチュエーターを用いて物理的に周囲の環境と相互作用し、人間の操作によりあるいは、自動的に動作する機械を指す。これには、家庭用ロボット、産業用ロボット、医療用ロボット、サービスロボット、エンターテインメントロボット、教育用ロボット、およびコミュニケーションロボットなどが含まれる。

ロボカップ / Robocup

ロボットに関する国際的な競技会の一つ。発足当初は2050年までに自律型ロボットのチームがW杯優勝チームに勝つことを目指すサッカー競技のみであったが、災害救助、家庭内ロボット、産業用ロボットに関する種目が追加された。他にも将来のロボットに期待されるタスクを想定した競技会として World Robot Summit (WRS) において実施されたパートナーロボットチャレンジ、フューチャーコンビニエンスストアチャレンジ等がある。

ロボット基盤モデル / Robot Foundation Model

ロボットに特化して設計・学習された基盤モデル。物理環境での実行や対話を想定し、動作制御、物体操作、感覚処理、環境変化への適応など、ロボティクス固有の要求に対応する。ロボットの知能を支える中核的なAIモデルとして、多様なロボットタスクに汎用的に活用されることを目指す。

参考文献

- [1] 科学技術振興機構 研究開発戦略センター（CRDS）. (2025). 人工知能研究の新潮流 2025 ～基盤モデル・生成AIのインパクトと課題～（CRDS-FY2024-RR-07）. 科学技術振興機構.
- [2] 「2024年版 協働ロボット市場の現状と将来展望」 矢野経済研究所
- [3] 厚生労働省, 介護人材確保に向けた取り組み https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_02977.html (2025年4月アクセス)
- [4] 厚生労働省, 「ロボット技術の介護利用における重点分野」を改訂しました https://www.mhlw.go.jp/stf/juutenbunya_r6kaitei_00001.html (2025年4月アクセス)
- [5] フォーチュンビジネスインサイト「自動運転車の市場規模、シェア、新型コロナウイルス感染症の影響分析、レベル別（L1、L2、L3、L4、L5）、車両タイプ別（乗用車と商用車）、および地域予測、2023年～2030年」 <https://www.fortunebusinessinsights.com/jp/自動運転車市場-109045> (2025年3月アクセス)
- [6] H. Moravec, *Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence*. Cambridge, MA: Harvard Univ. Press, 1988.
- [7] R. A. Brooks, "Intelligence without representation," *Artificial Intelligence*, vol. 47, no. 1–3, pp. 139–159, 1991.
- [8] H. L. Dreyfus, *What Computers Still Can't Do: A Critique of Artificial Reason*, rev. ed. Cambridge, MA: MIT Press, 1992.
- [9] L. Suchman, *Human-Machine Reconfigurations: Plans and Situated Actions*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007.
- [10] S. Pinker, *The Blank Slate: The Modern Denial of Human Nature*. London: Penguin Books, 2002.
- [11] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning," *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444, 2015.
- [12] RT-2: Vision-Language-Action Models Transfer Web Knowledge to Robotic Control, arXiv:2307.15818.
- [13] Open X-Embodiment: Robotic Learning Datasets and RT-X Models, <https://robotics-transformer-x.github.io/> (2025年4月アクセス)
- [14] Shao et al., "3D-VLA: A 3D Vision-Language-Action World Model", arXiv:2403.09631.
- [15] RSJ2024 チュートリアルB「ロボット基盤モデルの実ロボット応用」
- [16] サカナAI進化的モデルマージ, <https://sakana.ai/evolutionary-model-merge-jp/> (2025年4月アクセス)
- [17] Zhu et al., *Few-shot Adaptation for Manipulating Granular Materials Under Domain Shift*, RSS 2023
- [18] Goyal et al., *RVT-2: Learning Precise Manipulation from Few Demonstrations*, RSS 2024
- [19] Shen et al., *Distilled Feature Fields Enable Few-Shot Language-Guided Manipulation*, CoRL 2023
- [20] カーネマン, ダニエル (著), 村井章子 (訳), 『ファスト&スロー あなたの意思はどのように決まるか? (上・下)』, 早川書房, 2012年. (原著: Kahneman, Daniel, *Thinking, Fast and Slow*, Farrar, Straus and Giroux, 2011.)

- [21] 境野翔,「制御と学習の統合による再現性の高い動作生成モデル」, 科学技術未来戦略ワークショップ 報告書 フィジカルAIシステム, CRDS-FY2024-WS-07、2024年
- [22] Friston, Karl, “The free-energy principle: a unified brain theory?”, *Nature Reviews Neuroscience*, Vol.11, pp.127–138, 2010.
- [23] Asada, Minoru et al., “Cognitive developmental robotics: A survey,” *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, Vol.1, No.1, pp.12–34, 2009.
- [24] 早稲田大学, “深層予測学習型ロボット制御技術の開発”, <https://www.waseda.jp/top/news/79811> (2025年4月アクセス)
- [25] R. Sakai, T. Kaneko, and S. Shiraishi, "Framework for Fine-grained Recognition of Retail Products from a Single Exemplar," in *2023 18th International Conference on Knowledge Science, Engineering and Management (KSEM)*, August 2023, doi: 10.1109/KST57286.2023.10086714.
- [26] Danijar Hafner et al., "Mastering Diverse Domains through World Models", arXiv:2301.04104
- [27] Lukas Brunke et al., "Safe Learning in Robotics: From Learning-Based Control to Safe Reinforcement Learning," arXiv:2108.06266
- [28] Dietterich, Thomas G. “AI in Open Worlds: A Progress Report,” Keynote Lecture, International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-24), Jeju, South Korea, August 8, 2024.
- [29] 研究開発戦略センター「ELSIからRRIへの展開から考える科学技術・イノベーションの変革 政策・ファンディング・研究開発の横断的取り組みの強化に向けて（—The Beyond Disciplines Collection—）」(2022) CRDS-FY2021-RR-07、研究開発戦略センター「科学技術イノベーション政策における社会との関係深化に向けて 我が国におけるELSI/RRIの構築と定着（—The Beyond Disciplines Collection—）」(2019)CRDS-FY2019-RR-04
- [30] 米澤朋子「擬人化メディアと Human-Agent Interaction : 「情熱」のあるやり取りを目指して」 人工知能 36 巻 3 号 (2021) 377-396、大澤博隆「ヒューマンエージェントインタラクションの研究動向」 人工知能学会誌 28 巻 3 号 (2013) 405-411
- [31] 上出寛子、新井健生「人間らしいロボットに対する心理的安心」、科学技術社会論研究, 第16号 (2018) 43-53、新井健生「安心なロボットを考える」『日本ロボット学会誌』 Vol.36 No.4 (2018) 266–269
- [32] 岡田 美智男. (2012). 弱いロボット (シリーズ ケアをひらく). 医学書院
- [33] 厚生労働省「医療デジタルデータの AI 研究開発等への利活用に係るガイドライン」(2024) <https://www.mhlw.go.jp/content/001310044.pdf> (2025年4月アクセス) 日本総合研究所「訪問系や通所系サービスにおける介護ロボット・ICT 等のテクノロジー活用及び介護現場におけるAI技術の活用などを通じた生産性向上の取組の実態調査研究事業 報告書」令和6年度 老人保健事業推進費等補助金 老人保健健康増進等事業 (2025) https://www.jri.co.jp/MediaLibrary/file/column/opinion/pdf/2504_mhlwkrouken_report_109.pdf (2025年4月アクセス)
- [34] M. Ryan Calo, *Robots and Privacy*(2012) <https://www.cs.cmu.edu/~illah/CLASSDOCS/CaloRobotsPrivacy.pdf> (2025年4月アクセス)
- [35] 弥永真生、穴戸常寿『ロボット・AIと法』(2018) 有斐閣、栗田昌裕「ロボット事故と民事責任」『日本ロボット学会誌』 Vol.38 No.1 (2020) 41–46、稲谷龍彦「ロボット事故の刑事責任」『日本ロボット学会誌』 Vol.38 No.1 (2020) 37–40
- [36] EU Parliament, *European Civil Law Rules in Robotics* (2016) <https://www.europarl.>

- europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/571379/IPOL_STU(2016)571379_EN.pdf (2025年4月アクセス) 中川裕志「AIは法人格を持てるのか、持つべきなのか?」日本ロボット学会誌 (2025) 43 巻 1 号 p. 42-47、斉藤邦史「人工知能に対する法人格の付与」情報通信学会誌 (2017) 35 (3),19-27
- [37] Richard Ngo, Lawrence Chan, Sören Mindermann, The Alignment Problem from a Deep Learning Perspective,arXiv, [Submitted on 30 Aug 2022 (v1), last revised 3 Mar 2025 (this version, v7)] <https://arxiv.org/abs/2209.00626> (2025年4月アクセス)
- [38] 科学技術振興機構 研究開発戦略センター (CRDS),『リアルワールド・ロボティクス ～開かれた環境に柔軟に適応するロボティクス学理基盤の創出～』, CRDS-FY2022-SP-02, 2022年8月.
- [39] 文部科学省, 科学技術・学術審議会 基礎研究振興部会 (第14回・第15回), https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu27/index.htm (2025年4月アクセス)
- [40] 文部科学省,「2025年度戦略目標：実環境に柔軟に対応できる知能システムに関する研究開発」, 2024年3月, https://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/2024/mext_000010_00004.html (2025年4月アクセス)
- [41] 学技術振興機構 研究開発戦略センター (CRDS),『科学技術未来戦略ワークショップ報告書：フィジカルAIシステム』, CRDS-FY2024-WR-07, 2025年3月.
- [42] “A Roadmap for US Robotics: Robotics for a Better Tomorrow 2024 Edition”, <https://hichristensen.com/pdf/roadmap-2024.pdf> (2025年3月アクセス)
- [43] National Science Foundation “Foundational Research in Robotics (FRR)” <https://beta.nsf.gov/funding/opportunities/foundational-research-robotics-frr> (2022年6月アクセス)
- [44] “DARPA Subterranean (SubT) Challenge (Archived)” <https://www.darpa.mil/program/darpa-subterranean-challenge> (2022年6月アクセス)

作成メンバー

総括責任者	木村 康則	上席フェロー	CRDS システム・情報科学技術ユニット
リーダー	茂木 強	フェロー	CRDS システム・情報科学技術ユニット
メンバー	青木 孝	フェロー	CRDS システム・情報科学技術ユニット
	嶋田 義皓 ¹⁾	フェロー	CRDS システム・情報科学技術ユニット
	平池 龍一	フェロー	CRDS システム・情報科学技術ユニット
	福島 俊一	フェロー	CRDS システム・情報科学技術ユニット
	吉脇 理雄	フェロー	CRDS システム・情報科学技術ユニット
	馬場 寿夫	フェロー	CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット
	小川 泰嗣 ²⁾	技術主幹	ムーンショット型研究開発事業部
	桐葉 佳明	主任専門員	戦略研究推進部
	森下 明	主任専門員	未来創造研究開発推進部
協力	鈴木 和泉	フェロー	CRDS 安全安心グループ
	村野 文菜	主査	CRDS エビデンス分析グループ

1) 2024 年 9 月まで 2) 2025 年 3 月まで

戦略プロポーザル

CRDS-FY2025-SP-01

フィジカル AI システムの研究開発

～身体性を備えた AI とロボティクスの融合～

STRATEGIC PROPOSAL

Physical AI System

—Integration of Embodied AI and Robotics—

令和 7 年 5 月 May 2025

ISBN 978-4-88890-990-7

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

なお、本報告書の参考文献としてインターネット上の情報が掲載されている場合、当該情報は URL に併記された日付または本報告書の発行日の 1 ヶ月前に入手しているものです。

上記以降の情報の更新は行わないものとします。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.

Please note that all web references in this report were last checked on the date given in the link or one month prior to publication.

CRDS is not responsible for any changes in content thereafter.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



CRDS

<https://www.jst.go.jp/crds/>