

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

AIロボットの研究開発動向 (米欧中)

2024年5月16日

科学技術振興機構(JST)
研究開発戦略センター(CRDS)

茂木 強

t2motegi@jst.go.jp



全体俯瞰

世界動向：基盤モデル、生成AIの登場によりロボットの研究開発が大きな変革を遂げつつある（AIロボット）

- 基礎研究：OpenAI/Googleなどによるロボティクスへの生成AIの適用とAIロボット向け生成AIの研究が並行して進行している
- AIロボット：従来困難だったタスクの実行が生成AIにより可能になりつつある（ヒューマノイドが主流）
- 半導体・AIチップ：エッジやロボット本体で実行可能な半導体開発が競争領域になっている

米国：企業を中心にAIロボットの研究開発で世界を牽引してきたが、ここ数年中国に追われている

- Google/OpenAIなどソフトウェア企業がAI技術のロボット適用を強力に推進し成果を上げつつある
- ハードウェア企業もGoogleやOpenAIからの支援を受けAIロボットの開発に注力、また、TeslaやBoston Dynamicsなどは独自技術でAIロボットを開発し市場投入を狙う、その一方でNVIDIAはエッジAIチップの開発を着々と準備している

欧州：HORIZON EUROPEにおいて官民連携プログラムを主導し研究開発を促進

- HORIZON EUROPE(2021-2027)では、官民協働イニシアチブ「欧州パートナーシップ」の一環として、人工知能（AI）・データ・ロボット技術に対し、官民合わせ26億ユーロの投資を実施した

中国：国家レベルの戦略により技術力や研究者の底上げを強化、論文でも米国に肉薄している

- 国家重点研究開発計画の下で「智能机器人（スマートロボット）」に投資している
- 研究開発でも件数ベースではほぼ全領域で世界一位、トップ1%、10%論文でも米国と一、二位を争う

AIロボティクスの各国における主要プロジェクトと主要プレイヤー

国・地域	政府主導のプロジェクト	産業界	学术界
米国	<ul style="list-style-type: none"> • NSF: National Robotics Initiative 3.0 (2019-2024) • NSF: Foundational Research in Robotics (2020-2029) 	<ul style="list-style-type: none"> • Google Deepmind (AIロボ融合研究) • OpenAI / Figure AI (人型) • Tesla Bot (人型) • Boston Dynamics (人型、4足) • Amazon Robotics (物流) • NVIDIA (エッジAIチップ) 	<ul style="list-style-type: none"> • Stanford (Mobile ALOHA) • Carnegie Mellon University • Massachusetts Institute of Technology • University of Michigan
欧州	<ul style="list-style-type: none"> • HORIZON EUROPE (2021-2027): 人工知能・データ・ロボティクス 	<ul style="list-style-type: none"> • ノルウェー 1X (人型) • スイス ANIbotics (4足) • ドイツ Kuka (双腕) • エストニア Starship Technologies (配送) • スペイン Keybotic (4足) 	<ul style="list-style-type: none"> • スイス ETH (ANIboticsと連携) • 英国 Oxford University • ドイツ Fraunhofer • ノルウェー NTNU • スウェーデン KTH
中国	<ul style="list-style-type: none"> • 中国製造2025 (2018-2025) : スマート製造 (高性能NC工作機械とロボット) • 国家重点研究開発計画: 智能机器人 (スマートロボット) (2021-25) 	<ul style="list-style-type: none"> • Unitree Robotics (人型、4足) • Xiaomi (人型) • Robotics Plus (配膳) • Huawei Technologies • Hangzhou Hikivision Dig. Tech. 	<ul style="list-style-type: none"> • 北京大学 • 清華大学 • 中国科学院 • ハルビン工業大学 • 上海交通大学

海外における研究ファウンディングの現状（米国）

米国においては、Roadmap for US Robotics に基づく米国国立科学財団（NSF）のプログラム NRI3.0 が、各省庁が期待する将来に向けた基礎研究の支援を実施した。2020年からは後継のFRRが、主に基礎研究を支援している。

■ NSF: National Robotics Initiative 3.0（NRI 3.0） 2019～2024

ロボット工学の統合に関する基礎研究をサポート。米国国立科学財団（NSF）が、運輸省（DOT）、国立航空宇宙局（NASA）、国立衛生研究所（NIH）、米国国立衛生研究所（NIOSH）、および米国農務省（USDA）と共同で、各省庁が期待する将来に向けた革新的なロボットの基礎研究を実施する。

2020年で公募完了（開発は2024まで）。採択件数：131件、総額：93百万USD（145億円※）

※1ドル=156円で換算

■ NSF: Foundational Research in Robotics（FRR） 2020～2029

NRIの後継。ロボティクス研究全般にまたがる基盤の提供が目的。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（一部AIロボティクス）の基礎研究にファウンディング。

2020年から公募開始（開発は2029年まで）。採択件数：2024年4月時点で159件、総額：82百万USD（128億円※）

※1ドル=156円で換算

採択テーマの分類	具体的な研究内容
<u>人間とロボットのシームレスな統合と協調</u>	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
<u>ロボットの自律性と適応性</u>	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
<u>ロボットの操作性と精度</u>	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
<u>ロボットの信頼性と安全性</u>	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
<u>ロボットの応用範囲の拡大</u>	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

海外における研究ファンディングの現状（EU）

■ Horizon Europe(2021-2027)におけるロボット分野の研究支援

- 「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（4,350億円※）。Horizon Europeで13億ユーロ、産業界も同額の13億ユーロを拠出。

※1ユーロ=167円で換算

技術分野	公募テーマ（応用研究）
<u>AI・ロボティクス融合</u>	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
<u>ロボティクス</u>	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
<u>AI</u>	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
<u>AI × ヒューマンインタラクション</u>	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

海外における研究ファンディングの現状（中国）

■ 国家重点研究開発計画におけるロボット支援

中国は2015年「中国製造2025」、2021年に「第十四次五カ年計画」（2021-25）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）

2020年予算 6600万元(15億円※)、開発期間：2020-2024
※ 1元 = 23円で換算

国家重点研究開発計画「スマートロボット」（2021）

2021年予算 3.15億元(69億円※)、開発期間：2022-2024
※ 1元 = 23円で換算

1. 基礎先端技術

- 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
- バイオニッ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
- 生命システムに基づくロボットのスマート学習法
- ブレインコンピュータインターフェースと生物学的制御技術
- ロボットの社会的相互作用の理論と方法
- 肺の微小結節に対するロボット検査技術
- 複雑な骨折手術ロボット技術
- 救助ロボット検査の原理と技術

1. 基礎先端技術

- 1.1 ロボットの構造、機能、性能、設計理論
- 1.2 生体機械クロスアコンバードロボット
- 1.3 生体機械システムの相互作用制御と行動の融合
- 1.4 全域感知多機能群ロボット
- 1.5 ロボットハンドスキル及び知能の育成
- 1.6 高地など複雑な環境用ホイールフットロボット
- 1.7 新しいコンセプトロボットシステム（若手科学者用）

2. 共通関連技術

- 2.1 ロボットコア部品の性能向上及び応用
- 2.2 多関節型産業用ロボットの高度化及び応用
- 2.3 産業用ロボットの応用を統合する開発プラットフォーム
- 2.4 産業用ロボットスマートオペレーションシステム

3. 産業用ロボット

- 塗装自動化、電池組み立て、織物自動化

4. 医療用ロボット

- 手術、鍼灸、リハビリ、など

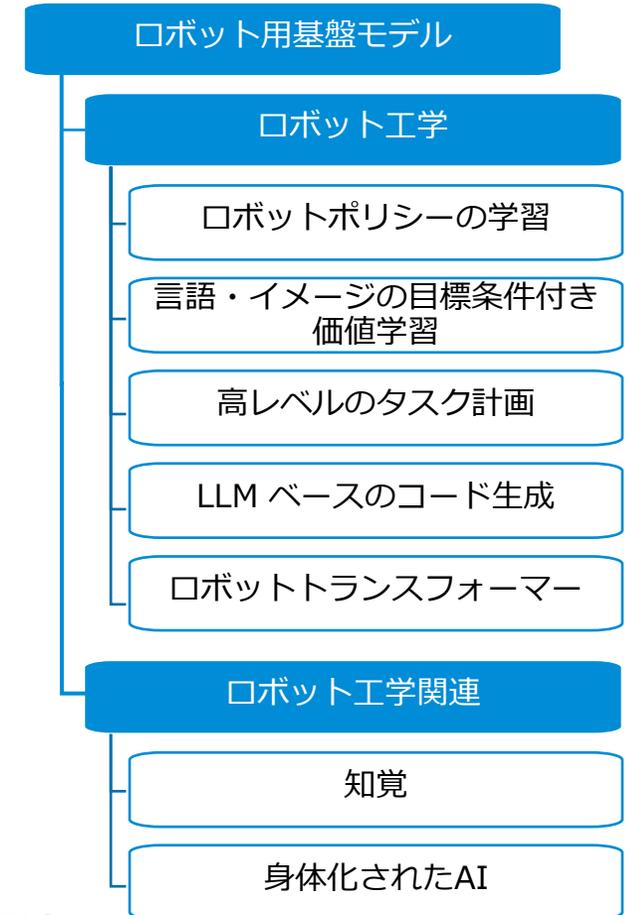
5. 特殊ロボット

- ダム水中点検、LEDパネル搬送、など

基礎研究 ロボット用の基盤モデルに関する論文サーベイ

ロボット工学における基盤モデルのサーベイ論文¹⁾によると、関連する233論文を分析した結果、基盤モデルがポリシー学習からタスク計画まで幅広く応用されていることがわかった。

- ロボット工学の従来の深層学習モデルは、特定のタスクに合わせた小さなデータセットで訓練されており、多様なアプリケーションへの適用が困難
- 対照的に、インターネット規模のデータで事前に訓練された基盤モデルは、優れた一般化能力を持っているように見え、場合によっては、トレーニングデータに存在しない問題に対するゼロショットソリューションを見つけるための能力を示す
- 基盤モデルは、知覚から意思決定、制御まで、ロボット自律スタックのさまざまなコンポーネントを強化する可能性を秘めている
(大規模な言語モデルはコードを生成したり、常識的な推論を提供したりできるが、視覚言語モデルはオープンな語彙の視覚認識を可能にする)
- 一方、ロボット関連のトレーニングデータの希少性、安全保証と不確実性の定量化、リアルタイムの実行など、重要な課題が残る

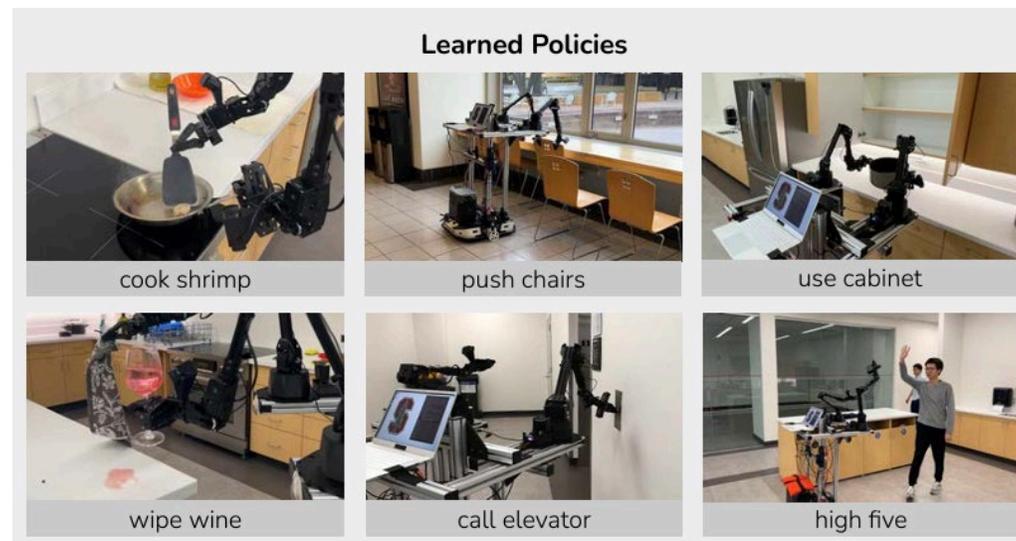
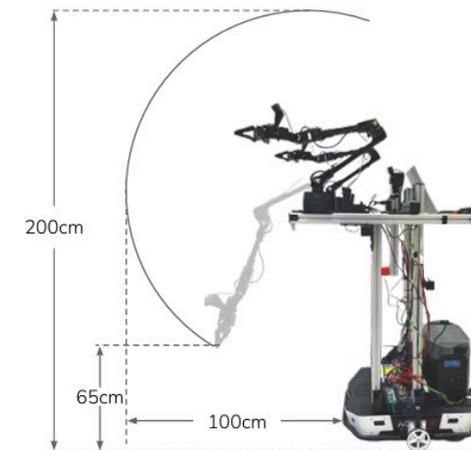


1) arXiv:2312.07843 Foundation Models in Robotics: Applications, Challenges, and the Future
Roya Firoozi, Johnathan Tucker, Stephen Tian, Anirudha Majumdar, Jiankai Sun, Weiyu Liu, Yuke Zhu, Shuran Song, Ashish Kapoor, Karol Hausman, Brian Ichter, Danny Driess, Jiajun Wu, Cewu Lu, Mac Schwager

海外の最新AIロボット事例（研究用） Stanford/Mobile ALOHA

低価格で使いやすい、両手操作可能な小型自律ロボット

開発	Stanford University
現状	人が操縦することで学習し、学習後は自律的に家庭内のさまざまなタスクをこなすことができる
課題	単一タスクのみの強化学習、リアルタイム性、多様なデータセットからの学習、ハードウェアの制約（低い場所へのアクセス、狭い場所での移動）など
協力	Google（Mobile ALOHA2を共同開発）
目標	<u>双腕ロボットの動作を人がテレオペレーションすることで学習する模倣ロボット</u>
応用分野	家事など家庭内の作業
特長	双腕、車輪、廉価なオープンソースハードウェア（3万2千ドル） <u>さまざまなタスクのデータを収集することが目的</u>
駆動	電動（バッテリー）
参考資料	https://mobile-aloha.github.io/resources/mobile-aloha.pdf 、 https://aloha-2.github.io/



出典：プロジェクトのホームページより
<https://mobile-aloha.github.io/>

海外の最新AIロボット事例（商用人型ロボット）

- マルチモーダルデータを学習したロボット基盤モデルによる、AIロボットの行動計画・動作生成の実証が進行している
- 商用を狙う人型ロボットは、現状では、総じて、成人男性程度の身長体重を持ち、移動し、ものをつかむ、運ぶなど基本的な動作は可能である
- 一方で、普及に向けては、実環境への適応、リアルタイム性、コスト、安全性など、ソフト・ハード両面での課題がある

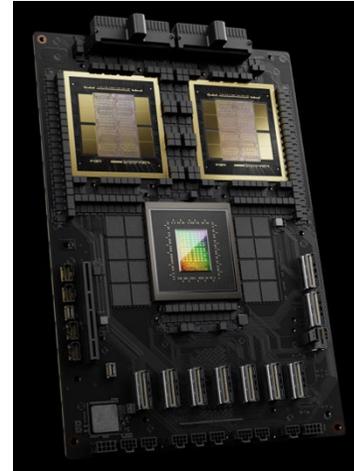
AIロボット	米国 Figure AI/Figure 01	ノルウェイ 1X Technologies/EVE	米国 Tesla/Optimus
協力	OpenAIやNVIDIAから6億7000万ドルの資金調達、OpenAIとはAIモデル開発で提携	OpenAIから2023年に2350万ドル、2024年に1億ドルの資金調達	公表していない
目標	自律汎用二足ロボット	人型作業ロボット EVEは車輪付きで平面移動、NEOは二足歩行	汎用の二足歩行自律型ヒューマノイドロボット、人間の手指の動きを模倣し細かい作業が行える
応用分野	労働力不足が最も深刻な、製造、出荷、物流、小売り等	物流、倉庫、小売、製造、建設、医療、介護	製造業、物流、建設、介護など、危険なタスク、反復的なタスク、または単調な作業
特長	身長167cm、体重60Kgで、二足歩行、5本指による把持と20Kgの荷重運搬、また、AIで周囲環境の把握と人間とのインタラクションが可能	人間と共存する環境における安全性を確保するために、自製の高トルク密度モーターを使った柔軟性トランミッションを実装が特徴	自動運転技術の応用（センサー、コンピュータビジョン処理、自律行動）、FSDチップによるAI推論処理
駆動	電動（バッテリー）	電動（バッテリー）	電動（バッテリー）
参考情報	https://www.figure.ai/	https://www.1x.tech/	https://www.tesla.com/AI

海外の最新エッジAI用コンピューティング NVIDIA

- NVIDIA がヒューマノイド ロボット向け Project GR00T 基盤モデルと Isaac Robotics プラットフォームの主要アップデートを発表¹⁾
 - ロボット向け基盤モデルのソフト、トレーニングシミュレータ、AIモデル実行用の高速なGPUチップが提供されるようになり、ロボットに学習させる環境は整いつつある。
 - 一方、各種のセンサ情報から環境の変化をリアルタイムに認識し、ロボットの適切な行動にフィードバックする高性能・低消費電力（高効率）の推論チップ開発や、ロボットの自律的で素早い動作の報告はまだない。
- NVIDIAの最新アクセラレータ（GB200 Grace Blackwell Superchip）²⁾
 - NVIDIAのGeneralist Robot 00 Technology (GR00T) のような「マルチモーダル生成 AI モデルを実行」するための混載チップ（テンソルコアのBlackwell GPU2つと、1つの Grace CPU、大容量の高速メモリが統合）



出典：<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000444.000012662.html>



GB200 Grace Blackwell Superchip

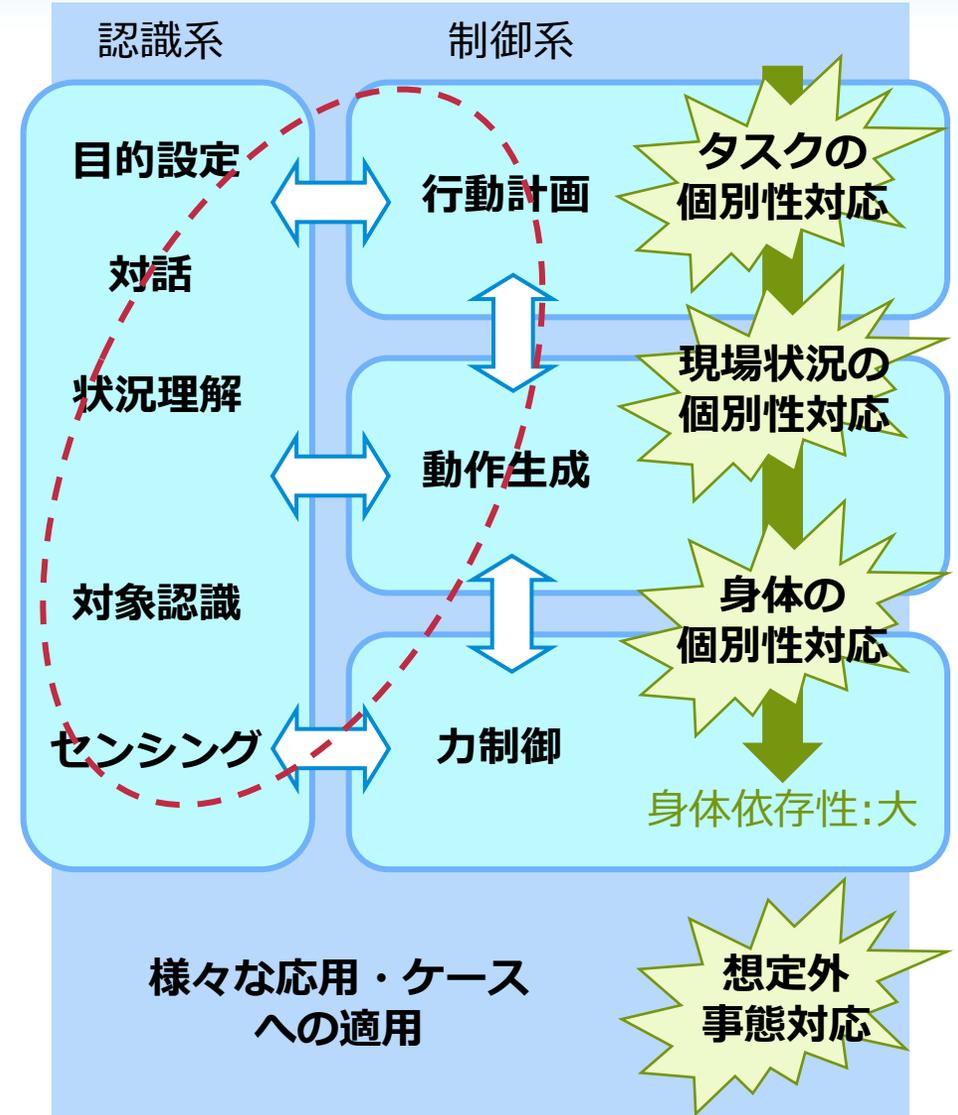


合計72基のBlackwell GPUを搭載した「GB200 NVL72」

1) <https://www.nvidia.com/ja-jp/about-nvidia/press-releases/2024/foundation-model-isaac-robotics-platform/>
2) <https://nvidianews.nvidia.com/news/nvidia-blackwell-platform-arrives-to-power-a-new-era-of-computing>

海外のAIロボットの研究開発動向と日本の対応について

- 海外の政府におけるプロジェクトでは、AIやロボットに対して大規模投資をしているが、現時点では、AI基盤モデルの登場などAIの進展を踏まえた新たなAIロボット研究のプロジェクトは開始していない。
- 海外の主なAIロボットについては、ここ一、二年で大規模投資に基づく活発な研究開発が行われている。生成AIを搭載したAIロボットの開発も大学等に先んじてGoogleやOpenAI等の民間企業を中心に進められている。
- しかし、AIロボット基盤モデルで実現できているのは、認識系と制御系の行動計画や動作生成の一部である。実世界で働くためには、実環境への適応能力や自律性、器用さ、リアルタイム性などPhysicalな課題も多い。さらには、人と協働するための安全性、信頼性の担保も必要である。
- 我が国には、これらの課題の解決に必要となる、産業用ロボットで培ってきた技術（制御、マニピュレーション技術など）や、認知発達ロボティクスなど知能と身体性の理解に関する先行した研究がある。
- これらの状況を踏まえると、AIロボットの研究については、日本が強みを活かして世界を先導するチャンスである。世界を先導していくには、政府、企業、大学、研究機関が連携し、研究開発投資、国際連携、人材育成、社会実装に向けた取り組みなどを推進することで、AIロボット技術の発展と社会課題の解決への貢献を加速させていく必要がある。



「基盤モデル後のAI研究開発動向」より再掲
AI×ロボットへの技術発展における課題と方向性