

家庭内における共生型ロボットの研究開発に関する報告書

中村 泰

はじめに：日常生活を支えるロボットへの期待

現在、ロボット開発は大きな転換点を迎えている。特に大規模言語モデル (LLM) と物理的な身体を統合した「物理的AI (Physical AI)」の発展は目覚ましいものがある。例えば、Generalist¹ などの様々な作業を行うことが可能なマニピュレーション機能、人間が日常的に生活する場でユーザの指示に従って人間が日常的に行う汎用的な作業をこなすロボット OK-robot² など、様々な機能を持ったロボットが出現している。

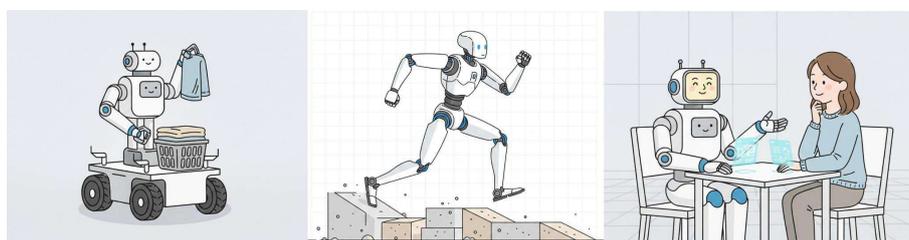


図1: 近年のロボットが達成しつつある機能

さらに、脚歩行のロボットの発展は、階段や劣化したり整備されていない歩道など、人間が通常的生活する環境で直面する状況での移動機能 (Unitree G1³) を実現するだけでなく、キックボクシングのようなダイナミックなモーションまで実行できるようになってきた⁴。4脚歩行ロボットを含め、このような不整地でも移動可能な移動機能は、例えば、宅配便の配送におけるラストワンマイルを埋め、社会の活動を自動化する可能性を持つ。

これらの機能の発展はロボットが近い将来、工場内などのロボットのための環境での生産性向上だけでなく、人間が日常的に生活する空間で共生し、人間の社会そのものの中で「役に立つ」機能を提供する。このような実用化に向けての取り組みが現実味を帯びてきた。

一方で、家庭内での応用においては、従来の「掃除」や「片付け」など与えられたタスクを遂行するだけでなく、人間と同じ空間を共有し、人間の意図を汲み取り、長期にわたって寄り添い続ける「共生型ロボット」の実現が求められている。本報告では、家庭という複雑

¹ <https://generalistai.com>

² <https://ok-robot.github.io/>

³ <https://www.youtube.com/watch?v=CIkdq7Zf4Zw>

⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=yN9e8cSj46A>

で非定型な環境において必要な要素として、スケーラブルなソフトウェアアーキテクチャと、物理的な特性を活用した人間との親和性の高いハードウェアの2つの側面から、将来の家庭用ロボットに必要とされる要素を整理・議論を行う。

2. ユーザとの経験を活用するソフトウェア基盤

自主研究「科学技術の動向とロボティクスの将来 - ロボティクスと家庭の関係 -」では、家庭内で真に役立つロボットとは何か？を検討してきた。直接的な生産性という観点では、ロボットの繰り返し精度・高速性を追及する工場内での生産は非常に高い。さらに、近年のマニピュレーション機能に対する学習機能 (Physical intelligence) は多品種少量生産においても筋道がついてきたと考えられる⁵。それらの技術の進展により、家庭内での作業、すなわち、家事を肩代わりすることも現実的な将来である。

この活動の中で、松本吉央教授 (東京理科大学) を招いた勉強会を行い、主に介護の側面からの研究を紹介いただいた。支援ロボットがユーザごとの必要な支援の多様さ・個々の機械に対する利用者の少なさを含め、Benefit / Safety / Cost の3点のバランスの難しさなどの課題と共に、特に興味深かった点は、生活の分析・適応の明確化に対する取り組みが進められている事である。特にサポートを必要とする人の「できる活動」と「している活動」という考え方、過剰な支援による廃用症候群などの課題である。実際の生活の中で”300gのモノを持ち上げる”という動作が可能ならば、約90%の行動をカバーすることができる。また、それ以上の作業も”ヤカンを使うのではなく、給水機能の付いた電気ポットを使う”や”掃除機を移動するのではなく、掃除ロボットで代替する”というような方法で生活を支えることができること、さらに、過剰な支援は人間の生活機能を低下させる可能性がある⁶。また、これらの解析はICレコーダで記録した家庭内の行動へのアノテーションにより行われており、現場を知ることが重要であることを示している。

これらの考えは、家庭内のロボットに求められる機能は、単にプログラムされた動作を繰り返したり、面倒な作業を代替し、負担を軽減することだけではないことを示している。また、必ずしもロボットが万能である必要は無く、ユーザが使う既存の家電製品や掃除ロボットなどの単機能のロボットをロボットが利用する、というシーンも想定できる。すなわち、

⁵ <https://www.physicalintelligence.company/blog/pi0>

⁶ 実際、認知症当事者が共同生活を行うグループホームにおいても、料理などの生活活動を介護者と共に当事者が行うことは良く行われている。

既存の技術の方向性として欠けている点として、ロボット自身が人間と同じ空間で活動し、ユーザとの対話を日常的に行い、日々の経験を積み重ねながら自らの振る舞いをアップデートする仕組みが考えられる。

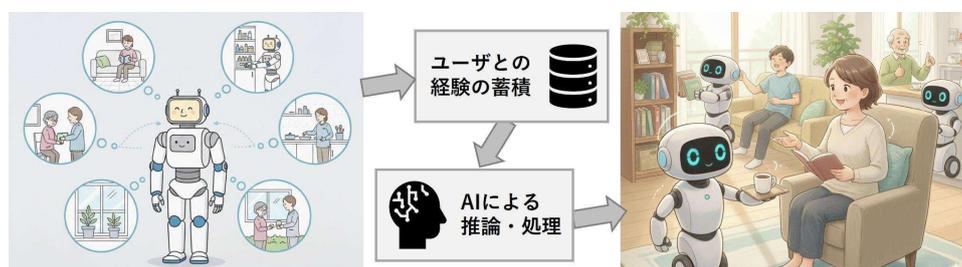


図2: ユーザとの経験に基づく”さりげない”支援

理化学研究所 ガーディアンロボットプロジェクト (GRP) で開発しているロボット「Indy」のシステムはこのような方向性に対する一つの取り組みとなっている。Indyは、記号的な推論を行う「記号層 (Symbolic Layer)」と、リアルタイムな運動制御を担う「信号層 (Signal Layer)」を、黑板モデル (Blackboard system) を介して非同期に統合する実行環境を構築している。このシステムでは、大規模言語モデルなどを用いた、リアルタイム性の無い記号レベルでの抽象度の高い処理と、制御信号やセンサ信号処理など刻々と変化する実世界につながる信号レベルの処理を非同期的に統合する。

このシステムでは、日々の対話や環境認識の結果を記号的に蓄積するため、データベースシステムである MongoDB を記号層の黑板モデルとして用いている。これにより、数か月レベルの経験を蓄積することが可能なスケーラビリティを持つ。さらに、大規模言語モデル (LLM) 等との連携の容易さから、文脈に応じた高度な (抽象度の高い) 判断を行うモジュールを容易に追加することが可能である。この特性により、適応的な学習、すなわち、蓄積された長期的なインタラクションデータを利用し、ユーザの嗜好や家庭特有のルールに合わせて、ロボットの振る舞いを漸進的に進化させるためのプラットフォームとなる。

信号層の処理も黑板モデルを利用することで、それぞれが自律性を持つ多数のモジュールがマルチエージェント的に連携し、リアルタイム性を持つ処理を行う。これにより、ジェスチャなどの、質の高い人間とのインタラクション技術を導入することができる。

2025年は、このシステムを研究室内での常時稼働実験を開始するとともに、Expo 2025 大阪・関西万博「フューチャーライフヴィレッジ」に出展した⁷。Indy は研究室内を移動する

⁷ <https://grp.riken.jp/news/20250520/>

とともに、研究室内での情報や、人間との対話を経験として蓄積する。経験の活用に関しては今後の課題となってい

るが、自律的に活動するロボットの経験を長期間集めることで家庭内でも活動するロボットが、人間からの指示を待つだけでなく、自発的に状況を察し、能動的に行動する「先回りした支援」を機能の実現を目指している。



図:3 Expo2025 大阪・関西万博 FLE への出展とGRP で活動する Indy

例えば、能動的な関わり、すなわち、ユーザからの指示がなくても特定のイベントや蓄積された経験に基づいて行動を開始する仕組みは重要な機能である。人間が言葉にしていない潜在的なニーズ（例：喉が渴いていそうな時に飲み物を勧める、家電の操作に困っている際に助言する）に対応することで、わざわざ指示をしなければ動かない「部下」のような関係性ではなく、共生する対象となることが期待できる。また、ユーザが使いたいと思った時に使用する道具ではなく、24時間常にスタンバイし長期的・持続的な運用を行うことで、日常生活のあらゆる場面で経験を蓄積し、ロボットは家庭の真のコンテキストを理解することができるようになる。このようなアーキテクチャにより、ロボットは単なる「機械」から、ユーザと経験を共有し共に成長する「パートナー」へと進化できる可能性を秘めている。

3. 家庭環境でも利用可能なハードウェア基盤

家庭内は、家具が入り組み、段差や狭い通路が存在する非常に制約の多い環境である。この中で活動するためには、ハードウェアの物理的な制約を克服する必要がある。さらに、人間との親和的なインタラクションにおいて、接触（肩を叩いたり、手をつないだり）は有効なモダリティであり、親密なインタラクションを行うことができる。このような特性を持ち、かつ、長時間安定して動作するメカニズムが必要になってくる。

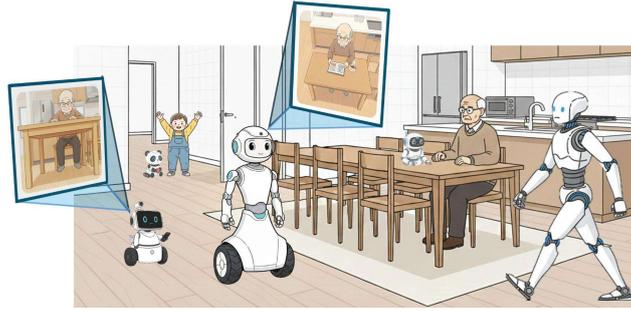


図4: 家庭内で働くロボットのあり得る形状

人間とのインタラクションにおいては、身体の見た目や大きさの影響は無視できない。人間はジェスチャーなどの非言語のコミュニケーションチャンネルも使って他者とインタラクションを行っており、ロボットが言語以外の様々なモダリティを用いることができることは、人間との親和的な対話を通して関係性を構築する有効な手段になると期待できる。特に、握手をしたり、手を引いて移動するなど、身体的な接触を伴うインタラクションは人間同士でも介護や見守りのような状況では多く見られる。

このようなインタラクションにとって、人間サイズのヒューマノイドは、その人間らしい姿や多様なコミュニケーションチャンネルを利用できる可能性を持つとともに移動機能を利用して様々な絵経験を共有できる。また、人間の同様の視点(視覚センサの高さ)から周囲を見渡すことで、人間の視野と同様の視野で環境を捉える、人間と同様の「経験」を得ることができる。このような特性は、ペットロボット、Amazon Astro⁸のようなローバーにモニタを付与したようなロボット、卓上の小型ヒューマノイドなどでは実現できないインタラクションを実現する可能性を持つ。

しかしながら、現在の人間サイズのヒューマノイドロボットをそのまま導入するにはいくつかの課題がある。二脚で移動するロボットは非常に高い機動性を持つが、立っているだけでもエネルギーを消費するため、長時間の運用は容易ではない。さらに、転倒の危険性だけでなく、移動時に非常に大きな足音が発生する。車輪移動のヒューマノイドは、頭部の高さを確保するためには、安定性のために重く大きくなる。これは、ドア幅は約70cmであるような一般的な家屋で、廊下などを通り各部屋を自由に行き来するのは容易ではない。さらに固い(人間に押されるなど外界からの力が加わっても高いギア比によって動かな

⁸ <https://www.amazon.com/Introducing-Amazon-Astro/dp/B078NSDFSB>

い) 関節を持つロボットは自然な接触を伴うインタラクションを行うことができない。このような特性を改善していくことは重要な課題となっている。



図5: Pixie 起き上がり小法師のメカニズムで、外乱を柔らかくいなすロボット

GRP で開発している Pixie は複雑な計算による姿勢制御ではなく、重心設計や機構そのもの、すなわち身体の仕組み、で安定性を維持する「物理的知能 (Physical Intelligence)」を取り入れることで、安全で柔らかく動作するロボットである。起き上り小法師のようにバランスを保つ受動的安定性を備えることで、外から押されたり、段差を乗り越えても、自然にもとの直立状態を維持する。これにより、消費エネルギーを抑えつつ、安全に長時間の稼働を行うことができる。この特性は恒常的な稼働が求められる家庭用ロボットにとって非常に現実的なアプローチとなる。

4. タスク遂行を超えた「新しい共生の形」

家庭内においても将来的にロボットが家事などの物理的労働を担う能力を持つことは重要である。一方で、ロボットが日常的なユーザとのインタラクションを行いながら、ユーザとの経験を蓄え、ユーザを理解し、さりげない支援を行うことも必要な要素である。また、そのためには肩をなでるなどの接触を利用したリッチなインタラクションが重要であるとともに、家庭内というロボットのために設計されたのではなく、人間に合わせて設計され、ユーザに合わせて使われている、乱雑で構造化されていない環境において恒常的に活動できることも重要である。

ロボットがユーザの隣に寄り添い、共に生活する中で少しずつユーザを理解しながら、多様で不定形な支援を実施していくためには、ハードウェアの「柔らかさ」による安全性と、ソフトウェアの「経験の蓄積」による知的な成長が不可欠である。これらが融合することで、単なる便利な道具ではない、人間とロボットの新しい共生社会が実現される。完璧なタスク遂行を目的にするのではなく、ユーザの傍らで「心強さ」を提供し続けるよう

な存在となることも家庭内で活動するロボットとして重要な課題である。蓄えた経験をユーザーに対する支援に繋げる技術的な課題は何か？また、大量の個人データを集める倫理的な問題も今後は検討する必要がある。