

立石賞功績賞の受賞記念講演概要

ロボットと人間との実世界での調和に関する研究と社会実装

早稲田大学 理工学術院 教授 菅 野 重 樹

私とロボットとの最初の出会いは、私が中学生だった1973年に早稲田大学の生物工学研究グループが世界初のヒューマノイドロボット(WABOT-1, 図1)を開発したと報じる新聞記事である。このグループの代表が当時の早稲田大学機械工学科の故加藤一郎教授であった。幼少のころから鉄腕アトムや鉄人28号のアニメを通してロボットに興味を持っていた私は、早稲田大学の加藤一研究室に入ることを目標にした。

大学3年次のゼミナール配属で、運よく加藤研究室に入れた私は、学部では義足の研究、大学院で鍵盤楽器演奏ロボット(WABOT-2, 図2)の研究に取り組んだ。当時はロボットの研究開発が盛んになり始めたときであり、日本にはロボット研究開発の現状を調査しに海外から多くの訪問客があった。加藤研で訪問客を案内すると必ず質問されるのが、「なぜ人に近い形で作るのか?」であった。今でこそヒューマノイドロボットは世界中で研究開発されており、その設計コンセプトは当たり前になっているが、当時は、ロボットは所詮道具であり、必要な機能を備えれば十分であり、形態には拘らないという認識が多かったのだ。それでも、一通りの見学が終わりディスカッションすると、人に近い形をしたロボット(当時はhumanoid robotではなく、anthropomorphic robotと呼んでいた)の意義が分かったと言って帰っていった。

加藤研では、義手・義足の研究も展開していたが、人のために作業する機械、すなわちロボットは、必然的に人に近い形になるという考え方で研究を進めていた。その考え方は現在で

も多くの加藤研出身の研究者に受け継がれている。

私は、独立して研究室を構えてからは、人と触れ合えるロボット、人を理解して人に合わせることができるロボットの実現を目指して、特に私が“最高のロボット”であると信じている人間を参考にすることで、ロボットの研究開発を進めている。

本稿では、トピックスとなる研究課題ごとに、全体の流れも含めて、技術課題を紹介する。



図1 WABOT-1



図2 WABOT-2

WABOT-2

1973年に完成したWABOT-1から約10年が経過した1980年代、コンピューター技術はミニコンからマイコンへと発展し、また1980年はロボット元年と呼ばれ、産業用ロボットが急速に普及したときでもある。このマイコンをフルに活用し、産業用ロボットの力作業に対し

て繊細な作業の実現を目指し 1984 年に完成したのが鍵盤楽器演奏ロボット WABOT-2 である。WABOT-2 は完成後に 1985 年につくばで開催された科学万博の日本政府テーマ館「人間のコーナー」に、住友電工の協力を得て WASUBOT として展示実演された。

WABOT-2 の基盤技術は、人と等身大の大きさのヒューマノイドロボットが、10 本の指で人と同等に鍵盤楽器（当初は電子オルガン、その後の研究でピアノ）を演奏するスキルの実現、さらに人が使う楽譜を CCD カメラで読み取り、指・手・腕の動きを自動的に決定する制御系の構築であった。WABOT-2 は腕に 7 自由度、5 指に計 14 自由度を有し、胴体内に配置したモーターの動力をワイヤケーブルで伝達する構造とすることで、手の小型化と高速の指運動を実現した。ワイヤケーブルを用いた高速指駆動では先駆的な研究成果であった。また、動作の自動生成は、今でこそ AI で簡単に処理できるが、当時は予測機能を組み込んだ新しいロボット動作プランニングであった。WABOT-2 の成果は 1991 年に日本ロボット学会の技術賞を受賞した。

機械的柔軟性

WABOT-2 で確立したロボットハンドの制御の次の展開は、力制御を取り入れることであった。特に、様々な繊細な作業は運動だけでなく力の制御が必須であり、さらに能動的な力制御だけでなく受動的な力制御すなわちコンプライアンス制御が、人との協調を実現するためには重要な技術要素であった。しかし、ひずみゲージ等を用いたフィードバック制御による柔軟性の実現は、応答性に限界があり、理想的なコンプライアンスを得ることは難しかった。

そもそも硬い機械系を制御で柔らかくすることには無理があることから、機械屋の発想で、機械要素の一つである「ばね」を関節に組み込めば理想的な柔らかさが得られると考え、当初は板バネを用い、その有効長が変えられる機構を

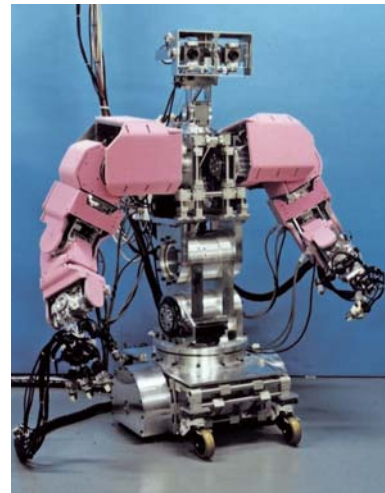


図3 WENDY (1999)

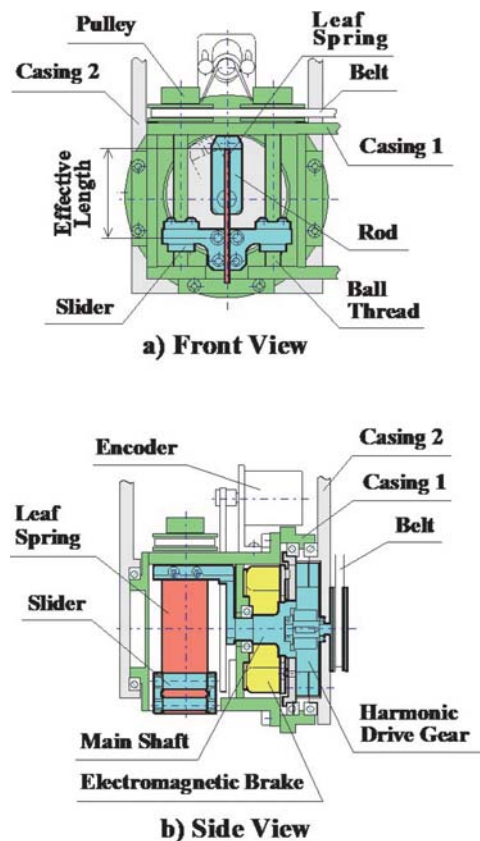


図4 機械的受動柔軟機構

備えた受動関節を試作した。しかしかなり大型となることから、アームに適用することとし、指にはコイルばねを導入した。

図3は板ばねによるコンプライアンス制御機構を取り入れた人共存ロボット WENDY, 図4はそのメカニズムである。

ばねによるコンプライアンスだけでなく、電

磁ブレーキを組み込むことでダンピングファクターも調整可能とし、総合的にインピーダンス制御を実現している。

この機械的柔軟性のメカニズムは、その後の柔軟ロボットの代表的設計例と評価されている。

この研究の成果を発展させて2007年に発表した TWENDY-ONE (図5) は、ばね定数を固定としたトーションバー (ゴムメタル: 超弾性・超塑性チタン合金) と機械式ロータリーディスクダンパを組み合わせた受動的な柔軟機構を搭載した (図6)。制動力は回転部と固定部の間に注入されたシリコンオイルの粘性抵抗を利用している。



図5 TWENDY-ONE (2007)

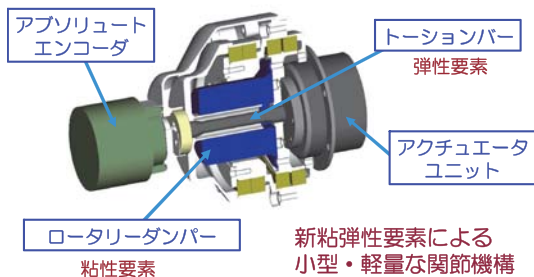


図6 TWENDY-ONE の柔軟関節構造

TWENDY-ONE は、人との共存を目指し、人との協調作業が可能な設計となっており、ベッドからの起き上がり支援、車椅子への移乗、キッチン作業補助 (図7) など、様々な日常作業支援の実行能力があることをデモンストレーションで示し、世界的な注目を集めた。



図7 TWENDY-ONE のキッチン作業補助

TWENDY-ONE の成果は、現在進めている JST ムーンショット型研究開発制度の目標3における人共存ロボット AIERC 開発のベースとなっている。

人間志向機械

WABOT-2 の研究開発後、人共存ロボットの研究に本格的に取り組む前に、ロボットも含め、人と関わる機械を対象として、人が機械に適応するのではなく、機械が人を理解して人に合わせる方法論の研究を進めた。このシステムを人間志向機械システム (HOMES: Human oriented Mechanical System) と呼んでいる。これは、私が専任教員として、工作や生産・製造に関わる科目を担当したことも切掛けであり、最初は工作機械を対象に、工作機械を使用する人のスキルや体調などに合わせて、工作機械がその設定を変更するというシステムであった (図8)。

このシステムでは、ハンドルの操作速度・トルク、呼吸波、脈波を計測し、操作者の状態や

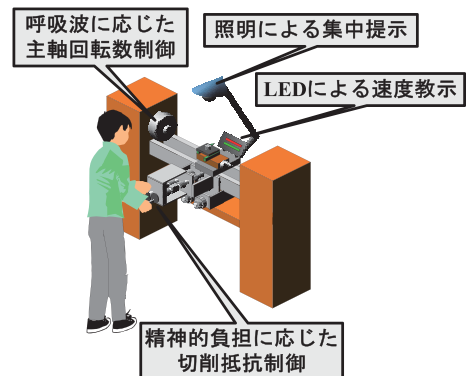


図8 工作機械に適用した HOMES (1995)

スキルを判断する。それに基づき、操作者の特性に合わせて、情報提供や機械特性を調整することで、操作者の心地よさとスキル発揮を実現した。

人間指向ではなく人間志向としたのは、機械が究極的には、人間に近づきたい、人間と同等になるという方向性を有する、すなわち機械の自律性・自立性を企図したためである。

HOMES の考え方は、その後、産業用ロボットを使った組立作業支援にも応用し、人の意図を理解してラック組立を自動的に支援するシステムを実現している（図9）。



図9 組立作業支援システム

立石財団の研究助成(S)（2019～2021年）で実施した「繊細な力の感覚と制御による熟練技能の自動化を実現するロボットワーカーの開発」は、この HOMES のコンセプトと人共存ロボット開発のコンセプトとを組み合わせ、特にスキルの獲得に関するロボットのハードウェアと AI とを融合することをテーマにした研究である（図10）。

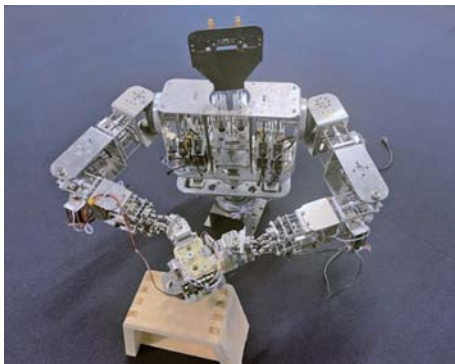


図10 ロボットワーカー

WABOT-HOUSE

1990年代は、様々なロボット開発が試みられるも、その難しさが浮き彫りになったときでもある。センサ、アクチュエータ、制御などの最高水準の技術をインテグレーションしても、人との作業能力の差は縮まらない。その頃に流行が始まった技術が「ユービキタス」である。集中というよりも分散の形態をとり、多数のセンサ、コンピューターで構成された環境を意味する。ロボットの分野では「環境構造化」とも呼ばれた。床や家具に RFID タグを取り付けることで、ロボットが自己位置を簡単に取得でき、対象物の規格も取得できる。すなわち、センサ等を駆使して認識するのではなく、情報が環境に埋め込まれることで、ロボットに高度な知能を付与する必要がなくなる方法である。

この実証実験を、2000～2010年に岐阜県の支援を得て、ロボット系研究者と建築系研究者が協力して各務ヶ原市に構築したロボットの家が WABOT-HOUSE である（図11）。室内 GPS などの先端技術の実証実験、ロボット設計のコンセプトと同じ方法で、間取りや家具の形態を目的によって変えられる人・ロボット共



図11 WABOT-HOUSE の構造

存ハウスの構築，床の高さが変えられるロボットのための家の設計など，先駆的な実験を展開した。この実験で得られたことは，生活支援における，人それぞれの生活スタイルや活動に対するロボットやロボットハウスの適応機能の重要性である。ロボットだけでなく，環境も含めてシステムを構築することが有効であることを実証したプロジェクトであった。

WAMOEBA

WABOT-2 が電子オルガン演奏成功の後，制御系などの改良によりピアノ演奏を実現した頃，新しいロボットの研究を始めようと加藤一郎先生とディスカッションの結果，1990 年に始めたのが「ロボットの心」に関する研究である。人とロボットの違いは何か，ロボットはどこまで人に近づくか，ロボットが心をもつことは有り得るか，といった哲学的なテーマに対して技術的にアプローチする研究である。当時は，ニューラルネットワークが広がり始めた頃であり，ロボットと AI に関する議論はほとんど無かった。

出発点は，人間や動物における知能や感情の源としての内分泌系，自律神経系のモデル化であった。当時，博士課程に進学したばかりの尾形哲也君（現，早稲田大学理工学術院教授）が学会発表したときには，多くの質問があり，質問者に理解させるのがなかなか難しかった。

その後，作成したモデルを基に体内温度，電流，バッテリー状態などを制御系に組み込み，内界受容器と外界受容器のデータを入力し，結果を色で表示する自己組織化マップを組込んだロボット（WAMOEBA：早稲田のアメーバ）を開発し，様々な評価実験を行った（図 12）。

研究を続けて分かったことは，ロボットの心に関する研究は，生命，人間の本質に迫る深遠なテーマであるだけでなく，人共存ロボットの機能，ロボットのハードウェアとソフトウェアのコンセプトなど，人と関わるロボットを研究する際に，不可欠な要素が多数含まれているこ



図 12 WAMOEBA-2

とである。

さらに，AI 研究が進み，AI とロボットとの組み合わせが当然の姿になり始めると，実はハードウェア設計と AI 研究の延長線上に原始的感情の芽生え，そして知能の創出が見え始めた。

後述するムーンショットプロジェクトでは，新しいハードウェアに様々な AI を融合させる研究を展開している。この新しいロボット AIREC が，WAMOEBA の第 2 世代となる日が近づきつつある。

ムーンショットプロジェクト

2020 年に JST ムーンショット型研究開発制度の目標 3 の PM として採択され，「一人に一台一生寄り添うスマートロボット」の研究を開始した。

このプロジェクトでは，ムーンショット目標 3 が目指す人・ロボット共生社会を実現するために，AI・ロボット・社会実装のチームにより，接客や家事はもとより，人材不足が迫る福祉・医療などの実世界の現場で，人の多様な高難易度の物理作業をサポートし，さらに自らの身体から生まれる情動を持って人と豊かな情緒コミュニケーションを行う，一人一台の汎用型スマートロボット AIREC（AI-driven Robot for Embrace and Care）の実現を 2050 年の目

標として設定している。

具体的には、(1) AI との統合を考慮した「体液（バックドライバブル油圧型人工筋、自己修復材、冷却剤など）」の循環機構、すなわちこれまでの Dy だけではなく Wet を取り入れたロボット身体の実現、(2) 深層予測学習による多様な物理作業の実現、また wet 機構による身体調整から創発される「情動」によるコミュニケーション知能の革新、(3) ELSI や国際的視点から総合的に受容可能な論理・社会性の導出とそれに基づく AIREC の設計・動作の生成・制御方法の確立を行うことを目指している。

Dry-AIREC

本研究のハードウェア開発のゴールは、Dry・Wet ハイブリッドロボットの実現である。現在の金属やプラスチック等を素材としたロボットは Dry タイプである。しかし、流体アクチュエータ、燃料電池、自己修復など、様々な技術に、いわゆる Wet であるケミカル素材などが入りつつある。必然的に機械システムは Wet を含むようになると予測できる。耐久性などは Dry で、柔軟性などは Wet にすることで、双方の利点を活かすことができるからだ。しかし、Wet のロボット実現には課題が多く、未だ研究途上であり、すぐにシステムを構築することは難しい。一方で、AI のロボット導入は急速に進んでおり、ロボット研究の優位性を維持発展するためには、Wet ロボットを待つことはできない。そこで、ハードウェア構築としては、Wet ロボットのための油圧アクチュエータ、循環系構築の基礎実験を進めつつも、同時に現状の最先端ロボット技術のインテグレーションにより、AI を導入した作業実験を評価するための Dry-AIREC を開発して基礎実験を進めている（図 13）。

これまでに、移乗介助、起き上がり支援、テーブル・バス・トイレなどの拭き掃除、スクランブルエッグなどの調理、衣類のハンガー掛

け、超音波診断などの作業が実現可能であることを確認した。これらの作業では、模倣学習と深層学習を組み合わせた深層予測学習のモデルに注意機構を組み込むことにより、重要度の高い感覚運動情報に注目させ、リアルタイムでその特徴の認識を行いながらタスクを実行することで、変化する対象を扱うことが可能になる。これまでに、加熱すると液体から固体に変化する卵を対象とし、AIREC のマニピュレーションによりスクランブルエッグの調理を実現した。提案する深層予測学習モデルには、CAE と注意機構つき MTRNN を用い、学習では、予めアームの目標姿勢を複数設定し、実際に調理中に目標姿勢を随時指示することでロボットを操作し教示を行った。教示では、数種の調味料・具剤、異なる火加減で訓練し、提案モデルに学習させた。30 回ほどの学習の結果、未学習の明太子が入った溶き卵でも適切にかき混ぜ、焦がすことなくスクランブルエッグの調理を実現できた（図 14）。トイレの掃除、ハンガー掛けなども、同様に人が数十回教えることで作業を



図 13 AIREC による車椅子移乗介助



図 14 AIREC によるスクランブルエッグ調理

実現できている。

現在は、人に触れる介護支援を学習させることを試みており、多くの作業のスキルを獲得させ、それらを連続的に実行することで、日常生活支援、福祉・医療現場において、人との協働作業、AIREC 単独での自律作業の実現を目指している。

おわりに

私のロボット研究は、支援、スキル獲得、協働など、常に人を意識し、人に適応するロボットの実現を目指している。「人間と機械の調和・融和の促進」を掲げる立石財団のコンセプトに強く賛同するとともに、立石財団の助成を受けられたことをたいへん感謝している。