

ロボティクスの機能デザイン

東京理科大学 先進工学部 まつもと よしお
機能デザイン工学科 教授 松本 吉央

東京理科大学 先進工学部 か い たつ や
機能デザイン工学科 准教授 甲斐 健也

1. はじめに

本記事は、機能デザイン工学科におけるロボティクス分野の研究紹介を目的としています。本学科においてロボティクスと関連のある研究室は、松本研究室（ロボティクス）、甲斐研究室（ヒューマノイド制御）、吉田研究室（ヒューマノイド運動機能）、保原研究室（障がい者スポーツ機能工学）、森研究室（健康認知機能）であり、それぞれロボティクスに関する最先端の様々な研究を行っています。また、本学科では学部3年次より「メディカル機能工学コース」と「運動機能工学コース」に分かれ、それぞれの専門分野の講義を学びますが、後者がロボティクス分野に相当します。ここでは、松本研究室と甲斐研究室におけるロボティクス分野の取り組みを紹介します。

2. 生活支援ロボットのための機能のデザイン （松本研究室）

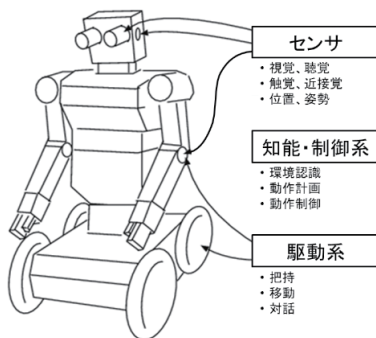
松本研究室は、2023年度に発足した新しい研究室です。研究分野としては、「ひとの生活を支援するた



【図1】 研究で利用しているロボットの例

めのロボット技術」を広く扱っています。その中でも研究の中心となるのは、本稿のタイトルにも掲げている通り、生活支援ロボットのための機能をどのように設計（デザイン）し実現するか、になります。一口でロボットといっても、ヒトの形に似たロボットもありますし、作業を行うアーム型のロボット、車輪を持ち移動するロボットもあります。【図1】は、私たちがこれまでに開発したり利用してきているロボットの例ですが、目的によってロボットが持つ機能は異なり、機能を実現するためのデザインも様々になるのです。

そもそも「ロボット」という言葉の定義は様々あり、統一されたものにはなっていません。例えば、世界初の人型ロボットの研究で知られる早稲田大学の故・加藤一郎先生は「①脳と手と足の3要素をもつ個体、②遠隔受容、接触受容器をもつ、③平衡覚、固有覚をもつ、これらの3条件を備える機械」と定義していましたし、日本産業規格（JIS）では、「2つ以上の軸についてプログラムによって動作し、ある程度の自律性を持ち、環境内で動作して所期の作業を実行する運動機構」と定義されています¹⁾。一方で「センサ、知能・制御系、駆動系の3つの要素技術を有する知能化した機械システム²⁾というシンプルで“緩い”定義もあり、分かりやすさも広く使われています【図2】。ただし、この定義によれば、自動運転車はもちろん、最近の洗濯機や調理家電などもほとんどがロボットに該当することになります。このようなロボットの機能の側からスタートしてひとの生活支援をどのように実現すればよいかを考えるのは、実は容易なことではありません。



【図2】 ロボットが持つ3つの機能要素

次に、支援を受ける側の「ひと」の機能について考えてみましょう。人間も、センサに相当する「感覚機能」、知能・制御系に相当する認知機能・脳機能、駆動系に相当する「運動機能」を有しています。このような機能に関連して、介護分野ではADL（日常生活動作）の自立度を評価する方法

として、バーセルインデックス (BI: Barthel Index)³⁾ が利用されています。BIは【図3】に示す10項目から構成されていますが、これはひとが生活を送るうえで必要な機能(生活機能)のうち最も基本的な項目と考えることができます。

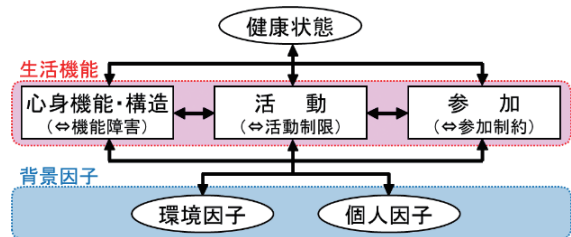
さらに詳細な生活機能の分類として、2001年にWHOが採択した国際生活機能分類(ICF: International Classification of Functioning, Disability and Health)というものもあります⁴⁾。ICFはひとの生活機能を記述するための共通言語として作られた世界共通の枠組み・分類【図4】で、ひとの生活機能を、「心身機能・構造」「活動」「参加」の3つの階層に分け、全体として約1,500項目に分類されています。「活動」は具体的な行動のことを指していて、歩くことや読み書きなど日常生活に必要な動作に加え、仕事や余暇活動なども含みます。「参加」は家庭や社会などへの関わりを指します。例えば主婦としての役割、職場などの組織での役割や、地域や趣味の会合に参加しメンバーとしての役割を果たすことなどです。「参加」は「活動」と密接な関係にあり【図5】、下位の生活機能である様々な「活動」が可能になることで、はじめて上位の生活機能である「参加」が実現できるという関係になります⁵⁾。

私たちは、生活支援のためのロボット技術をデザインするうえで、いきなりロボット側の機能からスタートするのではなく、これらのように「ひとの生活機能」からスタートすることが重要だと考えています。つまり、支援を受けるひと(ターゲットユーザ)側でどんな機能が失われている、あるいは低下していて支援が必要なのか考え、その機能を工学的にどのように実現するか(既存の要素技術を組み合わせるのか、新たな要素技術を開発するのか)は次のステップにくるといふ順番です。

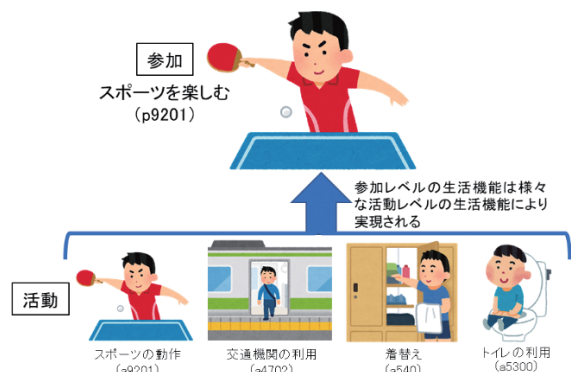
ICFの枠組みで考えると、支援ロボットも環境因子の1つに位置づけられ、それが直接的に影響を与える生活機能の多くは「活動」のレベルになります。しかし、そこから「参加」と「心身機能・構造」にも波及しますので、効果を評価・検証する際にはその視点も欠かせません。具体的には、利用することによって目的とする参加レベルの生活機能が実現されているか、長期的にみて心身に悪い影響がないか、などを確認することがあります。また、他の環境因子や個人因子からの影響(うまく使える環境条件は何か、ほかの既存の福祉機器・介護サービスとの組み合わせで無理・無駄がないか、など)を考えることも大事になります。

項目	点数	状態
1 食事	10	自立(自動具などを自ら利用し食事ができる。時間内に食べ終わられる等)
	5	部分介助(食べる段階で切ることが必要、エプロンが必要だが自分で付けられない等)
	0	全介助(経管栄養等)
2 移乗	15	歩行自立・自立(車いすに対して一連の移乗動作が一人で安全にできる)
	10	程度の部分介助または見守りが必要(声かけ等)
	5	座ることは可能であるが、移動などはほぼ全介助(介助すれば立ち上れる等)
3 整容	10	自立(洗面、歯磨き、整髪、ひげ剃り、化粧等)
	5	部分介助(歯磨き粉を自分で出せない、入れ歯の管理ができない等)
	0	不能
4 トイレ	10	自立(衣服の着脱、トイレペーパーの利用、パットの自己管理等)
	5	ポータブル便器などの管理(使用、衛生管理)
	0	部分介助(自立での立位不可、衣服の着脱に介助、清拭動作に問題等)
5 入浴	10	全介助または不能(トイレ動作がほぼ全介助、衛生管理不可、ベッドでのおむつ交換等)
	5	自立(浴槽につかる。シャワーを浴びる。髪や体を洗う等)
	0	部分介助・不能(洗髪・洗体に介助が必要、転倒の危険性、機械浴等)
6 歩行	15	45m以上の歩行が一人で出来る ※補助具(歩行者・車椅子は除く)の使用可
	10	脇を支える介助や見守りありでの45m以上の連続歩行、歩行者の使用を含む
	5	歩行不能ではあるが、一人で安全に車椅子を駆動、45m以上の連続で移動できる
7 階段昇降	10	自立(手すりや杖の使用も可)
	5	介助または見守りを要する
	0	不能
8 着替え	10	自立(ファスナーの上げ下げも含む着脱の着脱、靴を履くなどの動作を時間内に行える)
	5	部分介助(標準時間内に行える、半分以上でできる)
	0	上記以外
9 排便コントロール	10	自立(便失禁なし、洗滌・産棄の取り扱いも可能、人工肛門の衛生管理が可能)
	5	時に失禁あり(洗滌・産棄の取り扱いに介助)
	0	上記以外
10 排尿コントロール	10	失禁なし(尿器の装着や衛生管理も可能)
	5	時に失禁あり(尿器の装着や衛生管理に介助が必要)
	0	上記以外

【図3】 バーセルインデックスの評価項目と評価基準



【図4】 ICFにおける生活機能の構造の枠組み



【図5】 ICFでの「参加」と「活動」の関係

ひとの生活機能を理解し、不足している生活機能をどのように支援するかを考えたり、開発した技術を検証したりすることを目的に、本学科では「リビングラボ」という生活空間を模擬した実験室をつくりました【図6】。キッチン、リビング、寝室、トイレ、浴室、階段があり、自宅で生活しているときの動作を一通り行うことができます。また周囲に観察用スペースを備えており、マジックミラー越しにリビングラボ内での行動や動作を観察することができます。

このような環境を用いて、自分で生活動作を行いながら生活上の課題について考えたり、開発された支援ロボットや機器の検証・評価に利用するなどの活用が



【図6】リビングラボ



【図7】リビングラボでの実験の様子

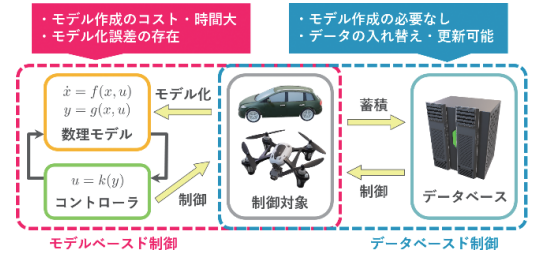
始まっています【図7】。

本稿では詳しく説明できませんでしたが、私たちは【図1】のような様々なロボットを使って、認知症高齢者や自閉スペクトラム症 (ASD) 児を含む様々な「ひと」を対象とした、ロボットによる生活支援技術を研究しています。ひとの機能の考察からスタートすることで、学術的に新しく面白いだけでなく、世の中のニーズにあった「役に立つ」ロボット技術を研究開発していきたいと考えています。

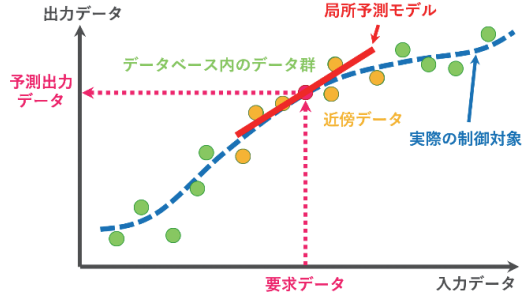
3. ロボットに必要な制御のデザイン (甲斐研究室)

甲斐研究室は2012年に発足し、本稿執筆段階(2024年10月)において、13年目となります。研究分野は制御工学・ロボティクスであり、主として理論的研究を中心に活動しています。ここで「制御工学」とは、世の中のありとあらゆるものを思い通りに動かす理論のことを指し、古くはJames Wattが蒸気機関の回転速度を調整するために発明した「調律器」が制御工学の起源といわれています⁶⁾。現在では、様々な機器・装置・機構・ロボットなどに制御工学の技術が使われており、持続可能な社会の実現には必要不可欠な理論といえます。また、制御工学は、「動きや振る舞いをデザインする学問」と考えられており、所望の動きや振る舞いを実現するためには非常に重要な研究分野です。

甲斐研究室では、制御工学における様々なテーマに取り組んできましたが、その中でもロボティクスに関係するテーマとして、「ジャストインタイムモデリングによるモバイルロボットの制御」について解説します。通常、与えられたシステムを制御する際、まずシステムの「数理モデル」を作成し、その数理モデルに対して、所望の制御目標を達成するようなコントロー



【図8】モデルベース制御 / データベース制御



【図9】ジャストインタイムモデリングの手法

ラ(制御器)を設計する、という流れで行われることが多く、「モデルベース制御」と呼ばれています【図8】。しかし、数理モデルの作成は非常に多くのコストや時間が掛かる作業であり、さらに「モデル化誤差」と呼ばれる、実際のシステムと数理モデルの違いが少なからず存在します。一方、具体的な数理モデルの作成を行わず、制御対象の振る舞いに関するデータを採集し、そのデータベースのみを用いて制御を行うという「データベース制御」なる手法が存在します。この方法だと、数理モデル作成の工程が不要であり、さらにデータの入れ替えや更新も可能です。「ジャストインタイムモデリング⁷⁾」はこのデータベース制御の一種であり、以下のような流れで行われます【図9】。

(Step 1) 制御対象のシステムに対する多数の入出力データを求め、それらを格納したデータベースを構築する。

(Step 2) 要求データが与えられ、データベース内からその要求データに対する近傍データを複数個検索し抽出する。

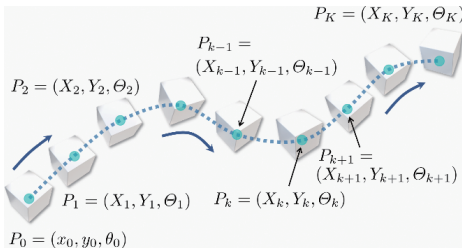
(Step 3) 得られた近傍データから「局所予測モデル」を作成する。

(Step 4) 局所予測モデルを用いて、要求データに対する予測出力を計算し、予測出力を制御入力として制御対象に印加して駆動させる。

ジャストインタイムモデリングも広い意味ではAI(人工知能)の一種と考えられますが、学習という機構が一切無いため、一般的なAIよりも計算量が大幅に



【図 10】 モバイルロボット「toio」⁸⁾



【図 11】 toio の経路追従制御問題

削減できるところが大きな特徴です。

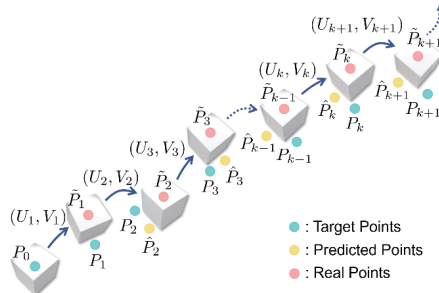
つぎに、使用するモバイルロボットとして、【図 10】にある SONY 社製の「toio (トイオ)」と呼ばれる小型モバイルロボットを用い、これは 2 次元位置・姿勢のリアルタイム取得、コンピュータと Bluetooth で双方向通信、左右のタイヤの速度指令値を制御可能、などの特徴を持っています⁸⁾。この toio に対して、2 次元平面上に設定された経路を考え、その上に目標点列ならびに目標角度を設定し、その点列を順次追従するような「経路追従制御問題」を考えます【図 11】。この制御問題を解決するために、ジャストインタイムモデリングの適用を考えます。以下がその制御アルゴリズムです【図 12】。

(Step 1) 様々な制御入力データを toio へと印加し、原点から到達した点ならびに姿勢角をデータとして含むようなデータベースを構築する。

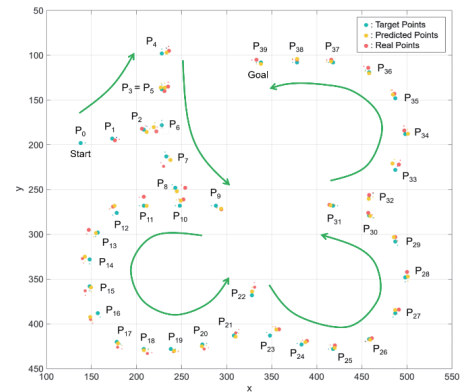
(Step 2) ジャストインタイムモデリングの手法を用いて、現在の toio の位置から次の目標点へ遷移させるような制御入力を計算する。その際に、計算時間による遅延が発生せず、滑らかな動作を実現させるために、到達予測位置を計算することによって、誤差を小さくなるようにする。

(Step 3) (Step 2) を繰り返し実行することによって、目標点列に toio を順次追従させ、経路追従制御を行う。

実機実験を行った結果が【図 13】に示されており、提案したジャストインタイムモデリングによる制御アルゴリズムによって、toio は小さな誤差で目標点列を順次追従し、結果として目標経路の追従制御が行われている様子が分かります。なお、toio は滑らかな動きで経路追従が行われており、計算による遅延も一切ないことが確認できています⁹⁾。



【図 12】 ジャストインタイムモデリングによる制御アルゴリズム (青：目標点, 黄：予測点, 赤：実際の到達点)



【図 13】 toio を用いた実機実験結果 (青：目標点, 黄：予測点, 赤：実際の到達点)

甲斐研究室では、このジャストインタイムモデリングによる制御技術を、車両モデル、ドローン、ロボットマニピュレータ、2 足歩行ロボットなどの様々な制御対象へと応用しており、より高速・高精度なデータベース制御を目指して日々研究を進めています。

4. おわりに

本記事では、ロボティクスに必要となる機能をどのようにデザインするかを中心に、機能デザイン工学科の松本研究室と甲斐研究室における、ロボティクス関連の取り組みを紹介しました。紙面の都合により、紹介した研究テーマは一部であり、他にも様々な研究活動を行っています。本記事が、機能デザイン工学科のロボティクス分野に興味を持って頂けるきっかけとなれば幸いです。

【参考文献】

- 1) 増田良介, “ISO/TC 299/WG 1 (用語) の現在, 過去, 未来”, 日本ロボット学会誌, 38 巻, 5 号, pp. 419–422, 2020.
- 2) 経済産業省, ロボット政策研究会 報告書, 2006.
- 3) Mahoney FI, and Barthel DW, “Functional evaluation: The Barthel Index.” Maryland State Medical Journal, Vol. 14, pp. 61–65, 1965.
- 4) 障害福祉研究会編：国際生活機能分類－国際障害分類改訂版. 中央法規出版, 2002.
- 5) 大川弥生, “「よくする介護」を実践するための ICF の理解と活用；目標指向的介護に立って”, 中央法規出版, 2009.
- 6) 大須賀, 足立, システム制御へのアプローチ, コロナ社, 1999.
- 7) Q. Zheng and H. Kimura, Just-in-time modeling for function prediction and its applications, Asian Journal of Control, Vol. 3, Issue 1, pp. 35–44, 2001.
- 8) toio 公式サイト, <http://toio.io>
- 9) 剣持, 甲斐, 予測型ジャストインタイムモデリングに基づいたモバイルロボットに対する自動経路追従制御と実験的検証, 電子情報通信学会信学技報, ITS2023–79, pp. 1–6, 2024.