



# JST MIRAI Program

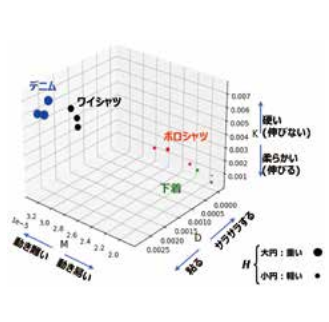
未来社会創造事業

探索加速型「超スマート社会の実現」領域 本格研究

製造業に革新をもたらすスマートロボット技術の開発



リアルハプティクスと機械学習で  
作業スキルをロボットに移植する



研究開発代表者

大西 公平

慶應義塾大学  
新川崎先端研究  
教育連携スクエア  
特任教授



## CONTENTS

01  
未来社会創造事業とは

03  
プロジェクト概要

05  
研究開発成果の紹介

13  
今後の展望



未	来	社	会
創	造	事	業
と	は		

研究開発を実施します。その研究開発において、斬新なアイデアの取り込み、事業化へのジャンプアップ等を柔軟かつ迅速に実施可能とするような研究開発運営を採用します。

未来社会創造事業では、社会・産業ニーズ(潜在的なニーズを含む)を踏まえ、経済・社会的にインパクトのあるターゲット(出口)を明確に見据えた技術的にチャレンジングな目標を設定し、戦略的創造研究推進事業や科学研究費助成事業等の有望な成果の活用を通じて、実用化が可能かどうか見極められる段階(概念実証/POC:Proof of Concept)を目指した

本事業は異なる2つのアプローチ「探索加速型」と「大規模プロジェクト型」で構成されます。

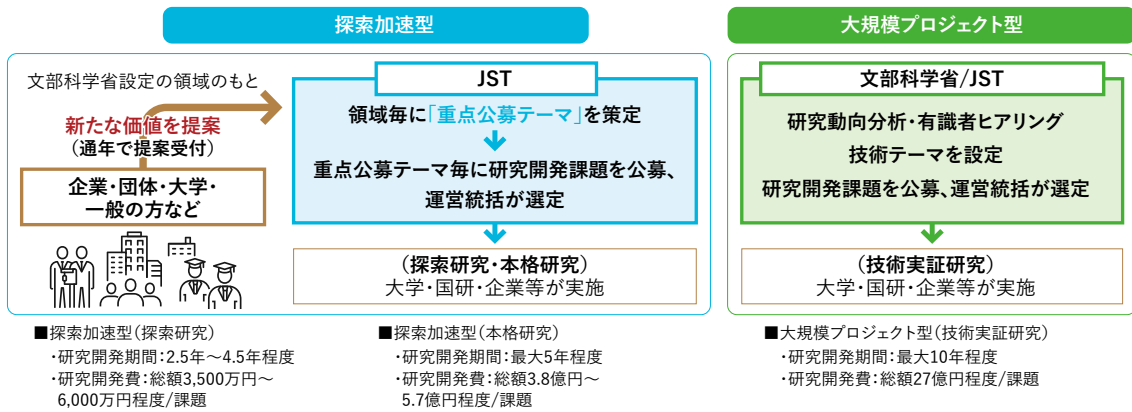
### 【探索加速型】

比較的小額の課題を多数採択(スモールスタート)する探索研究から、それらの課題を絞り込み、集中投資する本格研究へと段階的に研究開発を進めます。探索研究では、多くの斬新なアイデアを公募して取り入れ、本格研究に向けてアイデアの実現可能性を見極めるための研究開発を行います。探索研究から本格研究への移行時や、本格研究実施期間中において、ステージゲート評価を実施し研究開発課題を絞り込むことで、最適な研究開発課題を編成します。

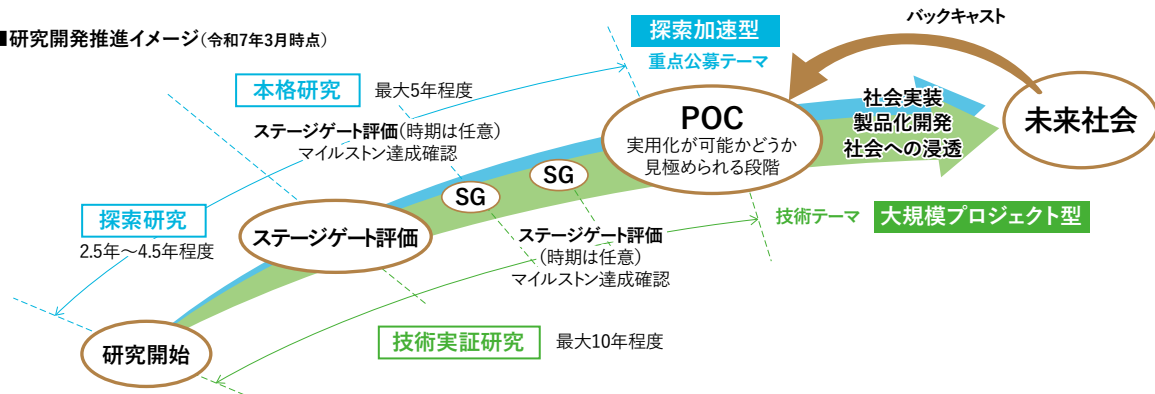
### 【大規模プロジェクト型】

科学技術イノベーションに関する情報を収集・分析し、現在の技術体系を変え、将来の基盤技術となるよう文部科学省が特定した「技術テーマ」に係る研究開発課題を公募し、集中的に投資します。

■事業概要図(令和7年3月時点)



■研究開発推進イメージ(令和7年3月時点)



## 「超スマート社会の実現」領域

「超スマート社会の実現」領域は、将来の産業創造と社会変革に向けた新たな価値の創出の視点に留意した、領域横断的(横断的)な領域です。具体的には、ネットワークやIoTを活用する取組を、ものづくり分野の産業だけでなく、様々な

分野に広げる研究開発や、超スマート社会において、我が国が競争力を維持・強化していくための基盤技術の強化などを対象とします。また、衛星測位、衛星リモートセンシング、衛星通信・衛星放送に係る宇宙に関する技術なども対象とします。

### 重点公募テーマ

## サイバー世界とフィジカル世界を結ぶモデリングとAI

Society5.0が目指す「サイバー空間とフィジカル空間の高度な融合」のためには、実世界(フィジカル空間)の複雑で時々刻々と変化する状況に対応し、センシングによって収集されたデータに基づいて判断や最適化を行い、実世界への制御・操作・働きかけといったフィードバックを行うというサイクルを繰り返し実行することが必要です。本重点公募テーマは、実世界の対象はエネルギーや交通、ものづくりの全体サイクル、防災・減災など複雑で変化する社会システムであり、これらを扱うために、モデリング/シミュレーション技術とAI・機械学習技術のそれぞれの特長

を活かし融合した取り組みにより、新しい応用分野を切り開く研究開発を推進します。

例えば、対象に関する事前知識を活用して機械学習を高度化する技術、機械学習した深層ネットワークからモデリング/シミュレーションに活用できる知識を抽出する技術、機械学習技術を適用してモデルパラメータだけでなくモデル構造を学習する技術などの技術開発により、実世界へのリアルタイムなフィードバック、精度や処理速度の飛躍的な向上、複雑な現実世界の問題の解決などの実現を目指します。

# リアルハプティクスと機械学習で 作業スキルをロボットに移植する

人間のようにモノに触れるだけでその重さや質感を自然に感知し、力の加減を調整する感覚=力触覚を人工的に実現する技術が「リアルハプティクス」だ。この技術によって職人技のロボットへの継承が実現しようとしている。



大西 公平 Kouhei OHNISHI

## Profile

慶應義塾大学 新川崎先端研究教育連携スクエア 特任教授  
2018年より未来社会創造事業研究開発代表者



## 背景

日本の製造業を支える66万社にのぼる中小企業は労働生産性の低下と高コスト体質に加え、熟練作業者の払底や若年層の離職などによる人手不足が深刻化し、困難に直面している。製造業では産業用ロボットの導入や自動化が進んでいるが、その多くは塗装、溶接、マテリアルハンドリングなどの位置指示で作動する定型作業の自動化にとどまっている。日本の製造業が生み出す付加価値の源泉は、組み立て、食品加工、縫製、研磨などの作業対象に合わせて力加減や柔軟な動作を必要とする、非定型作業によるところが大きい。それらのほとんどは人手に頼って

おり、自動化に至っていない。その原因は、既存の力センサーや画像センサーでは検出の精度や速度、また応答の速度が人の持つ感覚取得能力には遠く及ばず、さらには作業者が自然に身につける勘・コツといわれる暗黙知を情報として明示化できないため、特に接触を伴うロボット動作を教示できないことにある。

このような状況の中で、実空間(フィジカル空間)の作業感覚をデジタル化し、仮想空間(サイバー空間)で解析・予測などを行う力触覚を持つロボットが、従来の産業用ロボットが苦手としてきた、非定型作業の自動化を実現する切り札として期待されている。



## 実現したい未来社会

慣れれば誰でもできる比較的単純な非定型作業をロボットにさせようとしても、対象の形状や物理特性が時々刻々と変化するような作業では教示そのものが困難である。この解決には、実空間(フィジカル空間)の作業感覚をデジタル化し、仮想空間(サイバー空間)でそれを用いてAIの支援による動作予測や動作修正を効率よく行ない、変化する実空間に整合する動作指令を高速生成することで解決が可能である。本開発ではSociety5.0が提唱する、サイバー空間とフィジカル空間が高度に融合したスマートロボット技術を開発し、人による臨機応変な作業を人工的に実現することで経済発展と社会的課題解決の両立を目指している。

具体的には、多種多様な材質や形状の布地を扱う縫製作業や重労働であるが繊細な力加減も求められる研磨作業などにスマートロボットが適用可能であることをPOCとして実証し、

これらを拡張することでこれまでの製造業の限界が突破できることを示す。また、作業者の暗黙知である技能やスキルが発揮された動作データを援用することで、ロボットがその技能やスキルを動作に反映させることが可能になり、既存の教示を主体とした産業用ロボットでは不可能であった非定型作業を含む自動化の範囲が拡張され、また、熟練作業者の技能のデジタル継承も実現できることを明らかにする。

近い将来、この技術は介護・看護といった医療福祉分野や建築土木分野、農林水産分野など他分野への波及が見込まれるほか、教育分野への展開も可能と考えられる。製造業だけではなく、生産年齢人口が減少している日本の産業全体の人手不足解消と生産性向上、さらに国際競争力の強化を実現する新たな未来社会の姿となる。



## 研究概要

探索研究では、人に付随する暗黙的知識や技能等を動作データとして定量化した。力と速度を統合制御することで、動きや力触覚を人工的に実現する独自のリアルハプティクス技術を用いたロボット操作で、操作者が状況に応じて動作を補正することが可能な手法を考案した。また、動作自体を多段階に細かく評価する機械学習アルゴリズムを開発し、熟練度を定量的に示すことを可能にした。

本格研究では、縫製作業と研磨・研削作業の自動化を試み、作業スキルのデジタル化技術、高速力触覚検知技術、力触覚対応のAI技術を開発し、それらを統合した試作ロボットで基礎的な作業の自動化を実証した。POC1では、異なる硬さの布地で直線縫製や曲線縫製、立体縫製を、一連の動作計画を立てる計画部と、作業中の応答によって動作を補

正する修正部からなる機械学習によって行い、スキル動作の生成を成功させた。POC2では、複雑形状の部品の研削を行い、切断面により計画を行う上位系とバイラテラル模倣学習を行う下位系を組み合わせることで、形状の異なるワークピースそれぞれに適した力加減を行いながら、短時間で研削が行えることを検証した。「人では容易にできる」のに「ロボットでは困難な」非定型作業を対象に、人のスキルが機械学習を援用することでスマートロボットに移植されたことを確認し、自動化の範囲が拡張した。

本プロジェクトで開発した、機械学習により接触対象に適應したロボットのスキル動作が生成されるオリジナルな成果と後述するツインマスターシステム2件の特許申請を行った。

## 研究開発体制

**研究開発代表者**  
慶應義塾大学  
大西 公平グループ

【縫製】  
力感触モデルの定式化、力感触に基づくロボット動作の制御  
各種力感触マスター・スレーブロボットの開発  
-縫製の専用機(縫製メーカーと共同開発)  
-人型の汎用機(PJ内で独自開発)

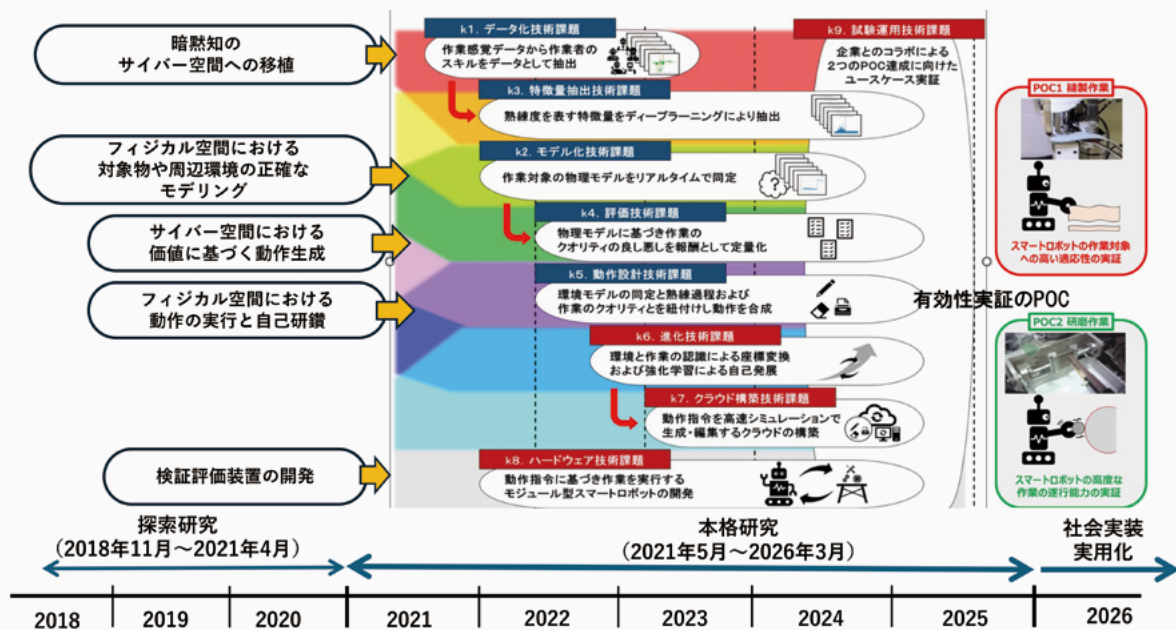
京都大学  
森本 淳グループ

【研磨・研削】  
研磨モデルの定式化、研磨モデルに基づくロボット動作の制御  
研磨ロボット評価システムの開発  
研磨ロボットと力感触モデルの融合

産業技術総合研究所  
山崎 啓介グループ

【共通技術】  
対象物の物性推定の高速性と高精度化

## 研究開発の流れとPOC



k1～k5 中核技術に関連する開発項目  
k6～k9 実装技術に関連する開発項目

Introduction of research and development results

研究の紹介



大西 公平  
Kouhei OHNISHI

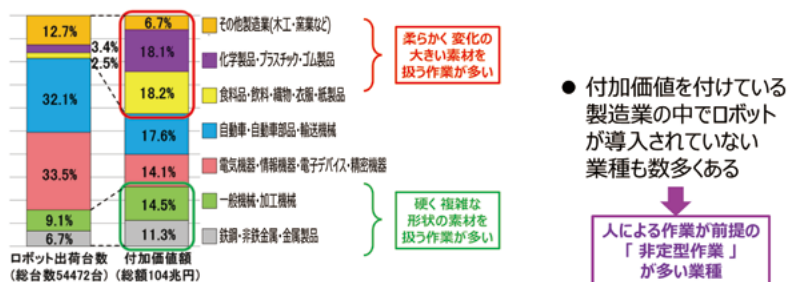
慶應義塾大学  
新川崎先端研究教育連携スクエア  
特任教授

非定型作業こそ自動化が必要

「スマートロボット」とは、人間の作業スキルを学習し非定型作業を自動化できる、AI搭載のロボットだ。臨機応変に作業に臨む環境適応性にこだわり、ロボットの形にはこだわらない。今話題のヒューマノイド(人型ロボット)とは一線を画す。

求められる背景には、製造業で用いる産業用ロボットの課題がある。産業用ロボットは一般に、手や足といった先端効果器の軌道を人間があらかじめ手で直接教示したりペンダントと呼ばれる入力・操作装置で教示したりすることで、先端効果器をその軌道通りに動かす。そこで教え込むのは、先端効果器の位置であり働き掛ける力ではない。そのため、例えば縫製したり研磨したりするような、対象物に対する力加減を臨機応変に変化させながら進めていく接触を伴う非定型作業を教示するのは、困難であった。

製造業の業種別に産業用ロボットの出荷台数を見ると、その実態が浮かび上がる。一般社団法人日本ロボット工業会が公表するデータによれば、例えば「化学工業」「食料品」「機械」「金属製品」などの業種でロボットの導入が進んでいない。2024年の出荷台数の構成比を見ると、導入が進んでいる「機械」でも10.5%で「化学工業」では0.9%と1%にも満たない。これらの業種は人間による作業を前提とする非定型作業が多いからだと思われる。探索研究を開始した2018年でのこれらの割合がほとんど変わらず、その当時から状況は変わっていないといえる。



製造業におけるロボット活用状況(2018年度)

ロボット出荷台数:日本ロボット工業会および付加価値額:経済産業省調べ  
(三菱電機(株) 小平紀生機器事業部主席技監のご教授による)

ところが今、非定型作業こそ、自動化が求められる時代である。作業を支えてきた熟練労働者の高齢化で退職者が増加し、スキルを伝承しようにも、伝える相手もいなければその手段もない。このままでは日本の産業競争力は弱まるばかりで産業全体の生産性を高めていくには、「スマートロボット」の開発が欠かせない。

研究の端緒には、慶應義塾大学の西公平教授が2000年代以降提唱してきた「リアルハプティクス」と呼ばれる、ロボットの力加減をリアルタイムで制御する技術がある。この技術を基礎に、非定型作業のロボットによる自動化への第一歩を踏み出そうというのである。

## 力触覚を伝え合う仕組み

ここで「リアルハプティクス」の全体像を概観する。想定するロボットは、人間が操作する手元ロボットと同期した動作で対象に接触する遠隔ロボットだ。

「リアルハプティクス」ではまず、この2つのロボット間で力触覚を計測・伝送する。力触覚とは、力覚と触覚の複合知覚であり、接触することで対象の強度や質感を感知する感覚を指す。計測・伝送する数値として、強度は力と速度の比で、質感はその振動成分の分布で表現される。

この力触覚を遠隔ロボット(フォロワー)側で計測し、手元ロボット(リーダー)側に伝送すれば、操作者はあたかも手元ロボット側で対象に接触しているかのような感覚を受ける。そこで操作者が力加減を調整すれば、その結果は遠隔ロボット側にも反映されるのである。

計測・伝送の仕組みを成り立たせるポイントは、接触時の力と速度の情報を同時に高速で伝送することにある。「手元ロボット側の力・速度と遠隔ロボット側の力・速度を結び付ける力触覚伝送モデルを構築し、力については作用反作用則を、速度については追従則(同期則)を成立させることにあります」と大西教授は解説する。

そのカギを握るのが、ロボットの導入である。ロボットとは、頑健さを意味し、環境の変化や誤差などに動じることなく、目的の制御性能を達成し得る頑健な制御システムを指す。この制御システムを取り入れた点が、力触覚の計測・伝送を可能にした。

感覚の伝送に人間はかねてから挑んできた。19世紀には聴覚の伝送を電話という技術で実現し、20世紀には視覚の伝送をテレビという技術で実現した。

力触覚の伝送は、大西教授によれば、1940年代から研究開発が続けられてきたという。「当初は危険物質を遠隔操作で扱おうという動機で研究開発が始まりました。しかしまだ、コンピューターのない時代。挑戦はことごとく失敗し



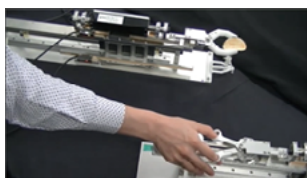
ました。1980年代に産業用ロボットが一般化すると、そこに力触覚を持たせる研究開発が始まりました。ところが、成功までの道のりは遠く、うまくいかない時期が20~30年続いていました。

大西教授は、そこに風穴を開けた。本人は「ビギナーズブラック」と謙遜するが、基礎には、1980年代に発表した「外乱オブザーバ」という独自のロボスタ制御理論がある。

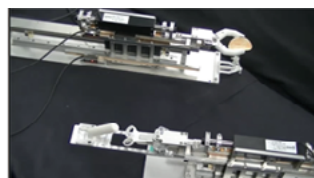
この制御理論は、制御対象の出力に影響を与える「外乱」を推定するもの。その結果を制御システムに取り込むことで、そのロボスタ性を高める。「発表当時、『都合のいい実験しか実施していない』など、学界から批判を浴びました。しかし今なお、この理論は多方面で発展しています」。大西教授は社会貢献への矜持を見せる。

力触覚伝送システムの1つとして大西教授が考案した「リアルハプティクス」はICチップとして製品化されている。大西教授がセンター長を務める慶應義塾大学新川崎先端研究教育連携スクエアハプティクス研究センターと株式会社東芝(神奈川県川崎市)が設計したものを、研究センター発のベンチャー企業として2016年4月に設立されたモーシヨンプ株式会社(神奈川県川崎市)が製造・販売を担う。

製品名は「AbcCore®」。モーター2台を接続し互いの運



親機(リーダー装置)を操作することで子機(フォロワー装置)があたかも相互につながっているかのように力触覚を伝えながら作動する



親機を動かしているときに動作情報(人の力と速度)を記録しているため子機はそのデータを用いて忠実に元の動作を再現することができる



元々の動作が優れれば対象が突然変わっても記録された動作は柔軟性があり異なった対象の把持も可能

グリッパでポテトチップスを掴んで運ぶという作業を記録して再現

動を瞬時に同期させ、力触覚を伝え合う。また上位システムを接続すれば、モーターの位置・速度・力の制御指令や計測を、そこから操作することも可能。力触覚情報はデジタルデータとして扱えるため、伝送や記録・再現はもとより、拡大や縮小など人間の力触覚を拡張した動作も可能である。

「リアルハプティクス」ではまた、手元ロボット側から遠隔ロボット側に力触覚と動作との因果関係を教示し、ロボットに身体性を持たせることができる。手元ロボット側で例えば「重い」という力触覚を受け取れば、遠隔ロボット側に「強く持とう」という動作指令を下す。同じように、「硬い」とい

う力触覚なら「力を抜こう」という動作指令を、「脆い」という力触覚なら「優しく触ろう」という動作指令を下す。遠隔ロボット側で接触対象に適応した臨機応変な動作を実現できれば、非定型作業をこなすことも可能になる。

この技術をもう一步進めれば、非定型作業の自動化にも道が開ける。手元ロボットを、操作者の代わりに務めるAIシステムに置き換え、そこで生成した動作指令を遠隔ロボット側に伝えることで、非定型作業を自動でこなせるようになる。

## 手元ロボットの形状を新たに開発

課題は、AIシステムにどのような情報を与えるのか、という点にある。1つは、柔軟性と適応性のある操作者の動作データだ。仮想モデルに基づく動作計画を立て、動作開始時に動作指令をAIシステムで生成する。もう1つは、その結果として遠隔ロボット側が受け取る力触覚データだ。これらを基に、修正動作指令をAIシステムで生成する、というサイクルを繰り返す。これは人の接触時における刺激と反応プロセスのロボット版である。

未来社会創造事業では、こうした課題への対応を試みながら「スマートロボット」開発に取り組み、非定型作業である縫製作業や研磨・研削作業の自動化に挑んだ。研究期間は、探索研究で2018年11月から2021年4月まで、続く本格研究で2021年5月から2026年3月まで、と計7年4か月にも亘る。

大西教授によれば、研究開発にとって転機は2つあった

という。1つは、操作者が取り扱う手元ロボットの形状開発である。一般にはエグゾスケルトン型と呼ばれる形状が使われる。身体の一部を覆うように人間が装着するもので外骨格型とも呼ばれる。ところがこの形状は、人間が装着し作業するのに苦勞する。重量があるうえに、無理な動きを強いられ、痛みを伴うからだ。「これを装着して作業すると、5～10分が限界です。しかし、手元ロボットの操作を通じて遠隔ロボットに非定型作業させる時間として、2～3時間は確保したかった」と大西教授は振り返る。

そこで開発したのが、ツインマスター型と呼ばれる形状である。操作者は手袋のような受動部に手を差し入れ、正面のロボットに自らの動作を鏡面反射させるように動かすものだ。ただロボットから遠ざかる動作の場合、鏡面反射であればロボット側も遠ざかるが、ツインマスター型では逆にロボット側は操作者に近づく。



ツインマスター型の手元部分

発想の原点は、ロボットを動かすのに必要な速度と力の2つを、操作者側とロボット側でどう受け持つか、という役割分担の見直しにある。「エグゾスケルトン型では操作者側で速度も力も受け持ってきました。それが重荷なら、操作者とロボットの間で役割分担すればいいのではないかと、思い付きました。ツインマスター型では、速度は操作者側で負担する一方、力すなわち負荷はロボット側に持たせる、という考え方です」と大西教授は説明する。

操作者側の動作が大きい場合、重量物であるロボット側が相応の速度で動くことになるため、安全面でリスクがある。

しかし幸い、自動化を想定する非定型作業とは、縫製作業や研磨・研削作業といった手元作業。操作者の動作は限られる。大西教授は「プロ野球の大谷翔平選手やゴルフのタイガー・ウッズ選手のような大きな動きでなく、自動化に必要な最小の動作データを取得するのが目的ですから、四六時中、ロボットを使う必要はありません」と安全性を強調する。

非定型作業を自動化するにあたっては、AIシステムに与える動作データの質が問われる。良質なデータを収集できていないと、精度の高い自動化動作は望めない。操作者側の負荷軽減は、こうしたデータの質向上につながるのである。

## キャリブレーションを超高速化

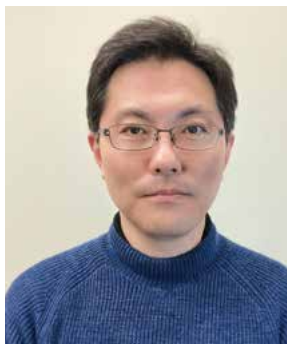
もう1つは、力触覚を瞬時に導き出す計算アルゴリズムの開発だ。その前段として、力触覚を構成する質感とは何かという点を大西教授らは新たに発見した。それは、慣性、剛性、粘性、負荷、という4つの成分で表現される。大西教授はアナロジーとして光の3原色を挙げる。「人間の目には3原色である『赤』『緑』『青』を感知する細胞があります。そこで感知する3原色の構成比に応じて、目にした色を紫と感じたり黄緑と感じたりします。力触覚も原理は全く同じです」。

そのうえで、この質感とは回路理論におけるアドミタンスという数値で導き出されるという。「質感の硬いものに軟らかい動作では作業しても進みません。一方、質感の軟らか

いものに硬い動作で作業すると壊しかねません。非定型作業では接触対象の特性に合わせた動作が求められます。それはつまり、特性と動作の相互のアドミタンスを合わせることで。そうした基礎的な概念を見いだしたのです」。

このアドミタンスを求める計算には、高速性が求められる。人間であれば、接触した瞬間にその質感を感知するだけに、瞬時の算出が欠かせない。大西教授に言わせれば、その速度は1,000分の1秒。超高速のアルゴリズム開発が必要だ。この領域で研究開発を担当したのは、産業技術総合研究所人工知能研究センターで研究チーム長を務める山崎啓介研究チーム長のグループだ。





山崎 啓介  
Keisuke  
YAMAZAKI

産業技術総合研究所  
人工知能研究センター  
研究チーム長

このグループではもともと、シミュレーションにおけるパラメーターの事前調整であるキャリブレーションの精度を高めるための基盤技術を構築していた。シミュレーションの活用によって、ロボットの作業計画の立案に高性能化・高効率化を期待できるが、キャリブレーションには膨大な時間やコストが必要になる。そこで、時間やコストを抑えながら高精度のキャリブレーションを可能にする基盤技術が求められていたのである。未来社会創造事業では、この技術をさらに発展させている。

探索研究期間では、キャリブレーションの高速化を図るため、AIとシミュレーションを融合する「モデルブリッジ技術」を考案した。帰納的手法であるAIと演繹的手法であるシミュレーションとでは、基本的な計算原理が異なるため、本来その融合は容易ではない。モデルブリッジ技術は、過去の事例をAIに学習させ、そこから導き出した最適なパラメーターを基に、シミュレーションに最適なパラメーターを推定するものだ。パラメーターは、従来のように探索するのではなく推定する。それによってキャリブレーションの高速化を図る。実際、キャリブレーション時間を、製造ライン上のシミュレーションでは1,000倍以上、流体シミュレーションでは10,000倍以上、高速化した。

本格研究期間では「モデルブリッジ技術」を「リアルハプティクス」に適用することを試みた。遠隔ロボットが把持した対象の質感を瞬時に推定する技術を開発した。質感は、ロボットが対象を一定時間把持した際のデータを取得したうえで、運動方程式に基づくシミュレーションを実施して推定する。「モデルブリッジ技術」を適用しキャリブレーションを高速化することで、質感の瞬時推定を実現した。

ここで要求された質感推定までの時間は、数ミリ秒。山崎研究チーム長は「超高速性への要求は、それまでのシミュレーションキャリブレーションの中でも厳しいものでした。非常に挑戦的な取り組みを経験できました」と振り返る。

高度な要求に応えられた秘訣は、縫製作業の自動化を担当した大西教授らのグループとの密な連携作業にある。「集中的に合同会議を開催し、互いの技術を深く理解し合うことに努めました」と山崎研究チーム長は振り返る。そのうえで、一定の役割分担の下で試行錯誤を繰り返し、瞬時の質感推定に向けたキャリブレーションの高速化を追求した。

山崎研究チーム長は役割分担の在り方を説明する。「質感を構成する、慣性、剛性、粘性、負荷という4つのパラメーターが、把持動作に与える影響は一律ではありません。そこで、寄与度の大きなパラメーターの精度を高める学習方法や推定機構の構成を私たちのグループで定め、それを大西教授のグループがシミュレーションと実機で検証する――。そういう極めて密な連携作業を、短時間で何度も繰り返しました」。

大西教授らのグループはこうした試行錯誤を経て、「スマートロボット」を開発。人型汎用機のほか、縫製作業の専用機も生み出した。専用機は3本の指を巧みに操りながら2枚の布地をミシンで縫い合わせていくもの。最終的には、「リアルハプティクス」を基に厚手や薄手といった布地の硬さ・軟らかさの違いに対応しながら、直線縫製、曲線縫製はもとより、立体縫製を実現するいせ込みも自動化できるだけの性能を実現した。

### 山崎グループ代表者より

サイバー空間とフィジカル空間の間にはフィードバックループが存在し、そのループを繰り返しながら、実世界の環境変化を理解し、最適な行動を決定します。今回の取り組みは、力触覚を加えたセンシング、サイバー空間でのシミュレーション、Human in the Loopを含めた半自動意思決定、動作実行によるフィジカル空間への介入、とループが直接的に短時間で活用された先駆的な事例です。

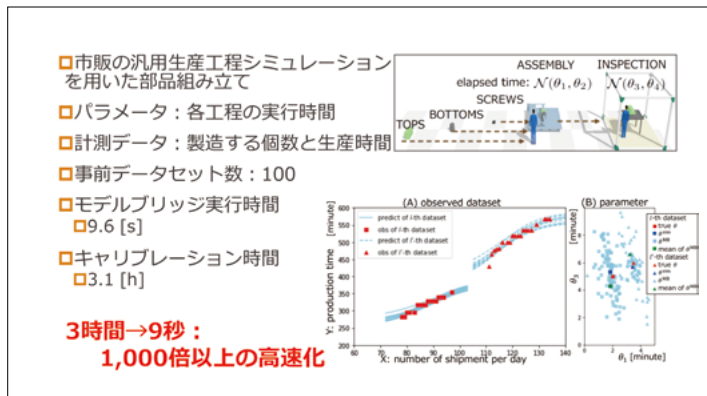


開発したスマートロボットによる自動縫製の様子  
機械学習で未知の布に対しても自動縫製が可能

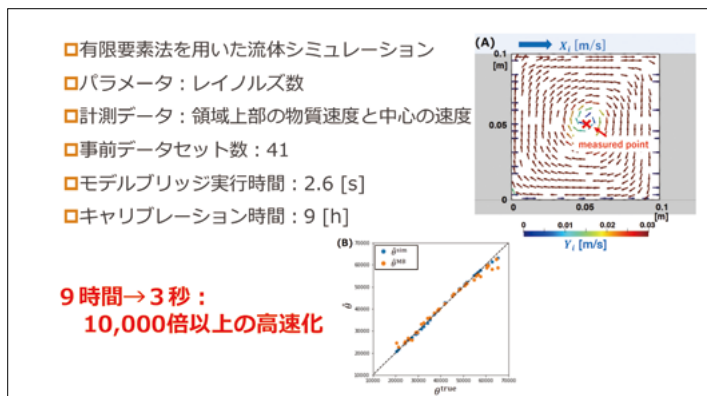
リアルハプティクスによる自動縫製



モデルブリッジは2つのモデルを繋ぎ各々の長所を生かす技術



生産工程シミュレーションへの応用において1,000倍の高速化を実現した



流体シミュレーションへの応用において10,000倍の高速化を実現した



森本 淳  
Jun MORIMOTO

京都大学  
大学院情報学研究科  
教授

自動化に挑んでもう1つの非定型作業である研磨・研削作業については、京都大学大学院情報学研究科教授の森本淳教授のグループが担当した。

ここで想定したのは、部材の表面を大まかに整える粗研磨の作業。部材の形状から作業計画を立て、それに基き実際に作業を実行したうえで、形状を改めて確認する、という手順を繰り返す。遠隔ロボット側の動きは縫製作業と異なり、研磨機に部材を押し当てるための把持動作だけで済むが、そこには力触覚だけでなく、作業後の部材形状を確認するための視覚を感知する仕組みも併せて持たせる必要がある。

最大の苦労は実験コストの高さである。一般にAI用の学習データ収集や評価実験のたびに、部材の準備や交換に多大な費用と手間がかかる。しかも、実験回数は膨大な数に上るが、研磨・研削作業は不可逆で一度加工すると部材を元に戻せない。大きな負担が想定されていた。

しかし、その酷な条件が、新たなアイデアを引き寄せた。「実験コストをどう下げるかという課題意識が、数理モデルやシミュレーションを積極活用するという新たなアイデアにつながりました。制約条件を創造の原動力に置き換えたという点が今回の成果の核心であると感じています」と森本教授は語る。

最終的には、幾何学演算で形状遷移を予測する上位コントローラーと、力触覚データを基に動作の模倣を行う下位コントローラーを組み合わせ、研磨・研削作業の自動化を達成した。ここで提案した手法は、上位コントローラーでは、部材の観測形状と目標形状を基に切断面を計画することで、初期形状や目標形状が異なる部材でも最適な研削軌道を生成することを、また下位コントローラーでは、部材の硬さや密度に適した力加減の自動調整を行い、安全で高速な研削動作を実現することを期待する。

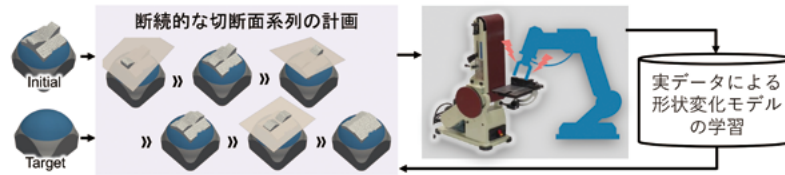
森本教授は「AI技術を用いた視覚と力触覚の統合を通じて、労働集約性の高い研磨・研削作業のロボットによる自動化に向けた方法論の開発を達成できました。またAIの学習に用いるデータ収集コストが低く、多様な部材形状・材質に適用可能な研磨・研削作業自動化システムを開発できました」と取り組みの成果を総括する。

「スマートロボット」の開発によって、「リアルハプティクス」と「AI」を基にした非定型作業の自動化へ、道が開けようとしている。こうした新たな技術開発がもたらす技術の広がりの可能性を大西教授は指摘する。「例えば聴覚の伝送にあたる電話の発明を皮切りに、電話網が広がり、それがインターネットの普及につながりました。それと照らし合わせて考えると、力触覚の伝送という技術開発の先に、どんなブルーオーシャンが待ち受けているのかという点こそが、今後問われるようになるはずです」。

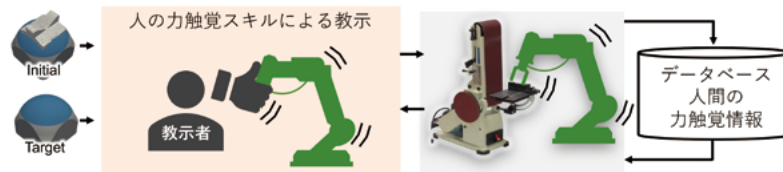
### 森本グループ代表者より

これまで人間の技能と労力が必須と考えられてきた研削のような非定型作業の自動化によって、まずは部品製造工程で頻出する「削る」という動作をロボットが代替することが可能になり、労働力減少がより深刻な問題になる日本において、それはものづくりを下支えするコア技術になると考えられます。今後は企業との連携を通じて、より実践的な作業対象・環境における実装が課題になります。

①上位コントローラー：視覚に基づく切断面計画



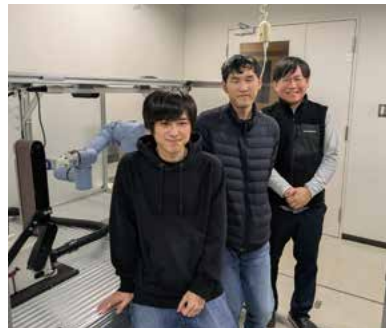
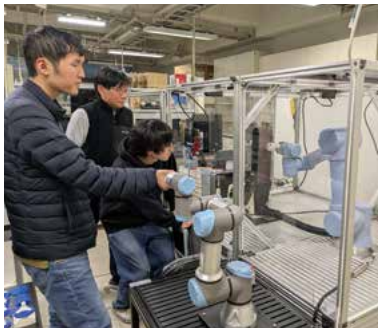
②下位コントローラー：力触覚を用いた人の適応力調整スキルの模倣学習



AI技術を用いた視覚と力触覚の融合



実験設備 (NAIST)



メンバー

主な論文

- Takumi Hachimine, Jun Morimoto, Takamitsu Matsubara, "Cutting Sequence Diffuser: Sim-to-Real Transferable Planning for Object Shaping by Grinding", IEEE Robotics and Automation Letters, 10(2), pp. 1162-1169, 2025. DOI: 10.1109/LRA.2024.3519873
- Tomoya Kitamura, Yuki Saito, Hiroshi Asai, Kouhei Ohnishi, "An Environment-Adaptive Position/Force Control Based on Physical Property Estimation" IEEE Access, vol. 13, pp. 34200-34210, 2025. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3543618
- Kouhei Ohnishi, Takahiro Nozaki, Yuki Saito, Hiroshi Asai, Tomoya Kitamura, "Force/Tactile Sensation for Contact Task" Springer, Emotional Engineering, Vol.10, pp.23-38, 2025.
- Takumi Hachimine, Jun Morimoto, Takamitsu Matsubara, "Learning to Shape by Grinding: Cutting-surface-aware Model-based Reinforcement Learning", IEEE Robotics and Automation Letters, 8(10), pp. 6325-6242, 2023. DOI: 10.1109/LRA.2023.3303721
- Kouhei Ohnishi, Yuki Saito, "Quantification of Force/Tactile Sensation", IEEJ Journal of Industry Applications vol.12, No.2, pp.125-130, 2023. DOI: 10.1541/ieejia.22004546

主な特許

- 大西公平、斉藤佑貴、浅井洋「自立制御システム、自立制御方法、及びプログラム」特願2024-221177
- 大西公平、斉藤佑貴、浅井洋「操作システム及び操作装置」特願2024-221220

# 今後の展望

## 中小企業向け動作データのプラットフォーム構築も

今後は、未来社会創造事業で確立してきたソリューションを基に、非定型作業の自動化に対するニーズを持つ民間企業との連携を深めていく方針だ。大西教授は慶應義塾大学ハプティクス研究センターとして提供できるソリューションを、①高品質な人の動作データの取得システム②数値化された力触覚データを超高速でオンライン同定するシステム③ロボットの各関節の高性能ハイブリッド制御システム④非定型作業のためのAIシステムとその組み込み⑤臨機応変ロボットを人が簡単に操作できるデジタルコックピットの構築――という5つに分けて提示している。連携対象としては、①製造業、農業、建設業、サービス業などで非定型作業の自動化を検討する企業②商社や研究開発企業などシステムインテグレーター(Sier)③大学や国立研究開発法人を含む研究教育機関などの研究開発を専門とする機構体――などを想定する。

慶應義塾大学ハプティクス研究センターではこれらの企業・機構体を対象に、「臨機応変ロボットプロジェクト」を2024年度から開始し、パートナー企業・機構体を年1回、公募する。2025年度については、2026年1月に募集を締め切った。「プロジェクト開始に乗り出したのは、2024年度は15社。2025

年度は10社程度になる見通しです」と大西教授は手応えを明かす。一方で2021年6月には、「ハプティクス技術協会」を立ち上げ、連携に向けたプラットフォームを構築した。研究センターではこれらの取り組みを通じて、非定型作業の自動化に向けた専用ロボットの開発を進める。

目線は技術分業が進む中小企業にも向く。「製品の工程ごとに担当者が異なるため、どこか1つの工程だけでも担当者が不在になると、製品そのものを出荷できなくなってしまいます。ところが熟練労働者の高齢化で、それが現実に近いに近づいています。中小企業は今、存亡の危機を迎えています」と大西教授は課題を指摘する。

そこで提案するのが、動作データのプラットフォーム構築である。ある工程の熟練労働者の動作データを共有できれば、その工程の担当者がいなくなっても、「スマートロボット」による自動化で替えが利くようになる。「ロボットに任せるか、熟練労働者に任せるか、中小企業側で選択できれば、それぞれが自社の強みを生かしながら生産活動を継続できるようになると思います」。大西教授は将来をそう見通す。



### 大西 研究開発代表者より

研究成果を半年後や1年後に出すように求めるプロジェクトが多い中、今回は探索研究と本格研究を合わせて研究期間は7年以上にわたります。非常にありがたく感じています。研究者としては、誰も開けられなかった扉をようやく開けることができたという実感です。今後、研究成果の社会へのフィードバックにまい進していきます。

慶應義塾大学ハプティクス研究センター  
<https://haptics-c.keio.ac.jp/>



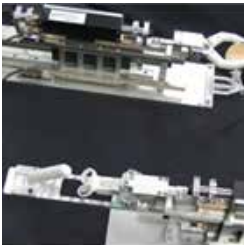
### 今後に期待すること



### 前田 章運 経営統括より

本プロジェクトは、「力触覚の計測」というコア技術を基軸に、非定型作業の自動化を可能とするスマートロボットの実現を目指すものです。労働力不足が深刻な課題となっている製造業において、大きなインパクトをもたらすことが期待されています。

本プロジェクトは「サイバー世界とフィジカル世界を結ぶモデリングとAI」というテーマで公募したものです。AI技術革新が急速に進む中で、現実世界へ直接働きかける「フィジカルAI」への注目が高まっていますが、本プロジェクトはまさにその先駆的な実現を狙うものです。2026年3月をもちまして研究開発期間は終了いたしますが、大きな社会的価値の創出を掲げるJSTの事業としては、ここからが正念場といえます。本技術が多様な現場で広く活用されることを期待しています。





国立研究開発法人科学技術振興機構  
未来創造研究開発推進部

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

TEL : 03-6272-4004

E-mail : [kaikaku\\_mirai@jst.go.jp](mailto:kaikaku_mirai@jst.go.jp)

WEB <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/>



X [https://x.com/JST\\_mirai](https://x.com/JST_mirai)



発行：令和8年3月