

研究助成成果報告 研究助成 (S)

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

The research on a worker robot with force sensing and control for skill automatization

2198002



研究代表者	早稲田大学 創造理工学部	教 授	菅 野 重 樹
共同研究者	早稲田大学 次世代ロボット研究機構	研究院講師	汪 偉
	早稲田大学 基幹理工学部	教 授	尾 形 哲 也
	早稲田大学 創造理工学部	准教授	アレクサンダー シュミッツ

〔研究の目的〕

現在、少子高齢化による労働力不足、人件費の高騰などの状況を受け、様々な分野でロボット技術による自動化が進んでいる。しかし、精密な仕上げ、外観検査、研磨加工など、熟練の職人による作業をロボットで再現することは難しく、自動化はほとんど進んでいない。初心者がこれらの技術を習得するには長期の時間と多大なコストが必要であり、人材の確保が難しい。加えて、単純な繰り返し作業であるという点からも自動化が強く求められている。

本研究では、工場の現場で基礎工程として広く存在している「研磨加工」に注目する。研磨加工は、製品の表面仕上げによく用いられる加工方法である。砥石を高速回転させ製品に押し当てる、もしくは高速回転させた製品に砥石を押し当てるといった方法で製品の表面の凹凸や異物を除去することが可能である。技能の伝承という面からは研磨加工には武道や芸道のような段級制や免許制がなく、技術の達成度が曖昧である。また技術を習得したとき、それが数世

代に渡って引き継がれたものなのか、自身の努力で新たに得たものか判断がつかない。このような問題を解決するには技能のシステム化が必須である。

本研究では、この「研磨加工」の、熟練技能のシステム化を目的とした。

まず、熟練技能に不可欠な「繊細な力の感覚と制御」機能をロボットに与えるため、「押し付け力を調整可能な研磨装置」及び「人間の機序を模倣した両腕ロボットワーカー」を開発し、システム化のためのハードウェア・プラットフォームとした。加えて人間が作業中の「マルチモーダルな技能データ」を解析した。この人間のマルチモーダルデータから、機械学習によってロボットの動作学習を行うことで、スペックが異なるロボットでも動作生成可能な汎用性を持つ、動作学習・生成システムを構築し、熟練技能のシステム化を図った。

これらのプロセスを通して、熟練技能の伝承が可能な「人間と機械の融和」場面が実現できると期待される。

〔研究の内容、成果〕

1) 人間の機序を模倣した両腕ロボットワーカー

熟練の職人は「磨く、削る」など、スキルが求められる作業を行う。この際、手首の動きに伴い、腕部、腰部、頭部などの多様な動作を加えて、複雑な身体動作をおこなっている。一方、工場の現場で多く導入されている産業用ロボットは、5自由度や6自由度など人間に比べ自由度が少なく、技能者の身体動きの再現が困難である。

そこで、本研究では、熟練技能の自動化のハードウェア・プラットフォームとなる「ロボットワーカー」を開発した。この際、身体構造など人間の機序を模倣した設計を行うこととした。本研究で開発された「ロボットワーカー」を図1に示す。

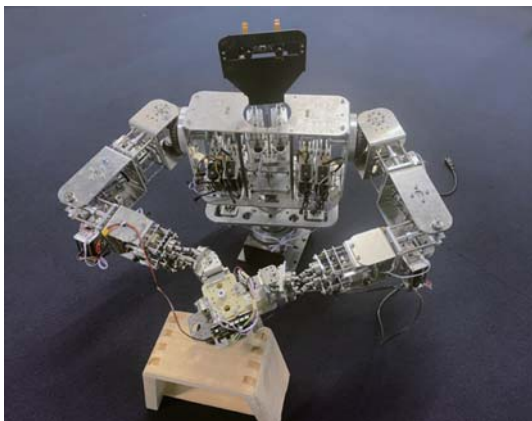


図1 開発した「ロボットワーカー」

「ロボットワーカー」は、技能者の様々な巧みな作業を行う際の身体動作を再現させるため、多くの自由度から構成する設計とした。具体的には、両腕部14自由度、腰部3自由度、頭部3自由度を含め、全20自由度を有する。さらに、ロボットの各部分のサイズも人間の身体の各部位の比率に従って設計した。

「ロボットワーカー」の各関節の駆動方式には、既存の産業用ロボットで用いられる回転関節駆動方式と異なり、人間の筋肉系と骨格系の仕組みを参考とした。具体的には、リニアアク

チュエータとボールジョイントの組み合わせで20自由度の電動駆動システムを実装することとした。

2) 押し付け力を調整可能な研磨装置

研磨加工では職人は繊細な力の感覚を頼りに作業を行う。先行研究では、熟練者、経験者、素人で研磨時に材料に付加する圧力を計測し比較した。その結果、素人は研磨する力のバラツキがあり、熟練者は力を一定に保持し、なおかつ力を抜く技術があるということが明らかとなった。また、熟練者は未経験者に比べ、素早い操作で表面に2倍の研磨力を加えることができ、その結果、表面粗さを1/2に抑えることができていた。

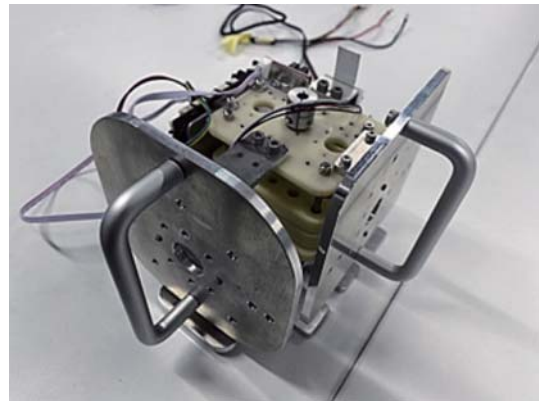


図2 開発した両手持ち「研磨装置」

このように、作業中の押し付け力の調整の技術が研磨加工の品質を左右し、作業者のスキルのレベルも決める重要な要素となる。そこで、既存の手持ちの研磨装置に、押し付け力を感知・調整する機能を付加することとし、人間が違和感なく使うことができ、ロボットにも適用可能な「押し付け力を調整可能な研磨装置」を開発した。この両手持ちの研磨装置を図2に示す。人間が研磨作業を行う際、市販の研磨装置の代わりに、この装置を用いて研磨作業を行うことで、押し付け力のデータを取得、解析が可能となる。そしてロボットワーカーが研磨作業を行う際にも、この装置を利用し、状況によって必要な押し付け力を調整することが可能とな

る。

開発した装置は、市販型研磨装置の上部にセンサー、可変柔軟性機構を搭載した構造を持つ。センサーはリニアエンコーダーとフォトセンサーで構成され、力の変化を柔軟部の変位として取得する。可変柔軟性機構とは、柔軟部の特性（コンプライアンス）を変えることができる機構である。装置に負荷をかけて、エンコーダーの値を変位として記録して実験を行い、装置の「力-変位」特性を調べた。装置の柔軟部の柔軟性を5段階で設定して実験を行った。実験結果を図3に示す。この特性に基づき、研磨する際のエンコーダー値から押し付け力の推定ができるようになる。

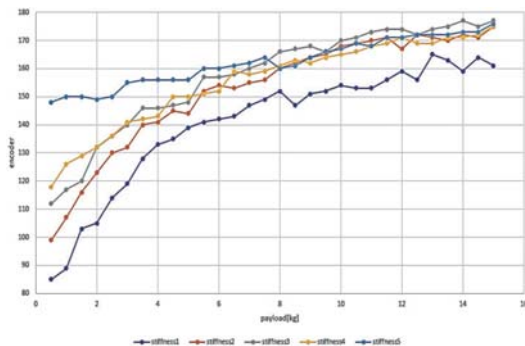


図3 「研磨装置」の「力-変位特性」

開発した装置は、可変柔軟性機構により柔軟性を連続的に変化させることができ、この機構だけでも押し付け力の調整が可能になる。この装置をロボットに搭載、研磨し、コンプライアンスを変動させた際のエンコーダーの値を押し付け力として記録して実験を行った。「コンプラ

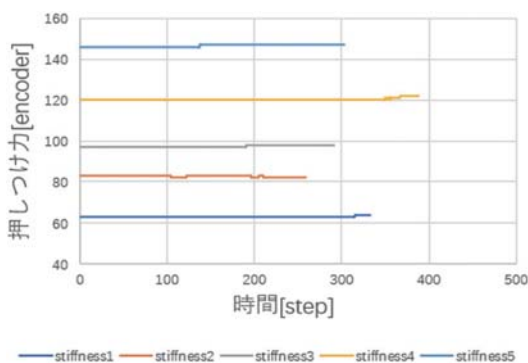


図4 「研磨装置」の「コンプライアンス力」特性

イアンス力」特性の結果を図4に示す。実験では、5段階のコンプライアンスで変化させデータを取得した。ロボットが研磨する際、この特性を参照し、押し付け力を実時間で調整することが可能になる。

3) マルチモーダル技能データ取得システムの開発及びデータ解析

生産現場では、産業用ロボットに対象物の運搬、溶接、塗装などの目的動作をさせるため、事前にエンジニアがロボットの目標動作を記憶（教示）させ、作業中に制御プログラムでそのとおりに繰り返し動作を行うのが一般的な方式である。これはティーチングプレイバック方式と呼ばれる。

しかし人間が「研磨、仕上げ」など、技能が求められる作業を行う際は、上記の産業用ロボットの「ティーチングプレイバック」方式と異なり、目視、力の感覚・触覚、身体の動作などを協調的に行うことによって、様々な巧みな目標作業が実現できる。このような、人間の作業に対する技能を理解するためには、作業中の「人間の身体の動き、視界、対象物への接触力」などマルチモーダルなデータを取得し、解析する必要がある。

そこで、本研究では「マルチモーダル技能データ取得システム」を開発した、図5にシス

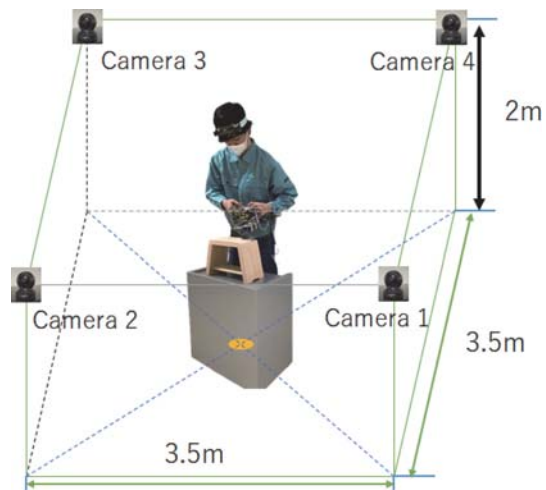


図5 マルチモーダル技能データ取得システム

テム全体の構成を示す。このシステムは環境カメラ、ヘッドマウントカメラ、押し付け力制御可能な研磨装置から構成される。これらにより体の動きのデータ、視界の移動データ、研磨時の押し付け力のデータが取得される。具体的なデータ事例を以下に示す。

環境カメラと体の動きの情報：環境には作業着、研磨対象を中心に、4方にカメラが設置されている。環境カメラ同士の間隔は3.5m、高さ2mの位置に設置した。環境カメラは研磨作業の様子を録画する。保存された動画から姿勢推定を行い、スケルトンモデルを構成、各関節の座標データに変換する。図6に環境カメラとそのスケルトンモデルの一例を示す。



図6 環境カメラと作業者のスケルトン

ヘッドマウントカメラと視界移動情報：作業者の頭部にヘッドマウントカメラを装着してもらい、研磨作業時の視界映像を録画した。ヘッドマウントカメラは左右の2つのカメラで構成されている。得られた動画からカメラ位置推定を行い、視界の移動情報として数値化した。各実験条件で数値化された視界の移動の事例を図

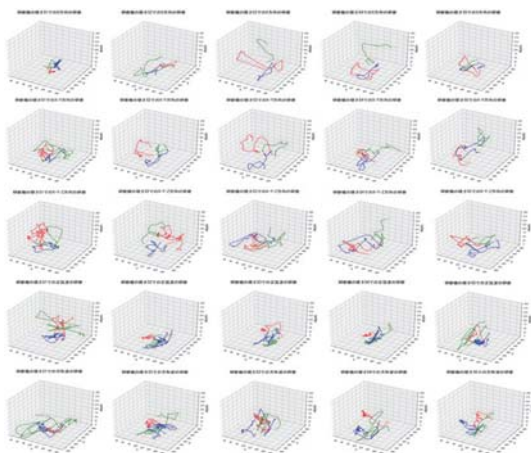


図7 数値化した視界移動情報

7に示す。

研磨装置及び押し付け力：実験で使用した研磨装置（図2）は、市販の手持ち研磨装置上部に可変柔軟性機構を搭載したものである。作業中に両手で持ち、対象物への研磨作業を行う。可変柔軟性機構の柔軟部の変位を測り押し付け力を推定する。今回の実験では5段階の柔軟性で変化させデータを取得する。押し付け力のデータを図8に示す。

実験では、複数の実験者により、研磨方法、研磨装置のコンプライアンスを変化させた実験を行った。その結果、観察深度は個人差が大きく、特定の方が他の人に比べ、観察深度が大きくなることが確認された。また4つの環境カメラのデータでは、体が斜めから覗き込む似た姿勢となること、また特定の方がより顔を近くにして作業を行うことが確認された。これは上記の観察深度の結果と一致する。また研磨装置のコンプライアンスが変わっても、実験者や研磨方法が同じ条件であれば、研磨時の観察深度の推移はおおむね類似することがわかった。研磨押し付け力については、特定の人（観察深度が大きい人）は他の人に比べ、押し付け力の変動が不安定になることが確認された。上手く力を加えられていない状況を定量的に見ることができていると考えられる。研磨方法の違いについては、細かい力の振動が観察されるものの、どの研磨方法でも研磨時の力はおおむね同じであった。

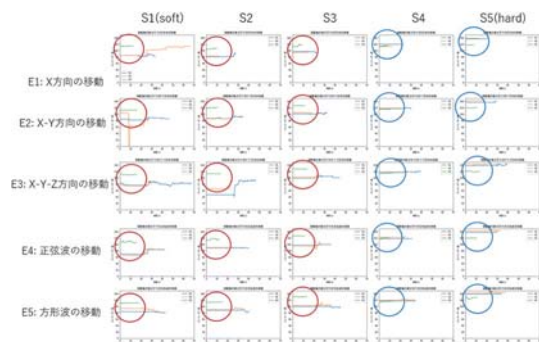


図8 各実験条件での研磨押し付け力

4) ミッドポイントの軌道学習に基づいた汎用性があるロボット動作学習・生成システム

機械学習を用いてロボットに技能の学習をさせることで、人間から技能伝承やロボット自動化を目指す研究が盛んとなっている。例えば、作業者が産業用ロボットアームを遠隔で操作して作業し、ロボットが人間の感覚の微妙なさじ加減を学習し、人間の動きを再現するシステムがある。なお、これらの手法は学習結果がロボット本体に依存し、構造が異なるロボットには直接応用できない。加えて学習のデータ収集に作業が必要ためコストがかかるという問題点がある。

本研究では、機械学習で「技能を人間から継承させる」、「技能を他のロボットに伝える」という技術伝承を目的とし、(a) 人間同士の学習と同様に、人間の動作の観察による学習、(b) 学習の結果をスペックが異なるロボットにも応用可能、という特徴を持つ汎用性を持ったロボット動作学習・生成システムを目指した。具体的には、人間の作業中の、デカルト座標系で、ロボットの先端や肘などの「ミッドポイント」の時系列軌道を学習対象とした。ミッドポイントの時系列軌道は、身体の情報を含むと同時に、汎用性が高い目標情報も含む。リカレントニューラルネットワークを用いてミッドポイントの時系列軌道を学習し、7自由度逆運動学によりロボット動作をリアルタイムで生成する。システムの全体図を図9に示す。

ミッドポイント時系列軌道による動作学習：ロボットの動作学習については、ロボットを操作して学習させる方法（模倣学習）やロボット

が自ら試行錯誤しながら学習する方法（強化学習）がある。いずれも学習データの取得コストの問題、また学習した結果を他のロボットに転用することが難しいといった問題がある。一方、人間が熟練者から学ぶ際は、これらの方法と異なり、直接、その動作を観察して、技能者の動作の大枠を把握した上で、試行錯誤を繰り返しながら技能を獲得する。

この人間の学習方法を参考とし、異なる技能者における動作の大枠の情報を把握するため、ロボットの関節角度ではなくミッドポイントの時系列軌道を学習対象とした。ミッドポイントの時系列軌道情報から、目標手先位置や、各関節角度などが計算でき、異なる技能者でも類似した情報が得られると期待される。この学習データは技能者が作業する際、環境カメラから推定可能である。本研究ではこの学習について、リカレントニューラルネットワークを用いた。例として、一人の技能者が円の軌道に沿って研磨する際の、ミッドポイント時系列軌道の学習データおよび学習後の時系列軌道生成データを図10に示す。

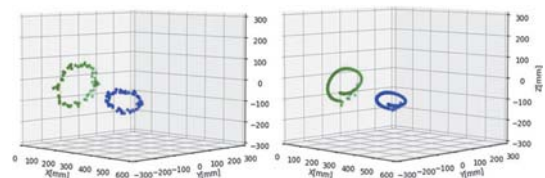


図10 ミッドポイント時系列軌道の学習

逆運動学解析及び動作生成：人間や人間の機序を模倣したロボットワーカーは、2つの7自由度冗長マニピュレータを持つ。学習後のミッドポイント時系列軌道を用いて、異なるロボットに動作を生成する。

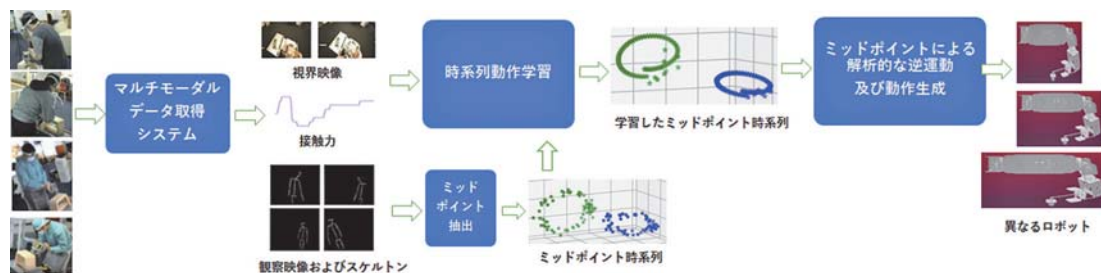


図9 ミッドポイントの軌道学習によるロボット動作学習・生成システム

ドポイント時系列をリアルタイムで動作生成するため、逆運動学モデルの適用、及び動作生成機能を開発した。冗長マニピュレータでもミッドポイントの解析的な逆運動計算から各関節の目標位置と角度が計算できる。結果として身体構造などが異なるロボットでも、リアルタイム動作生成が実現可能となる。図 11 に、上腕と前腕の長さの比率を変更した異なるロボットを用いた際の動作生成結果を示す。

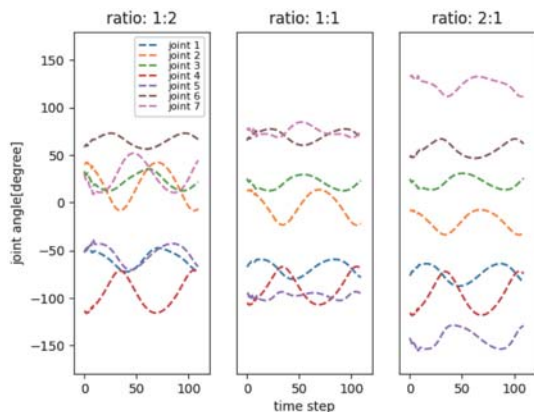


図 11 身体構造が異なるロボットの動作生成結果

[今後の研究の方向、課題]

本研究では研磨作業中のバリ取りや表面仕上げの技術のシステム化を目的とした、ロボットワーカーの開発、基礎評価実験を行った。実際の生産現場では、研磨作業だけでも、様々な研磨対象物や研磨方法が存在している。例えば、曲面を対象とした研磨をする際には、多自由度な押し付け力の調整が必要なため、研磨装置も 3 次元で押し付け力の取得・調整できるよう、押し付け力機構の多自由度化が必要になる。

機械学習については、「深層学習」の手法が急速に発展していることに伴い、問題に特化したデータセットの構築も重要になってきた。研磨作業については、様々な対象物、工程、作業

環境、作業方法、作業結果が存在している。今後は、現場から実際の作業データを大量に取得・整理し、研磨作業に特化したデータベースの構築が必要である。このようなデータベースができれば、研磨技能の技術化や機械学習システムの実用化に重要な貢献ができると期待される。

[成果の発表、論文など]

- [1] Satoshi Funabashi, Tomoki Isobe, Fei Hongyi, Atsumu Hiramoto, Alexander Schmitz, Shigeki Sugano, and Tetsuya Ogata: Multi-Fingered In-Hand Manipulation with Various Object Properties Using Graph Convolutional Networks and Distributed Tactile Sensors, IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L) (IF: 3.741), Volume: 7, Issue: 2, pp. 2102-2109, Jan. 2022. DOI: 10.1109/LRA.2022.3142417
- [2] Namiko Saito, Takumi Shimizu, Tetsuya Ogata, and Shigeki Sugano: Utilization of Image/Force/Tactile Sensor Data for Object-shape-oriented Manipulation: Wiping Objects with Turning Back Motions and Occlusion, IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L) (IF: 3.741), Volume: 7, Issue: 2, pp. 968-975, December 2021. DOI: 10.1109/LRA.2021.3136657
- [3] Ryoichi Nakajo, and Tetsuya Ogata: Comparison of Consolidation Methods for Predictive Learning of Time Series, He Jiang et al. (Eds.): IEA/AIE-2021, Advances and Trends in Artificial Intelligence, Lecture Notes in Computer Science (LNCS), vol. 12798, pp.113-120, Springer, Online, July 26-29, 2021.
- [4] Kulkarni, S., Schmitz, A., Funabashi, S., Sugano, S. (2020) Development and Evaluation of a Linear Series Clutch Actuator. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2020), pp.6353-6360, doi: 10.1109/IROS45743.2020.9341293.
- [5] Funabashi, S., Schmitz, A., Ogasa, S., Sugano, S. (2020) Morphology-Specific Stepwise Learning of In-Hand Manipulation with a Four-Fingered Hand. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 16(1), pp. 433-441, doi: 10.1109/TII.2019.2893713.