

補助事業番号 2025M-385

補助事業名 2025年度 強化学習によるオフラインティーチングに基づく大型産業用ロボットでの機械加工技術の開発研究 補助事業

補助事業者名 同志社大学 理工学部 機械システム工学科 生産システムデザイン研究室
廣垣俊樹

1 研究の概要

本研究では、オフラインティーチングにおいてAI強化学習を導入し、大型産業用ロボット(可搬100kg以上)での機械加工を具現化し、次世代マザーマシンとしての機械加工の技術を開拓する。従来の工作機械による機械加工に比べ、産業用ロボットの動作域が広い特徴を活用して航空機・造船・建築資材などの大型部品の加工を容易にして、その生産現場の自動化を進展させる。

2 研究の目的と背景

日本のものづくり技術の競争力は5ゲン主義(3現=現場・現物・現実と2原=原理・原則)に基づく。本研究では強化学習の手法をロボットのオフラインティーチングの解の選択に導入して特異点の通過中も機械加工を可能とし、CAD/CAMとの連携が可能な産業用ロボット加工システムを提案するものである。特異点は多関節ロボットの動作範囲の外周部付近に多く存在し、それを避けるために従来のオフラインティーチングによるロボット加工の動作範囲は大きく制限されてきた。そのため機械加工の対象とする工作物のサイズに対してロボットが大型化する課題が生じていた。提案する手法は特異点通過が可能であるので、多関節ロボットの動作範囲の外周部付近まで機械加工が可能であり、大型の工作物への応用が可能になる理論である。それは2原(=原理・原則)であり、3現(=現場・現物・現実)との両輪が不可欠と考えられる。そこで大型部品で用途が多いドリル穴あけ加工を対象に、建築資材で木材・カミカルウッド、航空機材で難削材CFRP、造船材でアルミおよび鋼材を対象に検証をする。さらに穴以外への適用のためエンドミル加工による自由な創成運動への発展にもトライアルを遂行して、5ゲン主義に基づくマザーマシンとしての実用性を検討する。

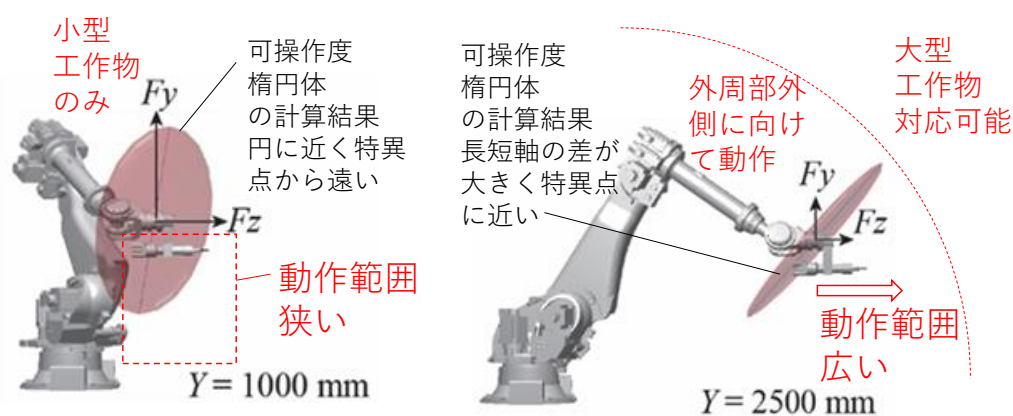
3 研究内容(<https://msdl.doshisha.ac.jp/archives/952/>)

(1) 産業用ロボットの強化学習によるオフラインティーチングによる特異点通過法の研究開発

従来、産業用ロボットは作業者が現場で動作点を教示・再生(オフラインティーチング)する手法が大半であった。すなわち現場のフィジカル(物理)空間で作業者が教示する手法である。一方、フィジカルAIへの応用などを考慮すると、コンピュータ上のサイバー(仮想)空間でプログラミング、その指令を産業用ロボットに送信して動作させるオフラインティーチングが必要になるが、ロボットの動作空間内に多数存在する特異点(特異姿勢)で指令する解が不定となるため、動作が不安定になる課題があった。その不安定さ抑制するため、従来はサイバー空間上でプログラマーが手作業で特異点を回避(特異姿勢の回避)してプログラミングしていた。さらに回避ミスが恐れもある

ため、特異点から十分に遠い姿勢での動作プログラミングを遂行するため、結果として動作範囲が限定的であり、特にロボット加工への応用では小型の工作物しか対応できない課題があった。

特異点での動作の不安定さの要因は、ロボットの関節モータが1回転する間(回転角 $0\sim 360^\circ$)に、特異姿勢では各関節モータに2個の解の候補が生じ、それらが複数の関節で組み合わせられるが、その最適な組み合わせを動作毎に探索するのが難しい点にある。一方、2個の解の組み合わせ最適化問題は、強化学習での探索と相性が良い。そこで強化学習の手法を特異点通過に応用して、動作の不安定さの解消を試みた。



(a) 特異姿勢から十分に遠い動作 (b) 特異点を通る動作

図1 オフラインティーチングにおける強化学習による特異点通過

図1(a)が従来の特異姿勢から十分に遠い範囲での動作例であり、機械加工を遂行可能な動作範囲が狭く、結果として小型工作物しか対象にできなかった。一方、強化学習により各関節の適切な解の探索で、図1(b)に示すように大型産業用ロボットにおいて特異点(特異姿勢)が多く存在する動作範囲の外周部に向けての機械加工が可能となり、大型の工作物でも機械加工が可能であることを実証することができた。すなわち最新のAI強化学習を用いて、5ゲン主義の2原に該当する原理・原則についての検証ができた。

(2) 特異点通過を含むオフラインティーチングでの穴あけ加工の検証

機械加工を対象とする工作機械業界において、機械の性能の評価は最終的には動作精度ではなく、実加工で創成できたターゲット工作物の加工精度で取引される場合が大半である。マザーマシンは機械をつくる機械であるので、生産技術となるユーザ側のニーズから考えれば当然の流れでもある。そこで全高2030 mmの大型産業用ロボット(SRA166-01, NACHI製, 本体質量960 kg, 最大可搬質量は166 kg, 繰り返し位置決め精度0.10 mm)のエンドエフェクタに、穴あけ加工用の主軸として、テーパBT15サイズでAutomatic Tool Changer (ATC)機能を有するスピンドルモータ(TEMB-60-10ATC, タック技研製, 出力は1.2 kW, 最高回転数10000 rpm)を取り付け、機械加工実験を遂行した。機械加工の基本は穴あけであるので、第一ステップとして穴あけ加工に取り組

んだ。図2はその様子(ドリル直径6mm, 工作物は木材, 格子状に9穴加工)であり, 左上には特異点(特異姿勢)から十分に遠い姿勢でのドリル加工と特異姿勢で特異点通過を含む姿勢でのドリル加工の加工後の工作物の写真を示している。特異点通過の場合でも十分に安定した穴あけが具現化できているが, 加工穴の位置精度には課題が残ることがわかる。図中の右上はドリル進行方向に直角な半径方向で水平成分(x成分)と鉛直成分(y)成分の切削力の測定結果である。特異点通過の方が振動成分が小さく, 強化学習で安定したプログラミング指令ができれば, 安定したドリル加工の遂行が可能であることも示された。

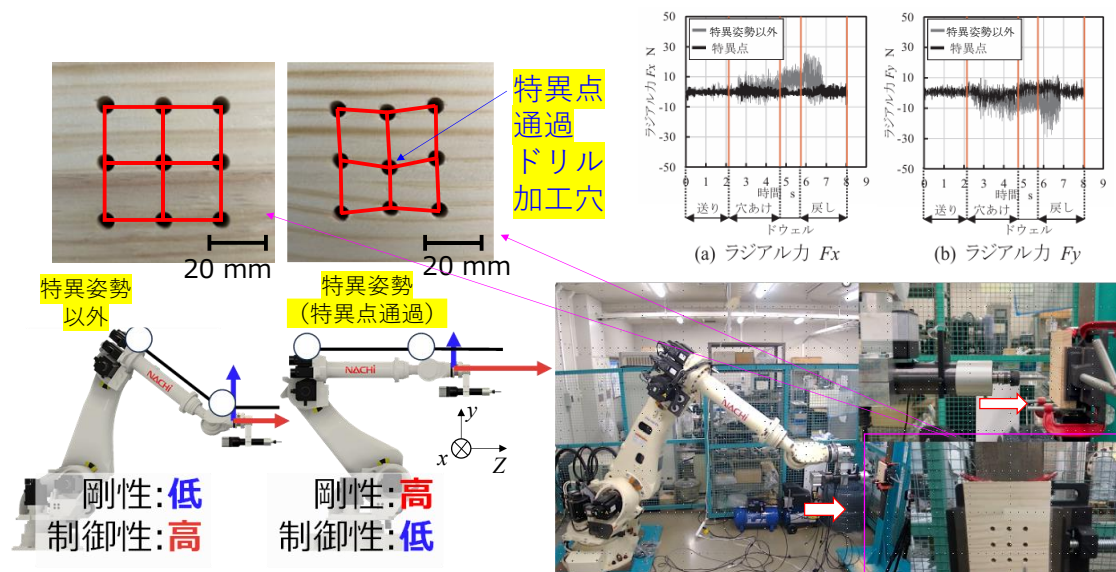


図2 強化学習による特異点通過してのドリル加工の例

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

大型産業用ロボットによる機械加工は, ほとんどが作業員ハンドツール加工の依存している航空機や造船業の大型部品や土木建築現場などの自動化技術の進展に大きく寄与できる。すなわち, それら自動化が進まない作業現場の安全確保と軽労化のための嚆矢となるものと考えられる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本研究室では, メカトロニクスに基づく「つくる」「あやつる」「はこぶ」技術, すなわちものづくり技術の高度化・自動化・自律化の研究開発を進めてきた。本研究はその一環として, 自動化が進まない大型部品の機械加工の現場に対して, 大型産業用ロボットの新しい応用展開の可能性を示すことができ, その意義は極めて大きいと考えている。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

・国際会議発表

Tomohiro Uchino, Daiki Kato, Masahiro Kanzaki, Masao Nakagawa, Toshiki Hirogaki, Drilling

through a wrist singularity during off-line teaching using a large industrial robot, Proc. of the 11th Int. Conf. of Asian Society for Precision Eng. and Nanotechnology (ASPEN 2025)pp.20-24

・国内学会・技術交流会・講演発表

廣垣俊樹, オフラインティーチングの強化学習による特異点通過とロボット加工, 2025 年度(公社)砥粒加工学会賛助委員会 第2回技術交流会(産業ロボットによる加工事例)

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

なし

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 同志社大学理工学部(ドウシシャダイガク リコウガクブ)

住 所: 〒610-0321

京都府京田辺市多々羅都谷1-3

担 当 者: 教授 廣垣俊樹(ヒロガキトシキ)

担 当 部 署: 生産システムデザイン研究室(セイサンシステムデザインケンキュウシツ)

E - m a i l: thirogak@mail.doshisha.ac.jp

U R L: <https://msdl.doshisha.ac.jp>