

補助事業番号 2024M-534

補助事業名 2024年度 R3 アルゴリズムによる量子アニーリングを利用した生産設備配置とロボット動作の最適化補助事業

補助事業者名 東京理科大学 創域理工学部 機械航空宇宙工学科 知能ロボティクス研究室

1 研究の概要

本研究では、量子アニーリングを活用した生産設備配置とロボット動作の同時最適化手法を開発した。独自に考案した R3 アルゴリズム (Random Resolution selection for each Region) を発展させ、障害物周辺領域を適応的に高解像度化する A3 アルゴリズム (Adaptive Area Awareness) を提案した。製造業向け部品組付けシステム (シミュレーション) と食品サービス業向け店舗用調理システム (実機) を用いて本手法を検証し、D-Wave 社の量子アニーリングマシンによる評価で古典コンピュータ比約 96% の計算時間短縮を達成した。

2 研究の目的と背景

製造業や食品サービス業では、省スペース化・高効率化のために設備配置とロボット動作経路を同時に最適化することが求められている。この問題は、配置パターンや経路の組み合わせが設備数やロボット台数の増加とともに爆発的に増大する「組み合わせ最適化問題」であり、古典コンピュータでは候補解を逐次的に評価するため、現実的な計算時間内に最適解を得ることが極めて困難である。

これに対し、量子コンピュータ (量子アニーリング方式) は、量子力学の重ね合わせ原理を利用して多数の候補解を同時探索できるという根本的な優位性を持つ。古典コンピュータが「一つずつ試す」のに対し、量子アニーリングは「全候補を一斉に評価しながら最適解へ収束する」最適化手法であり、組み合わせ最適化問題において古典コンピュータに対する飛躍的な高速化が期待される。

一方、現状の量子コンピュータは利用できる量子ビット数に制約があり、大規模問題をそのまま解くことは難しい。本研究は、この制約を克服する独自アルゴリズムを開発し、量子コンピュータを実際の製造・サービス現場の最適化へ適用することを目的とした。

3 研究内容 (https://www.rs.tus.ac.jp/ir/jka_social_action2024.html)

(1) A3 アルゴリズムの開発

量子アニーリングで組み合わせ最適化を解くには、問題を QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization) 形式に変換する必要があり、変数 (量子ビット) 数の削減が鍵となる。本研究では、三次元作業空間を格子状に離散化し、各領域の解像度をランダムに選択することで量子ビット数を抑えながら高精度な探索を実現する R3 アルゴリズム (Random Resolution selection for each Region) を考案した。

さらに、大規模問題への適用研究を通じて、障害物周辺の隣接領域を動的に高解像度化する適応的手法が有効であることを見出した。この知見を活かして R3 アルゴリズムを発展させ、2025 年 11 月により効率的な A3 アルゴリズム (Adaptive Area Awareness) として実装・定式化した。A3 アルゴリズムは障害物周辺を自動的に高解像度化することで、R3 に比べてより安定した経路生成と高い解品質を実現する。大規模問題への拡張を見据えた階層的最適化フレームワーク (空間分解・時間軸分解) の設計も完了しており、ロボット台数と設備数の増加にも対応可能なスケールビリティを有する。

(2) 検証用ロボットシステムの構築と動作最適化の検証

- ① 部品組付けシステム (製造業向け) —— 製造業への適用を主眼として開発。マニピュレータによる部品の把持・組付け動作を対象に QUBO 定式化を実施し、アルゴリズム開発の基盤検証環境とした。R3 アルゴリズムの適用により、古典コンピュータでは 9167 秒を要した最適化計算時間が、量子アニーリングの適用により 350 秒まで短縮された。
- ② 店舗用調理システム (食品サービス業向け) —— 製造業とは性質の異なる食品サービス業のユースケースとし

て麺類自動調理・配膳システム(固定マニピュレータ+AGV)を構築した。2025年3月完成。AGVの経路追従・自動ドッキングとマニピュレータの把持・搬送・配置の連携シーケンスを実装した。



図 1: 部品組付けシステム(CAD)



図 2: 店舗用調理システム実機

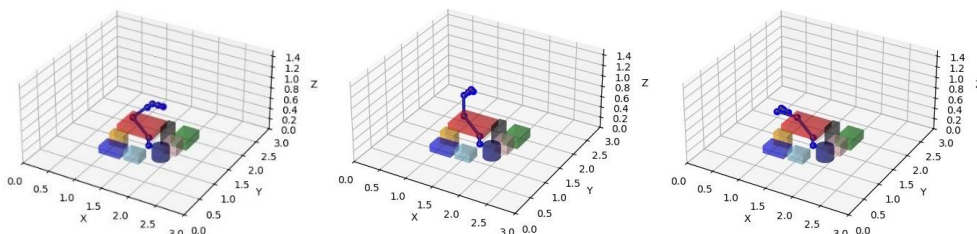


図 3: 部品組付けシステムでの最適化結果(シミュレーション)

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

計算時間の約 96%削減という実績は、製造・食品サービス現場における設計変更や試行錯誤を大幅に容易にし、多品種少量生産での迅速な生産ライン立ち上げを可能にする。A3 アルゴリズムは量子コンピュータの性能向上に伴いさらなる高解像度化・高精度化が見込まれ、大規模工場や物流倉庫への適用拡大も期待される。モバイルマニピュレータへの展開が実現すれば、固定型・移動型を問わず複数ロボットの協調最適化を提供できる汎用プラットフォームとなり、我が国の製造業および食品サービス業の競争力強化に貢献する。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

申請者はこれまで、ロボットマニピュレーションおよびロボットビジョンを主軸として、ロボットによる対象物の認識・把持・操作に関する研究に取り組んできた。特に、マニピュレータによる組立・搬送作業の動作計画、および視覚情報に基づく対象物姿勢推定・把持計画の高度化を通じて、産業用ロボットの自律化・柔軟化を一貫したテーマとしてきた。これらの研究を通じて顕在化した課題の一つが、個々のロボット動作を最適化するだけでは生産システム全体の効率には到達できないという問題であった。設備をどこに配置し、ロボットがどの経路で動作するかを同時に決定する必要があるが、この問題は配置と経路の組合せ爆発を伴い、古典的な最適化手法では現実的な計算時間内に解を得ることが困難であった。本事業は、この課題を量子アニーリングという新たな計算パラダイムによって突破することを試みたものであり、申請者のマニピュレーション研究を個別動作の最適化からシステム全体の同時最適化へと押し広げる位置づけにある。

本事業で開発した R3/A3 アルゴリズムは、量子コンピュータの性能向上とあわせて大規模生産システムへ適用可能であり、今後の量子コンピュータのロボティクス分野への応用に向けた基礎技術として位置づけられる。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

<発表論文・学会発表>

三輪隼也, 荒井翔悟, “量子アニーリングマシンによるマニピュレータの高速経路計画,” SICE Multi-Symposium on Control Systems, 2025.

三輪隼也, 荒井翔悟, “量子アニーリングを利用したロボットセル生産システムにおけるマニピュレータ経路と設備配置の同時最適化,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2025.

三輪隼也, 荒井翔悟, “量子アニーリングを利用したロボットセル生産システムにおけるマニピュレータ経路と設備配置の最適化,” Robotics Ongoing Breakthroughs 2025.

三輪隼也, 荒井翔悟, “Optimization of manipulator trajectories and equipment layouts in robot cell production systems using quantum annealing,” International Conference on Movement Science and Technology, 2025.

三輪隼也, 荒井翔悟, “量子ビット数の制約を考慮した量子アニーリングによるロボットセル生産システムにおけるマニピュレータ経路と設備配置の最適化手法の提案,” 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2025.

山本莉月矢, 三輪隼也, 平岡恵太郎, 荒井翔悟, “量子アニーリングと古典コンピューティングによるセル生産システムにおけるマニピュレータ経路と設備配置の最適化,” 日本機械学会関東学生会学生員卒業研究発表講演会, 2026.

山本莉月矢, 平岡恵太郎, 荒井翔悟, “Optimization of Manipulator Trajectories and Equipment Layout in a Robotic Cell Production System Using Quantum Annealing within a High-Resolution Search Space,” SICE FESTIVAL, 2026(発表予定).

平岡恵太郎, 荒井翔悟, “量子アニーリングを用いた複数台モバイルマニピュレータによる組立作業の最適化,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2026(発表予定).

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

本補助事業で実施した研究に関する説明 (<https://www.rs.tus.ac.jp/ir/>)

(2) (1)以外で当事業において作成したもの

該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 東京理科大学 創域理工学部(トウキョウリカダイガク ソウイキリコウガクブ)

住 所: 〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641

担 当 者: 准教授 荒井 翔悟

担当部署: 創域理工学部 機械航空宇宙工学科 知能ロボティクス研究室

E-mail: arai.shogo@rs.tus.ac.jp

URL: <https://www.rs.tus.ac.jp/ir/>