

# 自動車車体塗装のための複数ロボットアームの経路設計に関する基礎検討

永井 裕也 梶浦 梨央<sup>†</sup> 中村 博光 東園 雄太<sup>‡</sup> 小野 智司<sup>§</sup>  
 鹿児島大学<sup>†</sup> トヨタ車体研究所<sup>‡</sup> 鹿児島大学<sup>§</sup>

## 概要

複数のロボットアームを用いた自動車車体塗装の経路設計は人手で設計されており、設計時間の短縮や設計の自動化が求められている。本研究では本問題を組合せ最適化問題として定式化し、進化計算により自動的に設計を行う手法を提案する。

## 1 はじめに

自動車の生産工程において、自動車車体の塗装は複数のロボットアームが同時に塗装の吹き付けを行う。これらのロボットアームの経路計画は熟練の専門技術者がシミュレータを用いながら数週間から数ヶ月の時間をかけて行っている。近年、上記の塗装経路計画に関する研究が行われ始めているが [1]、塗装品質を保つための制約を考慮した研究は、著者らが確認する限り行われていない。

このため本研究では、複数のロボットアームを用いた自動車車体の塗装経路設計を配送計画問題 (Vehicle Routing Problem: VRP) の類似問題として捉え、組み合わせ最適化問題として定式化を行い、進化計算により解く手法を提案する。提案手法は、進化計算の利点を活かして、ロボットアームによる制約に加え車体塗装問題特有の条件を制約として考慮し、その特性に応じて最適化の各プロセスにおいて個別に扱う点に特徴がある。評価実験を行い、結果として専門技術者が設計した経路と類似する経路を設計できることを確認した。

## 2 関連研究

本論文で対象とする複数アームによる塗装工程を扱う研究はごく限られており、類似する研究は溶接

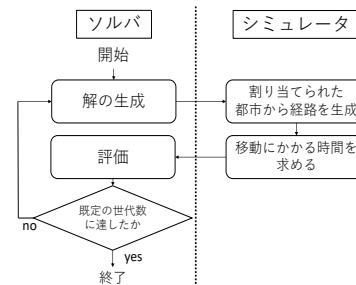


図1 提案手法の処理手順

作業を対象とした研究が多い [2, 3, 4]。溶接作業を行う際はアームが停止して行われることと比較して、塗装作業はアームが定速で移動しながら行われる。また、塗装の品質を高めるために塗装順についての制限があり、より複雑な問題である。このため、車体が一定速度で動く条件や、塗装順序を考慮していない研究が行われている程度である [1]。

## 3 提案手法

本論文では、複数のロボットアームを用いた自動車車体の塗装経路設計を VRP の類似問題として定式化を行い、自動車生産現場で考慮されている一部の条件を制約として追加した組み合わせ最適化問題として解く手法を提案する。

提案手法の構成と処理手順を図1に示す。本手法は塗装箇所（都市に相当）の訪問順ならびにアームへの割当てを決定する VRP に類似する組合せ最適化問題（上位問題）と、決定された塗装箇所の訪問順、アームへの割当てから詳細な経路を導出する問題（下位問題）との組合せにより塗装経路設計問題を表現する。本手法は前者を解くソルバと、後者を解くシミュレータから構成される。ソルバは遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) による最適化を行い、シミュレータは貪欲法を利用して詳細な経路を設計する。

ソルバは、VRP と同様の解表現を採用する。すなわち、解候補に相当する個体  $x$  は、訪問する順で並べられた都市番号の順列である。ここでは、説明を単純化するために、各アームが同数の都市を訪問す

<sup>†</sup> Yuya Nagai, and Rio Kajiura, Kagoshima University

<sup>‡</sup> Hiromitsu Nakamura, and Yuta Higashizono, TOYOTA AUTO BODY Research & Development

<sup>§</sup> Satoshi Ono, Kagoshima University

ることとし、下記により塗装位置（都市）の割当と訪問順の両方を表現することとする。

$$\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}, \quad (x_i \neq x_j, \forall i, j \in \{1, \dots, N\}) \quad (1)$$

また、解候補の評価値（適応度）は、シミュレータを呼び出して詳細な経路の設計を行い、その結果をもとに算出する。シミュレータは塗装箇所の訪問順ならびにアームへの割当てを表わす  $\mathbf{x}$  をもとに、アーム  $a \in \{1, \dots, n_a\}$  の詳細な経路  $\mathbf{r}_a$  と作業時間  $t_a(\mathbf{x})$  を求める。  $\mathbf{r}_a = \{\mathbf{r}_{a,1}, \mathbf{r}_{a,2}, \dots\}$  はアーム  $a$  の  $u$  秒ごとの座標である。上位問題における目的関数は  $t_a$  の最大値とし、これを最小化する。

$$\text{minimize } f(\mathbf{x}) = \max_a t_a(\mathbf{x}) + p_a(\mathbf{x}) + p_c(\mathbf{x}) \quad (2)$$

$$\text{subject to } d(\mathbf{r}_{a,k}, \mathbf{o}_a) \leq R_a \quad (3)$$

$$d(\mathbf{r}_{a,k}, \mathbf{r}_{b,k}) \geq R_{collision} \quad (4)$$

$$(a, b \in \{1, \dots, n_a\}, a \neq b)$$

$$c(e(p_{c,l-1}) \geq e(p_{c,l})) \leq \tau \quad (5)$$

本手法では、アームの可動範囲に関する制約（式(3)）、アーム同士の衝突に関する制約（式(4)）、塗装順序に関する制約（式(5)）を考慮して塗装経路の設計を行う。式(3)における  $d$  は距離を表わす。割当てられたが訪れなかった都市の数と違反が生じている時間に応じたペナルティ  $p_a$  を目的関数に加算する。ロボットアーム同士の衝突に関する制約の違反が確認された場合は、違反が生じている時間に応じたペナルティ  $p_c$  を目的関数に加算する。

本手法では塗装順序に関する制約を式(5)によって表現する。上下に隣接する塗装箇所  $s_{c,l-1}, s_{c,l}$  において、基本的に自動車車体の垂直面における塗装はアームを水平方向に往復させながら下から上に順次塗装を行うことが求められるため  $e(s_{c,l-1}) < e(s_{c,l})$  でなければならないが、アームの設置状況に応じてパネル毎に  $\tau$  回までの違反を許容する。式(5)における  $c(C)$  は条件  $C$  が生じる回数を表す。

提案手法は GA の利点を活かし、制約違反に対して修復処理とペナルティを併用することで制約違反の解消を図る。可動範囲に関する制約違反が確認された場合は他のアームに割当てられている都市と入れ替える。塗装順序に関する制約違反が確認された場合は、各アームが連続する領域を塗装するように都市の割当と訪問順を同時に変更する。

## 4 評価実験

提案手法の有効性を検証するために、車体側面のみの塗装を 4 基のアームで行う経路の設計を試み

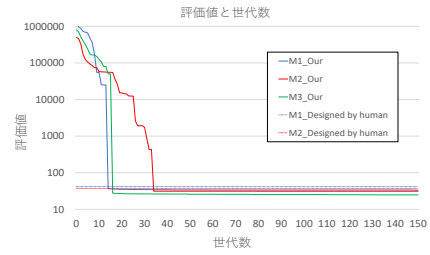


図2 最良個体の目的関数値の推移

た。本実験における経路は 2 次元座標の順列で構成されるものとし、アームは生産現場にもとづいて設定した。3 車種  $M_1, M_2, M_3$  について本手法を適用し、得られた経路を、専門技術者が設計した経路と比較する形で評価した。また、 $u = \frac{1}{100}$ ,  $\tau = 1$  とし、車種毎に 5 試行ずつ経路の設計を試みた。

提案手法による最適化の様子を図 2 に示す。すべての車種のすべての試行において、すべての制約を満たし人手で設計された経路に類似した経路を設計することに成功した。提案手法により設計された経路を専門技術者に提示したところ、「総じて、人手で設計したアーム割当て、経路に類似した解」であるとのコメントを得た。

## 5 結論

本論文では、複数のロボットアームを用いた自動車車体の塗装経路設計を自動で行う手法を提案した。2D シミュレータを用いた実験を行い、本手法が専門技術者により設計された経路に類似した経路を設計することを確認した。今後、実際の塗装経路を設計する際に利用される 3D シミュレータと組み合わせることで、提案手法の実用性を検証する。

## 参考文献

- [1] K Zbiss, et al. Automatic collision-free trajectory generation for collaborative robotic car-painting. *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 9950–9959, 2022.
- [2] H. Touzani, et al. Multi-robot task sequencing & automatic path planning for cycle time optimization: Application for car production line. 5 1335–1342, 2021. *Robotics and Automation Lett.*, Vol. 6, No. 2, pp. 1335–1342, 2021.
- [3] E. Xidias, et al. Time-optimal task scheduling for two robotic manipulators operating in a three-dimensional environment. *Proc. Instit. Mech. Eng.*, Vol. 224, No. 7, pp. 845–855, 2010.
- [4] A Tika, et al. Optimal scheduling and model predictive control for trajectory planning of cooperative robot manipulators. *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 53, No. 2, pp. 9080–9086, 2020.