生産環境変動に迅速に対応できる ロボット生産ラインの一貫自動設計技術の開発*

Integrated Automatic Design Technology for Robot Production Line That Can Be Adapted Immediately for Changes in Production Environment

梶田大毅**

中須信昭**

榎本敦子***

勝又大介**

小山洸也†

Daiki KAJITA, Nobuaki NAKASU, Atsuko ENOMOTO, Daisuke KATSUMATA and Koya OYAMA

Key words robotic cell, 3D CAD, assembly sequence, line configuration, assembly motion

1. はじめに

近年、消費者嗜好の多様化により、製品ライフサイクルの短期間化が進んでいる。一方、世界的な政治経済情勢不安や大規模な自然災害、疫病の発生などにより生産環境がたびたび変動する中での対応を余儀なくされている。

従来は作業変更が容易な人手に頼り、人件費の低い拠点に生産体制を構築することでコスト競争力を得ていたが、近年は前述の生産環境の変動や世界的な生産年齢人口の減少により生産リソースが確保できず、当該拠点での生産維持が困難な状況が発生している。そのため、製造業では人の作業を代替するロボットの活用が広がっている。

しかし、生産ラインの構成検討やロボット動作の教示作業は習熟を要するため、熟練したライン設計者および作業者の確保や育成が追いつかないことが問題となっている。このような背景から、非熟練者でも熟練者と同等以上の品質で、かつ迅速に生産ライン構成やロボット動作プログラムの作成が可能な技術の開発が求められていた。そこで、3D-CAD の製品組み立てモデルと生産量などの生産条件から自動的に生産ライン構成やロボット動作を生成する技術の開発^{1)~3)}に 2016 年に着手した。

2. ロボット生産ライン構築の課題

ロボット生産ラインの構築では、組み立て順序立案、ライン構成・作業割り付け立案、ロボット動作教示の 3 ステップで検討を進める。100 個程度の部品で構成される製品を組み立てる生産ラインで数十台のロボットを配置する場合、ロボット台数の決定や各ロボットへの作業割り付け、各ロボットの動作教示には多くの時間がかかる（表 1）。

例えば、ロボット台数を最小化するには、前後のロボット間で待ち時間が発生しないよう各ロボットに作業を割り付ける必要がある。また、ロボット動作教示は、ペンダントと呼ばれるロボットの操作盤でロボットを所定位置まで動かして位置を登録する作業を数百回繰り返す必要がある。生産環境の変動に合わせて生産ラインを変更するには、これらの所要時間をいかに短縮できるかが課題となる。

従来、生産ラインを容易に変更する仕組みとして FMS (Flexible Manufacturing System) が提案されている^{4) 5)}。これは、生産設備を標準化あるいはモジュール化し、簡易に再配置できるようにするコンセプトである。これをロボット生産ラインで実現する場合、動作プログラムを変更して作業内容を切り替えるため、切り替え作業自体には時間はかからないが、事前準備としてロボットの動作シーケンスを表す動作命令のコーディング作業と、ロボットの移動先の教示作業に時間がかかる。動作命令のコーディング作業は、製品の 3D-CAD に記述されている拘束関係から部品の組み付け順序を算出する手法⁶⁾や、「部品を拾い上げる」「部品を嵌合する」といった組み立て作業のモデル化手法⁷⁾、設備や治具もモデル化して作業割り付けを算出する手法^{8) 9)}が開発されているが、ロボットの移動先の教示作業まで連動している例はない。

生産ラインの動作シミュレーションや障害物の干渉回避軌道を生成するソフトウェアも市販されている。しかし、これらのソフトウェアでは、組み立て順序やライン構成、軌道の始終点座標を入力として与えて、その動作をシミュレーションするものであり、オペレータの介入が必須である。また、組み立てが進展すると、組み立て中の製品自体が干渉物になるため、周辺環境変化を反映させた始終点座

*原稿受付 令和 2 年 12 月 1 日

** (株) 日立製作所研究開発グループ生産イノベーションセンタ（神奈川県横浜市戸塚区吉田町 292 番地）

*** 正 会 員 (株) 日立製作所研究開発グループ生産イノベーションセンタ（神奈川県横浜市戸塚区吉田町 292 番地）

† 日立オートモティブシステムズ(株)パワートレイン&セーフティシステム事業部 xEV 生産本部（茨城県ひたちなか市高場 2520 番地）

表 1 従来のロボット生産ライン構築期間

検討項目	作成時間
組み立て順序立案	手作業（1 日）
ライン構成・作業割り付け立案	市販シミュレータ（1 日）
ロボット動作教示	手作業（38 日）

図1 分解図

【下から順番に組む場合】

①→②→③→④→⑤→⑥→⑦→⑧

【組み立て順序グラフネットワーク】

コスト

・移動距離

・ツール交換時間

【最適な組み立て順序】

①→②→④→⑤→③→⑥→⑦→⑧

図2 組み立て順序グラフネットワーク

標を逐次決定しながらシミュレーションするには時間を要するなど、実用上の隘路となっていた。

そこで、製品の3D-CADに記述されている拘束関係と生産数量などの生産条件から組み立て順序、ライン構成・作業割り付け、ロボット動作プログラムを一貫自動生成する技術を開発した。

3. ロボット生産ライン一貫自動設計技術

3.1 組み立て順序自動生成技術¹⁾

製品3D-CADに記述されている幾何学的拘束条件から組み立て順序のグラフネットワークを生成し、ロボット組み立て動作の移動距離などを評価関数として最短経路を探索することにより、膨大なパターンの組み立て順序が取れる製品に対して、非熟練者でも短時間で最短時間動作となる組み立て順序を生成できるようにした。

開発方式では、まず部品間の幾何学的拘束関係から、分解可能な方向と分解の先行関係を抽出する。例えば、図1の例では、部品A(②)と部品B(④, ⑤)を分解する前にカバー(⑦)を分解する必要があるが、部品A(②)と部品B(④, ⑤)は、ケース(①)から上方に移動させて分解する必要があることが抽出される。

次に、抽出した分解動作の先行関係を逆にたどることにより、組み立て順序のグラフネットワークを作成する(図2)。このとき、コストとして移動時間とツール交換時間の和を与え、トータルコストを最小化する経路をDijkstra法で探索する。図1の例では、③と⑥が同種類のねじであることから、部品A(②)と部品B(④, ⑤)を組み立ててからツールを交換し、ねじA(③, ⑥)を締める順序の方がツール交換回数が減り、トータルコストを小さくできる。

組み立て順序グラフネットワークにおいて、各ノードでの最大分岐数は、そのときの残りの部品数となるが、実用的な時間で解を得るために、分岐ノード数に上限を設け

た。100部品からなる製品で評価したところ、従来は手作業で一日がかりの作業であった組み立て順序の立案が10分で計算できるようになった。

3.2 ライン構成・作業割り付け生成技術

ライン構成・作業割り付けでは、ロボット台数を最小化しつつ、サイクルタイム以下で稼働する生産ライン構成を生成する。しかし、100部品で構成される製品の多数の作業割り当てパターンの中から、制約条件を満たす最適解を現実的な時間内に手作業で求めることは困難であった。

そこで、整数である設備台数と実数である平均稼働率を同時に最適化する混合整数計画問題として、ロボット台数と各ロボットへの作業割り付けを生成する方式を開発した。本技術は、標準化されたロボット設備と組み合わせることでさらなる効果を得られる。生産品種の変更や生産量の増減に合わせて、標準化ロボット設備の台数を増減させ、作業を割り付け直すことで、投資リスクを抑えながら生産能力を短期間で最適化可能になる(図3)。混合整数計画問題の制約条件として、生産数量から算出されるサイクルタイムとロボット設備で実行できる最大作業集約数、組み立て順序を示す作業の先行関係、設備や治工具のコストを与え、総設備コスト最小化と設備の平均稼働率最大化を評価条件として、設備台数と作業割り付けを算出する。

89部品で構成される製品で評価した結果を図4と表2に示す。自動設計した結果は、手作業で設計した場合と比較して、平均稼働率が1.08倍、設備コスト0.92倍となった。自動設計の方が、設備台数が1台少ないことから、総設備コストも0.92倍と削減することができた。

3.3 ロボット動作プログラム生成技術

各ロボット設備に割り当てられた作業を実行するロボット動作プログラムの自動生成技術を開発した(図5)。組み立てられた状態の製品と設備の3D-CADを用い、ハンドの装着座標と部品の供給座標、部品の組み付け座標を抽

図3 生産数量変動に対する生産能力調整

【制約条件の一例】

- ①サイクルタイム目標値
- ②ロボット設備の最大作業集約数
(例：部品2作業，ねじ締め4作業)
- ③作業Aは作業Bに先行する
- ④設備・治工具コスト

【評価条件】

- ①総設備コスト最小化
総設備コスト＝設備台数×装置コスト
＋治工具数×治工具コスト
- ②平均稼働率最大化

$$\text{平均稼働率} = \left[\frac{\sum_{n=1}^N \text{設備 } n \text{ の作業時間}}{\text{設備 } 1 \sim N \text{ のうちの最大作業時間}} \right] / N$$

図4 混合整数計画問題によるライン構成最適化

表2 ライン構成生成結果比較 (89 部品)

方式	計算時間	設備台数	平均稼働率	設備コスト
手動設計	8 時間	13 台	0.75	1
自動設計	10 分	12 台	0.82	0.92
効果	0.02 倍	0.92 倍	1.08 倍	0.92 倍

出する。部品の拘束面で垂直方向に移動可能であることから，部品を組み付ける方向やハンドを装着する方向を抽出することができる。

組み付け動作では一般に組み付け前後でロボットの移動速度を落として動かすため，移動速度の変更位置として組み付け前にいったん停止するアプローチ点，組み付け点，組み付け後の退避点を 3D-CAD の寸法情報から生成する。

図5 ロボット動作プログラム生成技術

さらに，ロボット組み立て動作データベースに保存されている組み立て作業に伴うノウハウ動作を付加して，ロボット動作プログラムを生成する。ノウハウ動作には，ねじ締め作業であれば，ドライバの回転を開始する位置や回転数，ドライバの押し込み力や押し込み速度が含まれる。

本技術により，ロボット動作教示の所要時間を 38 日から 12 時間に短縮することができた。ここで，12 時間には 3D-CAD モデルと実空間上の実機との間のずれを調整する時間（8 時間）を含む。

4. 本技術の適用効果

(1) 生産ライン構築期間の短縮

本技術により，組み立て順序生成時間を 1 日から 10 分，ライン構成生成時間を 1 日から 10 分，ロボット動作プログラム生成時間を 38 日から 12 時間に短縮することができ，ライン構築期間を 96% 短縮した（図 6）。これにより，生産ライン構築にかかるコストを削減でき，本技術を適用したロボット設備 10～30 台で構成される生産ラインを国内外に構築し，2019 年度に量産適用を開始した。

(2) 製品の早期市場投入

本技術は，生産ライン構築期間短縮により，製品の早期市場投入にも貢献することができ，生産準備期間中の機会損失を最小限に抑えられる。このとき，ロボット設備を標準化することで，製品設計と並行してロボット設備を製作できるため，製品の市場投入までの期間を 44% 短縮する効果が見込まれる。さらに，既存の標準化ロボット設備を流用できれば，生産ライン構築期間をトータルで 61% 削減することが可能となると見込んでいる（図 7）。

図6 ライン構築期間の短縮効果

図7 製品の市場投入までの期間短縮効果

5. お わ り に

3D-CADの拘束条件と生産数量などの生産条件から、組み立て順序、ライン構成・作業割り付け、ロボット動作プログラムを一貫自動生成する技術を開発した。本技術を実用化し、製造拠点のグローバル化や短納期化に貢献し、栄誉ある精密工学会技術賞をいただくこととなりました。今後も、本技術の研鑽に努めていく所存です。

参 考 文 献

- 1) A. Enomoto, Y. Aoyama, Y. Yamauchi and N. Yamamoto: Near Optimal Assembly Sequence Generation, Proceedings of the 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, (2016) 95-101.
- 2) 梶田大毅, 榎本敦子, 堤大輔, 諸貫信行: 幾何学的拘束条件に基づくロボット組立動作自動計画技術, 日本機械学会論文集, **85** (2019) 875.
- 3) 人・ロボット協調フレキシブル生産システム, 日立評論「2017年日立技術の展望」, **99**, 1 (2017).
- 4) Y. Yamazaki, K. Sugito and Tsuchiya: Development of flexible manufacturing system, Journal of Robotics and Mechatronics, **26**, 4 (2014) 426-433.
- 5) J. Rybicka, A. Tiwari and S. Enticott: Testing a flexible manufacturing system facility production capacity through discrete event simulation: automotive case study, International

Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, **10**, 4 (2016) 690-694.

- 6) S. Kojima, P. Kerites, T. Hayashi, and H. Hashimoto: Assembly model data in robot cell systems, Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (1998) 655-660.
- 7) 小林左千夫, 村上亮, 島田大地, 小林弘樹: 人と機械が混在する組立工程における作業のモジュール化手法, 2016年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2016) 397-398.
- 8) J. Michniewicz, G. Reinhart and S. Boschert: CAD-based automated assembly planning for variable products in modular production systems, Procedia CIRP, **44** (2016), 44-49.
- 9) S. Kardos, A. Kovács and J. Váncza: Towards feature-based human-robot assembly process planning, Procedia CIRP, **57** (2016) 516-521.

梶田大毅

2007年首都大学東京大学院工学研究科機械工学専攻修了。現在、(株)日立製作所研究開発グループ生産イノベーションセンタ 主任研究員。

中須信昭

1992年京都大学大学院工学研究科応用システム科学専攻修了。現在、(株)日立製作所研究開発グループ生産イノベーションセンタ 主任研究員。

榎本敦子

1985年筑波大学第一学群自然科学類数学専攻修了, 工学博士。現在、(株)日立製作所研究開発グループ生産イノベーションセンタ 主任研究員。

勝又大介

2010年東京工業大学大学院社会理工学研究科経営工学専攻修了。現在、(株)日立製作所研究開発グループ生産イノベーションセンタ 研究員。

小山洸也

2015年茨城大学工学部電気電子工学科卒業。現在、日立オートモティブシステムズ(株)パワートレイン&セーフティシステム事業部 xEV 生産本部 企画員。