# 産業用ロボットによる組み立て作業の自動化に関する研究動向

原田 研介（大阪大/産総研）

# Research Trends on Assembly Automation by using Industrial Robots

Kensuke HARADA (Osaka Univ./AIST)

Keywords: Robotic Assembly, Assembly Automation, Grasping, Manipulation

## 1. はじめに

ロボットが作業を自律的に行うことで，ヒトの作業を代行することは，ロボット研究の一つの究極的な目的である．本稿では，産業用ロボットによる組み立て作業が直面する問題を明らかにし，組み立て作業の完全自動化に向けた研究の動向と体系化について述べる．

近年，製品のライフサイクルが短くなることで，製品の製造形態も大量生産から多品種少量生産，変種変量生産へと移行している [1]．また，それに伴い，製品を組み立てる際の生産形態もライン生産からセル生産へと移行している．ここで，従来多くの産業用ロボットではティーチング・プレイバック方式により動作を生成しているが，ティーチング・プレイバックはライン生産においてロボットに一度教示した動作を行わせ続ける場合に適した方式である．ここで，セル生産をロボット化する際に直面する問題を考えてみよう．

現在，セル生産は多くの場合において人手に依存している (図 1(a))．セル生産において，作業者は部品箱から必要な部品をとり，作業台の上で組み付ける．この作業をロボットにより代替することを考えてみよう．まず考えられるのは，ヒトと同じくらいの大きさを持った双腕ロボットを導入し，ヒトが作業していたところに設置するということであろう (図 1(b))．しかしながら，単にロボットをヒトが作業していたところに設置しただけでは，ほとんどの場合においてロボット化は成功しない．これには，いくつかの理由がある．まず，双腕ロボットへの動作教示は少なく見積もっても単腕ロボットに比べて倍の労力が必要である．次に，ロボットは部品箱にバラ積みされた状態から部品を取り出さなくてはならないが，その困難さからパーツフィーダなどの自動整列装置を用いることがしばしばである．さらに，把持した部品を組み付ける際に，部品が外力を受けて把持位置がずれることを避けるために，部品毎に指の形状を工夫した専用グリッパをツールチェンジャにより切り替えながら用いることになる．このように，部品毎

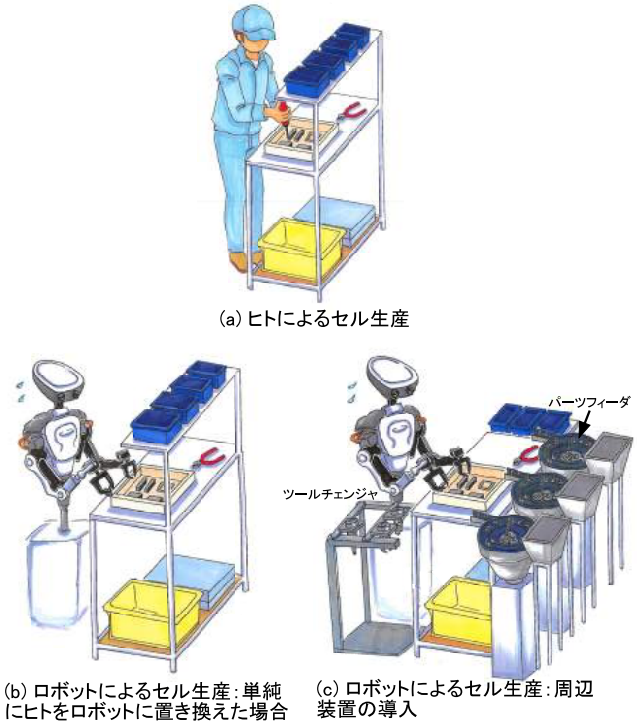


Fig. 1: セル生産の自動化に関する課題

にパーツフィーダや専用グリッパを用意したのでは，変種変量生産における製造工程の変化に柔軟に対応できなくなる．また，このような苦労を重ねても，ロボット化できる工程は限定的であり，実際には作業者の熟練を要するようなロボット化が困難な作業は多く存在する．現状において，セル生産をロボット化する場合は，作業の容易さと製品のライフサイクルとを勘案して，ロボット化が可能かどうかを事例毎に注意深く吟味しなくてはならない．

このような背景により，近年の組み立て作業の研究は多品種少量生産や変種変量生産をターゲットとしており，研究のポイントは容易にロバストな組み立て作業動作を生成できるかということに集約される．おおまかに分けて，研究は

1) 組み立て作業動作の自動生成

2) 組み立て作業に用いる汎用グリッパ

という二つのポイントをお互いに考慮しながら進める必要

がある．そして，1) に関して完全な自動化が困難である場合，

3) ロボットとヒトの協働

が研究課題として挙げられる．また，1) へのアプローチとして

1-1) 組み立て作業の動作計画

1-2) ある製品に対する組み立て動作を汎化させて別の製品の組み立てに用いる

のように，動作計画と機械学習の二つを考えることができる．また，

1-3) 力制御に基づく熟練作業の自動化

もここに含むことができる．1-1), 1-2), 1-3) は互いに独立した研究項目ではなく，補完し合う面も持っている．最後に，組み立て工程を自動化するためには，組み立て工程への部品供給作業を自動化する必要がある．なぜなら，この作業を人手に依存するのであれば，組み立て工程を担当していた作業者が部品供給作業の担当に置き換わるだけになるからである．よって，以下の研究項目は組み立て作業の自動化の研究とは切り離せない

4) 部品箱からの部品のピッキング

これらの研究項目の多くは，ロボットの知能化と密接な関わりを持っている．本稿では，特に製品の組み立て作業を完全に自動化することを目指した研究を俯瞰すると共に，研究の動向を解説する．また，著者らの研究グループにおける研究を中心として，研究の事例を紹介する．

## 2. 研究の俯瞰

本章では，組み立て作業を完全に自動化することを目指した研究について，特に組み立て作業計画を中心として解説する．組み立て作業計画の研究は，従来から人工知能やロボット工学の問題として多くの研究が行われてきた [2, 3, 4]．それに対して，組み立て作業計画を把持計画と組み合わせることで，ロボットが部品を把持して組み付ける一連の動作を自動的に計画する研究が行われるようになったのは比較的近年である [5, 6, 7, 8, 9, 10]．ここでは，従来の組み立て作業計画に把持計画を組み合わせることで，ロボットの動作を計画する手法を特に組み立て作業の動作計画と呼ぶ．図 2 は，組み立て作業の動作計画を中心に置いて組み立て作業の自動化に関する研究を俯瞰したものである．ここで，組み立て作業の動作計画は図に示すような３層の計画問題から構成されることになる．まず，把持計画は最下層に配置され，与えられたグリッパによってパーツを把持する姿勢が生成される．このとき，把持対象物が持つ機能は把持姿勢を限定する役割を持つ．また，ここでは複数種類のグリッパを仮定することも可能である．次に，与えられたパーツと，その把持姿勢を用いて操り計画を行う．ここでは，対象物を安定に環境に置く姿勢や持ち替えの計画も同時に行いながら，ロボットの動作軌道を求めることになる．ここで，一つの把持姿勢に対してロボットの動作軌道が求まらない場合，別の把持姿勢を仮定して操り計画を再実行することになる．最終的に，操り計画で出力されたロボットの動作は，組み立てシーケンスの中の一部を構成する．組み立て作業計画では，このようなロボットの動作系列を探索により求めることになる．

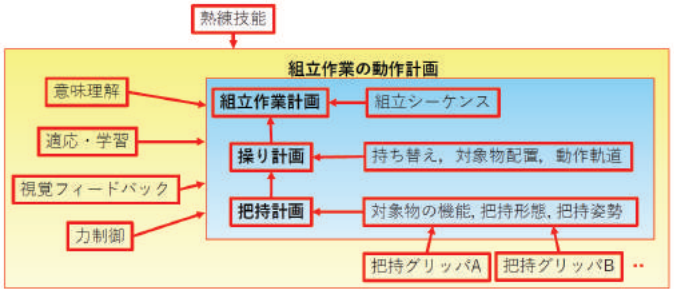


Fig. 2: 組み立て作業の自動化研究の俯瞰

ここで，図 2 の中心に据えた組み立て作業の動作計画を実行するだけでは，ロボットが実現できる作業は単純なピックアンドプレースに限定され，かつロボットが実現すべき作業のゴールを厳密に指定しなくてはならない．そこで，例えば人工知能の研究分野で盛んに研究されている意味理解を用いて，より抽象的な動作指令から，これらの３層構造を構成するパラメータを抽出することが考えられる．また，計画問題の３層構造を用いて生成した組み立て作業動作を汎化することで，類似した製品の組み立て動作に用いることが考えられる．さらに，視覚フィードバックや力制御を併用することで，センサフィードバックの結果に基づいたリアルタイムの動作計画を行うことが考えられる．最後に，より動作のバリエーションを広げるために，熟練作業者が持つ知識を抽出して適用することが考えられる．熟練作業者の知識は，意味理解，動作軌道，力制御パラメータなどあらゆる要素を含んでいるため，熟練作業者の知識の利用は俯瞰図において最も外側に配置されている．

最後に，この図においては与えられたグリッパの候補に対して組み立て作業動作を生成している．ここで，これと全く逆方向を辿るアプローチ（逆問題）を考えることができる．つまり，最初に作業指令が与えられており，この作業指令の実現が可能なグリッパを設計する問題である．これは，セル生産に用いる組み立て作業用グリッパの設計問題に帰着させることができる．セル生産においては，複数

の組み立て工程を仮定するが，使うグリッパの数は少ない方が望ましい．つまり，複数の組み立て工程を仮定し，これらで共通的に用いるグリッパを設計する問題として定義される．

本章では，以上のように組み立て作業の自動化に関する研究を俯瞰した．ここで，この図に掲載されている個々の項目については，それぞれ研究が行われているが，各項目を連携させる研究事例は多くない．また，多品種少量生産や変種変量生産を仮定した研究の事例もこれから増えることが期待される．

## 3. 研究事例

ここで，著者らの研究グループにおける研究を中心に研究の事例をいくつか紹介する．

**複数のグリッパを仮定した組み立て作業の動作計画**：著者ら [11] はツールチェンジを考慮した組み立て作業の動作計画の研究を行っている．この研究では，予め複数種類のグリッパを用意する．そして，対象物や作業に応じて適用可能なグリッパを自動的に選択し，作業毎に取り換えながら組み立て作業を自律的に行う (図 3)．

**作業データを考慮した組み立て作業の動作計画**：山野辺ら [12] は組み立て作業を Work, Task, Action の 3 層に分解し，各層に対してデータ型を定義することで，ヒトやロボットの組み立て作業を記録する研究を行っている．そして，これらの結果を組み立て作業の動作計画に適用する研究が行われている [13]．ここでは，単純なピックアンドプレースでは実現できない動作が組み立て作業に含まれる場合，この作業に相当する AND/OR グラフのエッジに Action のレイヤーに相当する作業データを紐づけておく (図 4)．そして，グラフ探索でこのエッジが選択されると，この作業データを修正して適用する．図 5 には，玩具の飛行機をロボットが組み立てる動作を計画した結果を示している．この例では，羽を胴体に固定するためにネジを締める際，ネジ締めの動作をデータから得ている．本研究を発展させることで，組み立て作業の動作計画に熟練技能を組み合わせるフレームワークが確立すると考えられる．

**組み立て用汎用ハンド**：図 2 では逆問題としてグリッパの設計問題を述べた．組み立て作業用の汎用グリッパに関する研究として，Nie ら [14] は対象物を一旦受動指に押し付けることで，対象物の初期位置に誤差が存在してもペグ挿入作業が失敗しないようなグリッパの機構を提案している．

**組み立て作業の機械学習**: 近年の深層学習の盛り上がりを受け，強化学習によりロボットに組み立て作業動作を獲得させる試みが行われている [15]．今後，機械学習によるアプローチは組み立て作業計画と融合することで，より多種多様な組み立て作業に関する動作を獲得できるようになる

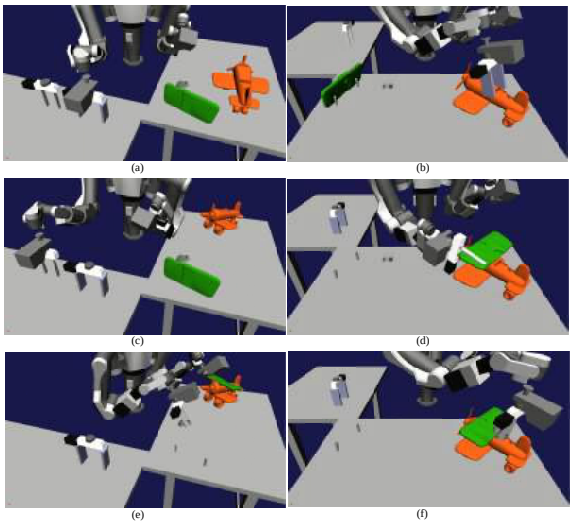


Fig. 3: ツールチェンジを考慮した組み立て作業の自動計画

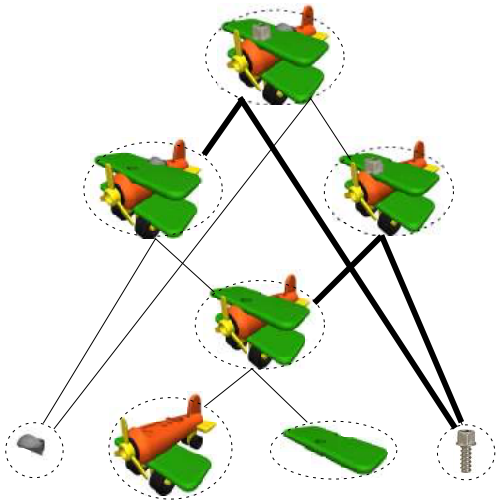

Fig. 4: 組み立て作業の AND/OR グラフ：動作データを適用するエッジを太実線示す

ことが期待される．

**熟練技能**: 熟練作業者の作業技能を抽出し，組み立て作業の動作計画に適用することを考える．このとき，一つの大きな研究トピックはヒトによる作業の力制御特性を抽出することである．福本ら [16] は，ヒトが油圧シリンダへパッキンを取り付ける作業を行う際に加える力を計測し，このデータに基づいて力制御則を導出している．そして，力制御のパラメータは滑降シンプレックス法を用いた最適化計算により求めている．

## 4. おわりに

本稿では，特に組み立て作業の動作計画を中心とし，組み立て作業の自動化に関する研究を俯瞰し，いくつかの研究事例を示した．ここで，セル生産のロボット化を実現しようと思うと，今回述べたアプローチ以外にも，直接教示

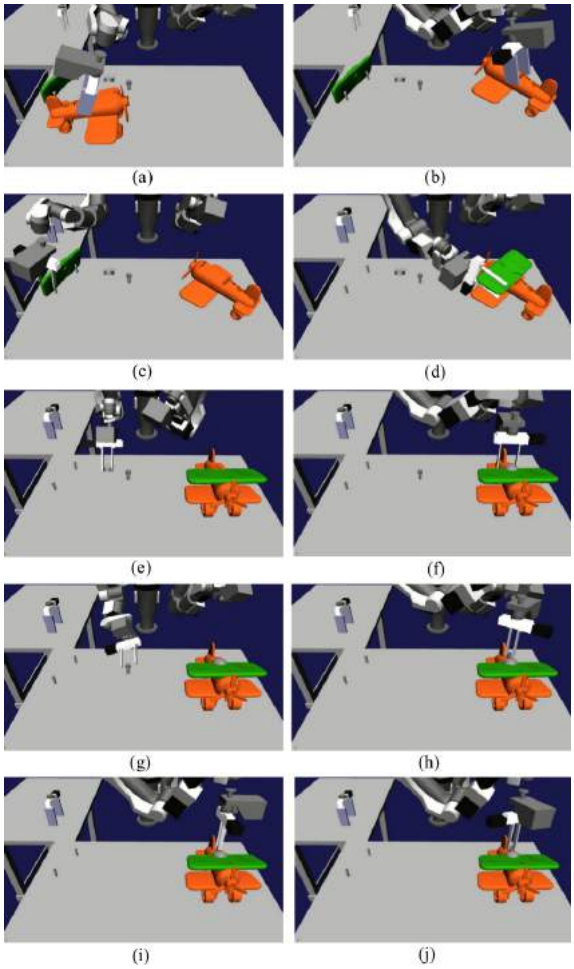

Fig. 5: 動作データを考慮した組み立て作業の自動計画

[17] や教示ソフトウェアにおいて教示した動作の再利用を行うアプローチ [18] が考えられる．

最後に，著者が平素より研究のディスカッションを行っている，大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻ロボットマニピュレーション研究室にのメンバーや産業技術総合研究所知能システム研究部門マニピュレーション研究グループのメンバーに感謝する．また，大阪大学の越智仁絵氏には図 1 を描いていただいた．

## 参考文献

[1] 小平, “製造業の未来を切り開くロボットセルの価値と課題”, MONOist, 2014.
[2] L.S.M. de Mello and A.C. Sanderson, “And/Or Graph Representation of Assembly Plans”, CMU Research Showcase, CMU-RI-TR-86-8, 1986.
[3] L.S.M. de Mello and A.C. Sanderson, “Automatic Generation of Mechanical Assembly Sequences”, CMU Research Showcase, CMU-RI-TR-88-19, 1988.
[4] R.H. Wilson and J.-C. Latombe, ”Geometric Reasoning about Mechanical Assembly”, Artificial Intelligence, vol. 71, no. 2, pp. 371-396, 1994.
[5] U. Thomas, T. Stouraitis, and M. A. Roa, ”Flexible Assembly through Integrated Assembly Sequence Planning and Grasp Planning”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Automation Science and Engineering*, pp. 586-592, 2015.
[6] M. Dogar, A. Spielberg, S. Baker, and D. Rus, ”Multi-robot Grasp Planning for Sequential Assembly Operations”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2015
[7] K. Harada, T. Tsuji, and J.-P. Laumond, ”A Manipulation Motion Planner for Dual-arm Industrial Manipulators”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 928-934, 2014.
[8] N. Vahrenkamp, T. Asfour, R. Dillmann, “Simultaneous Grasp and Motion Planning”, Robotics and Automation Magazine, 2012.
[9] T. Lozano-Pérez and L.P. Kaelbling, ”A Constraint-based Method for Solving Sequential Manipulation Planning Problems”, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2014.
[10] W. Wan and K. Harada, “Integrated Assembly and Motion Planning using Regrasp Graphs, Robotics and Biomimetics”, Vol. 3, No. 18, DOI 10.1186/s40638-016-0050-2, 2016.
[11] 原田, 万, 永田, 山野辺, 辻, Ramirez-Alpizar, “ツールチェンジ機能を考慮した組立作業の自動計画,” 日本ロボット学会学術講演会, 1B2-05, 2016.
[12] 山野辺, 辻, 原田, 永田, 花井, 万, Ramirez-Alpizar, “作業動作生成のためのクラウドデータベースの構築,” 日本ロボット学会学術講演会, 1B2-05, 2016.
[13] 原田, 山野辺, 万, 永田, Ramirez-Alpizar, “タスクデータを併用した組立作業の自動計画”, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1L3-03, 2017.
[14] Nie and Harada, “A Three fingered Adaptive Gripper for Assembly Tasks”, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1L1-04, 2017.
[15] S. Levine, N. Wagener, and P. Abeel, “Learning Contact-Rich Manipulation Skills with Guided Policy Search”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2015.
[16] 福本, 原田, “ヒトの動力学特性に基づいたパッキン取り付けロボット–滑降シンプレックス法による取り付け負荷の最小化–”, 第 18 回システムインテグレーション部門講演会, 2017.
[17] Rethink Robotics, http://www.rethinkrobotics.com/
[18] R. Hanai and K. Harada, “A Framework for Systematic Accumulation, Sharing and Reuse of Task Implementation Knowledge,” *Proc. of IEEE/SICE Int. Symposium on System Integration*, pp. 434-440, 2016.