

ロボットを用いた自動化技術の現状と アクティブビジュアルサーボ

東京理科大学 創域理工学部 機械航空宇宙工学科 准教授 あらい しょうご 荒井 翔悟

はじめに

FA (Factory Automation) は (主に工場における) 生産工程の自動化を意味する用語です。FA という用語に馴染みの薄い方でも、小中学校の社会科の教科書に掲載されている自動車工場の溶接を行うロボットと言えば、どこかで見たことがあるという方が多いのではないのでしょうか。本稿では、こうしたロボットを用いた生産工程の自動化について考えます。

自動化に関する近年の印象的な事例としてテスラ (Tesla, Inc.) の事例を挙げるすることができます。2016年にテスラは電気自動車のコストを下げるために、数百台のロボットを用いて電池パックと車体の組み立て工程の全自動化に挑戦しましたが、稼働効率が上がりませんでした。CEOを務めるイーロン・マスク氏自ら工場に泊まり込んで対応しましたが、自動化工程に人を配置する半自動化ラインでの生産に切り替えています。決算発表時の会見では、この状況について「生産地獄」と表現し、「こんな経験は二度としたくない」と語っていました。人に蹴られても倒れない4足歩行ロボットや走るヒューマノイドロボット等の近年のロボティクス技術の進化を日頃見聞きしていると、このテスラのニュースに対していささか奇異な印象—FA技術は十分に習熟しているのではないだろうか、生産の自動化の何が難しいのだろうか—を持つかもしれません。本稿では、産業ロボットを用いたFA技術に焦点を絞り、現在の課題はなにか、またその課題を解決するために行っている筆者の研究について紹介したいと思います。

生産自動化の課題

まず、生産自動化の難しさについては、大雑把に区分して2つの観点から考えることができます。

第一の観点は、作業自体の難しさです。たとえば、ロボット工学における代表的なタスクの一つにペグインホールと呼ばれるものがあります。一般社団法人日本機械学会発刊の機械工学辞典によると、ペグインホ

ールについて「ホール (穴) の中にペグ (ピン) を挿入する作業。ピンと穴のはめあい公差が小さくなるに従い、ピンと穴に干渉が発生しやすくなり、作業の実行に力調節機能が必要にもなる。ロボットの力制御や組立作業の例題によく用いられる」¹⁾と説明されています。要するに穴の中に物体を挿入する作業のことで、私達の日常生活にも見られる作業—たとえば、ドアの鍵穴に鍵を差し込むこと—です。人間は、成長過程でペグインホール作業を学習しています (子供用の玩具にもこのタスクを学習させるものが見られます **【図1左】**)。ペグインホールでは、ホールがペグのサイズに対して大きいことが必要ですが、両者のサイズの差が小さくなる、つまりクリアランスが小さいほど人にとっても難しい作業になります。他にも、紐を結ぶ/解くロープワークや衣類を畳むなど、柔軟物体の取り扱いが一般にロボットには難しいとされています。

第二の観点は、セットアップのためのコストです。新規に生産ラインを立ち上げる、あるいは既存の生産ラインの中で使用する部品に変更があった場合には、都度人手による調整作業や周辺装置が必要となります。このことについて解説するために、産業ロボットとこれを用いた生産ラインの概要について以下で説明します。

産業ロボットと生産ラインの立ち上げ/変更

まず、産業ロボットは **【図2】** に示すように関節、リンク、先端に取り付けられたエンドエフェクタ、ハンド等から構成されており、各関節にはアクチュエータと関節の回転角を計測するためのセンサが備わっています。そして、基本的にティーチング・プレイバック方式 (教示再生方式と呼ばれることもある) を採用しています。ティーチング・プレイバックとは、「人間がティーチングペンダントなどを用いて、ロボットが行うべき作業を逐次順を追って、その位置、センサ出力条件などを教示し、そのときのデータを記録し、これを再生することによって所期の作業を実現しようとする方式」²⁾ (一部変更) のことです。ここで、ティーチン

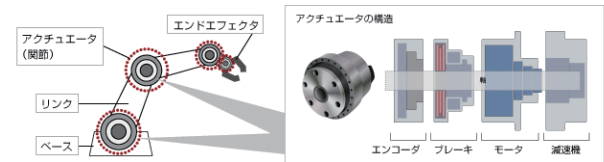


【図1】左：ペグインホールを目的とした玩具³⁾
右：ティーチングペンダント⁴⁾

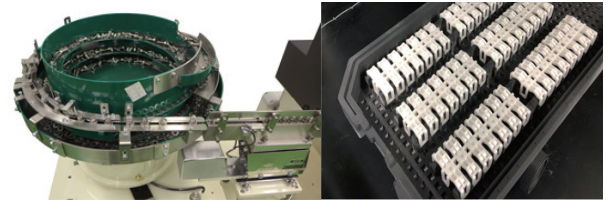
ゲペンダントとは、【図1右】に示す装置で、これを使って各関節に備わっているアクチュエータへ指令を出すことができるものです（ロボットを家電製品、ティーチングペンダントをリモコンと置き換えるとイメージが湧きやすいかもしれません）。この方式を使って、部品Aを製品Bに取り付けるタスク（以下、タスクAと呼びます）を考えましょう。この場合、生産を開始する前に、部品Aを掴める位置に設定者がティーチングペンダントを用いてロボットのエンドエフェクタを移動させ、そのときのロボットの各関節角を記録します（説明が重複しますが、各関節には関節角を測定するためのセンサがあります）。次に部品Aを掴んだ状態からティーチングペンダントによってロボットを動かし、製品Bに部品Aを取り付けます。つまり最初は人からロボットに指令を与えて一連の作業を一度実行します。この一連の動きにおける各関節角の時間変化を記録します。これがティーチングプレイバックのティーチング（教示）と呼ばれる工程です。実際の生産に際しては、記録された各関節角の時系列データ通りにロボットのアクチュエータを動かす（プレイバック）することで、生産（この例の場合は、取付作業）を達成します。以上のプロセスから分かる通り、この生産タスクにおいて、ロボットは部品Aや製品Bの位置、形状および機能などを認識しているわけではありません。したがって、ティーチング時から部品Aや製品Bの位置がわずかでもずれると、取り付けタスクの達成は困難になります。こうした事態を防ぐために、自動生産ラインでは必要な物体は基本的に位置決め供給されます。

位置決め供給とは、毎回定められた位置（上記の場合はティーチング時の部品Aと製品Bの位置）から寸分の狂いなく生産に必要な物体を配置することです。位置決め供給の方式は様々ですが、代表的な方法にパーツフィーダと呼ばれる装置を用いる方法や、治具を使う方法があります。

パーツフィーダは【図3左】に示すような装置であり、ばら積みにされた物体を振動で分離しながらレ



【図2】産業ロボットの構造⁵⁾



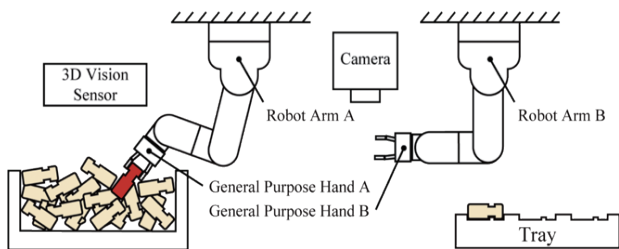
【図3】左：パーツフィーダー⁶⁾ 右：治具とトレイ

ールの先端に一個ずつ供給する装置です。

治具とは、たとえば【図3右】に示すものです。この例では、トレー内に物体を固定するための機構があり、あらかじめ人の手で物体を一つずつ固定します。その後、トレーを産業ロボットの作業範囲の決められた位置に設置し、生産を行います。

変種変量生産のための自律ロボット

以上、ロボットを用いた生産ラインの概要について説明しましたが、このやり方は少品種大量生産（読んで字の如く、種類（品種）の少ない製品を大量に生産する方式のこと）を行う場合には比較的うまく機能しました。しかし、私達が物質的に豊かになり、社会の製品に対するニーズは多様化しました。その結果、少品種大量の製品を求める時代から顧客毎のニーズにあわせた多種多様な製品が求められる時代へと変化し、様々な製品を需要に応じて臨機応変に生産する変種変量生産が要求されています。実際、同一の製品に見えても色、機能、形状に小さい差異のある製品が急激に増えています。変種変量生産には、これまでの自動生産のやり方は適していません。その理由はコストにあります。これまでに説明したとおり、自動生産ではロボットに教示をする必要があります。さらに、パーツフィーダや治具も必要です。一般に、扱う物体の形状やサイズ、タスクの内容がわずかでも変更になると、再度ロボットに対して教示を行う必要がでてきます。また、パーツフィーダや治具も新たに設計し直す必要があります。したがって一連の変更には時間と金銭的なコストが発生します。少品種大量生産では、生産ラインの立ち上げや変更にある程度のコストがかかっても、そのラインで大量の製品の生産が見込めるので大規模な初期投資が可能でした。しかし、変種変量生産では、需要に



【図4】トレーに部品を組み付ける作業

応じて製品の種類や生産量が変動するため、生産ラインの立ち上げや変更の段階で、(コストを回収するために)十分な量の生産が可能かどうか不明なことが多いのです。したがって、変種変量生産時代では、自動生産のために必要なコストを下げるのが、より強く求められます。コストを下げるためには、人の手による設定作業を減らすこと、そのためには、ロボットが自律性を持つことが必要です。

ロボットの自律性とは、「状況の認識に基づいてなすべき動作を自ら決定できること」になります。したがって、自律的なロボットに求められるのは、大きく分けて認識と動作決定の2つの能力です。

ここで、【図4】に示すばら積みされた部品AをトレーBに取り付けるタスク(以下、タスクBと呼びます)について考えてみましょう。自律ロボットは人に指示されずに、部品AとトレーBの位置を認識する必要があります。つぎに、数多くある部品Aの中で一つを選び、それを掴みます(把持と呼びます)。さらに、適切な動きでトレーBに取り付けます。この一連の作業には、ロボット工学の重要な技術が数多く必要とされます。具体的には、物体の計測/認識、物体を把持するハンド、物体のどこを掴むかを決める把持計画、ロボットの軌道を決定するための動作計画、取り付けのための物体位置決め技術などです。以上の一連の技術について筆者が取り組んできた研究について紹介するには紙面が足りないため、ここではアクティブビジュアルサーボ技術について紹介したいと思います。

自律ロボットのキーテクノロジー： アクティブビジュアルサーボ

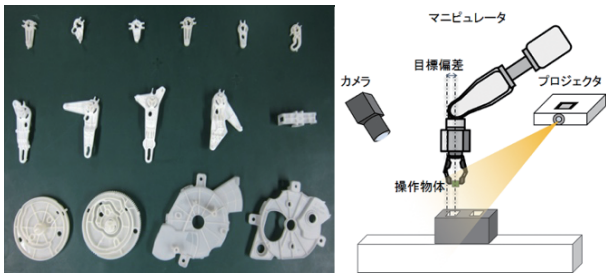
タスクBにおいて、部品Aの把持に成功した後の状況を考えます。つまり残る作業は、部品AのトレーBへの組付けです。このとき、固定用治具がなければトレーBの位置は毎回同じだとは限りません。人間であれば、トレーBの取り付けポイントを見ながら部品Aを取り付けるでしょう。これと同じよう

なロボットの技術的な枠組みがビジュアルサーボと呼ばれます。もう少し詳しく説明するとビジュアルサーボによる組付けは以下の手順で実施されます。まず、カメラを使ってトレーBに部品Aを取り付けた場면을撮影します。この画像のことを目標画像と呼びます。つぎに、部品Aを把持します。その後に、カメラで撮影を行いながらロボットを動かします。この際に、撮影された画像と予め撮っておいた目標画像が一致するようにロボットを動かすことがビジュアルサーボの肝になります。

ビジュアルサーボという技術を使うことで、部品の組付けなどの生産をロボットが自律的に行うことが可能であることを説明しましたが、生産にこの技術をそのまま適用できないケースが現実には多いです。

ビジュアルサーボは基本的に、目標画像と現在の画像の違いを少なくすることを目的としています。したがって、この画像の違いが現れにくいケースでは、うまくロボットが動作しない、つまり目標とする位置(以下、目標位置と呼びます)にロボットが移動しないのです。具体的に、こういったケースが問題になるかと言えば、【図5左】に示すように扱う物体の表面に模様が少ないときです。逆に言えば、物体の表面に模様が多きときにはビジュアルサーボを使うことでロボットはうまく動作します。これは、模様が多きときは、物体が目標位置にあるときに撮影された目標画像とそこから少しずれた位置にあるときに撮影された画像の違い(以下、画像偏差と呼びます)がよく現れるからです。しかし、多くの工業製品の部品は、その表面に模様を持たない、あるいは模様が少ないため、ビジュアルサーボをそのまま生産に適用することが困難になります。

こうした問題を解決するために、筆者はプロジェクタを使って、模様のあるパタン光を物体に投影してビジュアルサーボを行うアクティブビジュアルサーボ【図5右】という技術を提案し、研究してきました⁷⁾。模様が無いのであれば、人工的に模様を付加しようという発想です。問題はどのような模様を投影(投影する模様のことを以下ではパタン光と呼びます)するかということです。これについて、筆者は、画像偏差を最大とするようなパタン光を、ある一定の仮定の下に理論的に導出しました(本稿ではこの詳細については紙面の制約もあり省略します)。つぎに、ビジュアルサーボとアクティブビジュアルサーボの比較実験について説明します。この実験では、【図4】のシステムを使って把持した物体をトレーの中の治具に設置します。



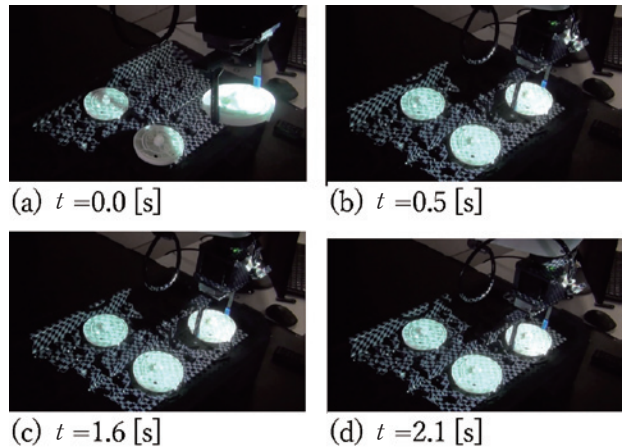
【図5】左：表面模様が少ない物体 右：アクティブビジュアルサーボ

【図5左】に示された物体が対象です。表面に模様がなく、多種多様な形状の物体を対象としています。比較実験の結果、通常のビジュアルサーボと比較してアクティブビジュアルサーボの位置決め誤差は平均72%減少していることが確認され、高精度な位置決めが可能であることが分かりました。また、実験で使用したトレイと治具との間のクリアランスは約0.5 (mm) ですが、ビジュアルサーボを使った場合、うまく物体を治具に挿入することができませんでした。これに対して、アクティブビジュアルサーボを利用した場合には、治具への挿入に成功することを確認しました【図6】。

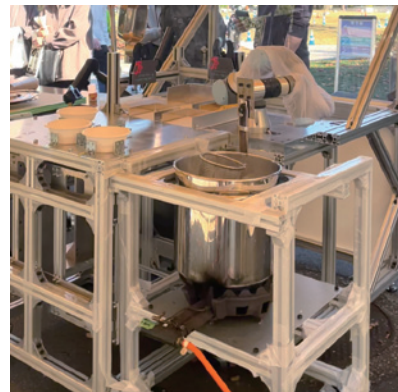
おわりに

本稿では、生産自動化に焦点を当て、その現状と課題、特に現在のロボティクス技術を生産に適用した場合の問題を解説しました。その後で、そうした問題を解決するためにロボットの自律動作が必要であり、そのための技術として筆者が研究しているアクティブビジュアルサーボについて説明しました。紹介した以外にも、三次元計測、三次元認識、物体を把持するハンド、物体のどこを掴むかを定める把持計画、ロボットの軌道を決定するための動作計画など、自律ロボットに必要とされる幅広い技術についての研究を行っています。また近年では深層学習と呼ばれる一種のAI技術を使った各種ロボティクス技術についても研究していますが、紙面の都合上で紹介は次の機会にしたいと思います。

最後に余談ですが、こうしたロボットを用いた生産自動化の問題については自ら経験しないと本質的な理解につながりにくいものです。そこで、ロボットを用いた生産自動化の現状について理解を深めるために筆者の研究室では、卒業研究に取り組む前に、産業ロボットを使って自動生産システムを製作しています。本年度は調理の自動化をテーマにロボットラーメン屋台の製作に取り組みました。実際の産業ロボットを使い、



【図6】アクティブビジュアルサーボによる治具への挿入



【図7】ロボットで自動化されたラーメン屋台

麺をピックアップしてテボに入れ、麺を茹でたあとに、皿に盛り付けを行いました。製作したロボットシステム【図7】は、大学祭(理大祭)に出店し、実際にシステムを一日あたり約8時間稼働させ、茹でたラーメンを販売しています。機会があれば、次の理大祭にぜひお越しください。

【参考文献】

- 1) 日本機械学会 “機械工学辞典”
<https://www.jsme.or.jp/jsme-medwiki/14:1011815> (As of January 19, 2023).
- 2) 日本機械学会 “機械工学辞典”
<https://www.jsme.or.jp/jsme-medwiki/14:1008536> (As of January 19, 2023).
- 3) <https://studypark.tokyo/?pid=132512414> (As of January 19, 2023).
- 4) 株式会社デンソーウェーブ “ティーチングペンダント”
<https://www.denso-wave.com/ja/robot/product/option/tpmp.html> (As of January 19, 2023).
- 5) 三木プーリ株式会社
<https://www.mikipulley.co.jp/JP/Services/Blog/topic01/index.html> (As of January 19, 2023).
- 6) 村田精工株式会社 “システム事例集”
<http://www.murata.co.jp/system/index.html> (As of January 19, 2023).
- 7) 荒井翔悟 “ピンピッキング&キッティングのためのロボットシステム” 日本ロボット学会誌, vol. 32, no. 10, pp. 938-942, 2019.