

マニピュレーション革命の兆候と未来

原田 研 介*

* 大阪大学大学院基礎工学研究科, 大阪府豊中市待兼山町 1-3
* Graduate School of Engineering Science, Osaka University, 1-3
Machikaneyama, Toyonaka, Japan
* E-mail: harada@sys.es.osaka-u.ac.jp

キーワード：把持 (Grasping), マニピュレーション (Manipulation)
JL 002/02/4202-0086 ©2002 SICE

1. まえがき

ヒトが日常生活を送る上で、手の機能は大きな役割を担っている。たとえば、ヒトは料理、掃除、洗濯、片づけなどの手作業を難なく行っているが、これらの手作業をロボットに行わせようとして初めて、我々研究者はその作業の困難さに気付くことも多い。ヒトが何気なく行っているこれら作業の背後には、ヒトが進化の過程で獲得したものや、ヒトが生まれてから経験を積んで成長する過程で獲得したものが多く含まれていると考えられる。ロボットによる対象物の把持やマニピュレーションの研究は、ヒトが進化や成長の過程で獲得してきた技能をプログラムの形で記述するプロセスに他ならない。

ここで、把持やマニピュレーションの研究分野において、技術を一気に実用化に近づけるような革命的な技術のイノベーション（マニピュレーション革命）が起こるかどうかを予測してみよう。2000年代の前半にSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) の技術が確立したことで、未知環境における自動運転の技術が一気に実用化に近づいた。それと比較して、ヒトと同様に腕の先端にハンドを有するロボットが未知環境において与えられた作業を遂行する場合を考えてみる。自動運転の問題はそれ自体で困難な問題であるが、最も単純化すると2次元平面内の並進と法線まわりの回転から構成される3次元のコンフィグレーション空間内での動作計画問題に帰着される。それに対して、対象物の把持やマニピュレーションの問題は3次元空間内で動作を計画しなくてはならない上に、ハンドと対象物の接触も同時に考慮しなくてはならない。このとき、コンフィグレーション空間の次元は少なくとも $6(\text{アーム})+2(\text{ハンド})+6(\text{対象物})=14$ となる。また、自動運転においては、多くの場合自動車がゴールに到達するという明確な目標があるのに対して、把持やマニピュレーションにおいて与えられる目標は多様多様である。例えば、日常生活においてヒトを支援するのであれば、料理をする、掃除をする、片づけるなどの抽象的な指令をロボット自身が解釈しなくてはならない。そして、これらの抽象的な指令の意味を理解した上で、各種センサによってロボットの周辺環境を適切に認識し、対象物とハンドとの接触を考慮してロボットの動作を生成しなくてはならない。また、ロボッ

トが動作中は対象物とハンドとの接触を維持するような実時間制御が必要である。つまり、把持やマニピュレーション研究の難しさは、単純に問題の次元が増加すること以外にも、AIや、センサ、制御など種々の周辺領域の研究を統合しなくてはならないことも含んでいる。

では、これまでの把持やマニピュレーションの研究がどのようであったかについて簡単に振り返ってみたい。筆者が把持やマニピュレーションの研究をスタートさせた1990年代の後半は、国際学会において把持やマニピュレーションの発表の占める割合は今程は多くなかった¹⁾。それに対して、2000年代前半に軌道計画や把持計画の技術が確立されたことで把持やマニピュレーションの研究が活発になり始め、2000年代の後半から把持やマニピュレーション研究に関する国際的な研究プロジェクトが組織されるようになったことで、国際会議における把持やマニピュレーションの発表件数が大幅に増加した¹⁾。そして、これらのムーブメントはロボットハンドの機構、作業計画、機械学習的アプローチなどの発展へとつながり²⁾、更に近年では把持やマニピュレーションの技術を実環境で適用することを想定した競技会が多く開催されている²⁾。ただし、これらの競技会においても、実際にヒトが行っている作業からはブレイクダウンした、現状の把持やマニピュレーションで対応可能なレベルの技術をターゲットとしているのが現状である。ただ、それでも把持やマニピュレーションの技術は着実に実用化へと近づいており、国際学会における研究発表を聴講している限りにおいては、マニピュレーションを実用化するために何が必要かについて、大まかな合意は形成されてきているように感じている。要するに、マニピュレーション革命はまだ訪れていないが、マニピュレーション革命への足音は着実に大きくなってきていると考えられる。

本稿においては、本特集号において後で解説される各技術項目に関して、マニピュレーション革命を起こす要素として筆者自身の簡単な解説を行った上で、今後の技術展望を述べる。各技術項目に関する詳細な解説については、後に続く解説記事に譲ることとする。

2. 兆候

本章では、近年の技術的なトピックのいくつかを紹介する。

2.1 機械学習的アプローチ

近年の深層学習 (Deep Learning) の盛り上がりの影響を受け、把持やマニピュレーションの分野に機械学習を導入するアプローチが盛んである。近年の IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) は、研究の流行に敏感なダイナミズムの高い国際学会となっているが、2017 年は採択された 938 件の発表のうち、Learning and Adaptive Systems の研究領域に含まれるものの件数は 101 件に上っている。把持やマニピュレーションの研究分野に機械学習を導入することで、ヒトが詳細な作業指示を行うことなしに、簡単な作業目的を与えるだけでマニピュレーションの動作が自動的に生成できるようになることが期待されている^{3), 4)}。また、ロボットハンドの研究分野では未知対象物を把持する場合の把持可能性の判定に関する研究が盛んに行われている (例えば⁵⁾)。また、2017 年の 11 月は 1st Annual Conference on Robot Learning (CoRL) が開催される。これらのことより、ロボットによる把持やマニピュレーションの研究分野への機械学習の適用が今後益々盛んになることが期待される。

2.2 ロボットアーム・力制御

近年、関節トルクが制御可能なロボットアームが多く市販されている (例えば⁶⁾⁻⁸⁾ 等)。これらのロボットアームに共通することは、各関節において高精度な電流制御を行っていることである。これらのロボットアームは、製品製造における組立工程において、作業者とロボットが協働することを想定している。このようなロボットアームは、作業者に接触すると関節トルク情報を基に瞬時に動作を中断しなくてはならない。ここで、正確な関節のトルク情報が容易に取得できるということは、これらのロボットアームを用いることでインピーダンス制御などの力制御が容易に実装できることを意味する。

また、産業用ロボットメーカー各社が手先に 6 軸の力・トルクセンサを搭載することを想定した力制御モジュールや、これらを含んだロボットアームを市販している (例えば⁹⁾)。これらの力制御モジュールを用いることで、力制御を用いた嵌合、挿入位置の探索、面合わせ、ならい作業などを容易に実現することができる。力・トルクセンサ自体の低価格化と併せて、従来と比べて力制御を実装するための垣根は下がってきており、今後力制御の実用化が多くの場面で進むと考えられる。

2.3 ロボットハンド

近年、劣駆動型のロボットハンドの研究が盛んである²⁾。劣駆動ハンドを用いることで、精密な指関節の制御をすることなしに、ハンドが適応的に未知対象物の形状に合わせることで、容易にロバストな対象物の把持が実現できる。また、劣駆動ハンドの限られた自由度の中で、どの程度の操りができるかを検証する研究も行われている¹⁰⁾。また、劣駆動ハンドは予期せずハンドを環境にぶつけて

しまった場合でもハンドを破損する危険性が比較的少ないという利点も持っている。容易に対象物の安定把持が実現できる点と併せて、劣駆動ハンドもマニピュレーション研究に対する垣根を下げるために一役買っている。

2.4 ビジョンシステム

Kinect センサの登場は、マニピュレーション研究者がビジョンの研究者に頼らずとも容易に 3 次元情報を取得して視覚情報処理を行うことができるきっかけを作り、マニピュレーション研究者がビジョンを使う垣根を下げることとなった。しかしながら、実際に Kinect や、それに類似した種々の低価格な 3 次元視覚センサを使うと、位置誤差、焦点距離、深度画像が取得可能な対象物など、意外に制約が多いことに気づくのではないだろうか。一方、近年高精度にポイントクラウドを取得できる 3 次元視覚センサが登場している (例えば^{11), 12)})。今後、このような高精度な 3 次元視覚センサが容易に使えるようになることが期待されている。また、深層学習は視覚認識の分野に大きなイノベーションをもたらしており、視覚情報に基づくマニピュレーションがより高度化することが期待される。

2.5 産業用ロボットマニピュレーション

製品の製造工程のうち、特に組み立て工程や、組み立て工程への部品供給工程の自動化が期待されている。ここで、これらの工程においてロボットには物体の把持や操りに関して高度な技術が要求される。現状では、このような工程をロボット化するために、大きく分類して三つのアプローチが取り組まれている。それは、1) ロボットが全ての工程をこなすのは困難と考え、ロボットがヒトと協働するアプローチ、2) 動作教示の UI (User Interface) を工夫することにより、作業者がロボットに容易に動作を教示できるようにするアプローチ (例えば¹³⁾)、ならびに、3) 機械学習や動作計画などを用いてロボットの動作を自動的に生成するアプローチ (例えば¹⁴⁾) である。これらのアプローチを各組立工程に個別の特徴などを理解した上で用いることで、今後製品製造工程のロボット化が進むものと考えられる。

2.6 Dataset

ヒトの日常生活には膨大な数の日用品が存在する。ロボットがヒトの日常生活に入っていくために、ロボットはこの膨大な数の対象物をハンドにより掴んで操らなくてはならない。これに対処する一つの方法は、日用品の把持に関するデータベースを整備することである。近年、日用品のデータベースを整備し、このデータを基にして把持や操りを行うアプローチ (例えば¹⁵⁾) の研究が盛んである²⁾。これらの研究により、今後日用品の多種多様性を考慮した把持やマニピュレーションの研究がより一層進むものと考えられる。

2.7 競技会

近年、把持やマニピュレーション研究が盛り上がっている影響を受けて、これらの技術を実際の現場に応用することを視野に入れた競技会が多く開催されている²⁾。対象となる応用先としては、物流におけるマテリアルハンドリング¹⁶⁾や、製品の組み立て作業¹⁷⁾が想定されている。これらの競技会においては、ターゲットとなるタスクに対して実際に効果的であった手法が参加チームの間で一気に広まるという特徴を有しており、研究が行われている技術を実用化に向けて熟成させることに役立っている。

3. 未来

以上を踏まえて、今後の技術の展望について述べたいと思う。1章では、ロボットによる対象物の把持やマニピュレーションの研究は、ヒトが進化や成長の過程で獲得してきた技能を、プログラムの形で記述するプロセスであることを述べた。しかしながら、このようにヒトが年月をかけて獲得してきたものを、高々数万行程度のコードで実現することは非常に困難である。それでもなお、これを可能にするためには、言い尽くされていることかもしれないが次の三つの技術を確立していくことが重要である。それは、1) ロボットが把持する対象物や周辺環境の多種多様性を考慮する効果的な手法、2) 類似した対象物、類似した作業から類推して新たな対象物を把持したり新たな作業を遂行する手法、ならびに、3) 個々の要素技術を効果的にインテグレーションする手法である。また、本稿で紹介したロボットハンドのハードウェアの研究事例からも分かるように、個々の要素技術の完成度を高めていくことも極めて重要である。近年は、ようやくこれらの本質的な課題に対して正面から向かい合っただけの問題の解決を図る体制が整いつつあるフェーズであると考えられる。今後もマニピュレーション研究から目が離せない。

4. おわりに

本稿では、把持やマニピュレーションの研究に関して近年の動向と将来展望について述べた。ここで、ヒトが日用品を操作する場合、ヒトは難なく器用な操作を実現している。これは、研究者が苦勞してロボットによる把持やマニピュレーションを実装したとしても、研究に携わっていない人にとっては、問題の難しさが理解されにくいといった面を持っていることにも注意が必要である。マニピュレーション研究者は、研究の見せ方にも十分に工夫をする必要がある。最後に、本稿では1章においてマニピュレーションの問題を明確にするために、SLAMとの比較を行った。ここで、SLAMの研究は近年も非常に活発に行われていることを付記する。

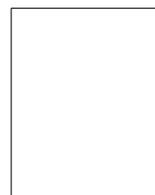
(2017年8月1日受付)

参考文献

- 1) 原田, “マニピュレーション研究—把持計画を中心とした研究動向—”, 日本ロボット学会誌, vol. 31, no. 4, pp. 320-325, 2013.
- 2) 原田, “マニピュレーションの現在と将来”, 日本ロボット学会誌, vol. 35, no. 1, pp. 2-8, 2017.
- 3) C. Devin, A. Gupta, T. Darrel, P. Abbeel, and S. Levine, “Learning Modular Neural Network Policies for Multi-Task and Multi-Robot Transfer”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2017.
- 4) S. Gu, E. Holly, T. Lillicrap, and S. Levine, “Deep Reinforcement Learning for Robotic Manipulation with Asynchronous Off-Policy Updates”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2017.
- 5) D. Guo, F. Sun, H. Liu, W.G. Birchler, A. Dollar, “A Hybrid Deep Architecture for Robotic Grasp Detection”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2017.
- 6) Universal Robots, <https://www.universal-robots.com/ja/>
- 7) Yaskawa HC10, <https://www.yaskawa.co.jp/newsrelease/product/31940>
- 8) Torobo Arm, http://robotics.tokyo/ja/products/torobo_arm/
- 9) MotoFit, <http://www.e-mechatronics.com/product/robot/related/MotoFit/feature.html>
- 10) M.G. Catalano, G. Grioli, E. Farnioli, C. Piazza, and A. Bicchi, “Adaptive Synergy for the Design and Control of the Pisa/IIT SoftHand”, *J. of Robotics Research*, vo. 33, no. 5, 2014.
- 11) 3次元メディア, <http://www.3dmedia.co.jp/catalog.html>
- 12) Photoneo, http://www.photoneo.com/product-showcase/phoxi_3d_scanners/
- 13) YuMi, <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/yumi>
- 14) K. Harada et al., “Tool Exchangeable Grasp/Assembly Planner”, *Submitted to IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, 2017.
- 15) N. Tian, M. Matl, J. Mahler, Y. Zhou, X. Yu, S. Staszak, C. Correa, S. Xheng, Q. Li, R. Zhang, and K. Goldberg, “A Cloud Robot System Accessing Learned Grasps from Dexterity Network 1.0 and Berkeley Robotics and Automation as a Service”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2017.
- 16) Amazon Robotics Challenge, <https://www.amazonrobotics.com/#/roboticschallenge>
- 17) World Robot Challenge, <http://worldrobotsummit.org/programs/challenge>

[著者紹介]

原田研介



1997年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年広島大学工学部助手。2002年産業技術総合研究所知能システム研究部門研究員。2005年から1年間Stanford大客員研究員。2013年産業技術総合研究所知能システム研究部門タスクビジョン研究グループ長。2016年大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻教授。同年産業技術総合研究所クロスアポイントメントフェロー、現在に至る。ロボットハンドによる把持・操り、ロボットの動作計画、ヒューマノイドロボットなどに関する研究に従事。博士(工学)。IEEE、日本ロボット学会、日本機械学会、システム制御情報学会の会員。