

展 望

マニピュレーションの現在と将来

Current and Future of Robotic Manipulation

原 田 研 介* *大阪大学大学院基礎工学研究科

Kensuke Harada* *Graduate School of Engineering Science, Osaka University

1. 緒 言

近年、ハンドでの対象物の把持やマニピュレーションに関する研究が世界的に非常に盛んである。筆者は2013年にロボット学会誌において「マニピュレーション研究の最前線」という特集号を企画し、その中で「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—[1]」と題した解説記事を執筆する機会を得た。この中で、筆者は2000年代前半に把持計画が一般的に広く導入されたことにより、把持計画を拡張する研究や把持計画を仮定した操り計画に関する研究が非常に盛んになり、関連したトピックで複数の国際的な研究プロジェクトが組織されたことを述べた。また、日本国内の学術講演会とIEEEの国際学会とでフォーカスが置かれる研究のトピックが大きく異なっていることを指摘した。

この特集号から約4年の歳月が経ち、幸いにも再びマニピュレーション研究に関する解説記事を執筆する機会を得た。把持やマニピュレーションの研究が重点的に行われたことにより、この4年の間に多くの進展がみられた。特に、近年のマニピュレーション研究の方向性は大まかに三つに大別することができる。この三つの方向性とは、1) マニピュレーションの知能化をより進めるアプローチ、2) 従来から構築されてきた把持やマニピュレーションの理論を再構築するアプローチ、ならびに、3) マニピュレーションの実用化を目指すアプローチである。ここで、1) は従来より一貫して盛んに研究が進められてきており、ロボットが日常生活環境や変種変量生産の製造現場などにおいて多種多様な作業を行うために、ロボットに自律性を付加することを目指している。それに対して、2) は1) の研究が盛んに行われたことで従来把持やマニピュレーションの研究を行っていた研究者が再び同分野に着目して研究分野を主導した結果であると考えられる。そして、3) についても1) の研究が盛んに行われたことで産業界がマニピュレーション

研究の実用化に向けて動き出した結果であると考えられる。本稿では、これらのすべてに言及するが、特に2)、1)の順番で解説し、3)については近年のマニピュレーションに関する競技会について述べる。また、近年はマニピュレーション研究が注目されている結果として、一般誌[2][3]や一般のニュースサイトなどにおいてもマニピュレーション研究の成果がしばしば紹介されるようになっている。以上のように、マニピュレーション研究の近年の進展は多岐にわたる。本稿で解説できる量には限界があるため、本稿では多くの事項を広く浅く解説することになっている点にご了承いただきたい。また、本稿に続く解説記事において詳細な解説が行われているトピックも多い。

なお、近年IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)などの著名な国際学会に併設されるワークショップにおいては、マニピュレーション研究に関連して非常にタイムリーなテーマを取り上げたワークショップが多い。これらのワークショップにおいては、そのテーマを主導的に進めている研究者が比較的長い時間をかけて研究の発表を行っており、筆者自身も研究を進めるうえで多いに刺激を受けたり参考にしたりしている。本解説の内容も、少なからずこれらのワークショップから題材を得ている。

さらに、製造工場が日本から外国に移転することで、国内の製造業の空洞化が指摘されて久しい。ここで、これは製造工程のうちに部品供給工程や組み立て工程が労働集約的であることに起因しており、これはロボットによるマニピュレーションに関する技術が未熟であることが招いた結果とも考えられる。そのため、筆者はこれを自分自身に対する問題としてとらえるようになっている。この問題に取り組むべく、筆者らがチームを組んで推進している人工知能・ロボットに関する研究プロジェクトについて、近年の研究の方向性を紹介する。最後に、本稿では把持やマニピュレーションの研究について、若干の将来展望を述べる。

2. 劣駆動ハンド

近年、ハンド自体が持っている自由度よりもアクチュエータの数が少ない劣駆動型のロボットハンドが注目を集めてお

原稿受付 2016年11月21日

キーワード: Robotic Manipulation, Grasping, Research, Industrial Robot

*〒560-8531 豊中市待兼山町 1-3

*Toyonaka-shi, Osaka

り、ロボットが作業を行う際に、劣駆動ハンドを使う場合が増えてきている。特に、DARPA によって組織された研究プロジェクト DARPA Autonomous Robotic Manipulation (ARM) Program [4] は 2013 年に終了した。このプロジェクトは、ロボットによって作業を行う場合を想定し、ソフトウェアを構築することで作業技能を競うもの (ARM-S)、とハンドのハードウェアを構築するもの (ARM-H) から構成された。ARM-S においては標準的に用いるハンドのハードウェアとして、Barrett Hand (図 1(a)) が採用された。また、ARM-H において iRobot 社や Yale 大学が中心となり開発したハンド [5] (図 1(b)) は 3D プリンタで容易に作成でき、かつロバストに対象物を把持できることで多に注目を集めた。そして開発されたハンドを基にして、Open Hand Project [6] としてハンドの詳細が公開されたり、Right Hand Robotics 社 [7] によりハンドの製品化が行われたりした。また、DARPA によって組織されたヒューマノイドロボットの作業性能を競うプロジェクトである DARPA Robotics Challenge (DRC) [8] においては、ヒューマノイドロボットのアームの先端に搭載するハンドとして Robotiq 社 [9] の 3 指ハンド (図 1(c)) を採用したチームが多くみられた。

ここで、これらの多指ハンドに共通する点は劣駆動であるということである。すべてのハンドは多自由度であるにもかかわらず、数個のアクチュエータによって駆動されている。また、Yale 大学らのグループによって開発されたハンドと Robotiq 社のハンドには、機構的なコンプライアン

スが備わっていることも特徴的である。これらのハンドが注目を集めた理由として、この劣駆動と機構的なコンプライアンスの組み合わせにより多種多様な対象物をロバストに把持でき、ロボットが作業を行う際に有効であることが広く認められてきたことが挙げられる。ここで、劣駆動ハンドは古くは広瀬らのソフトグリップ [10] にさかのぼることができる。しかしながら、このような劣駆動と機構的なコンプライアンスを有するハンドについては現在まで十分な解析が行われてきたとは言えず、ハンドが持つ機能についても十分に解明されていなかったと言える。

次に、議論をいったんヒトの手の機能に移してみよう。従来より、ヒトの把持形態の分類に関して多くの研究がある (例えば文献 [11] [12])。これら研究の結果より、ヒトの手は非常に多くの自由度を有しているが、ヒトが果たしてこれらすべての自由度を十分に利用してマニピュレーションを行っているのかという疑問が存在した。この問題に対して、Santello ら [13] はヒトの手の動作の主成分分析により、ヒトの手の動作は最初の 2, 3 個の主成分により説明が可能であることを示した。また、Tsoli ら [14] はテレオペレーションを行うためにヒトの手の動作の次元は二次元で十分であることを述べた。この結果は、ヒトの手は多くのアクチュエータにより駆動されているが、実際は劣駆動のような動作を示しており、上で述べた劣駆動性や機構的なコンプライアンスをロボットハンドが備えていることも自然であると考えられる。この問題に対して、Ciocarlie ら [15] は多自由度のロボットハンドにおいて把持姿勢の主成分のことを *Eigengrasps* と呼び、把持姿勢における低次元の基底空間内で把持計画を行う手法を提案した。

Bicchi らの研究グループは劣駆動ハンドに関する理論的枠組みの構築を行っている [16]~[18]。彼らの定義では把持姿勢の主成分は *Synergy* と定義され、十分なアクチュエータの数を有するハンドが制御によって *Synergy* を実現することを *Software Synergy*、対してハードウェアによって *Synergy* を実現することを *Hardware Synergy* と定義した。また、ハンドにインピーダンス制御を適用したり、ハンドに機構的な柔軟性を含めることにより、*Synergy* により定義されるハンドのコンフィグレーションを中立点としたハンドのコンプライアンスを考えることができ、これを *Soft Synergy* と定義した。更に、*Soft Synergy* を有するハンドでは、把持対象物や環境に合わせてハンドがコンフィグレーションを適応的に変えることができるが、これを *Adaptive Synergy* と定義した。彼らの研究グループでは仮定する *Synergy* の数だけアクチュエータをスタックさせる構造のハンド [17] を構築し、このハンドを用いて様々なシチュエーションにおける *Adaptive Synergy* の効果を確認した。彼らの実験ビデオは非常に印象的であり、1 入力しか持たない多指ロボットハンドが環境に指を接触させ



図 1 Some examples of underactuated hands

て *Adaptive Synergy* を使うことで、例えば本棚に並んだ本から 1 冊を取り出したりする動作が実現された。

一方、*Adaptive Synergy* で見られた環境を利用するアプローチは、別の研究の進展にもつながっている。例えば、一本の指に十分な自由度がある多指ハンドでは指と対象物との接触位置を順次変更する In-hand Manipulation により対象物の姿勢を変更することができる。それに対して、並行グリッパなどは、それ自体では対象物の姿勢を変更するのに十分な自由度を備えていない。それに対して、Chavan-Dafle ら [19] は、グリッパで把持した対象物をいったん環境に押し付けることで把持対象物の姿勢を変更する手法を提案し、このような環境などを利用した *Dexterity* を総称して *Extrinsic Dexterity* と呼んだ。これらの研究の進展を受け、ICRA 2016 で *Adaptive Synergy* や *Extrinsic Dexterity* にフォーカスを置いたワークショップとして Workshop on “Exploiting Contact and Dynamics in Manipulation” [20] が開催された。このワークショップでは、これらの研究を主導してきた研究者の多くが発表を行い、非常に盛況なワークショップであった。

3. 作業動作生成

続いて作業動作の生成に関する研究の進展について解説する。2013 年の解説記事においては、把持計画問題や把持計画を仮定した操り計画問題における研究の進展を主に紹介した。ここで、ロボットが何等かの作業を行う場合、ヒトは何等かの判断をし、与えられた作業をどのようにして行うかを大まかに計画したうえで、動作を計画していると考えられる。ここで、上位の作業計画が解けても、下位の動作シーケンスの計画ができないと、作業を実行することは不可能である。作業動作を計画する場合、一番下位レベルに位置するのが把持計画と軌道計画であり、その上位に作業計画が位置する。近年の作業動作計画の研究は、下位レベルから徐々に、下位レベルを仮定した上位レベルの計画問題や、下位レベルと上位レベルの接続に関する問題に移行している。また、作業計画にセンシングを考慮したアプローチが研究され始めたり、深層学習を用いることで作業動作を自動的に獲得しようとするアプローチが研究され始めている。ここでは、特にセンシングを考慮した作業計画の研究と深層学習を用いたアプローチについて解説する。

また、ロボットが日常生活環境や変種変量の製造現場で活動するためには、ロボットは多様な形状、表面の摩擦係数、柔らかさなどを有する対象物をハンドで把持した上で作業を行わなくてはならない。そこで、近年ハンドによる対象物の把持姿勢をデータベースに蓄える試みが行われている。本稿では、このデータベースに基づくアプローチについても解説する。

3.1 センシングを考慮した作業計画

まず、実環境で作業を実行する場合、問題となるのが対象物や環境のセンシングの問題である。特に、視覚センサにはオクルージョンがあるためロボットの作業計画はオクルージョンの影響を最小にしながら行う必要がある。POMDPs (Partially Observable Markov Decision Processes) は、局所的に観測可能な視覚センサを仮定し、マルコフ決定過程に基づいてセンシングを行いながら確率的にロボットの行動を決定するフレームワークとして注目を集めており、近年の国際学会では毎回コンスタントに数件のマニピュレータの作業計画に POMDPs を用いた研究が発表されている。ICRA 2015 に併設されたワークショップ “Beyond Geometric Constraints: Planning for Solving Complex Tasks, Reducing Uncertainty and Generating Informative Paths and Policies” においては、POMDPs の枠組みでマニピュレータの作業計画を行った研究が多く紹介された。特に、本ワークショップでは最初に MIT の Lozano-Perez が “Integrated Task and Motion Planning in Belief Space” と題した招待講演を行った [22]。Lozano-Perez は組み立て作業計画の研究を一貫して行ってきた研究者であるが、講演の中で POMDPs の技術に注目していることを述べたことは非常に印象的であった。現状で、計算量的な制約により POMDPs は非常に単純なタスクへの適用に限定されており、今後より複雑なタスクへの適用が求められている。

3.2 学習に基づくアプローチ

緻密に作業や動作の計画を行うアプローチに対して、このような緻密さを自動的に学習により獲得しようとするアプローチが研究され始めている。近年の深層学習の盛り上がりの影響を受け、ロボットによる作業動作の生成に対して深層学習を用いる研究が増えている。作業に関する動画や画像を入力として与え、End-to-end でロボットの作業動作を学習するアプローチ [24] [25] として、特に Levine ら [24] は双腕ロボット PR2 がハンドで把持した積み木を穴に入れたり、ハンドで把持したハンガーを水平な棒に引っ掛ける動作を実現している。

また、学習によるアプローチは、把持の問題を解くツールとしても導入され始めている。Lenz ら [23] は与えられた対象物の画像から、グリッパによる対象物の把持姿勢を導出する問題に深層学習を導入した。また、部品をバラ積みの状態で箱に入れ、これから一つをピックアップする問題は、製造現場における部品供給作業のロボット化に貢献するために重要な技術である。このバラ積みピッキングは現状ではピッキングの成功率が 8 割程度であり、現場合わせも必要である。容易にピッキングの成功率を上げるためにはピッキングの成否を予測する必要がある。近年、バラ積み状態の部品の画像を入力として、ピッキングの成否を予測する

学習器の構築を行うアプローチが研究されている [26] [27].

なお、深層学習に対する注目度の高さから、ロボットの作業動作の生成に対する学習によるアプローチに関して特集記事 [2] [3] が組まれている。また、ここでは表面的な解説に留まるが、詳細は後に続く尾形氏の解説記事を参照されたい。

3.3 データベースによるアプローチ

把持計画に基づいた対象物の把持では、把持計画にかかる計算時間を節約したり、把持計画が不自然な把持姿勢を出力することを避けることを目的とし、あらかじめ把持計画で導出された把持姿勢の集合をデータベースの形で保持することが一般的である。このとき、ロボットが実際に把持する場合は、データベースを探索することで把持を実現する。

ここで、ロボットに多種多様な対象物を把持できる機能を付与することを目的とし、種々の対象物のモデルに対して種々の多指ハンドのモデルを用いて計算された把持姿勢を比較的大規模なデータベースとして蓄える研究が行われている。Goldfeder ら [28] は、Columbia Database として把持姿勢の集合をデータベースとして蓄えるためのフレームワークを提案した。また、把持においてデータを利用するアプローチについて、詳細な解説記事が発表された [29]。さらに近年も、いくつかの把持に関するデータベースが提案されている。特に、カリフォルニア大学バークレー校の研究グループにより整備されている Dex-Net [30] は与えられた対象物のモデルに対して並行グリップによる把持姿勢と接触点での摩擦係数が不確定であるという仮定の下で Force Closure 把持になる確率を求めた。また、対象物の形状を CNN に基づいて分類し、これらの情報をデータベースとして蓄える手法を提案している。把持においてデータベースを用いるアプローチに関して、ICRA 2016 に併設されたワークショップである Workshop on “Grasping and Manipulation Datasets” [31] では、近年の把持に関する種々のデータベースが紹介され、非常に盛況であった。

さらに、対象物の把持や操りに関して、各研究グループから提案されている手法の特徴や、ほかのグループと比較した手法の性能を明確にする必要がある。ICRA 2015 に併設されたチュートリアルである Tutorial on “Benchmarking in Manipulation Research: The YCB Object and Model Set” においては、把持や操りの研究に用いる把持対象物を標準化しようという提案がなされた。YCB (Yale—CMU—Berkley) Object Model Set はそのような標準的な対象物のセットであり、種々の形状や大きさの対象物を含んでいる。チュートリアルの参加者には希望に応じて実際の対象物のセットが配布された。

4. 競技会の開催

近年のマニピュレーション研究の盛り上がりを受け、マニピュレーションの実用化に向けた取り組みが盛んである。特に近年顕著なのは、競技会を組織して特定の応用分野での技術を競う取り組みである。なお、競技会についての詳細については、本稿に続く岡田氏の解説記事を参照されたい。

競技会の中で最も著名なものは、Amazon 社が主催する Amazon Picking Challenge (APC) であろう。これは、物流倉庫において棚に収納された商品から指定されたものをロボットが掴んで箱の中に入れたり、箱の中に乱雑に置かれた商品を棚の指定された場所に置く技能を競うものである。ICRA 2015 に併設して第 1 回が開催され、RoboCup 2016 に併設して第 2 回が開催された。Amazon 社が扱う商品は多種多様であり、また、物流倉庫の棚には商品が詰まった状態で置かれている。しかしながら、競技会においては扱う商品の数を限定し、さらに棚の中に入っている商品の数を少なめに設定している。これらの設定の下で、第 1 回、第 2 回を通じて、正確に商品を視覚認識したうえで適切な吸着点を算出し、そこに比較的強力な吸着力を持つ吸着パッドを有したエンドエフェクタで商品を吸着するアプローチのチームが優勝している。しかしながら、例えば棚に置かれる商品が増えた場合など、手元の商品を選んで奥の商品を取ったり、平積みされた商品から一つを取ることが必要となる。よって、今後はより複雑なマニピュレーションの動作が必要となることが想定されている。

また、EuRoC (European Robotics Challenge) [33] は EU 圏内において製造産業のニーズを満たすように設計されたロボット工学に関する競技会である。この競技会は 3 分野から構成されており、そのうちの二つ (Reconfigurable Interactive Manufacturing Cell と Shop Floor Logistics and Manipulation) は把持やマニピュレーションの技能を競うものである。また、競技会自体は 3 ステージから構成されており、大学、研究機関、産業界などから 45 チームがエントリーしている。

ロボット工学に関するメジャーな競技会である RoboCup においては、RoboCup@Home [34] が家庭環境において把持やマニピュレーションの技能を競う競技会として存在していたが、2017 からは加えて RoboCup@Work [35] として製造産業におけるマニピュレーションの技能を競う競技会が開催されることが予定されている。

これら以外にも、航空機の組み立て工程の自動化に寄与することを目的として、AIRBUS Shopfloor Challenge [36] が ICRA 2016 に併設する形で開催された。2016 年の競技はアルミの板の正確な場所に穴を空けることに関するものであった。また、IEEE Robotics and Automation Society の Technical Committee (TC) の一つである TC on

Robotic Hands, Grasping and Manipulation が主催し、Robotic Grasping and Manipulation Competition [37] が IROS 2016 に併設する形で開催され、いくつかのシンプルなマニピュレーションの技能を競った。また、産業応用を目指した競技会として RockIn@Work [38] が 2014 年から開催されている。

一方、日本においても 2020 年の東京オリンピックと同じ年に World Robot Summit [39] と題されたロボット工学の競技会を開催することで準備が進んでいる。この競技は 3 分野（ものづくり、サービス、災害）から構成されており、特にものづくり分野においては競技の主眼はマニピュレーション技能になることが想定されている。

5. 産業用ロボットの知能化

前章で紹介した把持やマニピュレーションに関するロボット競技会として、産業応用をターゲットとしたものが多いことが分かる。現在、多くの産業分野において、ロボットによる自動化を妨げる大きな要因の一つが、高度なマニピュレーション技能が要求されることである。例えば、製品製造分野における製品の組み立て工程や部品の供給工程、あるいは物流分野におけるマテリアルハンドリング、食品加工分野などはその典型的な例である。工場における自動化の遅れは、工場の人件費の安い国への流出へとつながるため、マニピュレーション研究に対する産業界からの期待は大きい。実際、筆者は種々の企業との共同研究を通じて産業界のロボット研究への期待の大きさを実感してきたと同時に、現状の日本のロボットに関する学術研究が必ずしも産業界の方向を向いていないことへの失望を耳にしてきた。

2015 年より、筆者は NEDO の次世代ロボット中核技術開発プロジェクトにかかわっている。ここでは、人工知能を基盤としたロボット作業に関する研究を広く行っているが、その中心分野として産業用ロボットの知能化に関する研究がある。ここでは、部品供給工程、製品の組み立て工程、ならびに製品の発送工程をターゲットとしている。特に、変種変量生産における製品の組み立て工程をロボット化するために、ロボットは種々の対象物を把持したうえで、はめあい、加工、接合など多種多様な作業を実行しなければならない。また、ロボットによる作業動作を苦勞して教示により作ったとしても、頻繁に製造工程を変更しなくてはならないため、従来の動作の教示ではロボットを導入するメリットがでなくなる。さらに、ロボットを組み立て工程に導入する場合は、現場合わせ的な要素が多いことも問題を困難にしている。

プロジェクトでは、これらの問題を解くことを目指して研究開発を行っている。作業の多種多様性の問題に対処するためには、前章で紹介した対象物把持に関するデータベースに加えて、作業動作を解析し、このデータベースを構築す

ることが必要である [40] [41]。そのうえで、ピックアンドブレースや把持対象物の持ち替えに対しては、マニピュレーション計画の枠組みで自動的に動作を生成し [42]~[44]、マニピュレーション計画では対応が困難な複雑な作業に対しては、データベースから類似した作業に関する情報をダウンロードして、ダウンロードした情報を加工した上で適用しなくてはならない [45] [46]。また、プロジェクトでは剛体部品だけでなく、弾性変形や塑性変形を伴う対象物のマニピュレーションについても研究を行っている [47] [48]。さらに、転移学習に基づくアプローチによる対象物のマニピュレーションについても研究を行っている [25]。一方、部品の供給工程に対しては、バラ積み状態からのピッキングにおいて容易に高いピッキングの成功率を実現するために、機械学習に基づいたアプローチを確立するべく研究を行っている。さらに、対象物を把持する際には、視覚センサによってロボストに把持対象物や周辺環境を認識することが必要となる。このことを目的とし、視覚認識に関するクラウドプラットフォームを構築している [49] [50]。

6. 展 望

本章ではマニピュレーション研究の将来について言及する。基本的に、近年の把持やマニピュレーションの研究は、日常生活環境や変種変量生産の製造現場などにおいてロボットが多種多様な作業を行うために、ロボットに自律性を付加することを目的として進められている。ここで、ここ 10 年程度の研究動向より、当面は同様の方向性で研究は継続するものと考えられる。ただ、近年のマニピュレーション研究の進歩は、計算機の処理能力の向上によって処理可能な情報量が増えたことの寄与が大きいと考えられる。ここで、AI において処理可能な情報量が増えるに従い、チェス、将棋、碁と徐々に AI がプロのプレーヤーに勝つようになってきたことを考えると、このまま計算機の処理能力が向上することで、どこかの時点で上記の目標が何らかの形で達成される可能性は高いと考えている。有本 [51] は AI とロボティクスの双方の課題として常識推論 (Commonsense Inference) と日常物理学 (Everyday Physics) が知能ロボットにおける未踏課題であることを指摘している。この未踏課題が実現できるかは、ヒトが作業する環境において、ヒトが何気なく実行していることの背後にある“常識”を何等かの方法によってロボットが行動する際の知識として取り込むことができるかにかかっている。

7. 結 言

本稿では近年の把持やマニピュレーションの研究に関して解説を行った。まず、近年導入が進んでいる劣駆動ハンドに関して解説した後、近年の作業動作生成に関するいくつかのトピックについて説明を行った。さらに、近年盛ん

に開催されている、把持やマニピュレーションに関する競技会について解説し、産業用ロボットの知能化に関する話題にも言及した。ここで、本稿はなるべく広い話題を提供することを考えたが、近年のマニピュレーション研究の盛り上がりと共に解説しなければならない事項が増えたことで、本稿で解説できなかった事項も存在する。例えば、物流分野におけるマテリアルハンドリングの実用化など、把持やマニピュレーション技術の実用化に関しては、また別の機会に解説を行いたいと考えている。

最後に、筆者らは計測自動制御学会のSI部門においてロボットマニピュレーションに関する技術調査研究委員会を組織し、日本の把持やマニピュレーション研究のプレゼンスを高めるための活動を行っている。特に、委員会のメンバーとは平素よりロボットマニピュレーションに関して深い議論を交わさせていただいており、本解説記事の内容もその議論に基づいたものが多い。ここで深く謝意を述べさせていただきます。

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] 進藤，中田：“ファナック/PFN は能動学習，グーグルらはシミュレタピッキングや把持の機械学習でラベル収集が焦点”，日経ロボティクス，no.7，pp.3–5，2016.
- [3] 進藤：“ロボットの行動生成にディープラーニング CNN と強化学習で連続値ベースの運動が獲得可能に”，日経ロボティクス，no.12，pp.14–19，2016.
- [4] D. Hackett, J. Pippine, A. Watson, C. Sullivan and G. Pratt: “An Overview of the DARPA Autonomous Robotic Manipulation (ARM) Program,” 日本ロボット学会誌，vol.31，no.4，pp.3269–329，2013.
- [5] L.U. Odhner, L.P. Jentoft, M.R. Claffee, N. Corson, Y. Tenzer, R.R. Ma, M. Buehler, R. Kohout, R.D. Howe and A.M. Dollar: “A Compliant, Underactuated Hand for Robust Manipulation,” Int. J. of Robotics Research, vol.33, no.5, pp.736–752, 2014.
- [6] Open Hand Project, <https://www.eng.yale.edu/grablab/open-hand>
- [7] Righthand Robotics, <http://www.righthandrobotics.com>
- [8] Darpa Robotics Challenge, <http://www.darpa.mil/program/darpa-robotics-challenge>
- [9] Robotiq, <http://robotiq.com/>
- [10] S. Hirose and Y. Umetani: “The Development of Soft Gripper for the Versatile Robot Hand,” Mechanism and Machine Theory, vol.13, no.3, pp.351–359, 1978.
- [11] J.R. Napier: “The Prehensile Movements of the Human Hand,” J. of Bone and Joint Surgery, vol.38, pp.902–913, 1956.
- [12] M.R. Cutkosky: “On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.5, pp.902–913, 1989.
- [13] M. Santello, M. Flanders and J. Soechting: “Postural Hand Synergies for Tool Use,” J. of Neuroscience, vol.18, no.23, pp.10105–10115, 1998.
- [14] A. Tsoli and O.C. Jenkins: “2nd Subspaces for User-driven Robot Grasping,” Robotics, Science and Systems Conference: Workshop on Robot Manipulation, 2007.
- [15] M. Ciocarlie, C. Goldfeder and P.K. Allen: “Dimensionality Reduction for Hand-independent Dexterous Robotic Grasping,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems, pp.3270–3275, 2007.
- [16] A. Bicchi, M. Gabbicini and M. Santello: “Modelling Natural and artificial Hands with synergies,” Philosophical Trans. of the Royal Society B: Biological Sciences, vol.366, no.1581, pp.3153–3161, 2011.
- [17] G. Grioli, M. Catalano, E. Silvestro, S. Tono and A. Bicchi: “Adaptive synergies: an approach to the design of under-actuated robotic hands,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1251–1256, 2012.
- [18] M.G. Catalano, G. Grioli, A. Serio, E. Farnioli, C. Piazza and A. Bicchi: “Adaptive Synergies for Humanoid Robot Hand,” Proc. of IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, pp.7–14, 2012.
- [19] N. Chavan-Daffe, A. Rodrigues, R. Paolini, B. Tang, S. Srinivasa, M. Erdmann and M. Mason: “Extrinsic Dexterity: In-Hand Manipulation with External Forces,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1578–1585, 2014.
- [20] Workshop on “Exploiting Contact and Dynamics in Manipulation,” held in conjunction with ICRA 2016, <http://clem.dii.unisi.it/~malvezzi/wordpress/>, 2016.
- [21] Workshop on “Beyond Geometric Constraints: Planning for Solving Complex Tasks, Reducing Uncertainty, and Generating Informative Paths and Policies” held in conjunction with ICRA 2015, <http://people.csail.mit.edu/jingjin/ICRA15/>, 2015.
- [22] L. Kaelbling and T. Lozano-Perez: Integrated Task and Motion Planning in Belief Space, Workshop on “Beyond Geometric Constraints: Planning for Solving Complex Tasks, Reducing Uncertainty and Generating Informative Paths and Policies” held in conjunction with ICRA 2015, 2015.
- [23] I. Lenz, H. Lee and A. Saxena: “Deep Learning for Detecting Robotic Grasps,” Int. J. of Robotics Research, vol.34, no.4–5, pp.705–724, 2015.
- [24] 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, pp.156–163, 2015.
- [25] P.-C. Yang, K. Sasaki, K. Suzuki, K. Kase, S. Sugano and T. Ogata: “Repeatable Folding Task by Humanoid Robot Worker using Deep Learning,” IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L), 2017(To appear).
- [26] S. Levine, P. Pastor, A. Krizhevsky and D. Quillen: “Learning Hand-eye Coordination for Robotic Grasping with Deep Learning and Large-scale Data Collection,” Preprints of Int. Symposium on Experimental Robotics, 2016.
- [27] K. Harada, W. Wan, T. Tsuji, K. Kikuchi, K. Nagata and H. Onda: “Initial Experiments on Learning-Based Randomized Bin-Picking Allowing Finger Contact with Neighboring Objects,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Automation Science and Engineering, pp.1196–1202, 2016.
- [28] C. Goldfeder, M. Ciocarlie, H. Dang and P.K. Allen: “The Columbia Grasp Database,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3343–3349, 2009.
- [29] J. Bohg, A. Morales, T. Asfour and D. Kragic: “Data-driven Grasp Synthesis—A Survey,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.30, no.2, pp.289–309, 2014.
- [30] Dex-Net, <http://berkeleyautomation.github.io/dex-net/>
- [31] Workshop on “Grasping and Manipulation Datasets” held in conjunction with ICRA 2016, <http://rhgm.org/activities/workshopicra16/>, 2016.
- [32] Tutorial on “Benchmarking in Manipulation Research: The YCB Object and Model Set” held in conjunction with ICRA 2015, <http://ycb-benchmarks.opensourcerobots.org/>, 2015.
- [33] European Robotics Challenge (EuRoC), <http://www.euroc-project.eu/>
- [34] RoboCup@Home, <http://www.robocupathome.org/>
- [35] RoboCup@Work, <http://www.robocupatwork.org/>
- [36] AIRBUS Shopfloor Challenge, <http://www.airbusgroup.com/int/en/people-careers/Working-for-Airbus-Group/Airbus-Shop->

- floor-Challenge-2016.html
- [37] Robotic Grasping and Manipulation Competition, <http://www.rhgm.org/activities/competition.iros2016/>
- [38] RockIn@Work, <http://rockinrobotchallenge.eu/index.php>
- [39] World Robot Summit, <http://www.robotcompetition.org/japanese/index.html>
- [40] 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”, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 1B2-07, 2016.
- [41] 稲田, 辻, 諸岡, 田原, 河村, 倉爪, 原田: “複数の遠赤外線画像を用いた全周の接触領域検出と把持形態推定への応用”, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 3A3-05, 2016.
- [42] 原田, 万, 永田, 山野辺, 辻, Ramirez-Aplizar: “ツールチェンジ機能を考慮した組立作業の自動計画”, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 1B2-05, 2016.
- [43] W. Wan and K. Harada: “Developing and Comparing Single-arm and Dual-arm Regrasp,” *Robotics and Automation Letter*, vol.1, no.1, pp.243–250, 2016.
- [44] W. Wan and K. Harada: “Integrated Single-arm Assembly and Manipulation Planning using Dynamic Regrasp Graphs,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Real-time Computing and Robotics*, pp.174–179, 2016.
- [45] 花井, 原田: “タスクモデルに基づく教示データの再利用と共有のためのフレームワーク”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P1-08b4, 2016.
- [46] 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*, 2016.
- [47] 村瀬, 松原, 杉本, 田中, 山崎: “ゴムの粘弾性に着目した双腕ロボットによる輪ゴムかけ動作計画”, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 3Z2-03, 2016.
- [48] 守屋, 山崎, 竹下: “把持経験の蓄積に基づく布製品の掴み上げ能力の獲得”, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 3F1-02, 2016.
- [49] 山内, 加藤, 山下, 藤吉: “クラウドロボティクスのための画像認識エンジンの提案”, 電子情報通信学会技術報告, パターン認識・メディア理解, vol.115, no.456, pp.91–96, 2016.
- [50] 飯塚, 武井, 秋月, 橋本: “日用品認識のためのアフォーダンス特徴量の提案～物体が有する機能に着目したカテゴリレベル物体認識～”, 動的画像処理実利用化ワークショップ (DIA2016), OS 3-2, 2016.
- [51] 有本: “ロボット産業の広がりを阻む未踏の研究課題”, 日本ロボット学会誌, vol.33, no.4, pp.233–238, 2015.



原田研介 (Kensuke Harada)

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 年同研究所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を兼務, 現在に至る。ロボットハンドによる把持や操りに関する研究に従事。IEEE, 計測自動制御学会, 日本機械学会, システム制御情報学会の会員。博士 (工学)。(日本ロボット学会正会員)