

# 解説

## 実環境における実応用に向けた物体操作研究

### —物体認識・ソフトロボットハンド・チャレンジプログラムとベンチマーク—

Survey of Robotic Manipulation Studies Intending Practical Applications in Real Environments

—Object Recognition, Soft Robot Hand, Challenge Program and Benchmarking—

渡辺 哲陽<sup>\*1</sup> 山崎 公俊<sup>\*2</sup> 横小路 泰義<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup>金沢大学理工研究域 <sup>\*2</sup>信州大学学術研究院工学系 <sup>\*3</sup>神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻

Tetsuyou Watanabe<sup>\*1</sup>, Kimitoshi Yamazaki<sup>\*2</sup> and Yasuyoshi Yokokohji<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup>Institute of Science and Engineering, Kanazawa University <sup>\*2</sup>Faculty of Engineering, Shinshu University

<sup>\*3</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Kobe University

#### 1. はじめに

本解説は文献[164]の邦訳概要版である。表や図は誌面の都合上文献[164]を参照されたい。引用の際は文献[164]を引用されたい。

「マニピュレーション」は、ロボット技術の「本丸」であり、ロボットを本格的に社会実装させていくためには避けては通れないものである。手の器用さの本質を理解した上で人間の手の機能に比肩する次世代マニピュレーション技術を創成することができれば、ロボットの応用範囲が大きく広がることは間違いない。

2015年に米国で開催された DARPA Robotics Challenge (DRC) や過去の様々な DARPA challenge 同様、適切に設計されたチャレンジプログラムやベンチマークは研究を加速する。チャレンジタスクは要素技術の開発だけでなく、それらを統合して動作させるためのインテグレーション技術の重要性を再認識させる。過去のチャレンジプログラムを検証してみると、様々な要素技術の中で、実タスクを実現する上でカギとなるのが「ロボットハンド」と「物体認識」であることが分かる。

そこで本稿では、数多くのマニピュレーション技術[2]のうち、チャレンジプログラムとベンチマーク、そのカギとなる要素技術である「ロボットハンド」と「物体認識」に注目し、最新の研究動向を紹介する。なお、ロボットハンドに関しては、過去の Suvery [3]~[8]で触れられていないが、実タスク実現で重要となる柔らかさに重きを置く。

#### 2. マニピュレーションのための認識

マニピュレーションで必要とされる物体認識は、対象物が何であるかを知ることだけではない。目的が物体把持だとすれば、位置、方位、形状や、場合によっては硬さなどの情報を得る必要がある。本章では、家庭環境や製造工程における物体把持・操作の作業に焦点をあてて、3種類のセンサデータ（画像データ、距離データ、触覚データ）を対象とした認識手法を紹介する。

##### 2.1 画像データを用いた認識手法

画像データは、本質的に多くの情報を含みうる。それゆえに、ロボットにカメラを搭載し、そこから得られる画像を用いて物体認識を行う手法が多く研究されてきた。その中でも、ビンピッキングは物体認識を必要とする伝統的なタスクである。ワイヤフレームモデルや輪郭エッジなどの幾何モデルが事前に与えられ、画像から抽出したエッジとの位置合わせなどにより、物品の位置と方位を特定する[9]~[11]。最近では、Haradaら[12]のように、正確な幾何形状モデルを用いずにビンピッキングを実現する方法も提案されている。また、Domaeら[13]により、バラ積みピッキングにおける把持可能性を評価する手法が提案されている。

幾何モデルを用いたアプローチは、生活支援を目的とするマニピュレーションタスクでも採用されている[14]~[16]。ただし、2Dもしくは3Dの形状モデルを利用する方法は、簡便であるが個々の物品についてのモデルを手で定義することが手間である。また、テクスチャが豊富な物体の場合は適切な画像エッジが得にくく、位置合わせが適切に機能しない場合もある。

それを踏まえたほかのアプローチとして、画像特徴点を利用する方法がある。弁別性の高い画像の局所領域を抽出し、そこから算出した特徴表現を用いて姿勢照合などを行う。有名な特徴表現としては、SIFT [17], SURF [18], MSER [19], HOG [20]などがある。例えばSIFTは、平行移動、回転、スケールの変化の影響を受けにくいいため、雑多な環境下に任意の位置・方位で映り込んでいる物品の検

原稿受付 2018年3月8日

キーワード: Object Recognition, Soft Robot Hand, Challenge Program and Benchmarking

<sup>\*1</sup>〒920-1192 金沢市角間町

<sup>\*2</sup>〒380-8553 長野市若里4-17-1

<sup>\*3</sup>〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1

<sup>\*1</sup>Kanazawa-shi, Ishikawa

<sup>\*2</sup>Nagano-shi, Nagano

<sup>\*3</sup>Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo

出や姿勢推定に有用である[21][22]。別の利点として、3D形状を利用する場合と比べて、モデルの生成が簡便なことがある。一方で、透明物や光沢物などを対象とした場合、適切な特徴表現を得ることは難しい。

## 2.2 距離データを用いた認識手法

画像は三次元のシーンを二次元平面に投影したものであり、そこで情報の縮退が起きていることが、物体の姿勢推定を困難にしている。それゆえに、2台以上のカメラを同時に用いて三次元点群を得る方法が提案されており、マニピュレーションの課題においても多くの研究が見られる[23]~[25]。そのうちの一つとして、Sumiら[26]は、VVVとよばれる三眼カメラシステムを構築して、曲面からなる物体の姿勢認識を実現した。三次元のデータを得る方法としては、複数のカメラを使う方法のほかに、パターン投影機と単眼カメラを組み合わせる方法もある。例えば、Willow Garage社のPR2[27]は、そのようなセンサから得た三次元点群を用いて、様々な物体操作を実現した[28]。

三次元点群を用いた物体の姿勢認識の方法としては、Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズムを用いた位置合わせがよく知られている[29][30]。一方で、上述した画像特徴点と同様の考え方で、三次元の局所特徴量が提案されている。Fast Point Feature Histogram (FPFH)[28]、Normal Aligned Radial Feature (NARF)[33]。などが有名である。これらはPoint Cloud Library (PCL)[34]で利用できる。2010年にMicrosoft社のKinectが登場してからは、三次元点群を用いるアプローチが主要になり、マニピュレーションタスクにおけるロバストな物体検出や姿勢認識の手法が多く提案された。当然、カラー画像と三次元点群を併用した方法も多くある[21][22][35]。

なお、点群の位置合わせや局所特徴量のほかにも、姿勢推定を実現するアプローチがある。テンプレートマッチングに基づく方法である。具体的にはBorgeforsら[36]の手法やHuttenlocherら[37]の手法などがあり、最近でも、文献[38]や[39]に関連手法が見られる。その中でも、Hinterstoisserら[40]によって提案されたLINEMODは、大量のテンプレートマッチングを高速に実行する仕組みが含まれており、性能が高い。

## 2.3 触覚を用いた認識手法

触覚センシングは把持の質を知るための伝統的なアプローチである。また、触覚はカメラや距離センサの弱点を補える可能性がある。例えば、透明物のセンシングやオクルージョンへの対応である。本節では、触覚センシングにより物体の形や姿勢を知る手法を紹介する。

Hondaら[23]は、多指ハンドとステレオカメラからなる物体操作システムを構築した。触覚センサは指先に設置され、視覚センサでは観測できない部分の表面部位を推定するために使用された。Kovalら[41]は、操作中の物体の状態

を推定するために触覚センサを用いた。粒子フィルタによって触覚センシングの正確性を向上させた。Tanakaら[42]は、触覚に基づく物体認識の手法を提案した。アクティブタッチに基づく学習により、多数の類似形状物体の種別を実現した。同研究グループでは、物体形状を明らかにするための探索手法も提案されている[43]。Bimboら[44]は、把持された物体の姿勢を推定するために、触覚と力覚を最適化する手法を提案した。Zhangら[45]は、立体物の種別を手掛け、物体への接触位置に基づく特徴表現を提案した。

以上のように、触覚センシングは物体認識における一つの選択肢である。ただし、利用できる状況が限定的であるため、マニピュレーションにおいては視覚認識等と適切に連携させることが肝要である。

## 2.4 最近の傾向：物体検出と姿勢推定に向けた深層学習の手法

深層学習は、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) などを用いて高い精度で物体認識が可能であることから、よく知られるようになった。ただし、マニピュレーションにおける課題には、物体が何かを知るだけではなく、姿勢を知ることでもある。その方面については、深層学習の手法は発展段階にあり、現状では既存手法との組み合わせが提案されている。

特定の物体や領域を検出する方法として、顕著性マップの利用や[46] Deformable Parts Model (DPM) などがある[47][48]。さらに、selective search [49] や Regionlets [50] などの手法が次々と提案されてきている。深層学習を利用する方法としては、R-CNN [51]、Faster R-CNN [52] や YOLO がある。また、物体の姿勢認識も深層学習のターゲットになってきている。Schwarzら[53]は、CNNの転移学習を行い、物体姿勢を推定する手法を提案した。ほかにも、Amazon Picking Challenge [54] や DARPA ARM project [55] において姿勢認識に関する様々な試みを見ることができる。

## 2.5 認識の視点からのマニピュレーション学習

一般に、物体操作の自動化はロボットアームを用いて行われる。ここで重要なことは、アームの動作をいかにして定義もしくは生成するかである。これには、人手で動作列を与えたり、動作計画手法により自動生成する方法があり、認識と動作計画を明確に分けてから問題を解いている。一方で、別のアプローチとして、操作学習の手法が研究されている。センサデータとロボットの動きに深い関連を持たせることにより、プログラマ等の付加を大きく減らすことが期待できる。Sasakiら[62]は畳み込みニューラルネットワークとリカレントニューラルネットワークを組み合わせる物体操作を実現した。また、Levineら[63]はVisuomotorとよばれる枠組みを提案し、センサデータと関節の動きを直接関連付けた学習を行った。

深層学習によるマニピュレーションの自動化は、まさに現在進行形である。最近では、強化学習との連携も注目されている。例えば、上述の Visiomotor では、shared autonomy [64] が組み込まれている。知能ロボティクスにおける Shared Autonomy は、人間とロボットで役割を分担する枠組みである。すなわち、人間が作業目的を伝えて大まかな指示を出せば、細かな部分はロボット側で補完する。その実現のためには、ロボット側に高次のセンサ情報処理能力と、センサ情報から適切な動きを生成する能力を与える必要がある。特に深層学習を用いた手法では、二者の境界を明確にせずとも複雑な作業を達成できる可能性があり、今後の発展が期待できる。

### 3. ロボットハンドにおける柔らかさ

物体認識の後に続くプロセスがハンドリングであり、ロボットハンドはその核となる。これまで数多くのロボットハンドが開発されている [7] [70]~[75] (文献 [164] 表 1 参照)。身近な道具や物体が人の手に最適化されていることから、実環境での器用さと汎用性を獲得しようと、人の手形状に近い多指ロボットハンドの開発が盛んに行われてきた [7] [71]~[75] (文献 [164] 表 1 (a) 参照)。人の手の重要な特徴として拇指対抗があげられる。そこで、Shadow Hand, DLR Hand, Hand HIRO, Gifu Hand, D-Hand, Festo Hand など拇指対抗が可能なロボットハンドが開発されている。バレットハンド, Robotiq グリッパ, Festo Multi-ChoiceGripper などは 3 本指であるが拇指対抗性をもつ。物体把持計画でよく用いられる物体把持条件として Force closure という概念があり、任意方向から加わる外レンチをバランスして把持物体の動きを静止できる状態と定義される [76]。Force closure の実現には 3 点以上の摩擦有り接触点が必要であるため、3 本指以上のハンドが多い。

人の手に似せたロボットハンドを用いることで、把持計画や操作計画をスムーズにできるのではないかと考えられてきた。外見は近いものの、構成している材料、メカニズム、構造はまったく異なる。このため、人に対して適用できる方法論をそのまま多指ロボットハンドへと適用することは難しい。結果として、得られた把持や操作の器用さは人のものに遠く及ばなかった。器用さを得るためには別の観点が必要と認識されるに至っている。事態を開拓するものとして考えられたのが柔らかさである。柔らかさがあれば、接触時の衝撃吸収、人と物体との間の安全なインタラクション、物体形状へのなじみなどの機能が得られる。このため、精密位置決めや正確な物体認識が不要で、認識誤差などの不確実性を吸収しながら物体をハンドリングできる。結果、多様な物体の把持が可能となる。

ロボットハンドに関する総説は数多くあるため [3]~[8]、本稿では、柔らかさに注目して近年の研究動向について紹

介する。柔らかさは、表面における柔らかさと関節部における柔らかさに大別できる。

#### 3.1 関節部における柔らかさ (文献 [164] 表 1 (b) 参照)

リンク部分が硬くても、バネなどを関節部に組み込むと、物との接触により関節が受動的に曲がる。この受動要素のお蔭で、物体形状になじんだ形態でのハンドリングが可能となる [88] [89] [101]。最近では、ベルト形状の弾性物質で関節部を構成することが試みられている [80] [81] [83]~[87] [90] [103]。ベルト形状の場合、曲げ方向以外にも、量は少ないが曲がるうえ、ひねることも可能である。このため、物体形状への適応能力がより高い。受動関節の駆動には、ケーブルやワイヤーで構成される腱駆動システムが用いられる [80] [81] [83]~[86] [88]~[90] [101] [103]~[106]。けん引方向を自由に变化させることができることから、構成方法は多様で、数々の構造が開発されている。この構造を活用した i-HY hand [87] では 22 [kg] の物体を保持することに成功している。リンクメカニズムでも受動関節を構成できる (uGripp [78])。根元部のリンク腹で物体と接触すると、その反力によって先端部リンクが曲がり、物体を包み込むように把持できる。空気圧アクチュエータも受動関節を構成できる [79] [97]~[99] [107]~[109]。

#### 3.2 皮膚表面における柔らかさ (文献 [164] 表 1 (c) 参照)

Shimoga と Goldenberg により、接触皮膚部の柔らかさの重要性が指摘されて以来 [110]、ソフトフィンガーというカテゴリーにて、摩擦モデル [111]~[121]、制御方法 [122] [123] など様々な研究がなされている。

接触皮膚部の柔らかさは、物体形状へのなじみ能力にはプラスにはたらくが、把持できる物体重量は低下する [120] [121]。この欠点は、対象物体へのなじみの後で、柔らかい部分を硬くすることで、解決することができる。磁性体を使う方法 [91] [124]、温度制御による方法 [92]、柔らかい層の内側に硬い層を設ける二層構造を使う方法 [118] [125]~[129] などがあげられる。二層構造は人の指の構造を模したもので、軟らかい表面でなじみ特性を、内側の硬い層で大きな把持力を提供することができる。空気を含んだ袋で皮膚部を構成し、内部の空気圧力を変化させる方法もよく用いられている [93] [94] [109] [130]。袋に粒体 (粉体よりサイズの大きい豆などの粒状物体の集まり) を入れ、空気を抜くと硬くなるジャミング転移現象は、物体形状になじみながら高い把持力を与えることができるため、多様な物体を把持するのに有効でよく用いられている [77] [95] [131] [132]。

#### 3.3 複合タイプ (文献 [164] 表 1 (d) 参照)

前述のように、ロボットハンドに柔らかさを導入する最も簡単な方法の一つが空気圧アクチュエータの活用である。このため、空気を活用して皮膚と関節両方に柔らか

さを持たせたロボットハンドが最近着目されている [96]～[99] [108] [109]. 両方の柔らかさの利点を活用できる一方で、皮膚の柔らかさをもつロボットハンドと同様に、空気圧だけで大きな把持力を発生することは難しい。硬い部位と柔らかい部位を両方合わせもつ構造にすることが一つの解決策である [118] [125]～[129]. 柔らかい皮膚表面に加え、動きを固定するような機構の導入も有効である。西村ら [100] は、ラチェット機構を柔らかい受動関節部に組み込むことで、受動関節の剛性を高め、皮膚と関節両方に柔らかさを持たせながら、大きな把持力を発生することに成功している。前述のジャミングを活かしたロボットハンドも該当する。

### 3.4 ソフトロボットハンドの機能

最大の特徴は物体形状へのなじみ能力にある。柔らかい皮膚・関節が物体形状に応じて変形する。結果として接触面付近の形状認識誤差や位置決め誤差などを吸収するため、平易な制御や計画であっても物体を安定把持できる。物体形状へのなじみ能力が高ければ、接触面積は広くなり、凹部での接触が容易になる。大きな摩擦を得ることとなり、小さな接触力で物体を把持できる。つまり、壊れやすい物体であっても把持できる（文献 [164] 表 1 (c), (d)）。

接触時の衝撃吸収と人と物体との間の安全なインタラクションも特徴の一つである。柔らかい皮膚の場合、どのくらい接触衝撃が緩和されるのか、Kim らのグループによって調査され、衝撃時やピークの力が劇的に減少することや、高いダンピング効果があることが示されている [93]。しかしながら、皮膚が変形しやすいことは、剛性の低下を意味するため、把持可能な重量は小さくなる（文献 [164] 表 1 (c), (d) 参照）。いくつか打開策が提案されている。文献 [94] では、硬い指の先端に空気圧で膨らんだゴムポケットを配置することで、31 [kg] の重量物把持に成功している。文献 [100] では、ラチェット機構を活用して関節を固定することで重量物の把持に成功している。ジャミング転移現象を活用すれば、粒体同士が硬く圧縮されるため、高把持力が得られるが、逆に小さな力で把持することはできず、壊れやすい物体把持には向かない [77] [95] [131] [132]。これを打開しようと、空気圧で駆動する指とジャミング転移現象を組み合わせる試みもなされている [133]。

受動関節と硬いリンクで構成する場合、把持できる重量は大きくなる利点をもつが、なじみ能力は柔らかい皮膚ほど高くないため、壊れやすい物体の把持には向かない。実現できない訳ではなく、硬いリンクの長さを短くして、なじみ能力を向上させ、壊れやすい物体の把持に成功している例もある [80]～[82] [102]。

ソフトロボットハンドのもう一つの特徴はアクチュエータ数の少なさである。柔らかさは変形のしやすさにつながっており、対象物形状になじむ動作を自動で生成することができる。結果として少数のアクチュエータで多様な物体把

持形態を実現できる。低価格にもつながる。

### 3.5 ソフトロボットハンドのためのセンサ技術

ソフトロボットハンドの変形のしやすさやフレキシビリティは状態推定を困難にする。特に皮膚表面が変形する場合、エンコーダなどの従来の内界センサからの情報だけでは十分な情報を得ることができない。Morrow らは eGaIn 流体 [135] を活用したソフトセンサを用いて変形しやすい指の姿勢を推定する方法を提案している。Homberg らは resistive flex センサを使って曲げ量を推定している [98]。Zhao は光電子センサを用いて、指の動きを推定している [136]。変形・伸縮する指の姿勢を内界センサで推定するのは大変困難であり、カメラなどの外界センサの活用が有効である。

触覚情報を得る方法も多岐に渡る。よく使われるのが、指内部に配備した流体の圧力から情報を得る方法である [93] [94] [99] [108] [118] [125]～[129]。マイクロ力センサを皮膚表面に複数とりつける方法もある [87] [137]～[139]。フレキシブルな光ファイバは曲がっても低ノイズで情報転送できるため、光学に基づく方法も有効である [140]～[144]。

### 3.6 ソフトロボットハンドへの期待

ソフトロボットハンドの構成方法は多種多様であり、未だ確立されたとは言えない。

柔らかい皮膚を構成するのによく使われるのが空気であり、圧縮性ゆえ接触圧力を一定に制御できる。油や水などの流体の場合、非圧縮性ゆえ、接触初めは低圧で押し込むほど高圧になる特性がある。どの流体を使っても接触圧力分布は一樣になるため、壊れやすい物体の把持に適している。破壊が力ではなく応力や圧力の領域の問題であることから、壊れやすい物体の把持では接触圧力の制御が重要となる [118] [125]。粉体は、流体より硬いが、物体形状への高いなじみ能力が期待できる。ジャミング転移現象の活用も可能である [133]。どの材料がよいかは用途次第であるが、まだまだ未開発・調査の部分も多く、今後の研究が待たれる。

柔らかさは物体把持を容易にする一方で操作を難しくする。物体情報における不確実性を吸収するということは、物体に関する精密な情報が得られないことを意味する。したがって、動作計画は不確実性を含んだ状態で行わなければならない。解決策の一つが Deep Learning の活用 [145] であるが、得られた結果は少なく、今後の発展が望まれる。

爪は固い部分が少ないソフトロボットハンドにとって有効な部位である。把持力向上やすくい機能付与などいろいろな場面に有効と言える [87] [100]。

生物は一般に柔らかい部位を持ち、それを上手く物体操作や動作生成に役立てている。このため、生物模倣（生物規範）はソフトロボットハンドによって重要と言える。flip-and-pinch 動作はテーブルの上の薄い対象物を持ち上げるのに有効である [146]。前述の軟・硬二層構造 [118] [125]～[129] は人の皮膚・骨構造の模倣であり、Festo の Fin grip-

per は魚の尾びれを模倣したものである。生物の動作や構造にはロボットのための新しいアプローチ法が数多く隠されているため、模倣（生物規範）に基づくソフトロボットハンドの開発は今後も大いに発展していくと考えられる。

#### 4. 物体操作用ベンチマークとチャレンジプログラム

##### 4.1 ベンチマークタスク

1984年にCollinsらが、組立作業用のロボットプログラミングを比較するために、Cranfieldベンチマークを提案している[147]。ロボットプログラミング評価用ではあるが、1) コンパクトさと移植性、2) ピッキング、設置、挿入の基本組立作業を含む、3) ユニバーサル（大半の組み立てロボットで実現できる）、といった点を考えた設計となっている。最近では、Yale大、CMU、カリフォルニア大バークレー校の研究者が共同で提案したYCB Object and Model Set [148]がある。対象物選定では、形状、透明性を含めたテクスチャ、フレキシビリティといった特徴の多様性だけでなく、適用しやすさ、永続性、移植性などが考慮されている。リハビリテーション分野のベンチマーク用対象物も採用されている。対象物の多様性だけでなく、選定した対象物を使ったベンチマークまで提案しているところにYCBのユニークさがある。YCB対象物は、食物、キッチン用品、工具、形状調査用アイテム、タスク用アイテムに分けられる。ありとあらゆる多様性よりむしろ、ベンチマークとして選定したタスクに必要な対象物を選定している印象がある。例として示されているベンチマークの多くは、操作システムの全体評価用というより、特定の機能の評価用という印象がある。実際、Backusら[149]は彼らが開発したロボットハンドの把持機能をYCB対象物を使って行っている。遠隔操作のベンチマークとして横小路らに使われていた[150]、LEGOブロックが採用されている点も興味深い。

NIST (The National Institute of Standards and Technology) のFalcoらは、ロボットハンドの性能を評価するためのベンチマークの設計指針を示している[151]。評価用ベンチマークは構成要素レベル、システムレベル、機能レベルの三つのレベルから構成されている。

##### 4.2 チャレンジプログラム

物流自動化のボトルネックとなっていたピッキングの自動化を目的に、ピッキングに関するロボット競技会であるAmazon Picking Challenge (APC) がICRA 2015の会場にて開催された[54]。

実際よりも単純化された環境下ではあったが、様々な種類の形状や見た目の対象アイテムをオクルージョンありで認識すること、変形、壊れやすさ、大重量などを考慮したハンドリングが求められた。最先端の技術を駆使・開発することが必要で、十分チャレンジングな課題であった。

2回めのAPCでは、対象アイテムが追加され、難易度

が上がった。トートから対象アイテムをピックして棚に収納するストーイングタスクが新しく追加されている。

2017年の3回目以降、APCはAmazon Robotics Challenge (ARC) とその名称を変え、ピッキングにフォーカスをあてることを止めた。ピッキングとストーイングを行う競技であることは変わらないものの、棚を含む物流システム全体を設計することが許されるようになった。よりシステムインテグレーションがより求められるような方向性へとシフトしたと言える。ただし、物体操作という観点から言えば、複雑な操作は必要としないため、タスク自体はシンプルのままにとどまっている。

マニピュレーションに関するチャレンジプログラムとしてDARPAのARMプロジェクトがあり[55]、ARM-SとARM-Hからなる。ARM-Sでは、カメラヘッド、双腕、ハンドからなるロボットプラットフォームが提供され、そのプラットフォーム上で動くソフトウェア開発が競われた。フェーズ1では、同じプラットフォーム上で様々な物体把持・操作を実施することが課された。フェーズ2に進んだトップ3チームはそこで、双腕を用いたより複雑な作業を行うことが求められた。異なるソフトウェアを比較・ベンチマークするために同じプラットフォームを使うことは重要であるが、その一方で、各ソフトウェアに適切なハードウェアプラットフォームを用意することもまた重要である。異なるハードウェアに簡単に移植できるようにソフトウェアの移植性を高める試みも必要であろう。

これに対し、ARM-Hは、将来の実用化を見据えたローコストで堅牢な多指ロボットハンドを開発するプロジェクトであった。3チームが参加し、ARM-Sとほぼ同様な物体把持・操作を実施することが課された。開発したハンドを遠隔操作することで、ハードウェアの性能のみを評価する枠組みとなっていた。実用化を目的の一つと見据えたこともあって、参加チームの一つであるRighthand roboticsにより開発されたReFlex Hand [152] が実用化されている。

RoboCupでは、2012年から工場での組立作業に必要なマニピュレーション作業を含む競技としてRoboCup@Work [153] が開催されている。競技会は、“Basic Manipulation Test (BMT)”を含む“Test”とよばれる基礎要素を含むタスクと“Technical Challenges”とよばれる高度マニピュレーション技術が必要な応用重視のタスクで構成されていた。各チームは1台以上のマニピュレータを搭載した1台以上の移動ロボットを用意していた。

操作対象物には、様々なサイズや色のアルミフレーム、ねじ、ナット、ベアリングが含まれていた。BMTでは、様々な色や形状をもつ物体の把持、回転、設置といった操作技能を競っていた。物体設置の際、ロボットを移動制御する必要があったが、設置自体はシンプルなものであった。一方、“Precision Placement Task (PPT)”では、把持した物体

を、形状に応じて作られた空洞に置く作業が課され、より高度な物体認識・操作技術が求められていた。

2017 年から、RoboCup@Work 2017 には三つのテクニカルチャレンジが用意され、このうち、物体把持・操作にかかわるのは“Basic Assembly Test (BAT)”であった。BAT の例としては、タイヤをモデル車の軸に取り付ける作業などがあげられる。しかし、把持・操作という観点からは未だ基本的な技術しか求められていないように感じた。移動プラットフォームに搭載の、マニピュレータの制御手法開発に主眼が置かれていた。固定された世界座標系を使えないというチャレンジングな課題であった。

EU では、EuRoC (European Robotics Challenge) とよばれるチャレンジプログラムが開始されている [154]。Challenge 1: Reconfigurable Interactive manufacturing Cell, Challenge 2: Shop Floor Logistics and Manipulation, Challenge 3: Plant Inspection and Servicing の三つの課題から構成されている。物体把持・操作に関連する課題は、このうち、Challenge 1 と Challenge 2 である。産業界と学術界のコラボレーションを促進するため、研究チーム、エンドユーザ、技術開発者、システムインテグレータでチームを構成することを募集段階から要求した点が特徴的である。チャレンジチームは資格審査、リアリスティックな研究ステージ、フィールドテストステージなどのいくつかのステップをクリアしなければならず、限られたチームのみが次のステージに進めるという仕組みになっていた。タスク自体もユニークで、リアリスティックな研究ステージでは、主催者が策定したベンチマークテストだけでなく、ユーザ事例に基づいて自由に設計したタスクを実施することを求められた。フィールドテストステージでは、エンドユーザの実環境にてパイロット実験を実施することが求められた。

EuRoC に加えて EU における組立作業に関連のあるほかのチャレンジプログラムとして、ICRA2016 で開催された Airbus Shopfloor Challenge [155] や RoCKIn@Work [156]~[158] がある。Airbus Shopfloor Challenge では、飛行機の胴体の一部を模擬したパネルに、できる限り正確にかつ早くドリルで穴を開けることが課せられていたが、物体把持・操作にかかわる要素は少なかった。

RoCKIn@Work は FP7 (7th Framework Programme, European Commission) と RoCKIn@Home により設立された RoCKIn project により設定された競技会である。RoCKIn project の目的は、再生産性と再現性を確かめるためのベンチマーク用競技会の設計である。機能性評価と要素技術・システムインテグレーション評価用ベンチマークの両方を含んだデザインになっている点が特徴的である。

RoCKIn プロジェクトは 2015 年に終了したが、EU の Horizon2020 によって設立された European RoboticsLeague (ERL) により継承されている。後継となっている

のが ERL Industrial Robots (ERL-IR) である。RoCKIn project で得られた成果や見識は、RoboCup@Work や RoboCup@Home でも活かされている。

IROS2016 では、hand-in-hand grasping, fully autonomous, simulation の三つのトラックで構成された IROS Robotic Grasping and Manipulation Competition (RGMC) [160] が行われた。トラック 1 (hand-in-hand grasping) は Stage 1: Pick-and-place と Stage 2: Manipulation で構成されていた。Stage 1 では、ペットボトルや菓子袋など計 10 個の対象物をショッピング籠からピックアップし、指定場所へ置く作業が課された。Stage 2 では、スプーンを使って豆をすくう、タオルをラックにかけるなど計 10 種類の操作を実施する作業が課された。トラック 2 (fully autonomous) のタスク内容はトラック 1 とまったく同じであるが、タスクをロボットで自律的に行わなければならない点が異なった。トラック 3 はシミュレーション環境下での競技会であった。トラック 1 では、ロボットの知識を持たないスタッフにより、開発ハンドを手動操作することでタスクを実施しており、開発したハードウェアの性能のみを評価する枠組みとなっていた。開発ハンドを動作させるためのロボットアームを持ち込む必要がなく、参加チームの負担を軽減していた。

使用された対象物と課せられたタスクは主に日常生活から選定されたものであり、主にサービスロボットに主眼が置かれていた印象であった。しかし、第 2 回 IROS Robotic Grasping and Manipulation Competition [161] では、Service Robot Track と Manufacturing Track の二つのトラックで構成されるということになっており、その対象が拡張されている。ただし、hand-in-hand grasping と simulation は廃止された。

日本における動向として、日本政府が 2015 年にとりまとめた「ロボット新戦略」に基づき、ロボットの研究開発や社会実装を加速することを目的に 2020 年に開催予定の World Robot Challenge (WRC) が挙げられる。ものづくり、サービス、インフラ・災害対応、ジュニアの四つのカテゴリから構成されている。

以上のように、物体把持や操作に関連するロボットチャレンジは数多くあるが、製品組立などで要求される高度な把持・操作は求められていない。おそらく、第 2 回 IROS Robotic Grasping and Manipulation Competition の Manufacturing Track がそのような高度な把持やマニピュレーションを要求する初めての試みとなるであろう。Manufacturing Track のタスクの一つであるギアユニット組立は、WRC のものづくりカテゴリのトライアルタスクとしても位置づけられており、ほかに類を見ないユニークなロボット競技種目となり得ると考えている。

## 5. Conclusion

人に比肩する器用な操作を実現するための次世代技術確立を目指し、本稿では、下記の物体認識、ソフトロボットハンド、チャレンジプログラムとベンチマークに関する最新動向を紹介した。

謝 辞 本成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の結果得られたものです。ここに感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] M. Mori and F. Yamashita: “Mechanical Fingers as Control Organ and Its Fundamental Analyses,” Preprints of Joint Automatic Control Conf., USA, pp.106–113, 1964.
- [ 2 ] C. Smith, et al.: “Dual arm manipulation—A survey,” Robot. and Autonomous Syst., vol.60, no.10, pp.1340–1353, 2012.
- [ 3 ] R.A. Grupen, et al.: “A Survey of General-Purpose Manipulation,” Int. J. of Robot. Res., vol.8, no.1, pp.38–62, 1989.
- [ 4 ] J. Pertin-Trocqz: “Grasping: A State of the Art,” The robotics review 1, pp.71–98, 1989.
- [ 5 ] J. Pons, et al.: “Multifingered dextrous robotics hand design and control: a review,” Robotica, vol.17, no.6, pp.661–674, 1999.
- [ 6 ] A. Bicchi: “Hands for dexterous manipulation and robust grasping: a difficult road toward simplicity,” IEEE Trans. on Robot. and Autom., vol.16, no.6, pp.652–662, 2000.
- [ 7 ] M. Controzzi, C. Cipriani and M.C. Carrozza: Design of Artificial Hands: A Review. pp.219–246, Springer, 2014.
- [ 8 ] K. Tai, et al.: “State of the Art Robotic Grippers and Applications,” Robotics, vol.5, no.2, p.11, 2016.
- [ 9 ] K. Ikeuchi: “A Vision System for Bin-picking Tasks Guided by an Interpretation Tree from a CAD Model,” Proc. of Int. Symp. for Science on Form, pp.265–272, 1986.
- [ 10 ] K. Rahardja and A. Kosaka: “Vision-based bin-picking: Recognition and localization of multiple complex objects using simple visual cues,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Intell. Robots and Syst., vol.3, pp.1448–1457, 1996.
- [ 11 ] M. Liu, et al.: “Fast object localization and pose estimation in heavy clutter for robotic bin picking,” Int. J. of Robot. Res., vol.31, no.8, pp.951–973, 2012.
- [ 12 ] K. Harada, et al.: “Probabilistic approach for object bin picking approximated by cylinders,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom., pp.3742–3747, 2013.
- [ 13 ] Y. Domae, et al.: “Fast Grasability Evaluation on Single Depth Maps for Bin Picking with General Grippers,” Proc. of IEEE Conf. on Robot. and Autom., pp.1997–2004, 2014.
- [ 14 ] K. Okada, et al.: “Multi-cue 3D Object Recognition in Knowledge-based Vision-guided Humanoid Robot Syst.,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst., pp.1505–1506, 2007.
- [ 15 ] L. Petersson, et al.: “Syst. integration for real-world manipulation tasks,” Proc. of Int. Conf. on Robot. and Autom., vol.3, pp.2500–2505, 2002.
- [ 16 ] K. Yamazaki, et al.: “Home Assistant Robot for an Aging Society,” Proc. of IEEE, vol.100, no.8, pp.2429–2441, 2012.
- [ 17 ] D.G. Lowe: “Distinctive image features from scale-invariant keypoints,” Int. J. of Computer Vision, vol.60, no.2, pp.91–110, 2004.
- [ 18 ] H. Bay, et al.: “SURF: Speeded Up Robust Features,” Computer Vision and Image Understanding, vol.110, no.3, pp.346–359, 2008.
- [ 19 ] J. Matas, et al.: “Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions,” Proc. of British Machine Vision Conf., pp.384–396, 2002.
- [ 20 ] N. Dalal and B. Triggs: “Histograms of oriented gradients for human detection,” Proc. of CVPR, vol.1, pp.886–893, 2006.
- [ 21 ] J. Kuehnle, et al.: “6D object localization and obstacle detection for collision-free manipulation with a mobile service robot,” Proc. of Int. Conf. on Adv. Robot., pp.22–26, 2009.
- [ 22 ] S. Lee, et al.: “Toward Human-Like Real-Time Manipulation: From Perception to Motion Planning,” Adv. Robot., vol.22, no.9, pp.983–1005, 2008.
- [ 23 ] K. Honda, et al.: “Real-time pose estimation of an object manipulated by multi-fingered hand using 3D stereo vision and tactile sensing,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robots and Syst., pp.1814–1819, 1998.
- [ 24 ] P. Azad, et al.: “Stereo-Based vs. Monocular 6-DoF Pose Estimation Using Point Features: A Quantitative Comparison,” Autonom. Mobile Syst., pp.41–48, 2009.
- [ 25 ] U. Klank, et al.: “Real-time CAD Model Matching for Mobile Manipulation and Grasping,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Humanoids Robots, pp.290–296, 2009.
- [ 26 ] Y. Sumi, et al.: “3D object recognition in cluttered environments by segment-based stereo vision,” Int. J. of Computer Vision, vol.46, no.1, pp.5–23, 2002.
- [ 27 ] J. Bohren, et al.: “Towards Autonomous Robotic Butlers: Lessons Learned with the PR2,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom., pp.5568–5575, 2011.
- [ 28 ] R.B. Rusu, et al.: “Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D registration,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom., pp.3212–3217, 2009.
- [ 29 ] M. Krainin, et al.: “Manipulator and object tracking for in-hand 3D object modeling,” Int. J. of Robot. Res., vol.30, no.11, pp.1311–1327, 2011.
- [ 30 ] C. Papazov, et al.: “Rigid 3D Geometry Matching for Grasping of Known Objects in Cluttered Scenes,” Int. J. of Robot. Res., vol.31, no.4, pp.538–553, 2012.
- [ 31 ] A. Johnson and M. Hebert: “Surface Matching for Object Recognition in Complex Three-Dimensional Scenes,” Image and Vision Computing, vol.16, pp.635–651, 1998.
- [ 32 ] R.B. Rusu, et al.: “Persistent Point Feature Histograms for 3D Point Clouds,” Proc. of Int. Conf. on Intell. Autonomous Syst., pp.119–129, 2008.
- [ 33 ] B. Steder, et al.: “NARF: 3D Range Image Features for Object Recognition,” Proc. of Int. Conf. on Robot. and Autom., pp.2601–2608, 2011.
- [ 34 ] R.B. Rusu, et al.: “3D is here: Point Cloud Library (PCL),” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom., pp.1–4, 2011.
- [ 35 ] K. Kitahama, et al.: “Vision-based scene representation for 3D interaction of service robots,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst., pp.4756–4761, 2006.
- [ 36 ] G. Borgefors: “Hierarchical Chamfer Matching: A Parametric Edge Matching Algorithm,” IEEE Trans. on Pattern Anal. and Mach. Intell., vol.10, no.6, pp.849–865, 1988.
- [ 37 ] D. Huttenlocher, et al.: “Comparing Images Using the Hausdorff Distance,” IEEE Trans. on Pattern Anal. and Mach. Intell., vol.15, no.9, pp.850–863, 1993.
- [ 38 ] M. Muja, et al.: “Rein—a Fast, Robust, Scalable Recognition Infrastructure,” Proc. of Int. Conf. on Robot. and Autom., pp.2939–2946, 2011.
- [ 39 ] S. Hinterstoisser, et al.: “Multimodal templates for real-time detection of texture-less objects in heavily cluttered scenes,” IEEE Int. Conf. on Computer Vision pp.858–865, 2011.
- [ 40 ] S. Hinterstoisser, et al.: “Gradient Response Maps for Real-Time Detection of Texture-Less Objects,” IEEE Trans. on Pattern Anal. and Mach. Intell., vol.34, no.5, pp.876–888, 2012.
- [ 41 ] M.C. Koval, et al.: “Pose estimation for contact manipulation with manifold particle filters,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst., pp.4541–4548, 2013.
- [ 42 ] D. Tanaka, et al.: “Object Manifold Learning with Action Fea-



- tures for Active Tactile Object Recognition,” *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst.*, pp.608–614, 2014.
- [43] T. Matsubara, et al.: “Active touch point selection with travel cost in tactile exploration for fast shape estimation of unknown objects,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Adv. Intell. Mechatronics*, pp.1115–1120, 2016.
- [44] J. Bimbo, et al.: “Global Estimation of an Object’s Pose Using Tactile Sensing,” *Adv. Robot.*, vol.29, no.5, pp.363–374, 2015.
- [45] M.M. Zhang, et al.: “A triangle histogram for object classification by tactile sensing,” *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst.*, pp.4931–4938, 2016.
- [46] N. Courty, et al.: “Visual perception based on salient features,” *Proc. of IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intell. Robots and Syst.*, pp.1024–1029, 2003.
- [47] P.F. Felzenszwalb, et al.: “Object Detection with Discriminatively Trained Part-Based Models,” *IEEE Trans. on Pattern Anal. and Mach. Intell.*, vol.32, no.9, pp.1627–1645, 2010.
- [48] X. Ren, et al.: “Histograms of Sparse Codes for Object Detection,” *Proc. of the 2013 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.3246–3253, 2013.
- [49] J.R.R. Uijlings, et al.: “Selective Search for Object Recognition,” *Int. J. of Computer Vision*, vol.104, no.2, pp.154–171, 2013.
- [50] X. Wang, et al.: “Regionlets for Generic Object Detection,” *IEEE Trans. on Pattern and Machine Intelligence*, vol.37, no.10, pp.2071–2084, 2015.
- [51] R. Girshick, et al.: “Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation,” *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.580–587, 2014.
- [52] S. Ren, et al.: “Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks,” *Proc. of Neural Information Processing Syst.*, pp.91–99, 2015.
- [53] M. Schwarz, et al.: “RGB-D Object Recognition and Pose Estimation based on Pre-trained Convolutional Neural Network Features,” *Proc. of Int’l Conf. on Robot. and Autom.*, pp.1329–1335, 2015.
- [54] Amazon Robotics Challenge, <https://www.amazonrobotics.com/#/roboticschallenge>. Accessed Apr. 2, 2017.
- [55] D. Hackett, et al.: “An Overview of the DARPA Autonomous Robotic Manipulation (ARM) Program,” *J. of the Robot. Society of Japan*, vol.31, no.4, pp.326–329, 2013.
- [56] Y. Kuniyoshi, et al.: “Learning by Watching: Extracting Reusable Task Knowledge from Visual Observation of Human Performance,” *IEEE Trans. on Robot. and Autom.*, vol.10, no.6, pp.799–822, 1994.
- [57] R. Zollner, et al.: “Programming by demonstration: dual-arm manipulation tasks for humanoid robots,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Intell. Robots and Syst.*, pp.479–484, 2004.
- [58] K Hsiao, et al.: “Imitation learning of whole-body grasps,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Intell. Robots and Syst.*, pp.5657–5662, 2006.
- [59] A. Saxena, et al.: “Robotic grasping of novel objects,” *Proc. of Neural Information Processing Syst.*, pp.1209–1216, 2006.
- [60] V.N. Vapnik: *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer-Verlag, 1995.
- [61] I. Lenz, et al.: “Deep learning for detecting robotic grasps,” *Int. J. Robot. Res.*, vol.34, no.4-5, pp.705–724, 2013.
- [62] K. Sasaki, et al.: “Neural Network based Model for Visual-motor Integration Learning of Robot’s Drawing Behavior: Association of a Drawing Motion from a Drawn Image,” *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst.*, pp.2736–2741, 2015.
- [63] S. Levine, et al.: “End-to-End Training of Deep Visuomotor Policies,” *J. of Machine Learning Res.*, vol.17, no.1, pp.1334–1373, 2016.
- [64] B. Pitzer, et al.: “Towards perceptual shared autonomy for robotic mobile manipulation,” *Proc. of Int. Conf. on Robot. and Autom.*, pp.6245–6251, 2011.
- [65] M. Fritz, et al.: “An Additive Latent Feature Model for Transparent Object Recognition,” *Proc. of Advances in Neural Information Processing Syst.*, pp.558–566, 2009.
- [66] I. Lysenkov, et al.: “Pose estimation of rigid transparent objects in transparent clutter,” *Proc. of Int. Conf. on Robot. and Autom.*, pp.162–169, 2013.
- [67] N. Alt, et al.: “Reconstruction of transparent objects in unstructured scenes with a depth camera,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Image Processing*, pp.4131–4135, 2013.
- [68] U. Klank, et al.: “Transparent Object Detection and Reconstruction on a Mobile Platform,” *Proc. of Int. Conf. on Robot. and Autom.*, pp.5971–5978, 2011.
- [69] K. Maeno, et al.: “Light Field Distortion Feature for Transparent Object Recognition,” *Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.2786–2793, 2013.
- [70] T. Laliberte, et al.: Power switching mechanism for robotic applications, US Patent no.6669257, 2003.
- [71] H. Kawasaki, et al.: “Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor: Gifu hand II,” *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol.7, pp.296–303, 2002.
- [72] T. Mouri, et al.: “Anthropomorphic Robot Hand : Gifu Hand III,” *Iccas2002*, pp.1288–1293, 2002.
- [73] J. Butterfass, et al.: “DLR-Hand II: next generation of a dextrous robot hand,” *Proc. of Int. Conf. on Robot. and Autom.*, vol.1, pp.109–114, 2001.
- [74] S. Haidacher, et al.: “DLR hand II: hard- and software architecture for information processing,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom.*, vol.1, pp.684–689, 2003.
- [75] H. Liu, et al.: “Multisensory five-finger dexterous hand: The DLR/HIT Hand II,” *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst.*, pp.3692–3697, 2008.
- [76] T. Watanabe, et al.: “Grasping Optimization Using a Required External Force Set,” *IEEE Trans. on Autom. Sci. and Eng.*, vol.4, no.1, pp.52–66, 2007.
- [77] I. Schmidt: “Flexible moulding jaws for grippers,” *Industrial Robot: An Int. J.*, vol.5, no.1, pp.24–26, 1978.
- [78] K. Yamaguchi, et al.: “Underactuated robot hand for dual-arm manipulation,” *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst.*, pp.2937–2942, 2015.
- [79] I. Gaiser, et al.: “A new anthropomorphic robotic hand,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Humanoid Robots*, pp.418–422, 2008.
- [80] M.G. Catalano, et al.: “Adaptive synergies for the design and control of the Pisa/IIT SoftHand,” *Int. J. of Robot. Res.*, vol.33, no.5, pp.768–782, 2014.
- [81] C. Piazza, et al.: “SoftHand Pro-D: Matching dynamic content of natural user commands with hand embodiment for enhanced prosthesis control,” *Proc. IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom.*, pp.3516–3523, 2016.
- [82] D. Prattichizzo, et al.: “On Motion and Force Controllability of Precision Grasps with Hands Actuated by Soft Synergies,” *IEEE Trans. on Robot.*, vol.29, no.6, pp.1440–1456, 2013.
- [83] G. Grioli, et al.: “Adaptive synergies: An approach to the design of under-actuated robotic hands,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Intell. Robots and Syst.*, pp.1251–1256, 2012.
- [84] A. Dollar and R. Howe: “A robust compliant grasper via shape deposition manufacturing,” *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol.11, no.2, pp.154–161, 2006.
- [85] A.M. Dollar and R.D. Howe: “The SDM Hand as a Prosthetic Terminal Device: A Feasibility Study,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Rehabilitation Robot.*, pp.978–983, 2007.
- [86] A. Dollar and R.D. Howe: “The Highly Adaptive SDM Hand: Design and Performance Evaluation,” *Int. J. of Robot. Res.*, vol.29, no.5, pp.585–597, 2010.
- [87] L.U. Odhner, et al.: “A compliant, underactuated hand for robust manipulation,” *Int. J. of Robot. Res.*, vol.33, no.5, pp.736–



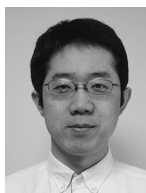
- 752, 2014.
- [88] M. Ciocarlie, et al.: "The Velo gripper: A versatile single-actuator design for enveloping, parallel and fingertip grasps," *Int. J. of Robot. Res.*, vol.33, no.5, pp.753–767, 2014.
  - [89] S.B. Backus and A.M. Dollar: "An Adaptive Three-Fingered Prismatic Gripper With Passive Rotational Joints," *IEEE Robot. and Autom. Lett.*, vol.1, no.2, pp.668–675, 2016.
  - [90] M. Tavakoli, et al.: "The UC SoftHand: Light Weight Adaptive Bionic Hand with a Compact Twisted String Actuation System," *Actuators*, vol.5, no.1, p.1, 2015.
  - [91] A. Pettersson, et al.: "Design of a magnetorheological robot gripper for handling of delicate food products with varying shapes," *J. of Food Eng.*, vol.98, no.3, pp.332–338, 2010.
  - [92] H. Takeuchi and T. Watanabe: "Development of a multi-fingered robot hand with softness-changeable skin mechanism," *Proc. of Int. Symp. on Robot.*, vol.1, pp.606–612, 2010.
  - [93] J. Kim, et al.: "3D printed soft skin for safe human-robot interaction," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst.*, pp.2419–2425, IEEE, 2015.
  - [94] H. Choi, et al.: "Design and feasibility tests of a flexible gripper based on inflatable rubber pockets," *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, vol.46, no.12–13, pp.1350–1361, 2006.
  - [95] J.R. Amend, et al.: "A Positive Pressure Universal Gripper Based on the Jamming of Granular Material," *IEEE Trans. on Robot.*, vol.28, no.2, pp.341–350, 2012.
  - [96] F. Ilievski, et al.: "Soft Robotics for Chemists," *Angewandte Chemie Int. Edition*, vol.50, no.8, pp.1890–1895, 2011.
  - [97] R. Deimel and O. Brock: "A novel type of compliant and under-actuated robotic hand for dexterous grasping," *Int. J. of Robot. Res.*, vol.35, no.1–3, pp.161–185, 2016.
  - [98] B.S. Homberg, et al.: "Haptic identification of objects using a modular soft robotic gripper," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst.*, pp.1698–1705, IEEE, 2015.
  - [99] A. Dameitry, et al.: "Lightweight Underactuated Pneumatic Fingers Capable of Grasping Various Objects," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom.*, pp.2009–2014, 2016.
  - [100] T. Nishimura, et al.: "Variable-Grasping-Mode Underactuated Soft Gripper With Environmental Contact-Based Operation," *IEEE Robot. and Autom. Lett.*, vol.2, no.2, pp.1164–1171, 2017.
  - [101] 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.
  - [102] A. Rocchi, et al.: "Stable simulation of underactuated compliant hands," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom.*, pp.4938–4944, 2016.
  - [103] M. Tavakoli, et al.: "Adaptive under-actuated anthropomorphic hand: ISR-SoftHand," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst.*, pp.1629–1634, 2014.
  - [104] R. Ozawa, et al.: "Design and control of a three-fingered tendon-driven robotic hand with active and passive tendons," *Autonomous Robots*, vol.36, no.1–2, pp.67–78, 2014.
  - [105] R. Ozawa et al.: "Analysis, Classification, and Design of Tendon-Driven Mechanisms," *IEEE Trans. on Robot.*, vol.30, no.2, pp.396–410, 2014.
  - [106] R. Ozawa, et al.: "Design of a Transmission With Gear Trains for Underactuated Mechanisms," *IEEE Trans. on Robot.*, vol.32, no.6, pp.1399–1407, 2016.
  - [107] K.C. Galloway, et al.: "Soft Robotic Grippers for Biological Sampling on Deep Reefs," *Soft Robot.*, vol.3, no.1, pp.23–33, 2016.
  - [108] R. Deimel and O. Brock: "A compliant hand based on a novel pneumatic actuator," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom.*, pp.2047–2053, 2013.
  - [109] R.F. Shepherd, et al.: "Soft Machines That are Resistant to Puncture and That Self Seal," *Adv. Materials*, vol.25, no.46, pp.6709–6713, 2013.
  - [110] K. Shimoga, et al.: "Soft Robotic Fingertips: Part I: A Comparison of Construction Materials," *Int. J. of Robot. Res.*, vol.15, no.4, pp.320–334, 1996.
  - [111] K. Shimoga, et al.: "Soft Robotic Fingertips: Part II: Modeling and Impedance Regulation," *Int. J. of Robot. Res.*, vol.15, no.4, pp.335–350, 1996.
  - [112] I. Kao, et al.: "Quasistatic Manipulation with Compliance and Sliding," *Int. J. of Robot. Res.*, vol.11, no.1, pp.20–39, 1992.
  - [113] N. Xydias, et al.: "Modeling of Contact Mechanics and Friction Limit Surfaces for Soft Fingers in Robotics, with Experimental Results," *Int. J. of Robot. Res.*, vol.18, no.9, pp.941–950, 1999.
  - [114] T. Inoue and S. Hirai: "Elastic Model of Deformable Fingertip for Soft-Fingered Manipulation," *IEEE Trans. on Robot.*, vol.22, no.6, pp.1273–1279, 2006.
  - [115] I. Kao and F. Yang: "Stiffness and contact mechanics for soft fingers in grasping and manipulation," *IEEE Trans. on Robot. and Autom.*, vol.20, no.1, pp.132–135, 2004.
  - [116] V.A. Ho and S. Hirai: "Modeling and Analysis of a Frictional Sliding Soft Fingertip, and Experimental Validations," *Adv. Robot.*, vol.25, no.3–4, pp.291–311, 2011.
  - [117] M. Ciocarlie, et al.: "Soft Finger Model with Adaptive Contact Geometry for Grasping and Manipulation Tasks," *Proc. of Joint EuroHaptics Conf. and Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Syst.*, pp.219–224, 2007.
  - [118] R. Maruyama, et al.: "Delicate grasping by robotic gripper with incompressible fluid-based deformable fingertips," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst.*, pp.5469–5474, 2013.
  - [119] T. Watanabe: "Softness effects on manipulability and grasp stability," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst.*, pp.1398–1404, 2011.
  - [120] T. Watanabe, et al.: "Experimental investigation of effect of fingertip stiffness on friction while grasping an object," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom.*, pp.889–894, 2014.
  - [121] Y. Fujihira, et al.: "Experimental investigation of effect of fingertip stiffness on resistible force in grasping," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom.*, pp.4334–4340, 2015.
  - [122] S. Arimoto: *Control Theory of Multi-fingered Hands*. Springer London, London, 2008.
  - [123] Y. Yokokohji, et al.: "Vision-aided object manipulation by a multifingered hand with soft fingertips," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom.*, vol.4, pp.3201–3208, 1999.
  - [124] T. Nishida, et al.: "Development of Universal Robot Gripper Using MR $\alpha$  Fluid," *Int. J. of Humanoid Robot.*, vol.13, no.04, pp.1650017, 2016.
  - [125] T. Nishimura, et al.: "Microgripper-Embedded Fluid Fingertip-Enhancing Positioning and Holding Abilities for Versatile Grasping Microgripper-embedded fluid," *J. of Mechanisms and Robot.*, vol.9, no.6, pp.061017–061017-13, 2017.
  - [126] N. Wettels, et al.: "Haptic feature extraction from a biomimetic tactile sensor: Force, contact location and curvature," *Proc. of Int. Conf. on Robot. and Biomimetics*, pp.2471–2478, 2011.
  - [127] C.H. Lin, et al.: "Signal processing and fabrication of a biomimetic tactile sensor array with thermal, force and microvibration modalities," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Biomimetics*, pp.129–134, 2009.
  - [128] J.A. Fishel, et al.: "A robust micro-vibration sensor for biomimetic fingertips," *Proc. of IEEE RAS/EMBS Int. Conf. on Bio. Robot. and Biomechanics*, pp.659–663, 2008.
  - [129] N. Wettels, et al.: "Deformable skin design to enhance response of a biomimetic tactile sensor," *Proc. of IEEE RAS/EMBS Int. Conf. on Bio. Robot. and Biomechanics*, pp.132–137, 2008.
  - [130] A.A. Stokes, et al.: "A Hybrid Combining Hard and Soft Robots," *Soft Robot.*, vol.1, no.1, pp.70–74, 2014.
  - [131] A. P. Perovskii: "Universal grippers for industrial robots," *Russ. Eng. J.*, vol.60, pp.3–4, 1980.
  - [132] E. Brown, et al.: "Universal robotic gripper based on the

- jamming of granular material,” Proceedings of the National Academy of Sci., vol.107, no.44, pp.18809–18814, 2010.
- [133] V. Wall, et al.: “Selective stiffening of soft actuators based on jamming,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom., pp.252–257, 2015.
- [134] J. Morrow, et al.: “Improving soft pneumatic actuator fingers through integration of soft sensors, position and force control, and rigid fingernails,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom., pp.5024–5031, 2016.
- [135] Y. Park, et al.: “Design and Fabrication of Soft Artificial Skin Using Embedded Microchannels and Liquid Conductors,” IEEE Sensors J., vol.12, no.8, pp.2711–2718, 2012.
- [136] H. Zhao, et al.: “Optoelectronically innervated soft prosthetic hand via stretchable optical waveguides,” Sci. Robot., vol.1, no.1, p.eaai7529, 2016.
- [137] K. Hosoda, et al.: “Anthropomorphic robotic soft fingertip with randomly distributed receptors,” Robot. and Autonomous Syst., vol.54, no.2, pp.104–109, 2006.
- [138] H. Hasegawa, et al.: “Net-Structure Proximity Sensor: High-Speed and Free-Form Sensor With Analog Computing Circuit,” IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol.20, no.6, pp.3232–3241, 2015.
- [139] D.M. Vogt, et al.: “Design and Characterization of a Soft Multi-Axis Force Sensor Using Embedded Microfluidic Channels,” IEEE Sensors J., vol.13, no.10, pp.4056–4064, 2013.
- [140] Optoforce, <https://optoforce.com/>. Accessed Jun. 10, 2017.
- [141] N.F. Lepora and B. Ward-Cherrier: “Superresolution with an optical tactile sensor,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst., pp.2686–2691, 2015.
- [142] W. Yuan, et al.: “Estimating object hardness with a GelSight touch sensor,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst., pp.208–215, 2016.
- [143] A. Yamaguchi and C.G. Atkeson: “Combining finger vision and optical tactile sensing: Reducing and handling errors while cutting vegetables,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Humanoid Robots, pp.1045–1051, 2016.
- [144] R. Patel and N. Correll: “Integrated force and distance sensing using elastomer-embedded commodity proximity sensors,” Proc. of Robot., Sci. and Syst., 2016.
- [145] A. Gupta, et al.: “Learning dexterous manipulation for a soft robotic hand from human demonstrations,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst., pp.3786–3793, 2016.
- [146] L.U. Odhner, et al.: “Open-Loop Precision Grasping With Underactuated Hands Inspired by a Human Manipulation Strategy,” IEEE Trans. on Autom. Sci. and Eng., vol.10, no.3, pp.625–633, 2013.
- [147] K. Collins, et al.: “The Development of a European Benchmark for the Comparison of Assembly,” Proc. of First Robot. Europe Conf. Brussels, pp.187–199, 1985.
- [148] B. Calli, et al.: “Benchmarking in Manipulation Research: Using the Yale-CMU-Berkeley Object and Model Set,” IEEE Robot. & Autom. Magazine, vol.22, no.3, pp.36–52, 2015.
- [149] S. Backus and A. Dollar: “An Adaptive Three-Fingered Prismatic Gripper With Passive Rotational Joints,” IEEE Robot. and Autom. Lett., vol.1, no.2, pp.668–675, 2016.
- [150] Y. Yokokohji, et al.: “Toy Problem’ as the Benchmark Test for Teleoperation Systems,” Adv. Robot., vol.17, no.3, pp.253–273, 2003.
- [151] J. Falco, et al.: “Grasping the Performance: Facilitating Replicable Performance Measures via Benchmarking and Standardized Methodologies,” IEEE Robot. & Autom. Magazine, vol.22, no.4, pp.125–136, 2015.
- [152] ReFlex Hand: <http://www.labs.righthandrobotics.com/reflex-hand-1>. Accessed Apr. 2, 2017.
- [153] RoboCupWork: <http://www.robocupatwork.org/>. Accessed Apr. 2, 2017.
- [154] European Robotics Challenge, <http://www.euroc-project.eu/>. Accessed Apr. 2, 2017.
- [155] The Airbus Shopfloor Challenge, <http://www.airbusgroup.com/int/en/people-careers/Working-for-Airbus-Group/Airbus-Shopfloor-Challenge-2016.html>. Accessed Apr. 2, 2017.
- [156] RoCKIn@Work, <http://rockinrobotchallenge.eu/work.php>. Accessed Apr. 2, 2017.
- [157] F. Amigoni, et al.: “Competitions for Benchmarking: Task and Functionality Scoring Complete Performance Assessment,” IEEE Robot. & Autom. Magazine, vol.22, no.3, pp.53–61, 2015.
- [158] P.U. Lima, et al.: “RoCKIn and the European Robotics League: Building on RoboCup Best Practices to Promote Robot Competitions in Europe,” RoboCup Int. Symp., pp.181–192, 2016.
- [159] European Robotics League Industrial Robots, [https://www.eurobotics.net/robotics\\_league/erl-industry/about/index.html](https://www.eurobotics.net/robotics_league/erl-industry/about/index.html). Accessed Jun. 13, 2017.
- [160] Robotic Grasping and Manipulation Competition@IROS 2016, [http://www.rhgm.org/activities/competition\\_iros2016/](http://www.rhgm.org/activities/competition_iros2016/).
- [161] 2nd Robotic Grasping and Manipulation Competition@IROS 2017, [http://www.rhgm.org/activities/competition\\_iros2017/](http://www.rhgm.org/activities/competition_iros2017/).
- [162] World Robot Summit, <http://worldrobotsummit.org/en/>. Accessed Apr. 2, 2017.
- [163] P.J. Besl, et al.: “A Method for Registration of 3-D Shapes,” IEEE Trans. on Pattern Anal. and Mach. Intell., vol.14, no.2, pp.239–256, 1992.
- [164] T. Watanabe, K. Yamazaki and Y. Yokokohji: “Survey of robotic manipulation studies intending practical applications in real environments-object recognition, soft robot hand, and challenge program and benchmarking,” Adv. Robot., vol.31, no.19–20, pp.1114–1132, 2017.



#### 渡辺哲陽 (Tetsuyou Watanabe)

2003 年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士（工学）。山口大学工学部助手、金沢大学大学院講師などを経て、2011 年金沢大学理工研究域准教授となり、現在に至る。ロボットハンドや医療福祉ロボット等の研究に従事。IEEE や日本機械学会等の会員。  
(日本ロボット学会正会員)



#### 山崎公俊 (Kimitoshi Yamazaki)

2007 年筑波大学大学院システム情報工学研究科博士課程修了。博士（工学）。東京大学大学院情報理工学系研究科特任助教、特任講師を経て、2012 年より信州大学。現在准教授。知能ロボティクス・センサ情報処理の研究に従事。IEEE や日本機械学会などの会員。  
(日本ロボット学会正会員)



#### 横小路泰義 (Yasuyoshi Yokokohji)

1988 年京都大学大学院博士課程中途退学。同年京都大学工学部オートメーション研究施設助手。1992 年機械工学教室助教授、2007 年機械理工学専攻准教授を経て2009 年より神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻教授。博士（工学）。遠隔操縦システム、ハプティックインタフェース、ロボットハンド等の研究に従事。日本機械学会および計測自動制御学会のフェロー。システム制御情報学会、日本バーチャルリアリティ学会、IEEE などの会員。  
(日本ロボット学会正会員・フェロー)