

解説

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

Manipulation Research
Trends of Research Related to Grasp Planning

原田 研 介* *(独) 産業技術総合研究所

Kensuke Harada* *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

1. はじめに

ロボットハンドで対象物を把持し、その対象物を操ることは、ロボット工学の基礎的な研究課題の一つであり、従来から研究が行われている。ここで、図1にはIEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) のプログラム (Table of Contents) に含まれる語句として manipulation と grasp の総数の推移を示している。会議の講演件数自体の増加を考慮しても、ここ数年マニピュレーションに関する研究が増加していることが分かる。また、これらのキーワードを陽には含まないマニピュレーションの研究があることや、マニピュレーションのための視覚認識など周辺領域の研究があることを考慮すると、近年マニピュレーションの研究が非常に活発であると言える。次に、表1には2012年のICRAにおける主なマニピュレーションや把持関係の講演数を示している。表から分かるように、マニピュレーション計画、把持計画、劣駆動などに関する講演が非常に多いことが分かる。また、マニピュレーション計画や未知対象物の把持においても、把持計画に基づいているものがあることを考えると、近年のマニピュレーションの研究が活発である理由の一つとして、この把持計画が確立されてきたことを考えることができる。本稿では、近年のマニピュレーション研究の解説を行うが、特に把持計画の研究と把持計画を用いたマニピュレーションを中心に解説する。把持計画とは対象物の位置・姿勢が与えられたときに、対象物を安定に把持できるハンドのコンフィギュレーションを求める計画問題である。把持計画はマニピュレータの様々な動作計画問題に展開させたり、アームを搭載する移動ロボットやヒューマノイドロボットにも用いることができるため、その応用範囲は極めて広い。

本稿では、まずその背景について述べた後に、近年の内外の研究動向について解説を行う。研究動向の解説を行う際、著者らの研究グループで行われている研究の成果も織り交

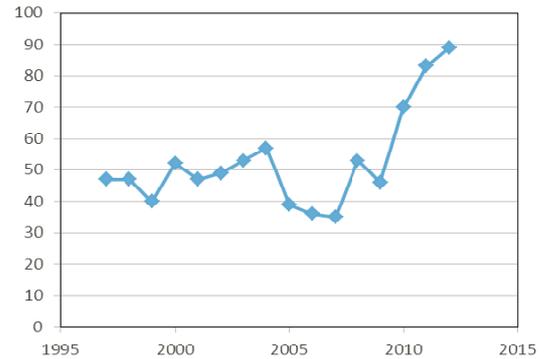


図1 ICRAのプログラム (Table of Contents) に含まれる語句として manipulation, grasp の総数の推移

表1 ICRA 2012におけるマニピュレーションやハンド関係の主な講演の件数

Manipulation Planning	12
Grasp Planning	11
Underactuated Grasping	7
Unknown Object Grasping	5
Force Control	5
Deformable Object Grasping	4
Caging	4

ぜながら解説を行う。

2. 背景

いずれも非常に有名な文献ではあるが、2000年以前に行われた把持やマニピュレーションに関する研究の解説は文献[1]~[4]などが詳しい。いずれの文献においても、多指ハンドによる対象物の把持における運動学、力学、内力制御、把持安定性など当時の研究が詳細に紹介されている。ここで、把持計画に関して Shimoga [4] は1996年に実時間で把持計画を実行することは計算量的に困難であることを指摘している。

一方、2000年前後に動作計画[5][6]、移動ロボットのナビゲーション[7]、ヒューマノイド[8]などロボット工学の様々な分野でイノベーションが起こっていたが、ロボットハンドの分野においても DLR Hand [9] が発表されて注目

原稿受付 2103年1月31日

キーワード: Manipulation, Grasp Planner, Robot Hand

*305-8568 つくば市梅園 1-1-1

*Tsukuba-shi, Ibaraki

を集めていた。そのようななか、同じDLRのBorstら[10]はインクリメンタルに計算することで計算コストの小さな把持安定性の計算手法を提案し、これに基づいて多指ハンドの把持計画を行った。また、その数年後にMillerら[11]はQuick Hull[12]を用いて把持安定性を計算する把持計画手法を提案した。また、Millerら[13]は彼らの把持計画手法をGraspIt!と呼ばれるソフトウェアにより一般に公開した。GraspIt!を公開したことの研究コミュニティへのインパクトは非常に大きかった。GraspIt!を公開する以前は多自由度を有する多指ハンドが与えられても、対象物の把持姿勢は試行錯誤的に決めなくてはならなかった。それに対して、GraspIt!を用いることで、とりあえず対象物を安定に把持できる可能性のある把持姿勢を自動的に作ることができるため、把持やマニピュレーションの研究は一般的な三次元形状の対象物に対して把持姿勢は計算できるものとして研究を進めることができるようになった。これ以降、マニピュレーション研究において、GraspIt!を用いた発表が多かったことは印象的であった。なお、把持計画のソフトウェアとしては、後にOpenRAVE[14]が登場し、筆者らもgraspPlugin[15]を別の観点より開発し公開している。

次に、マニピュレーション研究の裾野が広がってきたことを受け、マニピュレーション研究をフォーカスした大型の研究プロジェクトが組織されるようになった。特に、EU圏においては、国家横断的なプロジェクトとして、PACOPUS(2006-2010)やGRASP(2008-2012)などが組織され、この中でマニピュレーション研究が重点的に行われた。また、このようなプロジェクトにより、EU圏の多くの研究室は高性能な多指ハンドやアームを揃えることができ、ハードウェア的に優位に立ってマニピュレーション研究を行っている。一方、日本においては同時期にNEDO次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト(2007-2011)が組織された。このプロジェクト自体はロボット用のミドルウェアであるOpenRTMを用いてロボットの知能モジュールを整備することを主眼としていたが、そのなかでマニピュレーション関係のモジュールの整備も行われた。最後に、大きな広がりを見せたマニピュレーション研究で生まれた研究の果実を刈り取るべく、DARPA ARM (Autonomous Robotic Manipulation) Programがアメリカ合衆国において組織され、現在も継続している。

最後に、ロボット研究者にとっては有名なことではあるが、マニピュレーション研究が活発な理由として、Kinectセンサにより視覚センサが身近になったことや、OpenCV[16]やPoint Cloud Library[17]などのソフトウェアが整備されたことによって視覚情報処理が容易になったことが挙げられる。視覚センサを仮定せずにロボットが対象物を把持することは非常に困難であり、ロボットが対象物を把持するためには、多くの状況において何等かの視覚センサが必

要になる。これらのツールが登場するまで、マニピュレーションの研究者は視覚情報処理の研究者に頼んで視覚センサをセットアップしてもらわなくてはならなかった。それに対して、これらのツールが登場したことにより、マニピュレーションの研究者が比較的容易に視覚センサを使いこなすことが出来るようになり、マニピュレーション研究に対する垣根が低くなった。

3. 研究動向

把持計画手法の研究や、把持計画を基にしたマニピュレーション研究は様々な方向に展開を見せている。本章では、そのうちいくつかのトピックについて近年のマニピュレーション研究の動向を解説する。

3.1 把持計画手法の拡張

把持計画を様々な状況に対応させるために、手法自体を改良したり拡張する研究を紹介する。対象物のモデルを仮定しない把持計画の研究と把持計画の際に用いる形状プリミティブに関する研究などについて述べる。

多くの把持計画手法では、与えられた対象物の形状モデルや摩擦係数などの物理パラメータが与えられている条件下で把持計画を実行し、把持姿勢を導出している。ここで、ロボットが人の日常生活をサポートするために日常生活品を把持する場合、ロボットは莫大な種類の対象物を把持しなくてはならない。また、ロボットが工場でパーツの供給作業を行う場合も同様である。ここで、これら莫大な種類の対象物のそれぞれに対して形状モデルや物理パラメータを用意し、それらが与えられていると仮定して把持計画を実行するのは現実的ではない。そこで、対象物の形状モデルがない場合でも安定な把持を得るために、多くの研究が行われている(例えば文献[18]~[23])。これらの手法の多くでは、まず未知の対象物に対して視覚センサで局所的な形状情報を得る。次に、対象物の局所的な形状情報を基に、この対象物を安定に把持するハンドの姿勢を求めている。Goldfederら[18]は、まずモデルが存在する種々の対象物に対して把持計画を実行し、把持姿勢のデータベースを構築している。次に、新しい対象物に対しては、視覚センサにより得られた対象物の局所的な形状情報とデータベースのデータを組み合わせることにより把持姿勢を導出する手法を提案した。一方、Popovicら[20]やBohgら[23]は、学習に基づいてモデルがない対象物を安定に把持する手法を提案している。また、筆者ら[19]は例えば農作物に代表されるように、大まかな形状は分っているが各個体毎に形状が微妙に異なっている対象物に対する把持計画の研究を行っている。

次に、把持計画を行う場合、対象物の幾何モデルを形状プリミティブを用いていったん抽象化した上で、把持姿勢を求める場合が多い(例えば文献[11][24]~[32])。これは、形状プリミティブを用いることにより、ハンドのアプローチ

方向など把持計画に必要なパラメータを決定することができるためであり、また、対象物の形状によっては複数の形状プリミティブを割り当てる必要があるためである。例えば、複数の形状プリミティブを用いる例としてロボットハンドがマグカップを把持する場合を考えることができる。マグカップでは容器を把持する場合と取っ手を把持する場合が想定される。ここで、これらに対して別の形状プリミティブを割り当て、それぞれに対して独立に把持姿勢を求めることが考えられる。先に紹介した Miller ら [11] の研究においても、与えられた対象物の形状モデルに対して、円柱や直方体などの形状プリミティブを用いることで把持計画を行っている。Goldfeder ら [24] はクマのぬいぐるみや飛行機の玩具のような複雑な形状を持つ対象物を例にとり、形状プリミティブとして複数の超二次曲面を自動的に割り当てる手法を提案した。また、Huebner ら [25] は対象物全体の形状モデルを仮定せずに、局所的な形状モデルに対して複数の直方体を当てはめることで把持を実現した。筆者ら [26] [27] はハンドと対象物の両方に直方体を仮定し、これらの大きさを比較することにより、把持計画を実現した。この手法を用いることにより、例えば同じ指先把持であっても3指指先把持と4指指先把持などを自動的に切り替えて用いることができる。また、近年 Przybylski ら [31] らは対象物の形状モデルに大きさの異なる球を敷き詰めるアプローチを提案した。彼らのアプローチを用いることにより、例えばバナナのように湾曲している対象物に対してもハンドが適切に把持姿勢を求めることが出来る。最後に、近年永田ら [30] は対象物の複数の領域に対して別の機能を割り当てることを提案した。例えば、醤油差しであれば、注ぎ口、取っ手、蓋などで別の機能を割り当てることになる。

また、把持する対象物の周辺環境を考慮し、ハンドが周辺環境と干渉しないような把持姿勢を計画する手法が提案されている [33]。さらに、双腕ロボットが両手を使って大きな対象物を把持する場合の把持計画手法が提案されている [34]。

3.2 多指ハンド

次に、把持を実行するハンドとして様々な形態のものを考えることができる。ここでは、把持計画に用いるハンドについて、特に劣駆動ハンドに絞って解説する。

近年のマニピュレーション研究の中で、多指ハンドの指の自由度を利用して対象物をハンドの中で操るイン・ハンド・マニピュレーションに関しては、研究事例が少ないという印象を持っている。この理由としては、多くの把持計画手法では把持したあとで対象物をハンドの中で操ることを想定していないことと、対象物をハンドの中で操らなければならない応用事例がとりあえず目先にないということが考えられる。逆に、対象物をハンドの中で操らないのであれば、アクチュエータの数がハンドの関節数よりも少ない口

ボットハンド（劣駆動ハンド [35] [36]）により対象物を確実に把持できれば十分である。しかしながら、劣駆動ハンドを用いた把持や操りのメカニズムについては、従来研究が十分とは言えなかった。それに対し、近年劣駆動ハンドに関する多くの研究が行われている（例えば文献 [37]～[41]）。ここで、劣駆動ハンドを掴みたい対象物に近づけてハンドを閉じるコマンドを実行するだけで、厳密に把持姿勢を計画しなくても種々の対象物をロバストに把持することに成功しており [37] [38]、劣駆動ハンドの持つ高いポテンシャルを示している。このようなポテンシャルを有効に引き出すために、与えられた把持のクラスに対して安定な把持を実現するハンドの設計に関する研究 [39] [40] やパフォーマンスの解析 [41] が行われている。また、劣駆動ハンドの一つの形態として、指関節に受動的なコンプライアンスを持つハンドが近年開発されている（例えば文献 [42] [43]）。受動的なコンプライアンスを仮定することで対象物の形状に誤差が存在してもロバストな把持が期待でき、上記の劣駆動ハンドの研究においても、駆動関節の数が関節の総数よりも少ないだけではなく、関節のコンプライアンスも同時に仮定しているものがある（例えば文献 [41]）。Prattichizzo ら [44] は柔軟関節を有するハンドにより生成される内力の解析を行っている。

3.3 把持計画を仮定したアームの動作計画

把持計画を用いることで、多種多様なマニピュレータの動作を実現することが可能である。このような目的で、把持計画を様々なマニピュレーションの例に適用したり、他の様々な動作計画問題と組み合わせる研究が多く行われている。

マニピュレータを動作させる際にはロボットの動作軌道を周辺環境との干渉を避けるように計画する必要がある。ここで、把持計画では複数の把持姿勢の候補が得られるため、ロボットが初期姿勢から把持姿勢まで動く動作を計画する問題は複数の目標コンフィグレーションに対して軌道計画問題を解く必要がある。Vahrenkamp ら [45] や Horowitz ら [46] はこのような動作計画問題を解く手法を提案している。

また、ロボットによるピックアンドプレースにおいて、複雑な形状をした対象物を複雑な形状をした環境の上に置かなければならない場合など、対象物を環境に置く姿勢を求めることが困難になる。筆者ら [47] は環境の指定された位置に対象物を置く姿勢の計画を行い、この対象物の姿勢計画と把持計画や軌道計画を組み合わせるピックアンドプレースの動作計画を行う手法を提案している [48]。

さらに、重い対象物を把持した状態でテーブルの上を滑らせ、持ち上げて別のテーブルの上に置くような動作を生成するためには、複数の違った多様体上で動作を計画し、これらを組み合わせなくてはならない。Berenson ら [49] は

表 2 第 30 回日本ロボット学会学術講演会におけるマニピュレーションやハンド関係の講演の件数

ハンド機構・試作	8
力制御	4
ピンピッキング	2
マニピュレーション計画	2
視覚センシング	2
触覚センシング	1
産業応用	1

このような動作計画問題を研究した。

そのほか, Saut ら [50] は把持計画と併せて双腕での持ち替えの計画をおこなう手法を提案した。また, 多くの日用品に囲まれた環境においては, 目標とする対象物をいったん押し操作で動かした上で別の場所へ移動させて把持する必要がある。Dogar ら [51] は, このような動作の計画を行っている。また, Cosgun ら [52] は押し操作の計画を行っている。

3.4 国内におけるマニピュレーション研究

次に国内のマニピュレーション研究に目を向けてみる。表 2 には, 2012 年の日本ロボット学会学術講演会におけるマニピュレーションやハンド関係の講演の件数を示している。この年の講演会ではハンドのセッションが二つと, マニピュレーションのセッションが一つあった。表から分かるように, 日本国内では指の機構を考えて試作する研究や力制御に関する研究が多いことが分かる。また, 表 1 と比較することで, 日本国内と国外において, マニピュレーション研究における比重の置き方が大きく異なることが分かる。

そのようななか, 他の研究者があまり類似研究を行っていないが重要なオンリーワンの研究が多いことも日本のマニピュレーション研究の特徴であると考えられる。上で紹介した研究以外では, 例えば並木ら [53] は高速ビジョンと高速に動作できる多指ハンドを組み合わせることで, 種々のマニピュレーションを実現している。また, Arimoto ら [54] は柔軟指のピンチングによる把持の制御則を提案している。さらに, 柔軟で平たい対象物を平板の上で動的にマニピュレーションする問題 [55] や, 人の教示動作に基づいて折り紙ロボットの動作制御則を生成する研究 [56] が行われている。

4. おわりに

本稿では, マニピュレーション研究が活発になった経緯を述べるとともに, 近年の内外のマニピュレーション研究の動向について述べた。特に, 把持計画を中心にして, 把持計画の手法の拡張に関する研究や, 把持計画を利用したマニピュレーションの研究について解説した。少し筆者の私見が多かったことに, ご了承願いたい。

ここで, Grebenstein ら [57] は人と同じサイズで人と同じ関節構造を持ちケーブル駆動により全関節でトルク制御

可能なハンドを開発している。ただし, このような高性能なハンドが発表されてきているのと裏腹に, このような高性能なハンドの性能を十分に引き出すことを目指したマニピュレーションの研究は, 高速マニピュレーション [53] の研究以外, 事例が少ないのが現状である。このような高性能なハンドを使いこなせるようになり, あらゆる形状の対象物に対して指を対象物に当てるだけで, あとは把持力の制御により安定把持が得られるようになると, これまでの把持安定性に基づく把持計画を中心とした研究から研究の枠組みが大きく変わる可能性がある。また, PrimeSense 社から小型の距離センサが発表された [58]。このようなセンサがロボットハンドの掌や指先に装着され, かつ簡単に利用できるようになると, また研究の枠組みが大きく変わる可能性がある。

また, 本稿では従来から行われてきている, 把持の際の力制御, 把持安定性, 運動学などのトピックについては言及していない。これらの研究の発表件数自体は減っていると考えられるが, 例えば文献 [59] など, 従来研究から着実に進める成果が生まれていることも付記したい。最後に, 近年のマニピュレーション研究の解説としてはほかに文献 [60] [61] などがある。

今後とも, マニピュレーション研究から目が離せない。

謝辞 この解説記事を書くにあたり, 平素からマニピュレーション研究について議論をさせていただいている九州大学の辻徳生氏や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のメンバーに感謝致します。

参 考 文 献

- [1] A. Bicchi and V. Kumar, "Robotic Grasping and Contact: A Review", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 348-353, 2000.
- [2] A. Bicchi, "Hands for Dexterous Manipulation and Robust Grasping: a Difficult Road Toward Simplicity", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol.16, no.6, pp.652-662, 2000.
- [3] A.M. Okamura, N. Smaby, and M.R. Cutkosky, "An Overview of Dexterous Manipulation", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 255-262, 2000.
- [4] K.B. Shimoga, "Robot Grasp Synthesis: A Survey", *Int. J. of Robotics Research*, vol.5, no.3, pp.230-266, 1996.
- [5] L.E. Kavraki, P.Svestka, J.-C. Latombe, M.H. Overmars, "Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 12, no. 4, pp.566-580, 1996.
- [6] J.J.Kuffner and S.M.Lavalle, "RRT-Connect: An Efficient Approach to Single-Query Path Planning", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1-7, 2000.
- [7] M.Montemerlo, S.Thrun, D.Koller and B.Wegbreit, "Fast-SLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem", *Proc. of American Association for Artificial Intelligence*, pp. 593-598, 2002.
- [8] K.Hirai, M.Hirose, Y.Haikawa, and T.Takenaka "The Development of Honda Humanoid Robot", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1321-1326, 1998.
- [9] J. Butterfass, G. Hirzinger, S. Knoch, and H. Liu, "DLR's Mul-

- tisensory Articulated Hand. part I: Hard- and software architecture”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.2081-2086, 1998.
- [10] C. Borst, M. Fischer, G. Hirzinger, “A fast and robust grasp planner for arbitrary 3D objects”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1890-1896, 1999.
- [11] A.T. Miller, S. Knoop, H.I. Christensen, and P.K. Allen, “Automatic Grasp Planning using Shape Primitives”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 14-19, 2003.
- [12] <http://www.qhull.org/>
- [13] A.T. Miller and P.K. Allen, “Graspit! A versatile simulator for robotic grasping”, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol.11, no.4, pp. 110-122, 2004.
- [14] R.Diankov and J.J Kuffner, “OpenRAVE: A Planning Architecture for Autonomous Robotics”, CMU-RI-TR-08-34, 2008.
- [15] 辻, 原田, “graspPlugin for Choreonoid”, *日本ロボット学会誌*, vol.31, no.3, pp. 232-235, 2013.
- [16] OpenCV, <http://opencv.org/>
- [17] Point Cloud Library, <http://pointclouds.org/>
- [18] C. Goldfeder, M. Ciocarlie, J. Peretzman, H. Dang, and P.K. Allen, “Data-Driven Grasping with Partial Sensor Data”, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1278-1283, 2009.
- [19] K. Harada et al., “Probabilistic Approach for Object Bin Picking Approximated by Cylinders”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2013.
- [20] M. Popovic, D. Kraft, L. Bodenhagen, E. Baseski, N. Pugeault, D. Kragic, T. Asfour and N. Kruger, “A Strategy for Grasping Unknown Objects based on Co-Planarity and Colour Information”, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 58, no. 5, pp. 551-565, 2010.
- [21] E. Klingbeil, D. Rao, B. Carpenter, V. Ganapathi, A.Y. Ng, and O. Khatib, “Grasping with Application to an Autonomous Checkout Robot”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.2837-2844, 2011.
- [22] A. Saxena, J. Driemeyer, J. Kearns, C. Osundu, A. Y. Ng, “Learning to Grasp Novel Objects Using Vision”, *Experimental Robotics: The 10th International Symposium*, Springer, 2008.
- [23] J. Bohg and D. Kragic, “Learning Grasping Points with Shape Context”, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 58, no. 4, pp.362-377, 2010.
- [24] C. Goldfeder, P.K. Allen, C.Lackner, R. Pelosoff, “Grasp Planning via Decomposition Trees”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.4680-4684, 2007.
- [25] K. Huebner, S. Ruthotto and D. Kragic, “Minimum Volume Bounding Box Decomposition for Shape Approximation in Robot Grasping”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1765-1770, 2008.
- [26] K. Harada, K. Kaneko, and F. Kanehiro, “Fast Grasp Planning for Hand/Arm Systems Based on Convex Model”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1162-1168, 2008.
- [27] T. Tsuji, K. Harada, K. Kaneko, F. Kanehiro, and K. Maruyama, “Grasp Planning for a Multifingered Hand with a Humanoid Robot”, *J. of Robotics and Mechatronics*, Vol.22 No.2, pp. 230-238, 2010.
- [28] 辻, 原田, 山野辺, 永田, 中村, 長谷川, “把持計画のための対象物二次曲面近似のグラフ表現”, *日本ロボット学会学術講演会予稿集*, (3E1-7), 2011.
- [29] K. Nagata, T. Miyasaka, D.N. Nenchev, N. Yamanobe, K. Maruyama, S. Kawabata, and Y. Kawai, “Picking up an Indicated Object in a Complex Environment”, *Proc. of 2010 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.2109-2116, 2010.
- [30] 永田, 山野辺, 原田, 中村, 辻, “機能パーツの接続による日用品のモデル化”, *日本ロボット学会学術講演会予稿集*, (2N3-7), 2012.
- [31] M. Przybylski, T. Asfour, and R. Dillmann, “Planning Grasps for Robotic Hands Using a Novel Object Representation Based on the Medial Axis Transform”, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.1781-1788, 2011.
- [32] T. Tsuji, K. Harada, and K. Kaneko, “Easy and Fast Evaluation of Grasp Stability by using Ellipsoidal Approximation of Friction Cone”, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.1830-1837, 2009.
- [33] D. Berenson and S. S. Srinivasa, “Grasp Synthesis in Cluttered Environments for Dexterous Hands”. *Proc. of IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, pp. 189-196, 2008.
- [34] N.Vahrenkamp, M. Przybylski, T. Asfour, and R. Dillmann, “Bimanual Grasp Planning”, *Proc. of IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, pp. 493-499, 2011.
- [35] L. Birglen, T. Laliberte, and C. Gosselin, “Underactuated Robotic Hands”, Springer, 2008.
- [36] S. Hirose and Y. Umetani, “The Development of Doft Gripper for the Versatile Robot Hand”, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 13, pp.351-358, 1978.
- [37] 深谷, 和田, 遠山, “TUAT/Karlsruhe Humanoid Hand の把持機能向上”, *日本ロボット学会学術講演会講演予稿集*, 2010
- [38] C. Gosselin, F. Pelletier and T. Laliberte, “An Anthropomorphic Underactuated Robotic Hand with 15 Dofs and a Single Actuator”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 749-754, 2008.
- [39] M. Ciocarlie and P. Allen, “Data-Driven Optimization for Underactuated Robotic Hands”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1292-1299, 2010.
- [40] A.M. Dollar and R.D. Howe, “Joint Coupling Design of Underactuated Hands for Unstructured Environment”, *Int. J. Robotics Research*, vol. 30, no. 9, pp. 1157-1169, 2011.
- [41] L.U. Odhner and A.M. Dollar, “Dexterous Manipulation with Underactuated Elastic Hands”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2011.
- [42] 岩田, 塩澤, 木村, 菅野, “受動柔軟性を活用したハンド持ち替え制御と安定化手法”, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集*, 2009.
- [43] 金子, 原田, 金広, “等身大ヒューマノイドロボット用多指ハンドの開発”, *日本ロボット学会誌*, vol. 26, no.1, pp.98-109, 2008.
- [44] D. Prattichizzo, M. Malvezzi, M. Aggravi, T. Wimbock, “Object Motion-Decoupled Internal Force Control for a Compliant Multifingered Hand”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1508-1513, 2012.
- [45] N. Vahrenkamp, T. Asfour, and R. Dillmann, “Simultaneous Grasp and Motion Planning”, *Robotics and Automation Magazine*, pp. 43-57, 2012.
- [46] M.B. Horowitz, J.W. Burdick, “Combined Grasp and Manipulation Planning as a Trajectory Optimization Problem”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 584-591, 2012.
- [47] K. Harada et al., “Object Placement Planner for Robotic Pick and Place Tasks”, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 980-985, 2012.
- [48] K. Harada et al, “Pick and Place Planning for Dual Arm Manipulators”, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2281-2286, 2012
- [49] D. Berenson, S.S.Srinivasa, D.Ferguson, J.J. Kuffner, “Manipulation Planning on Constraint Manifolds”, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2009.
- [50] J.-P. Saut, M.Gharbi, J. Cortes, D. Sidobre, T. Simeon, “Planning Pick-and-Place Tasks with Two-Hand Regrasping”, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.4528-4533, 2010.
- [51] M.R. Dogar and S.S. Srinivasa, “A Framework for Push-Grasping in Clutter”, *Robotics: Science and Systems VII*, 2011.
- [52] A. Cosgun, T. Hermans, V. Emeli, and M. Stilman, “Push Plan-

- ning for Object Placement on Cluttered Table Surfaces”, *Proc. of IEEE/RSJ int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2011.
- [53] 並木, 石井, 石川, “高速センサフィードバックに基づく把握行動”, 日本ロボット学会誌, vol.20, no.7, pp.47-56, 2002.
- [54] S.Arimoto, K.Tahara, M.Yamaguchi, P.T.A.Nguyen and H.-Y. Han, “Principles of Superposition for Controlling Pinch Motions by Means of Robot Fingers with Soft Tips”, *Robotica*, vol. 19, pp.21-28, 2001.
- [55] I. G. Ramirez-Alpizar, M. Higashimori, M. Kaneko, C. Tsai, and I. Kao, “Nonprehensile Dynamic Manipulation of a Sheet-like Viscoelastic Object”, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.5103-5108, 2011.
- [56] 田中, 木原, 横小路, “人間の直接教示動作の統計的性質に基づいた折り紙ロボットの目標軌道とセンサフィードバック則生成法”, 日本ロボット学会誌, vol. 27, no, 6, pp. 685-695, 2009.
- [57] M. Grebenstein, M. Chalon, G. Hirzinger, R. Siegwart, “Antagonistically Driven Finger Design for the Anthropomorphic DLR Hand Arm System” *Proc. of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp.609-616, 2010.
- [58] “Hands-On With the Next Generation Kinect: PrimeSense Capri”, *IEEE Spectrum Blog*, 15th, Jan., 2013.
- [59] Y. Zheng, M. C. Lin, and D. Manocha, “On Computing Reliable Optimal Grasping Forces”, *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 28, no. 3, pp. 619-633, 2012.
- [60] C.Smith, Y.Karayiannidis, L.Nalpantidis, X.Gratal, P.Qi, D.V.Dimarogonas, and D.Kragic, “Dual Arm Manipulation – A Survey”, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 60, pp. 1340-1353, 2012.
- [61] T. Wimbock, C. Ott, A. Albu-Schaffer, G. Hirzinger, “Comparison of Object-Level Grasp Controllers for Dynamic Dexterous Manipulation”, *The Int. J. of Robotics Research*, vol.31, no.1, pp.3-23, 2012.

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, 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, 日本ロボット学会, 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)