

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K12499

研究課題名(和文)産業知能ロボットの強制吸引グリッパと触力覚誘導動作に基づく検証型一般物体把持体系

研究課題名(英文)Verification type general object gripping system based on forced suction gripper of industrial intelligent robot and tactile force sense guided operation

研究代表者

岡田 慧 (OKADA, Kei)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号：70359652

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：強制吸着と挟み込み多指からなる統合型の吸引ハンドを開発し、ここに曲げ、近距離、近接触覚センサを組み込んだ。吸引部に伸縮可能軸を追加し狭隘空間からの物品取り出しが可能になることを示し、挟み込み多指を活用することで物品の落下を防ぐ。また、近距離触覚センサを介して得られる手探り反応に応じたプリミティブ反射動作を設計し、これにより対象の形状に沿った形の把持を試行錯誤的に実現するアルゴリズムを提案した。また、動作する前に失敗を予測するための認識行動ネットワークを学習的に獲得し、これにより失敗確率が高い場合にのみ双腕の手添え動作を適用し、作業遂行時間の延長を抑制しつつ、高い動作安定性の確保が可能になった。

研究成果の概要(英文)：Integrated suction hand consisting of forced adsorption and pinching multi fingers was developed, and bending, short range, proximity tactile sensor was incorporated here. It shows that the product can be taken out from the narrow space by adding the extendable shaft to the suction part, and by using multi-fingered pinching, the article is prevented from falling. In addition, we designed an algorithm to design primitive reflecting motion according to the foreshock response obtained via the near range tactile sensor, thereby realizing trial - and - error grasping along the shape of the object. In addition, by acquiring a recognition behavior network to predict failure before learning, applying only the hand attached operation of the double arm only when the failure probability is high, thereby suppressing the extension of the work execution time, It became possible to secure high operational stability.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：知能ロボット 強制吸引グリッパ 手探り動作

### 1. 研究開始当初の背景

従来の知能ロボット分野の物体把持研究では、対象の三次元認識から把持位置姿勢を計算し、マニピュレータの軌道計画を実行する認識・把持計画・軌道計画のパイプライン型のアプローチが一般的であるが、このアプローチでは全ての段階が完全に機能することが前提になる。

実際に 2015 年にロボティクスの国際学会で実施された、指定された物体を倉庫の棚から取り出す産業ロボットのピッキング競技会では、ぬいぐるみ、本、ビニールに入ったコップなど多様な物体が、時には重なり合って置かれており、従来の認識計画パイプラインアプローチ研究者は苦戦していたが、申請者らは、対象物の大まかな存在を意識したらまず手さぐりで物体を取り出しその物体が指定された対象物であるかを検証し、もし違えば物体を棚に返し別の物体を取り出す検証型のアプローチを採用し、その有効性を確認した。しかしそのシステムは課題用に作りこんだものであり、そこから知見を得て他に展開するレベルではない。そこで、これらを学術的に体系づける事が出来れば、従来の認識計画にかわる新しい検証型物体把持研究分野の確立に繋がると共に、実際の産業応用ロボットとして工場の倉庫で活躍できるロボットの実現に繋がる必要性を確信するに至った。

### 2. 研究の目的

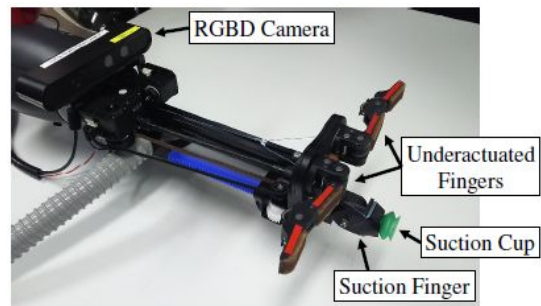
検証型のアプローチでは、環境物体の知識がない段階で手さぐりで物体の位置を判定する手法と、任意物体を把持出来るグリッパ機構が重要になる。そこで本研究では形状に依存せず物体を持ち上げられる強制吸引型のグリッパの設計論と、棚のように床や壁等障害物がある中で持ち上げ可能な物体を見つける手探り動作制御法を学術的に明らかにすることを目的とし、産業応用ロボットとして工場で利用する際的设计原理を提供する。

### 3. 研究の方法

物体環境情報に基づく把持や操作の計画実行ではなく、まず把持動作を行い、その行動の成否を判断していく検証型のアプローチを追求する本研究では、どのような物体でも把持できる強制吸引グリッパと未知の環境でも手探りで対象を見つけられる触力覚誘導動作がカギになる。そこで初年次において徹底的に強制吸引グリッパの特性や性質を明らかにし、その構成法を学術的に明らかにする。二年次にはこれに基づき能動センシングの手探り誘導制御と物体環境判別に取り組み、これと検証型の認識処理を統合し、検証型の一般物体把持動作システムを構築し、その有効性を実証的に評価する。

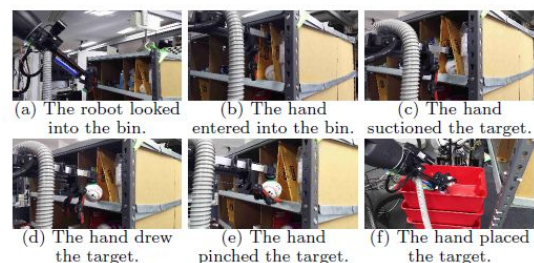
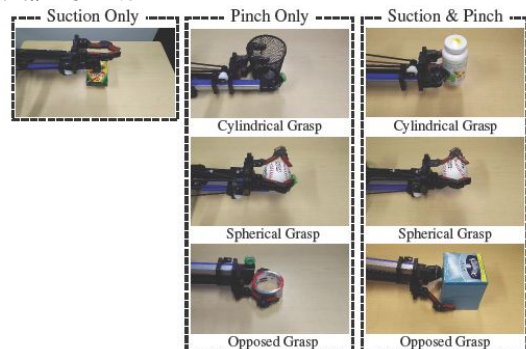
### 4. 研究成果

本研究では下図に示す吸着挟み込みハンドを開発し、その把持性能の評価実験を行った。このハンドは、吸着と挟み込みを同時に行う



ことで多様な物体把持を安定して行うことができる能力と、吸着機構のついた吸着指を差し込むことで、狭隘空間での物体のピッキング能力を有している。

このような強制吸引機構を有するグリッパの把持形態は、吸着機構のみを用いた把持・挟み込み機構のみを用いた把持・吸着機構と挟み込み機構を同時に用いた把持の三種類に分類できる。吸着機構のみを用いた把持は、小さな吸着指のみを狭隘空間に差し込んで、様々な寸法の物体を把持する場合に利用される。この把持は、狭隘空間から物体を引き出した後、吸着機構と挟み込み機構を同時に用いた把持に変化することで、物体を安定に把持した状態になる。吸着機構と挟み込み機構を同時に用いた把持には、筒状把持・球状把持・対立把持の三通りがあり、多様な物体を把持できる。筒状把持は円筒状物体や薄い物体に適し、球状把持は球状物体に最適な把持であるが、多くの場合筒状把持で代用できる。対立把持は高さのある物体や幅の広い物体の把持に利用できることを実証的に明らかにしてきた。



把持戦略としては掌に取り付けた近接覚を用いた試行錯誤型把持操作法を開発した。物体のバウンディングボックスと吸着点を取得するため、物体ラベルと把持アフォーダンスを同時に予測する畳み込みニューラルネットワークモデルを提案した。これは、RGB 入力画像に対し、各物体クラスと物体の

吸着アフォーダンス（吸着目標領域）の確率をピクセル毎に出力する2系統のDNNを構築した。

掌近接センサによる吸着点補正は以下の5段階で構成されている。

1. 目標物体を吸着し、少し持ち上げる。
2. 吸着している物体面が掌に届くようなら、次の段階に移る。もし届いていなければ、以下の段階を飛ばして畳み操作失敗予測に移る。

3. 元の位置に物体を戻し、吸着を切る。
4. 吸着していた物体面が床と区別できるなら、次の段階に移る。もし区別できなければ、以下の段階を飛ばして畳み操作失敗予測に移る。

5. 吸着していた物体面が掌に届く間、物体エッジに向かって吸着点をずらし続ける。

第一段階の持ち上げは、次の段階での判定の信頼性を高める役割がある。例えば、他の物体が目標物体近くにあった場合、吸着開始時点では掌近接センサがそれらの他物体に反応している恐れがあるが、物体を少し持ち上げると、吸着されている物体は持ち上がって掌近くに存在し続けるのに対し、他物体は動かず、掌から離れる。これにより、吸着している物体面が掌に届いているかどうかを、掌近接センサが反応しているかどうかで判断できる。

第二段階では、吸着した物体面が指を動かす上での障害物となるかどうかを判定する。しかしながら、指センサを使っての判定では、センサのついていない部分に吸着面がぶつかる場合を検出できない。そこで、掌近接センサを用いて、吸着した物体面が指を動かす上での障害物となる場合は常に成り立っている条件を用意した。成り立つ理由は、指が吸着パッドから見て掌と同じ側にあり、掌よりも遠い位置にあるからである。

第四段階では、吸着していた物体面が掌に届かなくなったことを第五段階において検出できない場合を事前に判定する。その場合は、第五段階を行った結果吸着点が目標物体から外れてしまうことが考えられるので、第五段階をスキップする。床の上に物体がないときの掌近接センサ値を事前に取得しておき、それと現在値を比較することで判定を行う。

第五段階では、物体バウンディングボックス表面と掌の間を一定距離に保ちながら掌を動かす。掌近接センサ値が顕著に変わった



(a) Recognition of the environment. (b) After suction point refining. (c) Hand pose in suctioning.



(d) Prediction of the folding failure. (e) Folding the target. (f) Inserting the target to the stand.

時に、吸着していた物体面が掌に届かなくなったと判断し、その時点での吸着パッド位置を新たな吸着点とする。

また、検証型の動作生成では物体把持動作の成否を実際にその行動を行ってみるまで明らかにならず、産業応用の場面で重要になるタクトタイム等に大きく影響する。そこで、動作を始める前に、その動作の成否を予測する作業失敗予測とこれに基づく動作選択の考え方を提案した。

対象としては収納作業を想定しおいて、物品の落下、損傷、棚からはみ出しの3つの作業失敗を設定し、この作業失敗を回避する双腕手添え動作を設計する。棚からはみ出しとは作業終了時に棚に物品が完全に収まっておらず、物品の一部が棚の外にはみ出している状態を指す。設計する手添え動作は、単腕で把持している物品の重心をもう一方の腕で下から支えあげることで、物品の垂れ下がりや抑制し、棚の床と把持物品の接触を回避する。把持の際には物品の重心を吸引しているものとして、手添えを行う腕は把持点の重力方向下方から物品を支え上げる。

作業失敗予測と動作選択では、作業安定性を評価して手添え動作を行うべきかどうかを判断する。ここで区別のために、手添え動作を行う収納動作を双腕収納動作、行わない動作を単腕収納動作とする。作業安定性の指標として、本研究では各作業失敗に対して減点を設定することで計算できる作業得点を用いる。物品の把持状態を観測した画像から各作業失敗の発生確率を予測することで、各収納動作を行った場合に獲得できる作業得点の期待値を計算し、これを評価して動作選択を行う。作業失敗予測は画像を入力とするCNNを用い、実際に各収納動作を実行して収集した学習データセットで学習を行う。

作業失敗予測の学習データセットは、単腕・双腕の各収納動作を用いて収納作業を実際に行い、その際の把持物品のRGB画像と作業結果をそれぞれ入力画像と出力ラベルとして収集する。把持物品の画像については、元画像から吸引ハンド手先の深度画像を基に把持物品とハンドの領域のみ自動的に抽出する。この処理の際にマスクされたピクセルの画素値はImageNetのデータセットの平均画素値に置き換える。出力ラベルについては、各収納動作を行った際に作業失敗が発生した場合には1、発生しなければ0のラベルを与える。しかし、ある把持状況に対して単腕・双腕収納動作のどちらかしか実行することができないため、実行していない動作についてのラベルには-1を与える。これによって出力ラベルとして長さ6のベクトルを収集する。

作業失敗予測を行うネットワークはAlexNetを基に設計した。出力層を除く畳み込み層と全結合層の活性化関数にはRectified Linear Unit関数を用い、0から1の連続した値を出力として得るために出

力層には Sigmoid 関数を用いる。また、全てのプーリング層の手前でバッチ正規化を、出力層を除く全結合層でドロップアウトを行う。

学習と損失関数：事前学習として畳み込み層の重みは AlexNet の学習済みモデルのものを用いる。損失関数によって長さ 6 のベクトルから、入力画像が収集された時に行われた収納動作に関する損失を計算することができる。バッチサイズが 1 の場合には、入力画像が収集された時に行われた収納動作に関する損失のみが逆伝播されることとなり、1 つのネットワークから両動作に関する作業失敗予測を同時に行うことができる。

動作選択アルゴリズムは各作業失敗に対して減点を設定することで各収納作業を行った場合の作業得点を計算し、これを作業安定性の指標として評価する動作選択アルゴリズムを設計する。この減点に重みをつけることで各作業失敗をどれだけ回避したいかを表現することができる。本研究では物品の落下を最も回避すべき作業失敗として他よりも重い減点を設定する。作業失敗の発生確率から計算できる作業得点の期待値を計算する。得られた作業得点の期待値を用いて双腕収納動作を行った場合の作業得点の期待値が単腕の場合よりも十分に高い場合のみ双腕収納動作を実行する動作選択アルゴリズムを考案した。

収集したデータセットの 8 割を学習用、2 割を検証用に分割して CNN の学習を行った。データ数が少ないため、10 回ランダムにデータセットを分割して学習を行った。予測精度については、ネットワークの出力について 0.5 の閾値を設定し、その値よりも高ければその出力が示す作業失敗は発生する、低ければ発生しないと予測しているとみなして計算を行った。30 回の平均精度は 72.46% となり、データセットの正解ラベル平均による平均精度の 64.02% を上回った。

実機検証実験として、学習したネットワークモデルを用いて選択的に手添え動作を行

Stowing System	Ave. Score	Ave. Time (s)
Single-arm Stowing System	6.0	52
Dual-arm Stowing System	8.8	67
Our Method	8.8	59



う収納作業システムを構成し、各物品に対して 10 回ずつ試行を行った。比較として単腕・双腕収納動作のみを行うシステムも同様の試行を行った。結果を以下に示す。

検証実験では双腕収納動作は 30 回の試行において 9 回実行され、それ以外の試行では

単腕収納動作が実行された。提案する動作選択システムによって双腕収納動作のみを行った場合と同等の高い作業安定性を実現しつつ、作業遂行時間の延長を抑制することが実現できた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)(査読付き国際学会を含む)

[1] Shingo Kitagawa, Kentaro Wada, Kei Okada, Masayuki Inaba: Learning-based Selective Dual-arm Grasping for Warehouse Stowing, in The 15<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-15), 2018

[2] Naoya Yamaguchi, Shun Hasegawa, Kei Okada, Masayuki Inaba: Daily Assistive Robot Uses a Bag for Carrying Objects with Pre-contact Sensing Gripper, in The 15<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-15), 2018

[3] Kentaro Wada, Makoto Sugiura, Iori Yanokura, Yuto Inagaki, Kei Okada, Masayuki Inaba: Pick-and-verify: verification-based highly reliable picking system for various target objects in clutter, Advanced Robotics, Vol.31, No.6, pp.311-321, 2017.

[4] Kentaro Wada, Kei Okada, Masayuki Inaba: Probabilistic 3D Multilabel Real-time Mapping for Multi-object Manipulation, in Proceedings of The 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.5092-5099, 2017.

[5] Shun Hasegawa, Kentaro Wada, Yusuke Niitani, Kei Okada, Masayuki Inaba: A Three-Fingered Hand with a Suction Gripping System for Picking Various Objects in Cluttered Narrow Space, in Proceedings of The 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1164-1171, 2017.

〔学会発表〕(計 9 件)

[1] 長谷川 峻, 和田 健太郎, 岡田 慧, 稲葉 雅幸: 多種センサ搭載ロボットハンドによる折り畳まれた物体の状態認識把持操作の実現, in 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'18 講演論文集, 2018

[1] 山口 直也, 長谷川 峻, 岡田 慧, 稲葉 雅幸: 指全周に近接触覚をもつ平行グリッパによる収納袋内の物体把持, in 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'18 講演論文集, 2018

[2] Shingo Kitagawa, Kentaro Wada, Kei Okada, Masayuki Inaba: Learning-based

Selective Dual-arm Grasping for Warehouse Picking, in The 32st Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2018

[3] 内海佑斗, 和田健太郎, 岡田慧, 稲葉雅幸: 物体メッシュモデルを用いた学習データ自動生成に基づく透明物体の深度画像予測と家事支援ロボットへの応用 in The 32st Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2018

[4] Kentaro Wada, Shingo Kitagawa, Kei Okada, Masayuki Inaba: Instance Segmentation of Visible and Occluded Regions for Finding and Picking Target from a Pile of Objects, in The 32st Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2018

[5] 長谷川 峻, 和田 健太郎, 岡田 慧, 稲葉 雅幸: 狭隘空間におけるピッキングタスクのための吸着挟み込みハンドの開発, in 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'17 講演論文集, 2P1-B07, 2017

[6] Kentaro Wada, Kei Okada, Masayuki Inaba: Fully convolutional object depth prediction for 3d segmentation from 2.5d input, in The 31st Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2017, 2M1-5, 2017

[7] 北川 晋吾, 和田 健太郎, 岡田 慧, 稲葉 雅幸: 作業失敗の予測学習に基づく棚への収納作業における双腕手添え動作の選択的実行, in The 31st Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2017, 2N2-4, 2017

[8] Kentaro Wada, Kei Okada, Masayuki Inaba: Adaptive Picking Motion Generation with Reinforcement Learning of Perception based on Experience in Robotic Tasks, in 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'16 講演論文集, 1P1-03b3, 2016

[9] 二井谷 勇佑, 和田 健太郎, 長谷川 峻, 北川 晋吾, 板東 正祐, 岡田 慧, 稲葉 雅幸: 物品棚のピッキング作業のための深層学習でのセマンティック画像分割と三次元物品輪郭抽出, in 第 34 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2G2-03, 2016

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕なし

〔その他〕

ホームページ等

[https://github.com/start-jsk/jsk\\_apc](https://github.com/start-jsk/jsk_apc)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 慧 (OKADA, Kei)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教

授

研究者番号: 7 0 3 5 9 6 5 2

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者 なし