把持機能と認識機能の統合による高度なマニピュレーションを実現するための標準的マニピュレーションタスク

ーレジチャレンジの提案ー

○横小路 泰義 (神戸大学)　渡辺 哲陽 (金沢大学)　山崎 公俊（信州大学）

1.　はじめに

1960 年代に本格化したロボット研究は，ヒトの機能を人工物で再現することを目指して始まり，当然のことながら「手」もその対象となった．これまで数多くのロボットハンドが開発されたが，まだヒトの手の機能に比肩するロボットハンドは実現されたとはいえない.「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．

政府の「ロボット新戦略」の一環として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）が行う「次世代ロボット中核技術」プロジェクトは，単なる現在のロボット関連技術の延長上にとどまらない，人間の能力を超えることを狙う革新的な要素技術を研究開発するものである．この次世代ロボット中核技術プロジェクトの調査・先導研究における革新的ロボット要素技術分野の課題の 1 つである「次世代マニピュレーション」として筆者らが申請した「把持機能と認識機能の統合による高度なマニピュレーションの実現」が採択され，神戸大学を委託先，金沢大学と信州大学を共同実施先として調査研究を行うこととなった．

DRC（DARPA Robotics Challenge）のように適切なチャレンジプログラムやベンチマークの設定は研究を加速する効果がある．マニピュレーション分野においても，ロボットハンド，物体認識，作業計画といった個々の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が重要であり，その研究を加速させる適切なベンチマークが必要である．そこで筆者らが実施する調査研究では，把持機能と認識機能を統合した次世代マニピュレーション技術の創成に向けて，要素技術とシステムインテグレーションに関する調査研究を行うとともに，次世代マニピュレーション技術が求められている業種・分野を調査して必要な技術課題を明らかにし，調査研究後の先導研究，さらにその後の本格研究におけるベンチマークタスクとなる標準的マニピュレーションタスクを設定することとした．本報告では，筆者らが提案する標準的マニピュレーションタスクの一つである「レジチャレンジ」を紹介する．

2.　既存のベンチマーク

2015 年にシアトルで開催された ICAR において，物流の中で自動化が最も遅れている商品のピッキング作業をロボットに行わせる競技会 Amazon Picking Challenge（以下 APC）（図 1）が開催された [1]．APC では実際のピッキング作業からはかなり簡単化されているものの，ピッキングすべき（一部隠蔽された）アイテムの認識や，さまざまな形状（変形し得る）や重さのアイテムを，確実かつ破損させることなくピッキングするという課題は，現状の技術では十分チャレンジングである．2016 年にドイツ・ライプツィヒで開催された第 2 回 APC では，対象アイテムが変更・追加されて難易度が増すとともに，棚への収納タスクも追加された．

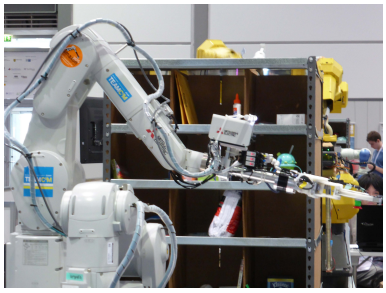


図 1　Amazon Picking Challenge

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 プロジェクトもある [2]．これはローコストで堅牢な多指ロボットハンドのハードウェアを開発するプロジェクト (ARM-H) と，提供されたロボットプラットフォーム（カメラヘッド＋双腕）でソフトウェアを開発するプロジェクト (ARM-S) の 2 つが行われ，ARM-H の成果として将来の実用化を見据えた様々な多機能ハンドが開発された．

YCB Object and Model Set[3]（以下 YCB）は，Yale 大学，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ているマニピュレーション研究を推進させるための対象物群とその 3 次元モデルである．対象物は，形状，テクスチャ（透明を含む），柔軟性といった特性の多様性に加え，入手の容易性と永続性，可搬性も考慮して選定され，リハビリテーション分野での既存のベンチマーク用のアイテムも取り入れられている．YCB は，単に多様な対象物のセットを提案するだけでなく，これらのアイテムを用いたベンチマークをとりそろえて行こうとするところに特徴がある．対象物は，food items, kitchen items, tool items, shape items, task items に分かれ，網羅的というよりもベンチマークとして選んだタスクに必要なアイテムの集合体という印象が強い．

RoboCup では，2012 年から工場での組み立て作業

表 1　アイテムリスト

1	2L ペットボトル	11	スティック状の包装菓子
2	320mL ペットボトル	12	タオル
3	缶飲料	13	ガム
4	紙パック飲料	14	カップ麺
5	袋菓子	15	プラスチックコップ
6	箱菓子	16	手帳
7	おにぎり	17	砂糖
8	あんぱん	18	板チョコ
9	大福	19	液体詰め替え用洗剤
10	チョコレート駄菓子	20	カイロ

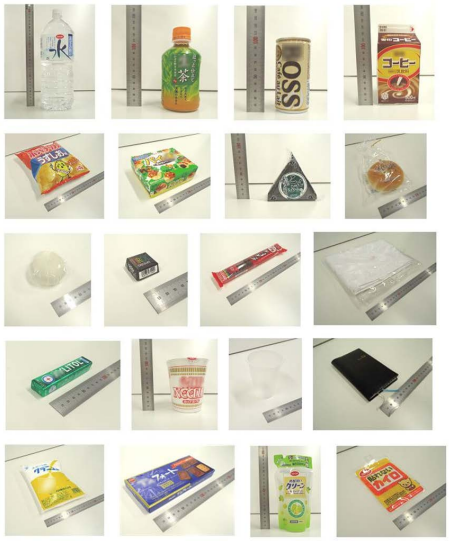


図 2　アイテム

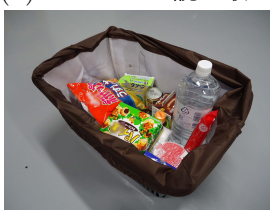
に必要なマニピュレーション作業を含む競技として RoboCup@Work[4] が開催されている．EU でも最近 EuRoC（Europian Robotics Challenge）というチャレンジプログラムが行われており，その中で，Challenge 2 : Shop Floor Logistics and Manipulation がマニピュレーションに関するチャレンジプログラムとなっている．EU では EuRoC 以外にも，Airbus Shopfloor Challenge や RoCKIn@Work[5] などのチャレンジプログラムが行われている．

日本でのチャレンジプログラムに関する動きとしては，ロボット国際競技大会（仮称）がある．政府の「ロボット新戦略」を組織的に推進するためのプラットフォームとして「ロボット革命イニシアティブ協議会」が 2015 年 5 月に設置され，三つのワーキンググループが活動を開始した．その中の WG3（ロボットイノベーション WG）において，ロボット国際競技会サブ WG が設置され，2018 年のプレ大会，2020 年の第 1 回ロボット国際競技大会の開催に向け，ものづくり分野，サービス分野，災害分野の 3 つの分野において競技と展示の内容が検討されているが，具体的な競技種目については現在検討中である．

最近の話題としては，2016 年 10 月に韓国で開催される IROS2016 において，IROS Robotic Grasping and Manipulation Competition[6] が開催される予定となっており，この競技用の対象アイテムやタスクの提案が公募された．

(a) カゴからの商品取り出し

(b) バーコード読み取り



(c) マイバッグへの商品収納

図 3　レジチャレンジ

3.　レジチャレンジ

3.1　タスクの概要

筆者らは，把持機能と認識機能を統合した次世代マニピュレーション技術の創成のためのベンチマークタスクとなる標準的マニピュレーションタスクの一つとして「レジチャレンジ」を提案した.「レジチャレンジ」は，スーパーマーケットのレジ作業（買い物かごからの商品の取り出し，バーコードの読み取り，マイバックへの商品詰め）をロボットに行わせるものであり，タスクの設定においては認識とマニピュレーションの機能を統合することで初めて実現可能なタスクとなるよう心掛けた．

3.2　対象アイテム

対象アイテムは，スーパーマーケットのレジ作業であることを考慮して，スーパーマーケットで販売されているものから様々なサイズ，形状，硬さ（柔らかさ）のものとするため，以下の条件を満たすものを含むように 20 品目を選んだ．

- 1[N] 以上の力を加えると壊れてしまう物
- 1[kg] を超える重量物
- 一辺の長さが 15[cm] を超える大型物
- 全辺が 3[cm] 未満の小型物

選んだアイテムのリストを表 1 に，外観を図 2 に示す．YCB とは違い，現実的なレジ作業を想定して腐敗し得る食品も躊躇なく選定しているが，対象アイテムのバリエーションを増やすために食品以外のアイテムも選定されている．特に「手帳」は「すくい」操作 [7] が必要な物として選定している．20 品目の上限は，際限なく選定することを抑制するための当面の数字であり，今後必要に応じて増やすこともありうる．

3.3 レジチャレンジの３つのタスク

レジチャレンジは以下の 3 つのタスク（図 3）を連続して行う．技術が十分でなく連続して行うことが困難な場合は，個々のタスクを適当な初期状態から個別に行っても良い．

STEP1: カゴにからのアイテムの取り出し カゴの中には，20 品目の対象アイテムのうち適当数の品目のアイテムが乱雑に入れられている．同一品目のアイテムが複数個入れられている場合もあるとする．ロボットはカゴからアイテムをひとつずつ傷つけることなく取り出さなければならない．このタスクでは，様々なアイテムの認識，安定把持，ピッキングの動作計画などが重要な技術要素となる．

STEP2: 取り出したアイテムのバーコードをスキャン 通常のレジ作業と同様に，取り出したアイテムに付与されているバーコードをバーコードリーダーでスキャンする．バーコードをスキャンするためには，まず取り出したアイテムのどこにバーコードがあるのかを探し出さなければならない．把持したハンドによってバーコードが隠れている場合は持ち替え操作が必要になる．また実際のレジ作業でも起こりうることであるが，バーコードの印刷面が凹凸になっていると正しくバーコードが認識されず，その際はバーコードの印刷面を平らに均す操作が必要になる．このように，このタスクでは持ち替え操作を含む一種のマニピュレーション操作を必要とする．認識機能の面では，バーコードの位置認識が必要であり，物体認識の結果からバーコード位置の候補を絞り込み，探索を効率化することも可能であろう．

また一旦バーコードが正しく読み取れた後は，取り出したアイテムに関する様々な情報をデーターベースから取り出すことが可能になり，事前にどのような情報をデータベースに蓄えておくかも検討課題となる．この STEP2 は現状の APC にはない要素である．

STEP3: アイテムをマイバッグに詰める アイテムをマイバックに詰める作業は，ピッキングとは逆のプレース作業であるが，重いものを下にして壊れやすいものを上にするなど，詰める順番に配慮が必要である．また STEP1 ではアイテムはある程度乱雑にカゴの中に入っていたが，このタスクではなるべく隙間がないようにコンパクトにアイテムを詰めていかなければならない．すなわちアイテムのサイズ，重さ，壊れやすさなどの情報（これらの情報は STEP2 で既に獲得済み）を参照して，詰め込み順や詰め込み方の計画が必要であり，隙間なく詰める作業は，プレース作業というよりは一種のアセンブリ作業ともいえ，第 2 回 APC で要求された Stow 作業よりもさらに難易度の高いものである．

以上述べたように，提案するレジチャレンジは単にレジ作業の自動化だけにとどまらず，むしろ具体的に設定したレジ作業の実現を通してピッキング作業だけでなくマニピュレーション作業やアセンブリ作業への発展が見込めるように工夫したものである．特に STEP3 の作業は，個人向けのネット販売などでも必要なパッキング作業への応用も見込める作業である点に注意されたい．

図 4　D-hand による 2L ペットボトルの把持実験の様子

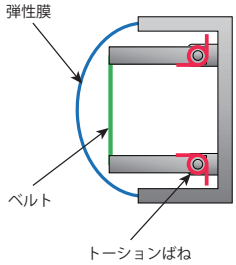


図 5　ハイブリッド柔軟指 [8]

4. レジチャレンジの事前検証と課題

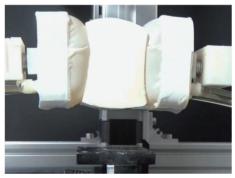
4.1 既存ハンドによる把持実験と汎用ピッキングハンドに求められる機能の明確化

レジチャレンジで選定したアイテムが既存のハンドでどの程度ピッキング可能かを検証した．既存ハンドの一例として，3 関節の劣駆動指 3 本を単一のアクチュエータで駆動する D-Hand（ダブル技研 TypeA3H）による把持実験を行った．この実験時に対象とした 20 品目は表 1 に示したものと一部異なっていたが，様々な初期姿勢からピッキングを試みて一つの姿勢だけでも成功したものは 20 品目のうち 8 品目のみであり，失敗した原因を分析することでピッキング用ハンドに必要な機能として以下が明確化された．

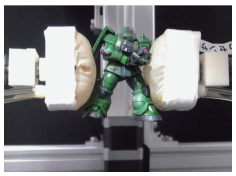
- 床とアイテムの間に指先を差し込む機能
- アイテムと指先に発生している力を計測，制御する機能
- アイテムの一部に力が集中することを防ぐ機能
- 指先の滑りを防止する機能
- 大きい把持力を発揮する機能

4.2 柔軟指

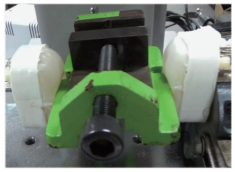
前節で明確化した機能のうち，アイテムの一部に力が集中することを防ぐ機能と指先の滑りを防止する機能については，金沢大学の渡辺らが提案する柔軟指 [8] が一つの解決策となりうるので，ここで簡単に紹介する．図 5 に柔軟指の構造を示す．流体（チェーンソーオイル (ISO VG 100)）を弾性膜（ニトリルゴム）内に充填している．トーションばねにより開閉できるマイクログリッパが内臓され，その先端部は非伸縮性のベルトによりつながっている．この構造により，柔軟であ



(a) 豆腐



(b) フィギュア



(c) バイス

(d) ペットボトル

図 6　柔軟指による把持例

図 7　動力付き小型自動車模型

りながら高把持力を発揮できる指となっている．柔軟指では接触圧力分布が一様となるため，壊れやすいものや不定形のものであっても容易に把持が可能である．この柔軟指によるアイテム把持の一例を図 6 に示す．

4.3　アイテムの物体認識ための課題

レジチャレンジでリストアップした操作対象物を認識するために必要なセンサと情報処理に関する簡単な考察を以下に述べる．まず箱ものや缶などの模様付き定形物に関しては，バラ積み状況下でのピッキングは既存技術で可能であり，認識に必要なセンサとしてはカメラやレーザ距離計などの非接触センサが考えられる．

不定形物については，単独で置かれている特定種の物品のみを対象とした場合には，研究開発事例が多く存在する．具体的には，変形モデルに基づいて食品の摘み上げをおこなう事例 [9] や把持すべき特定部位をカメラ等により検出して掴み上げをおこなう事例 [10] などである．ただし，ビニール袋のように透明で認識がしづらく，かつ大変形が起こりうる対象物に関しては確立した技術は存在しない．

以上より，提案するレジチャレンジは STEP1 の作業だけをとっても，定型・不定形の物品（透明部位あり）がバラ積みされた状況下でのピッキングであり，視覚・触覚ともに適切なセンサ情報処理手法は未だに存在せず，物体認識としても大きな研究課題であることが分かる．

5.　おわりに

本報告では，筆者らが現在実施中の「次世代ロボット中核技術」プロジェクト／革新的ロボット要素技術分野の一課題である「把持機能と認識機能の統合による高度なマニピュレーションの実現」において提案した標準的マニピュレーションタスクの一つである「レジチャレンジ」を紹介した．様々なマニピュレーションやピッキングに関するチャレンジプログラムの中で，提案する「レジチャレンジ」は，多彩でかつ現実的なアイテム，ピッキングだけでなくマニピュレーションやアセンブリにもつながるタスク設定，物体認識やマニピュレーションといった個々の要素技術ではなくそれらが統合されたシステムとしての評価を重視した点に特徴がある．また物体認識に限っても多くの研究課題があることが分かった．

「レジチャレンジ」は今回提案したものが最終形ではなく，今後アイテムの追加やタスクの内容の一部変更など，今後の変更の可能性を十分に含んでいる．この分野の研究者各位のご意見を是非頂戴したい．

筆者らは「レジチャレンジ」に加えて，組み立て作業に特化し，より難易度の高い標準的マニピュレーションタスクとして，図 7 に示すような動力付き小型自動車模型の組み立てタスクも検討中である．タスクの選定にあたっては対象部品の入手容易性も考慮している．柔軟部品としてはゴムタイヤや外装シールがあり，現状のマニピュレーション技術では極めて難しいタスクであるが，標準的マニピュレーションタスクとして妥当であるかを今後さらに検討していきたい．

謝辞

アイテムの選定，既存ハンドによる把持実験，汎用ピッキングハンドに求められる機能の明確化には，神戸大学大学院生の高松駿太君の協力を得た．また信州大学学部生の田中大輔君にはレジチャレンジの実装例の協力を得た．ここに感謝します．

参　考　文　献

[1] http://amazonpickingchallenge.org/

[2] D. Hackett et al., “An Overview of the DARPA Autonomous Robotic Manipulation (ARM) Program,” 日本ロボット学会誌, vol.31, no.4, pp.326-329, 2013.

[3] B. Calli et al., “Benchmarking in Manipulation Research: Using the Yale-CMU-Berkeley Object and Model Set,” IEEE Robotics & Automation Magazine, vol.22, no.3, pp.36-52, Sept. 2015.

[4] http://www.robocupatwork.org/

[5] http://rockinrobotchallenge.eu/work.php

[6] http://www.rhgm.org/activities/competition_iros2016/

[7] 吉塚, 横小路, “人の手のピッキング動作の筋骨格モデルに基づく解析とロボットハンドによる実現の検討,” 第 58 回 自動制御連合講演会, 2J1-4, 2015.

[8] 西村, 藤平, 渡辺, “把持耐力向上のためのマイクログリッパ内蔵の流体指の開発,” ロボティクスシンポジア論文集, pp.274-279, May, 2016.

[9] 谷口, 平井, “ロボットハンドによるレオロジー物体のピックアンドプレース,” ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 1A2-J03, 2012.

[10] A. Ramisa et al., “Using depth and appearance features for informed robot grasping of highly wrinkled clothes,” in Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1703–1708, 2012.