汎用ロボットプラットフォーム AERO の 競技会を通じた継続的開発評価

矢口 裕明^{*1} 溝花 弘登^{*1} 堀 慎太郎^{*1} 笹 渕 一 宏^{*1}
長 濱 虎太郎^{*1} 齋 木 拓 也^{*2} 椎 木 靖 人^{*2} 稲 葉 雅 幸^{*1}

A Continuous Development and Evaluation of Multi Purpose Robot Platform AERO via Competition

Hiroaki Yaguchi^{*1}, Hiroto Mizohana^{*1}, Shintaro Hori^{*1}, Kazuhiro Sasabuchi^{*1},
Kotaro Nagahama^{*1}, Takuya Saiki^{*2}, Yasuto Shiigi^{*2} and Masayuki Inaba^{*1}

In this paper we describe a continuous development and evaluation of multi purpose platform robot AERO via robot competitions. We participated to 4 robot competitions requiring different task with human size semi humanoid robot AERO, has same basic structure. For many types of competition tasks, the robot was designed as simple, robust, small and lightweight, furthermore it can be change parts for another situation of task. The versatility of the robot platform was increased from continuation of task analysis, consideration of requirements, and implementation. In this paper we describe a continuous integration of robot design, cycle of task analysis, implementation and integration, via robot competition.

Key Words: Platform Robot, Robot Competition, Continuous Integration

1. 序論・競技会とロボット

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、福島第一原子力発電所の過酷事故が発生した。本事故を通じて人の立ち入れない状況でのロボットの重要性に注目が集まり、米国国防高等研究計画局 DARPA による原子力発電所の過酷事故を想定したロボット競技会 DRC: DARPA Robotics Challenge が開催された [1]。本競技会の予選において日本のベンチャー企業 SCHAFT が優勝した [2] ことで、競技会参加による技術アピール効果が期待されることとなった。DRC 以降新規のロボット競技会が開催された例として通販会社 Amazon による自社倉庫における商品選別作業を題材とした APC/ARC: Amazon Picking / Robotics Challenge [3] があり、また日本においても 2020 年に WRS: World Robot Summit [4] が開催される予定である。一方、DRC 以前よりロボット競技会は存在している。森 [5] により提唱されたロボコンは様々な形態で実施され、非常に高い教育効果をあげている。またサッカーや災害救助、生活支援など様々な競技を行うリーグによって編成される国際大会 RoboCup [6] がある。

競技会は点数を競うものである。そのため、ルールに沿った構造のロボットのほうが有利であるが、そのようなロボットは競技以外の汎用性に乏しく、とすれば局所最適化に陥る。NimbRo

の例では、災害対応 [7] と倉庫内作業 [8] とでは異なるロボットを用いている。他方、RoboCup の中でも家庭内での生活支援を目的としたリーグである RoboCup@Home では 2017 年より標準プラットフォームとしてトヨタ社製の移動台車型単腕ロボット HSR と Softbank 社製のコミュニケーションロボット Pepper を採用している [9]。汎用性の高いプラットフォームロボットの活用形態の一環として競技会を通じて運用評価を行うという取り組みであるが、この場合プラットフォームの性能に引きずられてルール自体が設定されることになりかねない。実際に RoboCup@Home 2017 では HSR と Pepper 用にそれぞれ独自のルールが設定された [10]。

プラットフォームとして構築されたロボットで多種多様な複数の競技タスクに対して独自制限を課さずに取り組もうとしたとき、ロボットそれ自体の汎用性を高めることはもちろん、必要であれば拡張や部品換装を行うことで適用範囲を広げていくことができれば単一のロボットであっても段階的に汎用性を獲得できると考える。特に DRC における建屋内作業、APC における倉庫内作業のように人間の作業空間において人間と同等の作業能力が求められるタスクを課す競技会が複数存在し、人間と同等の作業領域を持たせることで単一のロボットで複数のタスクをこなすことが可能である。我々は 2015 年 6 月に開催された DRC の最終競技 DARPA Robotics Challenge Finals において、汎用ロボットプラットフォーム AERO を投入した。本機は単一の競技会にとどまらず、多数の異なるタスクをこなす競技会にも拡張と換装を重ねて参加してきた。プラットフォームとして共通の基本構造を根幹に据えつつ、複数の競技会で繰り返し要件分析、開発、改良を行うことで、ロボットプラット

原稿受付 2018 年 3 月 23 日

^{*1}東京大学

^{*2}THK 株式会社

^{*1}The University of Tokyo

^{*2}THK Co., LTD.

■ 本論文は有用性（システム設計・構築分野）で評価されました。

フォームとしての汎用性を高めることを目的として継続的に開発を行い、適用範囲を広げてきた。

本論文では汎用ロボットプラットフォーム AERO を競技会を通じて継続的に開発評価を行ったことについて、課題整理と解決策、その評価を通じて論ずる。

2. 汎用ロボットプラットフォームに関する関連研究

最初期のヒューマノイドロボットプラットフォームであり、災害対応競技会にも出場していた HRP2 [11] や軽量版の HRP4 [12] の場合、2 足歩行による段差乗り越えや接地面積の小ささがメリットとなるが、常にバランス制御を行わなければならない、吊り上げのためのテザーを必要とする。加えて自己干渉によるモータや構造材の破損が容易に起きるため、自己干渉回避計算を必要とし [13]、障害物への衝突にも注意が必要となる。より高出力なプラットフォームを目指し、DRC Finals で用いられた油圧アクチュエータ駆動 [14] によるヒューマノイドロボットプラットフォーム Atlas [15] の重量は 156 [kg] で、HRP2 (58 [kg]) に比べ 3 倍ほど重く、転倒時の衝撃力が増している、脆弱な地面での活動ができない、というデメリットもある。

一方で、ロボットプラットフォームとしての扱いやすさを考えると、PR1 [16] や後継機の PR2 のような車輪による効率的な移動と低出力で柔軟な関節による衝突安全性が非常に有用である。ただし PR2 の接地面積は室内空間に比べて大きく、また自重補償用のカウンターウェイトにより重量もある。トヨタ HSR [17] [18] は単腕のみで作業能力を限定した代わりにフットプリントや重量を小さく抑えており、最低高さ 1,030 [mm]、直径 430 [mm]、重量 37 [kg] となっている [19]。車輪移動は本質的に安定しているが、一方で走破性に問題がある。一般家庭においてもわずかな段差や階段は存在し、それらが移動の障壁となりうる。

これらの先行研究から分かることは、おのおののプラットフォームには一長一短があり、単一の構造や形態のみでは作業タスクが限定されるということである。例えば脚型は不整地移動や接地面積の小ささで有利であり、車輪移動は平坦地での移動や安定性に優れるが、前者は転倒の危険性があり、後者は段差乗り越え能力との両立に問題がある。特に人間と同等の作業領域を考えた場合、大きすぎるロボットでは活動できる空間が、逆に小さすぎると作業や移動の能力自体が制限される。

また、壊れない、壊さないための工夫が非常に重要である。破損のリスクは修理部品および工数のコストだけでなく、リスクヘッジのためにオペレータの心理的ブレーキがかかり、ロボットの運用そのものが抑制されるおそれがある。

一方プラットフォームロボットには様々なタスクに適用できる汎用性が求められる。部品換装による拡張の例として、HRP2 では下半身を車輪移動台車に交換する事例 [20] があるが、容易に換装できるものではなく、構造的な解決が求められる。

3. 汎用ロボットプラットフォーム AERO

本章ではプラットフォームロボットの設計思想について述べる。まず我々が求めたものは、人間の作業空間内で人間と同等のサイズの作業空間を確保できるような人型の汎用プラットフォームである。競技会に特化した形態を取るのではなく、あくまでも人間と同じ空間で作業をするロボットとして基準を設け、そのうえで様々な作業能力を達成することを第一とする。

次に、耐久性と信頼性である。DRC Finals では競技会中にロ

ボットの転倒が頻発したが、これはルール上転倒防止用のテザーの使用が禁止されたためである。実際の作業環境でもテザーの設置自体が高コストであるため、テザーを使わず運用できることが好ましい。そこでまず転倒そのものを起こしにくい設計とすること、万一の転倒によっても致命的破損が起きないことが前提条件であった。また同様に自己干渉や衝突による破損を防ぐことも重要である。

一方でそもそも汎用プラットフォームに完成形はなく、要素部品の性能向上やこなすべきタスクによって基準となる性能、求められる要件は容易に変わりうる。だからこそ継続的な開発が必要であって、性能向上や要求仕様の変化を部品交換により達成できるような、簡単に改造できるプラットフォームが好ましい。例えば下半身を状況に応じて脚型や台車型に変更したり、対象物に応じてエンドエフェクタを交換したりすることが容易なロボットであれば、より多くの状況へ対応できる。

これらを解決するためにロボットプラットフォームには以下のような特徴をもたせた。

3.1 低出力、ドライバ温度管理、脱調による脱力に基づく破損耐性向上

一部関節の減速機としてボールねじを用い、Fig. 1 に示すような直動とリンク機構による関節駆動とした。直動にすることで関節軸から離れた場所にアクチュエータを設置でき、リンクのレバー比を力の増幅に利用でき、かつバックラッシュの少ないボールねじを使うことで力のロスも少ない。さらにボールねじは歯飛びといった現象がなく、従来の歯車式減速機に対して壊れ難いという特長がある。ほかに腰と首、手首関節には差動リンク関節を用いており (Fig. 2)、二軸の同軸配置をコンパクトに収めることが可能である。主要な関節には Fig. 3 に示すようなばねを組み込むことで、カウンターウェイト方式よりも軽量の自重補償機構を実現し、ホールディングトルクを抑えている。また、過負荷によるモータの破損を避けるため、ブラシレスモータではドライバの温度管理を行っており、過熱時には電流を抑制して脱力する。さらに関節の多くはステッピングモータを採用しており、ステッピングモータは過負荷で脱調す

Fig. 1 Design of shoulder pitch joint (linear link)

Fig. 2 Design of wrist joint (differential link)

Fig. 3 Mechanism of self weight compensation

ることで脱力する。このようにモータからドライバまで包括した構造検討を行うことにより、破損耐久性を向上させている。

3.2 スマートアクチュエータを用いた拡張可能な配線

各関節の駆動系は、モータ、減速機、ドライバ、通信回路を一体化させたスマートアクチュエータを採用している。スマートアクチュエータ同士の接続は電源線を含めて4線ケーブルによるデジータチェーン接続となっており、コネクタ1個の接続のみで配線されている。このネットワークは上半身と下半身で別系統となっており、半身まるごとの換装は非常に容易である。また手先をまるごと交換する、手先にアクチュエータを一つ追加する、といったネットワーク内の部分的な換装についても、アクチュエータごとのID管理を行うことで可能としている。

4. 継続的開発によるロボットタスクの開発手法

AEROを用いて、災害対応、農作業、倉庫内作業、店舗内作業といった目的の異なる四つの競技会に出場した。これらの競技会の選択については、人間が現在手で行っている作業の代替であることを基準とした。災害対応では通常人間が行う発電所内の作業を緊急時にロボットで代替することを目的としている。農作業ではトマトの収穫作業の代替が求められる。倉庫内作業では人間が用いている棚やかごをそのまま使った作業となる。店舗内作業においても同様に、客が存在する店舗内で、客がアクセスする棚や商品の取扱いを人間と同様に行う必要がある。それぞれの競技会において競技の枠組みだけでなく、プラットフォームロボットとして求められる機能の構築と新規技術の研究開発について独自に目標を定め、問題点の導出と機能実装を継続的インテグレーションを参考とした段階で開発していく。

4.1 ロボットシステムの継続的開発

継続的インテグレーションとはソフトウェア開発における手法で、新機能追加やコード修正のリクエストを出した瞬間、デिलリービルドのような定期的なタイミング、マイルストーンのような長期スケジュール、といった段階においてビルドやテストを行うことで継続的にシステムの健全性を保ちつつ開発を進める手法である。これをロボットにおける開発に応用し、ロボットが持つ基本機能をソフトハード関係なく継続的に開発を行いつつ、競技会タスクに基づいてロボットの提供サービスの内容とマイルストーンを決定し、タスクの達成度をロボットシステムのテスト要件とすることを本論文では継続的開発とよぶ。このような開発段階を経て、各タスクにおいて共通して求められる機能はロボットの基本機能として改良されていき、また各タスク固有の機能はロボットのできることを拡張していく。

4.2 モデルベースアプローチに基づくロボット運用

基本的なアプローチとして、ロボットの運用はモデルベースのアプローチを取る。筆者らはこれまでにEusLisp [21]を用いた幾何学モデルに基づくロボットソフトウェアシステムを継続

して開発してきており、Okadaら[22]はEusLispを用いた既知の幾何学モデルとセンサ情報の照合に基づく動作システムを構築した。Yamazakiら[23]はモデルとセンサ情報の照合から複数タスクにおける失敗検知と再試行により連続タスク実行をするシステムを構築した。これらの先行研究ではロボットは身体および周辺環境のモデルを持ち、行動の結果環境がどう変化するのかを予測し、センサ情報から予測と実際の差異を推定することで修正を行う。この考え方を各競技会でも踏襲する。特に競技会はタスク要件としてのルールがモデルを定義すると捉えることができる。すなわちどのような物品がどのような配置で存在するかがある程度決められており、不確定性はある程度の範囲、例えば姿勢のずれや多少の大きさの差異、といったところに留められる。この状況では不明点を推定しながらモデルベースによるアプローチがうまく機能することが期待される。

5. 競技会タスクにおける開発評価

本章では各競技会タスクにおける開発評価について、タスク要件とそれを達成するためのロボットシステム実装、競技会における評価について述べ、最後に全体を通じた考察を述べる。

5.1 DRC Finals: 災害対応

5.1.1 タスク要件

DRC Finalsは米国国防高等研究計画局 DARPA が主催し、2015年6月にアメリカ合衆国カリフォルニア州ポモナで開催された。この競技会は原子力発電所の過酷事故を想定したものであり、自動車運転と降車もしくは100[m]の不整地走行、ドア開け、バルブ回し、ドリル操作、当日まで内容を伏せられているサプライズタスク、段差踏破もしくは障害物除去、階段昇り、という複数のタスクを組み合わせたものとなっている[25]。1時間の制限時間の中でロボットは釣り上げや電源供給のための有線設備を備えてはならず、自立した状態で独立した電源を用いて動き続けなければならない。また、階段を登ることをはじめとして、不整地での移動が求められる状況が多い。さらに屋内に進入した後は通信制限がかかるため、オペレータサイドが確認できる情報が限定される。

5.1.2 ロボットシステム

本競技会ではAEROはFig. 4に示すように上半身を人型とし、下半身を車輪付き四脚とした構成をとった。下半身が4脚である理由は、2脚に比べて静的に安定していること、歩行ができることで段差乗り越え能力が車輪移動より高いことが挙げられる。また車輪付きとしたことで移動台車と同様の走行も可能である。さらに、膝の曲げ角を調整して腰の高さを変えることで作業空間を上下に移動させることができる。

我々固有の問題として、AEROはハードウェアの完成が本戦半年前であり、そのためタスクに取り組める期間は非常に短く、新規に作成したハードウェアに対して短期間でロボットの全身を制御できるようなコントローラの開発が急務であった。このような場合、既存のフレームワークに適用し、これまでに構築してきた様々なソフトウェアを活用することが最短となる。このようなフレームワークとしてコンポーネントの組み合わせによるシステム構築のためのRTミドルウェア実装OpenRTM [26]、Publish / Subscribe方式によるフレームワークROS [27]がいずれもオープンソースで提供されており、これらに準じたソフトウェアも多数配信されている。今回はOpenRTMに準拠したヒューマノイドロボットフレームワークであるOpenHRP [28]、さらにOpenHRPとROSをブリッジし、またEusLisp用のロ

Fig. 4 AERO 4 Legs [24]

ボットモデルを生成できる hrpsys-ros-bridge [29] を用いた。

しかし、特にその特徴的な構造から、ロボットのモデルやコントローラをロボットフレームワークに落とし込むことが困難な点があった。一つは、関節角度を直接指令できないことである。これについては、ボールねじのストローク量と関節角度を近似した変換テーブルを持たせることでクリアした。もう一つは、4脚ロボットとしたことによる人型からの乖離である。OpenHRPを用いた場合、リムは両手両足の四つであることが前提条件であったが、本機は六つのリムを持っている。そのため、このままでは OpenHRP および EusLisp への対応を行うことはできなかった。本機には上半身と下半身が別々の通信網を持っているという特徴もあったため、上半身を通常の半身ヒューマノイドロボットとして、また下半身を手と足が同じ構造をもつヒューマノイドとして定義し、二つのロボットを合体させることで EusLisp 上のロボットモデルとした。

5.1.3 タスク記述

EusLisp 上のロボットモデルがあるため、各タスクにおいて行うべき動作計画を三次元幾何モデルを用いたシミュレーション環境で設計できる。また本競技会では遠隔操縦を前提としていたため、HRP2 用にすでに構築してあった EusLisp を用いた遠隔操縦システムを HRP2 と互換性を持たせる形で適用し、競技会に臨んだ。

5.1.4 評価と考察

移動能力については、事前の練習走行では凹凸が激しく、傾きがあり、側溝蓋などが混ざる路面でも舗装路であれば 100 [m] 以上を自走できることが分かっていた。本番の路面は Fig. 5 に示すような砂地であり、ところどころに砂だまりが存在し、砂だまりにはまるとオムニホイールが埋没し、完全にスタックした状態となると過負荷でホイールを駆動できなくなることが分かった。歩行による脱出を試みたが、砂地に埋まった足が完全に脱出できず、関節のモータが過負荷でとまり転倒したり、歩行移動量が極端に少なく、現実的な脱出手段として成立しなかった。車輪移動ではほかにも障害物除去において障害物を掃き出して進行することを試みた (Fig. 6) が、機体重量の軽さと重心の高さから直後に転倒したものの、ダメージは皆無であった。また、階段昇りでは足を 1 本ずつ段にのせていくことで 4 足歩行での登頂を計画していたが、時間切れで評価できなかった。事前検証では各足の自由度が 3 自由度と少なく、静的に安定できる 3 脚支持範囲が狭いことが分かっていた。

Fig. 5 Desert running task

Fig. 6 Debris task

Fig. 7 Door task

Fig. 8 Surprise task

作業性については、アクチュエータの性能上 2[kg] 程度の可搬重量を確保していた。また足の姿勢を変化させることで上半身の高さを静的に変更できるため、上下の作業範囲を広く取ることができた。事前の検証実験ではバルブ回しを、競技中にはドア開け (Fig. 7) を完遂できた。一方で手首の可動域が狭いためドリルの姿勢やホースのコネクタを任意の姿勢にすることが難しく、競技中にも Fig. 8 に示すサプライズタスク：ホースコネクタの付け替えを完遂することができなかった。特にこれらの操作は単純な手先位置指示による遠隔操縦で行われており、時間がかかる非効率的なものであった。

5.2 第 2 回トマトロボット競技会：トマト収穫

5.2.1 タスク要件

第 2 回トマトロボット競技会は九州工業大学社会ロボット具現化センターらが共催し、2015 年 12 月に福岡県北九州市で開催された [31]。この競技会はトマト畑を模した環境でトマト果実を収穫するものであり、第一段階では単体の果実、第二段階では房から果実を 1 個ずつ、第三段階では苗からの果実収穫をそれぞれ 10 分の制限時間で行う。移動は人工芝の上の自由移動かレール上を選択することができ、また操縦方式を、機体のすぐ横でオペレータが操作可能な直接操縦、機体や競技場の様子を目指できない遠隔操縦と開始終了以外の操作ができない自律行動の中から選択でき、選択した方式により得点倍率が変化する。今回は自由移動と遠隔操縦を選択した。また誰にでも取り扱うことのできるシステム構築をテーマとし、初学者である三年次ゼミ生を中心としたチーム開発を行った。

5.2.2 ロボットシステム

DRC Finals ではロボットのソフトウェアフレームワークに落とし込むことで、ROS および EusLisp を用いたほかのロボットとの互換性を持ったコントローラを構築した。これを応用し、初学者でも短期間に開発運用ができるシステム構築を行う。

ロボットの機体構成を Fig. 9 に示す。DRC では下半身を 4 脚にすることで歩行による段差乗り越えなどを期待したが、一方で平地では転倒のリスクを負うことになるというデメリットがある。そこで、本競技会からは安定性を考慮した全方位移動台車 (図中 3) を採用した。特に 4 脚のメリットとして上半身

Fig. 9 AERO (Tomato Harvesting) [30]

の高さを変えることができたことが作業領域の拡大や姿勢の安定につながったため、二自由度リフター（図中 2）を組み合わせ下半身を構成する。この下半身そのものを換装するという拡張に対応するため、上半身と下半身を切り離して構築していた状況をそのまま利用し、下半身を新しいロボットとして既存の上半身と合体させることで制御ソフトウェアを構築した。

エンドエフェクタについては、把持操作だけでトマトを収穫することは非常に困難であり、収穫用のはさみ（図中 8）を用いることとする。これは刃の下にばねによるグリッパがついたはさみで、切断時に刃を閉じるとグリッパが果柄を掴み、果実を保持することができる。刃を開くとグリッパが開放されて果実を放す。片腕のグリッパはこのはさみを駆動させるための構造に変更してあるが、指の開閉がはさみの開閉に変わったのみで自由度に変化はないため、ソフトウェア自体には変更を加えていない。また果実がはさみに押されることを防ぐため左手に図中 6 の補助板を装着して双腕での作業を行う。さらに腹部に収穫したトマトを収納するかごを設置した（図中 1）。

センサとして図中 5 に示したステレオカメラを用いるほか、遠隔操縦のために図中 4 の全方位カメラ、図中 7 の手先カメラを用いる。この二つのカメラは GigE での映像取得が可能であり、ロボットからは独立してネットワークに接続されている。

5.2.3 タスク記述

災害対応タスクで遠隔操縦システムが上手く機能していたため、これを継承してトマト収穫を行う。一方で完全遠隔操縦のために時間がかかっていた反省から、外乱の影響を受けない要素については定形動作を用意する。Fig. 10 に遠隔操縦システムの概要を、Fig. 11 にこれを用いた収穫の様子をそれぞれ示す。ロボットとオペレータ PC は LAN で接続されているが、オペレータがロボットを直接視認することはできない。そのため、オペレータ PC にはロボットの三次元モデル（Fig. 11 中 A-3）と頭部と手先の二台のカメラの映像（Fig. 11 中 A-2）が提示される。Fig. 11 中 A-1 の GUI には基本動作がまとめてあり、オペレータはボタン指示によってロボットを操縦する。

収穫時は、まず手先をトマト果実に接近させ（Fig. 11 中 B-1）、開いたはさみの刃先で果柄をはさみ込み（同 B-2）、はさみを閉じて切断する（同 B-3）。この際はさみを再度開くまで果実を保持し続けるため、このまま手先を引いてかごに誘導する（同 B-4）ことで一連の収穫動作が完了する。

Fig. 10 (Top) Environment of Tomato Robot Competition, (Bottom) Software Diagram for Harvesting

Fig. 11 (A) GUI for Teleoperation, (B) Result of Tomato Harvesting

5.2.4 評価と考察

競技会決勝ステージでは、移動を含めた 10 分間で 6 個のトマト果実を実際の苗から収穫することができた。災害対応に比べて簡易な操作系としていたことで、ロボット開発初心者である講義受講生でも正確に操作できたことが要因として挙げられる。特に初学者の場合、自己干渉など様々な理由でロボットを破損させることが多いが、本機は自己干渉では原理的に破損せず、事実開発期間を通じて破損は起こらなかった。破損を恐れずに挑戦的な試行ができることに加え、ソフトウェア面での有用性として、ROS を用いたほかのソフトウェアとの連携が容易であることも初学者によるプログラミング習得の一助となっていた。また、はさみを用いたエンドエフェクタが簡単に換装できたことでその収穫を達成することができ、ハンドそのものを容易に交換できることが大きなメリットになることが分かった。一方で、認識、動作計画との連携に至らず、遠隔操縦となった。よって完全自律動作の実現が次の課題となる。

Fig. 12 AERO (Picking Challenge) [32]

5.3 Amazon Picking Challenge 2016：倉庫内商品集配

5.3.1 タスク要件

APC: Amazon Picking Challenge 2016 は Amazon Robotics が主催し、2016 年 7 月にドイツ連邦共和国ライプツィヒで開催された。この競技会は実際の倉庫で用いられている棚や商品を用いて完全自律行動による商品取り出しと収納を実現することが求められる [34]。ルール概要は、Fig. 13 (a) の規定の物品棚と Fig. 14 (a) の 38 品目の対象物品について、収納タスク：カゴの中にある物品を任意の仕切りに収納する、取り出しタスク：指示された物品を取り出してカゴに入れる、をそれぞれ制限時間 15 分以内に行う。このときカゴと Fig. 13 (a) 中 A-L で示した棚の各仕切りに何が入っているかはすべて既知であるが、その中でどのような姿勢をとっているかは未知である。

5.3.2 ロボットシステム

Fig. 12 にロボットシステムの概要を示す。本競技会での問題点として、小柄であるがゆえの作業領域の狭さが挙げられる。ルール上は 2×2 [m] までのフットプリントが許可されており、実際優勝した Delft はこのサイズの中で産業用ロボットアームを前後に動かすステージを用いていた [35]。一方本機のフットプリントは 1 [m] 四方に満たない。水平方向への領域の拡大は移動台車を用いることとし、次に問題となるのは棚の高さである。Fig. 13 (a) に示すとおり、最上段の棚板までの床面からの高さは 1,450 [mm] あり、この高さで手先が十分物品を操作できる姿勢を取ることが最低条件である。方針として事前にロボットと棚のモデルを作成して検討し、リフターを大型の物へ換装することで対応した。

エンドエフェクタは Fig. 12 左に示すように、汎用のつまみ方式グリッパのほかにセンター把持のグラスプグリッパ、掃除機を利用した吸引アタッチメントを用いた。これは棚の前面からアプローチした際のつかみやすさと紙のような薄い物体への対処のためである。ソフトウェア側も部品換装への対応のため、上半身、下半身、グリッパといった換装される部品ごとに別々にモデルやコントローラを用意しておき、設定ファイルにどの部品を使ってロボットを構築するかを記述することでソフトウェアを生成することとした。

5.3.3 タスク記述

競技会に際して重要視したのは、競技内容を抽象化し、倉庫以外での一般的な品出し、収納タスクへと適用できるフレーム

Fig. 13 Shelf configuration

Fig. 14 Items in the warehouse task

Fig. 15 Pick Task [33]

Fig. 16 Solution of loading / unloading task

ワークを構築することである。Fig. 16 にフレームワークの構成図を示す。品出し収納タスクをすなわち移動、認識、計画の三つの組み合わせと定義し、本競技会では移動領域がごく狭いことから特に認識と計画に注力した。

収納タスクにおいてはカゴの中から掴めそうなものを掴んでから識別を行うこととし、Fig. 17 に示すように三次元的に突出した部分を把持対象領域とする戦略を取った。取り出しタスクでは Fig. 18 に示すように先に識別を行い、物品に応じた取り出し方法を選択する。取り出しのための認識機能については可能な限り既存システムを活用することとし、物体切り出しではスーパーピクセルに基づく領域分割を行いカテゴリ認識には COCO データセット [36] に対して機械学習を用いた結果により画像の分類を行うクラウドサービスを用いた。この分類器は

Fig. 17 Recognition process of stow task

Fig. 18 Recognition process of pick task

直接対象物から学習したものではないが、対象物のカテゴリ数 38 に対して分類器のカテゴリ数は 80 であり、各対象物に対して分類器が返すカテゴリの組み合わせを用いることで分類を行うことが可能であり、さらに各仕切りとカゴに何が入っているかは既知であるため、絞り込みが容易である。この手法を用いることで学習にかかる時間を省略する。

動作計画においては、棚や商品などすべての物体が既知であることから、本競技会では三次元物体モデルベースの手法を用いることとし、Fig. 13 (b) と Fig. 14 (b) に示すように、棚や物品といったすべての物体の三次元幾何学モデルを EusLisp 上に作成し、把持に必要な把持位置、エンドエフェクタなどをすべて人間が定義し与える手法をとった。

5.3.4 評価と考察

収納タスクでは 3 品め、品出しタスクでは 1 品めの操作に成功した。使用したエンドエフェクタはすべてつまみ方式であった。収納タスクでは乱雑にカゴに入れられた物品の中から取り出すためにつまみ方式が有効に作用したものと考えられる。品出しタスクの様子を Fig. 15 に示す。この事例では成功した物品が手袋であり、棚板の底に潰れた状態で置かれた布製の柔軟物を取り出すためにはつまみ方式が有効であった。一方そのほかの二方式であるセンター把持グリッパ、吸引アタッチメントはどちらも特定の対象物に対して選択的に用いることを想定しており、競技会中にはどちらも使用されず評価に至らなかった。

そのほかに問題となったのは棚との間の自己位置推定であった。品出しタスクでは台車移動の繰り返しにより幾何学モデルと実物の間に累積誤差が生じており、特に再走時に自己位置が正

Fig. 19 AERO (Convenience Store)

しく初期化されておらずそこで終了してしまった。ロボットがすべての情報を知ることは困難であるが、タスク遂行上重要な要素については都度ベリファイを行うことが重要であった。

5.4 WRS Future Convenience Store Challenge 2017: コンビニエンスストア店員

5.4.1 タスク要件

WRS FCSC: Future Convenience Store Challenge 2017 Trial は FCSC 実行委員会が主催し、2017 年 12 月に宮城県仙台市で行われた。この競技会では二つのタスクに臨んだ。一つは陳列廃棄タスク [37] である。カゴから棚へ商品を陳列し、すでに棚にある商品の中から消費期限を読み取ることで廃棄対象を選別し、廃棄物は持ち帰り、廃棄しないものは整理させる。陳列対象商品としておにぎり、プラスチックカップ入りのコーヒー、弁当の三種類がそれぞれ 3 個ずつ、廃棄対象商品としてサンドイッチが 5 個用意されている。もう一つは自由課題の接客タスク [38] である。ここでは独自の課題として、陳列廃棄タスクを行っている最中に客から話しかけられた場合、客の要望に応じた別のタスクを行い、終了後再び陳列廃棄に復帰する、というものを設定した。それぞれの制限時間は会場設営を含め 20 分となっている。接客タスクではこれまでの完全自律行動に加え、人間の行動に応じて自らの振る舞いを変えるインタラクション機能が求められる。この機能の実現のためには、作業対象のみならず広く環境を観察すること、人間からタスクを要求されていることを理解すること、現状のタスクを正しく中断し、正しく復帰できる計画を行えること、が必要となる。

5.4.2 ロボットシステム

Fig. 19 に FCSC 仕様ロボットの概要を示す。本競技会で取り扱う物品の特徴として、おにぎりやサンドイッチのような柔らかい物品、弁当のようなある程度の大きさがあり傾けられない物品、が存在する。細かな操作やアプローチ角度の変更を行うためには標準のつまみグリッパだけでは限界があることは災害対応でも判明していた。そのためグリッパ自体を二自由度の開き長さ可変とし、さらに把持姿勢の幅を広げるために手首に一軸を追加した。そのため、部品換装により自由度そのものが変化する構成となっているが、部品ごとのコントローラを組み合わせる制御ソフトウェア構成により、このような状況にも即時対応できる。追加センサとして、作業をしている状態で人間とインタラクションを行うため、腰部に回転テーブルを設置し、その上に三次元カメラをやや上方に向けて設置した。こうすることで、上半身の向きと関係なくカメラを人間に向けることができる。また、外部電源や通信線の配線が車輪に巻き込まれて移動が阻害されたり破損したりするのを避けるため、電源の最

Fig. 20 Display / Dispose Task

Fig. 21 Customer Service

適化を行い、バッテリーによる独立電源駆動となった。

5.4.3 タスク記述

陳列廃棄のタスク概要を Fig. 20 に示す。陳列廃棄は APC2016 の拡張とも捉えられ、抽象化した品出し収納フレームワークをそのまま利用して対応できる。すなわち移動、認識、計画の三つであるが、前競技会の反省から移動においてもレーザ距離計を用いた 2D SLAM とマーカーを用いた棚との相対位置推定を行い、認識では SSD: SingleShot MultiBox Detector [39] を用いた物品認識と特徴点マッチングに基づく姿勢推定、計画では単腕・双腕協調に基づく物品姿勢を維持した把持計画、サンドイッチの姿勢遷移計画を行った。物品認識については、本競技会で規定される物品カテゴリ数は 4 と少数であったが、一方で各物品はロボットから見て様々な姿勢をとりうる。そのため、カテゴリ自体の正答率よりも物品の姿勢にかかわらず検出されることが求められる。

接客タスクの概要を Fig. 21 に示す。接客タスクではインタラクション判断のために合意形成モデルを利用する [40]。人物認識には腰の三次元カメラを用いて姿勢認識と視線認識の組み合わせに基づく興味推定を行い、その結果と現在の作業状態を考慮した割り込みハンドリング、またタスク中断復帰のためにリバックハンドリングにより陳列廃棄と接客を切り替える。

Fig. 22 Competitions and Continuous Integration

5.4.4 評価と考察

陳列廃棄タスクでは、全種類の物品の陳列廃棄を成功させた。ただし各物品種類においては一部のみ成功し、競技得点としては 100 点中 50 点となった。接客タスクでは陳列廃棄から接客への相互タスク遷移を行うことができた。また人間の要求に応じて物品棚から商品を取り出して渡すことに成功した。

陳列廃棄において全物品を成功できなかった理由としては、双腕を必要とする弁当の陳列が重なった弁当同士の隙間に指を入れることが難しく、重ねた状態で把持する必要があったが、この際総数 3 のうち二つまでしかつかむことができなかったためである。これは把持計画やアタッチメントの使用で解決すべきと考える。廃棄タスクにおいてはクリアランスが狭く、また姿勢遷移操作を行う際に時間がかかるためすべてのサンドイッチをチェックすることができなかった。

認識機能については、倉庫内作業でクラウドサービスを用いたのに対し、陳列廃棄ではデータセットを自作し、学習させたものを用いた。前者は既存の学習済みのもので用いることで即時利用できるが、認識結果の組み合わせから推測が必要であった。一方後者は新たに学習が必要となるが、求める認識結果が直接得られる。タスク要件によってカテゴリ数や必要となる情報が異なり、それに応じたオープンソースソフトウェアやクラウドサービスの活用が工期短縮につながった。

5.5 全競技会を通じた開発についての考察

Fig. 22 に各競技会におけるシステムの変遷を示す。各競技会において、ロボットのハードウェアをどのように改良したか、幾何学モデルの取り扱いをどう拡張したか、タスク中の自律動作のレベルをどう向上させたか、の三点を主に説明する。

5.5.1 ハードウェアの改良について

Fig. 23 にロボットのハードウェアの変遷を示す。図中 Continue は継続して使用したもの、Refine は小変更を加えたもの、Change は完全に交換したもの、ADD は新たに取り付けたものを示している。まず、人型の上半身に関しては期間の途中で一部関節に使用されていたブラシレスモータを全軸ステッピングモータとし、最終的には肩と肘の関節可動域を増やした。下半身は段差乗り越えの必要のあった DRC Finals のみ 4 脚とし、以降は全方移動台車と平行リフタの組み合わせとした。途中作業領域の拡大のための大型リフタの採用や台車の安定性向上のための大径ホイールへの交換を行っている。これら二つの部位は早期に仕様が確定し、それ以降は性能向上に注力することができた。上半身と下半身が小変更にとどまっているのと比較し、エンドエフェクタはタスクごとにすべて異なるものを採用している。DRC Finals ではつまみグリッパ、トマトロボット競技会ではさみアタッチメント、APC ではセンター把持グリッパと吸引アタッチメント、FCSC では二軸グリッパと手首追加軸を用いた。これは対象物の操作方法に応じて適切なエン

Fig. 23 Robot hardware roadmap

ドエフェクタを選択する必要があったためである。APCにおいて二種類の異なるグリップを用いたが、最終的に活用できたのはつまみ方式のグリップであった。また、物品に対するアプローチ角度の変更がそのままでは難しく、FCSCで求められるような細かい操作はできないことが幾何学モデルによる検証で分かった。このフィードバックを受けてFCSCでは手首に軸を追加し、さらにつまみ方式を基本としてグリップの指の角度を変えられる二軸グリップとすることで多種の物品の操作を実現することができた。一方、特にトマトに対するはさみ、APCでの薄い物体に対する吸引のような特殊なケースではロボットから分離し、道具として使用することができればより高い拡張性を得られると考えられる。

5.5.2 幾何学モデルの拡張について

幾何学モデルの取り扱いについては、大きく二つの期間に分けて考えることができる。すなわち DRC Finals およびトマトロボット競技会ではロボット身体の幾何学モデルの構築、APC および FCSC では環境および対象物の幾何学モデルとの連携を行った。特にロボット身体は前節で述べたとおり ROS および EusLisp で利用可能なロボットモデルを設計に用いた 3D CAD モデルから変換する手法を確立することで、先に述べたハードウェアの変更への対応を即座に行うことができ、すべての競技会において有効に活用することができた。

APC と FCSC はどちらもピックアンドプレースを行う問題であり、Fig. 16 ですでに示したとおり自己位置推定、物品認識、動作計画の三つの抽象化された機能に着目することができる。一方 APC ではたかだか 2[m] 四方であった行動領域が FCSC では 5[m] 程度の移動が必要となる、FCSC では 4 種類の物品であったものが APC では 38 カテゴリである、取り扱っている棚の大きさも異なる、という点において異なるアプローチが必要となる。まず自己位置推定に関しては、APC ではモデル情報を完全に信頼する方式をとっていたが、FCSC ではレーザー距離計と AR マーカを用いた位置合わせを行っていた。物品認識についてはどちらも学習ベースであったが、APC では学習済みの認識器の結果を変換することで利用し、FCSC では対象物品を用いた学習を行って認識器を新規に作成した。動作計画では APC では狭い棚の仕切りの中での衝突回避に、FCSC では比較的広い棚板の上での整列にそれぞれ着目していた。これらのうち、自己位置推定と動作計画は幾何学モデルの差し替えの

みで基本機能としての再利用を行うことができる。一方で認識器については対象物とその操作内容によって変えていく必要がある。

5.5.3 自律動作レベルの向上について

DRC Finals とトマトロボット競技会においてはタスクを遠隔操縦で行ったため、APC と FCSC における自律動作について述べる。APC における自律動作は、基本機能の組み合わせによるシーケンシャルな動作記述を EusLisp を用いて作成した。これは収納・取り出しともに単純な繰り返し動作での達成を期待したためだが、競技中には棚の仕切りの中で対象物の前に別の物品が重なるなど複雑なシーケンスを必要とするケースも存在した。FCSC でも陳列廃棄はシーケンシャルな動作記述としたが、接客タスクにおいて陳列廃棄の内容をそのまま中断復帰可能なタスクプランナに組み込む必要があり、記述言語を統一するために EusLisp から C++ に変更した。これらのことから、自律動作のためのプログラムはそれぞれの求められるレベルや目的に対して都度作りなおす必要があると考えられる。

5.5.4 各競技会の共通点と再利用性について

最後に、各競技会を通じて再利用性の高かった要素を抜き出すと、上半身と下半身の構造、ロボット身体の幾何学モデル、ロボット身体以外の幾何学モデルとの位置合わせおよび衝突計算が挙げられる。これらは、人間の作業の代替を求められていたこと、ロボットの行動のために自己身体の情報が必要であること、自己身体と環境との関係性を理解することが実環境における作業ロボットにとって重要であることを示している。

一方、再利用性の低かったものとして、エンドエフェクタ、対象物の認識機能、自律動作記述が挙げられる。これはすなわち各競技会における相違点を表しており、対象物の操作方法に応じたエンドエフェクタ、対象物そのものの特性やドメインを考慮した認識、求められる目標に応じた自律動作が各競技会、ひいては実社会においてタスクを遂行するために必要な開発項目であると考えられる。

6. 結論・ロボットと競技会

本論文では汎用ロボットプラットフォーム AERO の競技会を通じた継続的な開発と評価について述べた。

特に、本ロボットに関連する評価実験はすべて研究室の外で行われたということが大きな意義がある。研究室ではロボットのための整えられた環境、潤沢な電源、計算機資源、ネットワーク資源が活用できるが、一歩外に出ればそのどれもがまったく信頼できない。このような状況でロボットを運用するための要素として、容易に持ち運べること、単体で確実に運用できること、部品換装による拡張性が高いこと、は重要な要素となった。特に DRC Finals と Amazon Picking Challenge は国外で開催された大会であり、ロボットを分解するなどして航空機の預け荷物として輸送できるサイズに収めることでチームメンバーと一緒に移動することができ、現地での準備や撤収にかかる時間を大幅に短縮できることが国外遠征のハードルを下げていた。

本論文において構築してきたロボットシステムはモデルベースシステムである。すなわち、競技会という枠組みの中で与えられる知識をモデルに落とし込み、あるいは不完全な情報からある程度の前提をもってモデルに当てはめ推定を行い、タスクを達成するという戦略が機能するという前提に立っている。このような方法論であっても不確かな情報を都度確認しながらモデルとの誤差を修正したり、あるいはタスクそのものの失敗を検知

してやり直すことで信頼性を向上することができるが、一方ですべてを網羅することはフレーム問題に陥り不可能であるから、効果的な要素を選択的に対処することが求められた。しかし競技会からさらに現場へと視点を移すと、問題はさらに複雑となりモデルの予測を立てることも困難となりうる。例えば DRC Finals におけるサプライズタスクは当日まで内容が伏せられており、モデル自体を立てることが不可能である。また FCSC の接客タスクについても、客がどのように振る舞うかを完全にモデル化することは同様に不可能であり、モデルベース以外の方法論が求められる。

競技会は点数を競うものである。単一のロボットプラットフォームのみを評価する場としては、得点によるほかのチームとの評価という面では厳しいものとなる。しかしながら、実際に現場に投入することを考えた場合に、例えば APC の倉庫内作業をバックヤードでこなしつつ店舗内で FCSC の陳列や接客をこなす、あるいは DRC の屋外軽作業をこなしつつ、トマトロボット競技会のように植物の手入れを行う、といった複数のタスクを横断的に遂行できる能力は非常に有用である。おのの求められるタスクに応じて専用の機器を導入するべきか、インフラで解決するべきか、という議論の先に、コストや接地面積という点で有利となる、汎用性を持ち複数のタスクを単一機体でこなせるロボットの必要性が見える。このような、タスク遂行のための形態の議論を進めるには比較対象となるような様々なロボットの形態が多面的に評価されるべきであり、継続した開発を進めるモチベーションの維持のためにもロボット競技会には多様性が求められる。

謝 辞 プラットフォームロボット AERO の開発に際しては、THK 株式会社 SEED Solutions のご協力をいただきました。

DARPA Robotics Challenge Finals では DRC 運営スタッフの皆様にご協力をいただきました。また競技会参加に際しては Dr. Wesley Patric Chan のご協力をいただきました。第 2 回トマトロボット競技会では、競技会実行委員会の皆様にご協力をいただきました。ゼミ内容の掲載に当たっては、受講生の安齋智紀君、河原塚健人君、牧野将吾君、森翔太郎君の資料提供をいただきました。Amazon Picking Challenge 2016 では Amazon Robotics の皆様にご協力をいただきました。WRS Future Convenience Store Challenge 2017 Trial では FCSC 実行委員会の皆様にご協力をいただきました。

また、すべての競技会において、ほかの参加チーム、メンバーの皆様との技術交流がありました。この場を借りて深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- [1] Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA Robotics Challenge Finals, <http://www.theroboticschallenge.org/>.
- [2] Evan Ackerman: Darpa robotics challenge trials: Final results, <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/humanoids/darpa-robotics-challenge-trials-results>.
- [3] N. Correll, K.E. Bekris, D. Berenson, O. Brock, A. Causo, K. Hauser, K. Okada, A. Rodriguez, J.M. Romano and P.R. Wurman: "Lessons from the amazon picking challenge," arXiv preprint arXiv:1601.05484, 2016.
- [4] World Robot Summit: World robot summit, <http://worldrobotsummit.org/>.
- [5] 森政弘: "ロボットコンテストの意義と願い", 日本ロボット学会誌, vol.15, no.1, pp.2-5, 1997.
- [6] RoboCup Federation: Robocup federation official website, <http://www.robocup.org/>.
- [7] M. Schwarz, T. Rodehutsors, D. Droschel, M. Beul, M. Schreiber, N. Araslanov, I. Ivanov, C. Lenz, J. Razlaw, S. Schüller, D. Schwarz, A. Topalidou-Kyniazopoulou and S. Behnke: "Nimbro rescue: Solving disaster-response tasks with the mobile manipulation robot momaro," Journal of Field Robotics, vol.34, no.2, pp.400-425, 2017.
- [8] M. Schwarz, A. Milan, C. Lenz, A. Muñoz, A.S. Periyasamy, M. Schreiber, S. Schüller and S. Behnke: "Nimbro picking: Versatile part handling for warehouse automation," 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.3032-3039, 2017.
- [9] RoboCup@Home: Robocup@home standard platform leagues, <http://www.robocupathome.org/athome-spl>.
- [10] RoboCup@Home: Rulebook for robocup@home 2017, <https://github.com/RoboCupAtHome/RuleBook/tree/2017.v1>.
- [11] K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, H. Hirukawa, T. Kawasaki, M. Hirata, K. Akachi and T. Isozumi: "Humanoid robot hrp-2," Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on, vol.2, pp.1083-1090, vol.2, 2004.
- [12] K. Kaneko, F. Kanehiro, M. Morisawa, K. Akachi, G. Miyamori, A. Hayashi and N. Kanehiro: "Humanoid robot hrp-4—humanoid robotics platform with lightweight and slim body," Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on, pp.4400-4407, 2011.
- [13] K. Okada, M. Inaba and H. Inoue: "Real-time and precise self collision detection system for humanoid robots," Proc. of The 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1072-1077, 2005.
- [14] G. Nelson, A. Saunders, N. Neville, B. Swilling, J. Bondaryk, D. Billings, C. Lee, R. Playter and M. Raibert: "Petman: A humanoid robot for testing chemical protective clothing," Journal of the Robotics Society of Japan, vol.30, no.4, pp.372-377, 2012.
- [15] Defense Advanced Research Projects Agency: Upgraded Atlas Robot, <http://www.theroboticschallenge.org/upgraded-atlas-robot-announcement>.
- [16] K.A. Wyrobek, E.H. Berger, H.F.M. Van der Loos and J.K. Salisbury: "Towards a personal robotics development platform: Rationale and design of an intrinsically safe personal robot," Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on, pp.2165-2170, 2008.
- [17] K. Hashimoto, F. Saito, T. Yamamoto and K. Ikeda: "A field study of the human support robot in the home environment," 2013 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, pp.143-150, 2013.
- [18] 寺田耕志, 村瀬和都, 山本貴史: "生活支援ロボット Human Support Robot (HSR) における ROS 活用", 日本ロボット学会誌, vol.35, no.4, pp.280-283, 2017.
- [19] トヨタ自動車: トヨタ自動車, 生活支援ロボットの実用化に向けて研究機関等と技術開発を推進するコミュニティを発足, <https://newsroom.toyota.co.jp/jp/detail/8709536/>.
- [20] T. Inamura, K. Okada, S. Tokutsu, N. Hatao, M. Inaba and H. Inoue: "HRP-2W: A humanoid platform for research on support behavior in daily life environments," Robotics and Autonomous System, vol.57, no.2, pp.145-154, 2009.
- [21] T. Matsui and M. Inaba: "Euslisp: An object-based implementation of lisp," J. Inf. Process., vol.13, no.3, pp.327-338, 1991.
- [22] K. Okada, M. Kojima, S. Tokutsu, T. Maki, Y. Mori and M. Inaba: "Multi-cue 3d object recognition in knowledge-based vision-guided humanoid robot system," Proc. of The 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3217-3222, 2007.
- [23] K. Yamazaki, R. Ueda, S. Nozawa, Y. Mori, T. Maki, N. Hatao, K. Okada and M. Inaba: "System integration of a daily assistive robot and its application to tidying and cleaning rooms," Proc. of The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1365-1371, 2010.
- [24] H. Yaguchi, K. Sasabuchi, W.P. Chan, K. Nagahama, T. Saiki, Y. Shiigi and M. Inaba: "A design of 4-legged semi hu-

- manoid robot aéro for disaster response task,” Proc. of the 2015 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2015), pp.61–66, 2015.
- [25] Defense Advanced Research Projects Agency: DRC Finals Rule Book, http://www.theroboticschallenge.org/sites/default/files/docs/2015_04_09_DRC-Finals_Rule_Book-DISTAR_24388.pdf.
- [26] Noriaki Ando: OpenRTM-aist official website, <http://www.openrtm.org/>.
- [27] Willow Garage: ROS.org, <http://www.ros.org/>.
- [28] F. Kanehiro, H. Hirukawa and S. Kajita: Openhrp: Open architecture humanoid robotics platform. The International Journal of Robotics Research, vol.23, no.2, pp.155–165, 2004.
- [29] Kei Okada: hrpsys_ros_bridge, http://wiki.ros.org/hrpsys_ros_bridge.
- [30] 長濱虎太郎, 笹渕一宏, 矢口裕明, 稲葉雅幸: “等身大人型ロボットの農作業タスクプログラミングと収穫競技会を通じた知能ロボットソフトウェア教育”, 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, 2P2–17a2, 2016.
- [31] 九州工業大学社会ロボット具現化センター: 第 2 回トマトロボット競技会, <http://www.lsse.kyutech.ac.jp/~sociorobo/tomato-robot2015>.
- [32] 矢口裕明, 笹渕一宏, 長濱虎太郎, 稲葉雅幸: “多種物取り出しタスクのための euslisp を用いた幾何学モデル構築と把持・動作計画手法”, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 3E3–04, 2016.
- [33] H. Yaguchi, S. Hori, K. Sasabuchi, K. Nagahama and M. Inaba: “A research of autonomous loading / unloading of consumer products using a dual-arm robot,” Warehouse Picking Automation Workshop 2017, p.19, 2017.
- [34] Amazon.com Inc: Amazon Picking Challenge —Official Rules—, http://pwurman.org/amazonpickingchallenge/APC-2016_Official_Rules.pdf.
- [35] C. Hernandez, M. Bharatheesha, W. Ko, H. Gaiser, J. Tan, K. van Deurzen, M. de Vries, B. van Mil, J. van Egmond, R. Burger, M. Morariu, J. Ju, X. Germann, R. Ensing, J. van Frankenhuyzen and M. Wisse: “Team delft’s robot winner of the amazon picking challenge 2016,” CoRR, vol.abs/1610.05514, 2016.
- [36] T.-Y. Lin, M. Maire, S.J. Belongie, L.D. Bourdev, R.B. Girshick, J. Hays, P. Perona, D. Ramanan, P. Dollár and C.L. Zitnick: “Microsoft COCO: common objects in context,” CoRR, vol.abs/1405.0312, 2014.
- [37] FCSC 技術部門: WRS Future Convenience Store Challenge トライアル 2017, 「陳列・廃棄」タスク ルールブック 2017/08/17, <http://sice-si.org/fcsc/wp-content/uploads/2017/07/FCSC-%E9%99%B3%E5%88%97%E5%BB%83%E6%A3%841708017.pdf>.
- [38] FCSC 技術部門: WRS Future Convenience Store Challenge トライアル 2017「接客」タスク ルールブック 2017/08/17, <http://sice-si.org/fcsc/wp-content/uploads/2017/07/FCSC-%E6%8E%A5%E5%AE%A2170817.pdf>.
- [39] W. Liu, D. Anguelov, D. Erhan, C. Szegedy, S. Reed, C.-Y. Fu and A.C. Berg: “Ssd: Single shot multibox detector,” Computer Vision – ECCV 2016, pp.21–37, 2016.
- [40] K. Sasabuchi, K. Ikeuchi and M. Inaba: “Agreeing to interact: Understanding interaction as human-robot goal conflicts,” Companion of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, HRI ’18, pp.21–28, 2018.

矢口裕明 (Hiroaki Yaguchi)

2004 年明治大学理工学部機械情報工学科卒業。2009 年東京大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻博士課程修了。博士 (情報理工学)。2008 年度下期 IPA 末路スーパークリエイター。2009 年東京大学特任助教, 2014 年特任講師。2018 年よりクシナダ機巧株式会社代表取締役社長。社会実装を目的としたロボットシステムインテグレーションに従事。

(日本ロボット学会正会員)

堀慎太郎 (Shintaro Hori)

2016 年東京大学工学部機械情報工学科卒業, 2018 年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士課程修了。同年よりファナック株式会社勤務。

(日本ロボット学会正会員)

長濱虎太郎 (Kotaro Nagahama)

2009 年東京大学工学部機械情報工学科卒業, 2014 年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻博士課程修了。博士 (情報理工学)。2014 年より東京大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻特任助教。2017 年より信州大学工学部講師。生活支援ロボット, 人型ロボットシステム, ロボットののための観察学習システム等の研究・教育に従事。

(日本ロボット学会正会員)

椎木靖人 (Yasuto Shiigi)

2009 年立命館大学理工学部ロボティクス学科卒業, 2011 年立命館大学大学院理工学研究科創造理工学専攻博士課程前期課程修了。同年 THK 株式会社入社, 現在に至る。

(日本ロボット学会正会員)

溝花弘登 (Hiroto Mizohana)

2016 年東京大学工学部機械情報工学科卒業, 2018 年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士課程修了。同年よりキャノン株式会社勤務。

(日本ロボット学会正会員)

笹渕一宏 (Kazuhiro Sasabuchi)

2013 年東京大学工学部機械情報工学科卒業, 2015 年東京大学大学院学際情報学専攻修士課程修了。

齋木拓也 (Takuya Saiki)

2012 年九州大学工学部機械航空工学科卒業, 2014 年九州大学大学院工学部機械工学専攻修士課程修了。同年 THK 株式会社入社, 現在に至る。

稲葉雅幸 (Masayuki Inaba)

1981 年東京大学工学部機械工学科卒業, 1986 年東京大学大学院情報工学専門課程博士課程修了 (工学博士)。1986 年東京大学講師, 助教授を経て, 2000 年教授。知能ロボット, ヒューマノイドの研究教育に従事。

(日本ロボット学会正会員)