

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601  
研究種目：基盤研究(A)（一般）  
研究期間：2020～2023  
課題番号：20H00226  
研究課題名（和文）多態推進操作機構を備えた環境適応移動作業ロボットにおける認識行動制御系の獲得  
  
研究課題名（英文）Acquisition of Perception Action Control Systems on Environment-Adaptive Mobile Manipulation Robot with Multi-body Transformer Mechanism  
  
研究代表者  
稲葉 雅幸（Inaba, Masayuki）  
  
東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授  
  
研究者番号：50184726  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、陸海空など異なる環境を行き来し、様々な作業を行えるロボットの身体機能構成法とその認識行動制御系をテーマとし、(a) 陸・海・空を移動し、作業可能なロボットの統一的なシステム構成法、(b) 多様な環境に適応し多様な身体態様を変形遷移し体勢操作制御法、(c) 多彩な道具作業の操縦に基づく操作認識・修正補助・獲得方式、(d) 多態推進作業機構を備えた全身表現からのロボット身体の分解組立法生成、を主軸に、従来のロボットに想定された運用環境を越えた環境に対しても自由に移動し、作業する汎用ロボットシステムの認識行動制御系の獲得法を理論と実験の両面から明らかにすることを目的とするものである。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、陸海空の環境に固有のロボットではなく、陸上から水中、水中から空中飛行など異なる環境を行き来して多様な道具を使って作業しないといけないロボットの構成法をテーマとしており、その機能を多態推進操作機構の構成法として研究するところに学術的意義がある。また、災害時などは陸海空を自由に移動し、現地へ急行して必要な作業を行うロボットが必要とされるが、それを実現するためのロボットシステムの研究は少なく人がロボットを現地へ運んでいるのが現実であり、雨が降っていても現地へ急行し水の中での作業であっても危険をかえりみずに作業できるロボットの研究でもありそこに社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：This research focuses on the design and control systems of robots capable of navigating and performing tasks in various environments, such as land, sea, and air. The main themes are: (a) a unified system configuration method for robots that can move and perform tasks across land, sea, and air; (b) adaptive control methods for body posture and transformation to suit diverse environments; (c) techniques for operational recognition, correction assistance, and acquisition based on the manipulation of various tools; and (d) methods for assembling and disassembling the robot's body from a multi-modal propulsion and task execution mechanism. The goal is to theoretically and experimentally elucidate the acquisition methods for recognition and action control systems of a versatile robot capable of moving and performing tasks in environments beyond those anticipated for traditional robots.

研究分野：ロボティクス

キーワード：知能ロボット 身体可変機能 トランスフォームロボット モジュールロボット ヒューマノイド 水陸両用ロボット 飛行変形ロボット ツール交換多機能ロボット

1. 研究開始当初の背景

ロボティクスにおいて、活動領域を限定した専用ロボットの研究は多いが、想定外の自然災害により、現場へ急行して人命を救助・環境復旧のために即座に利用可能なロボットには、多様な環境へ即時に対応できるロボットが求められる。

その解決策には、ヒューマノイドのように一般的な機能形態で、道具を利用する構成法のほか、移動推進には適切な移動用機構を利用し、作業内容に合わせて道具を切り替えて作業に当たることができる機能転換機構を備えたロボットの構成法の研究が求められるものとなっていた。

2. 研究の目的

本研究は、地上と空中だけでなく水中でも移動し、物や環境操作を伴う作業が可能なロボットを現場へできるだけ速く急行させ、簡単な既知作業と現場で個別に指示が必要な作業の両方を自動と操縦の組み合わせにより統合的に人の介入を減らしてゆける仕組みをもったシステムの構成法を明らかにしてゆくことを目的とする。

3. 研究の方法

多様な環境での移動と各種道具作業のための操作機能を備えた身体構成を構築するために、各身体構成要素をモジュール化し、モジュールの脱着機構と様々な形態の全身を構成した後にその形態にそって移動し作業を行う移動制御と作業制御を統合的に構成できるシステムの構成法を示してゆくために、以下の項目を順次進める。

- (A) 多態推進操作機構と全身の機構配置表現の構築
- (B) 移動時の位置・外力・姿勢推定と移動推進制御
- (C) 作業時の揺動推定と体勢維持制御
- (D) 道具利用環境操作作業の認識行動操縦制御
- (E) 環境適合の移動形態と作業形態との形態変換

4. 研究成果

(A) 多態推進操作機構と全身の機構配置表現の構築

多態推進操作機構として、図1のようなサーボモジュール、リンク構成接続部品の組み合わせにより2、4、6軸脚、2輪、全方位4輪、飛行用ロータなどの各移動推進モジュールを構成する。モジュール間接続には、ネジ固定、磁石脱着、弾性爪はめ込みなど脱着可能な要素を構成し、多様な身体構成を動的に変更可能なシステムを構成した。図2のようにバネ内蔵のポゴピンにより電力信号線を接続可変とする脱着用接続基板を構成し、さらに分布近接センサも搭載する基板により、接続部の種類・向き判定を行い、全身の要素接続構成を自己認識する可能なシステムを実現している。



図1 要素モジュール

、要素の幾何モデルを接続グラフで

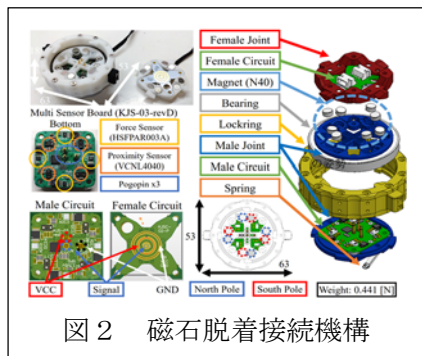


図2 磁石脱着接続機構

(B) 移動時の位置・外力・姿勢推定と移動推進制御

図3のように基板に加速度・角速度・地磁気、近接、力の各小型センサチップを搭載し、信号フィルタリング、姿勢推定、外界観測センサによる自己位置推定、関節負荷、駆動力、力センサからの外力推定等を行い、全身制御を行うシステムを構築した。空中、水中環境での行動シミュレーションが可能な環境を構築し、多種多態ロボットのロボットモデルからシミュレータに必要な環境記述モデルをコンパイル生成する環境を実現した。行動プログラムをコントローラとして与えれば任意の多態ロボットで各種行動をシミュレートする環境となっている。

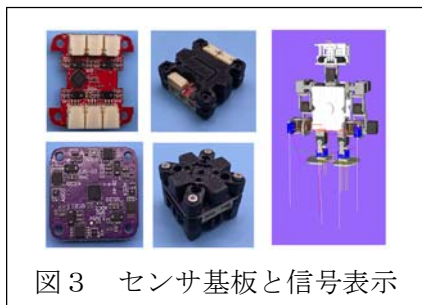


図3 センサ基板と信号表示

(C) 作業時の揺動推定と体勢維持制御

加速度・角速度・力センサをもつ接続用基板を身体要素に配置し、頭部には記憶画像・マーカ検出組込カメラの他

小型 RGB デプス視覚デバイスを搭載し、関節負荷トルク情報と合わせて、作業時の揺動推定、体勢維持制御のための基盤システムを実現した。図7に示すように水中で行動するロボットへの姿勢教示や動作教示をインタラクティブに行える環境を構築し、水中での上半身運動の反動、水中歩行、水中物体歩行運搬、水中壁面清掃動作を行い姿勢安定化制御への方策検討が可能となった。

(D) 道具利用環境操作作業の認識行動操縦制御

道具機能の脱着機能として、2指グリップと交換可能なドライバビット回転道具モジュールを実現し、認識行動操縦制御を行った。図4では、右手にグリップ、左手にドライバを装着した双腕上半身モジュールを別のロボットアームが4輪全方位台車モジュールへ装着してロボットがロボットを構築し、台車部分が水に浸る作業環境でケーソンに見立てた大型物体のボルト締めを行うという作業環境での全体システムの流れを示している。図5にその実作業環境の状況を示す。高台の上でロボットを組付け、ケーソンを持ち上げて坂を降りて水場へ降りてゆき、取り付け位置にて左手のドライバで締め付けを行う実験環境となっている。

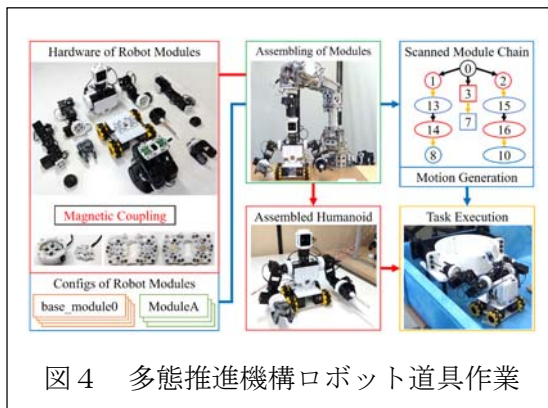


図4 多態推進機構ロボット道具作業

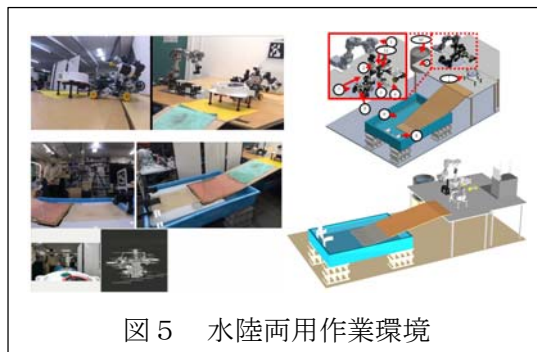


図5 水陸両用作業環境

(E) 環境適合の移動形態と作業形態との形態変換と全身の分解組立手順生成

防水用全身被覆法としてパラフィンの溶融脱着法を考え、被覆厚調整と関節固化防止法を実験を通して獲得するシステムを実現した。図6に示すように、ロボット全身を溶融パラフィン浴槽に浸し、空中で冷却して固着させ、浸す回数を変えることで外装厚みを調整でき、浴槽内と空中固着時においてロボットが動作を行うことで関節内が固着しないような厚み調整を行うことで防水機能を付与することを行う。防水外装が不要になれば高温浴槽や熱風ヒータガンにより溶融することで防水外装を脱ぐことができる。



図6 防水パラフィンの溶融脱着

磁力脱着機構・ワックス被膜の脱着機構を備えたことで、身体の状態変換の多様性は各段に上ることとなり、身体要素が変化するロボットの形態変換は、行動の手順生成だけでなく、身体要素の脱着可能性に基づく分解組立手順生成法を必要とすることとなり、実ロボットによる動作手順の生成、組立対象の配置、部品組み付け、手順生成、組み付け動作制御の基盤システムの基礎を構築してきている。

本研究の基盤環境を利用して、図7に示すような地上でのヒューマノイド動作を全身が水中に入って地上での動作と水中での動作の比較、図8の飛行ロータを2個備えたヒューマノイド型を構成し、テーブルの上にあるドア付物品棚へ床の上にある物品を把持して物品棚のドアを開けて中へしまおうという飛行・作業の行動実験を行っており、図5の水陸両用道具利用実験と同様に同じソフトウェア基盤により様々な多態推進操作機構を備えたロボットによる行動を実現することで本研究成果である基盤環境の評価を行った。

<引用文献>

安斎智紀, 認識行動通信機能を備えた構造可変マルチロータ飛行ロボットシステムの研究, 東京大学博士論文, 2021.

真壁 佑, 多環境適応のための接続可変機能を備えたトランスフォームロボットシステムの研究, 東京大学博士論文, 2022.

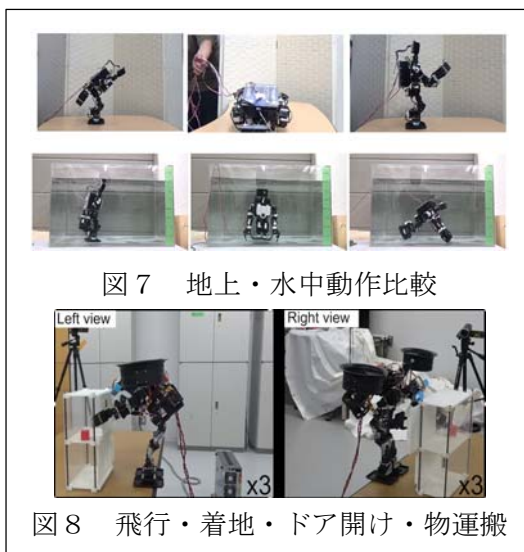


図7 地上・水中動作比較

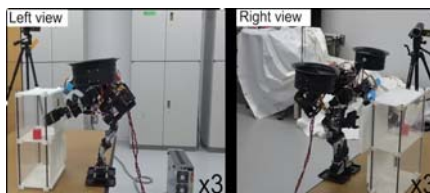


図8 飛行・着地・ドア開け・物運搬

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tasuku Makabe, Kei Okada, Masayuki Inaba	4. 巻 1
2. 論文標題 Design of Morphable StateNet Based on Pseudo-Generalization of Standing Up Motions for Humanoid with Variable Body Structure	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 in Proceedings of The 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation	6. 最初と最後の頁 15336-15342
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tasuku Makabe, Kei Okada, Masayuki Inaba	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of the Assembling System for Structure Transformable Humanoid with Attach-Lock-Detachable Magnetic Coupling	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 in Proceedings of The 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation,	6. 最初と最後の頁 2433-2439
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tasuku Makabe, Kei Okada, Masayuki Inaba	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of the Whole-body Waterproof Shell Applying and Removing System Using Phase-Change Paraffin and Grease for the Multi-DOF Robot	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 in Proceedings of The 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems	6. 最初と最後の頁 10125-10132
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IRoS55552.2023.10341470	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Makabe Tasuku, Hiraoka Naoki, Noda Shintaro, Anzai Tomoki, Kimura Kohei, Hattori Mirai, Sato Hiroya, Sugai Fumihito, Kakiuchi Yohei, Okada Kei, Inaba Masayuki	4. 巻 1
2. 論文標題 Design and Development for Humanoid-Vehicle Transformer Platform with Plastic Resin Structure and Distributed Redundant Sensors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 in Proceedings of The 2022 IEEE International Conference on Robotics and Automation,	6. 最初と最後の頁 8526-8532
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ICRA46639.2022.9811683	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tasuku Makabe, Jihoon Oh, Tomoki Anzai, Yuta Kojio, Shintaro Noda, Yohei Kakiuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba:	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of Amphibious Humanoid Platform for Sensor-based Behavior Acquisition of Whole-body Manipulation Tasks,	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 in Proceedings of the 2022 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots,	6. 最初と最後の頁 526-533
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shi Fan, Anzai Tomoki, Kojio Yuta, Okada Kei, Inaba Masayuki	4. 巻 1
2. 論文標題 Learning Agile Hybrid Whole-body Motor Skills for Thruster-Aided Humanoid Robots	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 in Proceedings of The 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,	6. 最初と最後の頁 12986-12993
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IRoS47612.2022.9981974	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Maki Toshiya, Zhao Moju, Okada Kei, Inaba Masayuki	4. 巻 7
2. 論文標題 Elastic Vibration Suppression Control for Multilinked Aerial Robot Using Redundant Degrees-of-Freedom of Thrust Force	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 2859 ~ 2866
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2022.3145060	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sugito Nobuki, Zhao Moju, Anzai Tomoki, Nishio Takuzumi, Okada Kei, Inaba Masayuki	4. 巻 1
2. 論文標題 Aerial Manipulation Using Contact with the Environment by Thrust Vectorable Multilinked Aerial Robot	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 in Proceedings of The 2022 IEEE International Conference on Robotics and Automation,	6. 最初と最後の頁 54-60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICRA46639.2022.9811948	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kim{-}Ngoc{-}Khanh Nguyen, Yuta Kojio, Shintaro Noda, Fumihito Sugai, Kunio Kojima, Yohei Kakiuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba	4. 巻 6-4
2. 論文標題 Dynamic Fall Recovery Motion Generation on Biped Robot With Shell Protector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 6741-6748
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2021.3094234	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shi, Fan, Homberger, Timon, Lee, Joonho, Miki, Takahiro, Zhao, Moju, Farshidian, Farbod, Okada, Kei, Inaba, Masayuki, Hutter, Marco	4. 巻 ICRA2021
2. 論文標題 Circus ANYmal: A Quadruped Learning Dexterous Manipulation with Its Limbs,	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 in Proceedings of The 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation,	6. 最初と最後の頁 2316-2323
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICRA48506.2021.9561926	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tomoki Anzai, Yuta Kojio, Tasuku Makabe, Kei Okada, Masayuki Inaba	4. 巻 Humanoid2020
2. 論文標題 Design and Development of a Flying Humanoid Robot Platform with Bi-copter Flight Unit	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 in Proceedings of the 2020 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots	6. 最初と最後の頁 69-75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/HUMANOIDS47582.2021.9555801	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tasuku Makabe, Tomoki Anzai, Yohei Kakiuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba	4. 巻 Humanoids2020
2. 論文標題 Development of Amphibious Humanoid for Behavior Acquisition on Land and Underwater	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 in Proceedings of the 2020 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots	6. 最初と最後の頁 104-111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/HUMANOIDS47582.2021.9555671	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takuzumi Nishio, Moju Zhao, Fan Shi, Tomoki Anzai, Kento Kawaharazuka, Kei Okada, Masayuki Inaba	4. 巻 ICRA2020
2. 論文標題 Stable Control in Climbing and Descending Flight under Upper Walls using Ceiling Effect Model based on Aerodynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of The 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation	6. 最初と最後の頁 172-178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICRA40945.2020.9197137	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fan Shi, Moju Zhao, Masaki Murooka, Kei Okada, Masayuki Inaba	4. 巻 ICRA2020
2. 論文標題 Aerial Regrasping: Pivoting with Transformable Multilink Aerial Robot	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of The 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation	6. 最初と最後の頁 200-207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICRA40945.2020.9196576	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Toshiya Maki, Moju Zhao, Fan Shi, Kei Okada, Masayuki Inaba	4. 巻 ICRA2020
2. 論文標題 Model Reference Adaptive Control of Multirotor for Missions with Dynamic Change of Payloads During Flight	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of The 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation	6. 最初と最後の頁 7433-7439
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICRA40945.2020.9196861	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 眞壁佑, 河原塚健人, 永松祐弥, 安齋智紀, 菅井文仁, 岡田慧, 稲葉雅幸
2. 発表標題 セルフロック減速機構と冗長センサを備えたサーボモジュールの設計開発と多関節アームにおける応用
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 海士部宏紀, 河村 洋一郎, 真壁 佑, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 小型ロボットにおける通信に基づくコネクタ脱着故障の認識とケーブル装着修理動作の実現
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'22
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉原 和輝, 西尾 卓純, 趙 漢居, 真壁 佑, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 飛行ユニットを備えたヒューマノイドにおける推力偏向制御に基づく転倒回避に関する研究
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安齋 智紀, 趙 漢居, 菅家 颯太, 石 凡, 西尾 卓純, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 マルチリンク型飛行ロボットによる屋外環境における自律ブロック運搬設置動作の実現
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河原塚 健人, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 逐次的な把持状態変化を考慮した適応的道具先端操作学習
3. 学会等名 第22回SICEシステムインテグレーション部門講演会講演概要集
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 真壁佑, 永松裕弥, 木村航平, 菅井文仁, 岡田慧, 稲葉雅幸
2. 発表標題 腰部軸を備えた用途適応三輪車型パーソナルモビリティロボットの開発
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤 裕弥, 真壁 佑, 木村 航平, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 低剛性の樹脂製ヒューマノイドにおける視覚に基づく重力補償行動の獲得
3. 学会等名 第21回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI2020)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>エージェントシステム 2021年度  <a href="https://github.com/agent-system/lecture2021">https://github.com/agent-system/lecture2021</a></p>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小島 邦生  (Kojima Kunio)  (50839131)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教    (12601)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	木村 航平 (Kimura Kohei) (50839230)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任助教  (12601)	
研究分担者	垣内 洋平 (Kakiuchi Yohei) (70501328)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任准教授  (12601)	
研究分担者	菅井 文仁 (Sugai Fumihito) (30739256)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任講師  (12601)	
研究分担者	野田 晋太郎 (Noda Shintaro) (30825104)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任助教  (12601)	
研究分担者	趙 漢居 (Zhao Moju) (30825378)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任助教  (12601)	
研究分担者	浅野 悠紀 (Asano Yuki) (40783080)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教  (12601)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	真壁 佑 (Makabe Tasuku)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・博士学生  (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	安齋 智紀  (Anzai Tomoki)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・博士学生     (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関