

令和 3 年 6 月 5 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01799

研究課題名（和文）遠隔協調探索タスクにおける人とロボットの協働メカニズム

研究課題名（英文）Human-robot collaboration mechanisms in remote collaborative object search tasks

研究代表者

三浦 純 (Miura, Jun)

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：90219585

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、離れた場所にいるユーザとインタラクションしながら、ユーザの要求する物体を発見する（遠隔協調物体探索タスク）ことのできるロボットの実現である。そのために必要となる技術として、オントロジを用いたロボットの知識の管理、ユーザの指示のあいまいさを解消するための質問生成、自然な指示のための多様なインタフェースを開発した。また、ロボットの自律性を高めるための技術として、環境認識、認識計画、行動計画の各手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生活支援ロボットにおいて、ユーザの指示する物体を探して持ってくることは基本的な機能の一つである。本研究では、ロボットが環境に関する自身の知識を適切に管理することを中心機能として、必要に応じてユーザとやりとりをしながら物体発見を確実にするためのさまざまな手法を開発した。ユーザの負担を軽減し、かつ自然なやりとりを実現するこれらの手法は学術的な価値があり、また近い将来の生活支援ロボットの実用化に有用なものである。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research is to develop a robot that can find a user-specified object with occasional interaction with the user. We have developed novel technologies for such robots, including ontology-based knowledge management, query generation for resolving ambiguities in the user's command, and various interfaces for natural human-robot interaction. We also developed fundamental technologies for increasing the autonomy of the robots, such as scene recognition, recognition planning, and motion planning.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：サービスロボット 人間ロボット協調 遠隔協調物体探索 移動ロボット ロボット操作インタフェース

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

最近のロボット技術、AI 技術の発展に伴い、ロボティクスによる人の生活サポートが期待されている。特に高齢者向けの生活支援ロボットにおいて指摘されている重要な点の一つは、すべてを自動化するのではなく、サポートを最低限に留めることにより、知的活動・身体活動を継続させ健康年齢を維持することである。そのために、人と協働して動作するロボットへの期待は大きい。そのようなロボットの備えるべき機能の一つは、必要に応じて臨機応変なインタラクションを行って、人の指示の意図を理解することである。

## 2. 研究の目的

本研究では多様なインタラクションによって、ユーザの指示を理解したり、意図を推定したりするための手法を研究する。また、ロボットの動作に必要な環境認識および行動生成についての手法もあわせて研究する。具体的な研究項目は以下の通りである。

- (1) サービスロボット用オントロジシステムの構築と利用
  - (a) オントロジを利用したユーザ指示の精緻化
  - (b) 新たな概念の獲得とオントロジへの登録
- (2) 多様なインタラクションによるユーザ意図の伝達と推定
  - (a) 環境認識結果に基づくユーザ指示あいまいさ解消のための質問生成
  - (b) 操作者・観測者型インタフェースによるユーザによる助言
  - (c) ロボットによるユーザ探索行動の推定と予測
  - (d) 画像による人の遠隔操作意図の早期推定
- (3) 物体探索のための環境認識と行動生成
  - (a) 動的環境での VisualSLAM
  - (b) ロボット探索行動の自動生成
  - (c) 物体把持のための物体認識と把持計画
  - (d) ロボット移動行動の強化学習による生成
  - (e) ロボット競技会への参加

## 3. 研究の方法

- (1)(a): ロボットの環境についての知識を管理するオントロジシステムを開発し、多様なユーザ指示に対し必要に応じて質問を行ってあいまいさを解消する方法を研究する。
- (1)(b): 提示された物体の見えと名称からオントロジ中の適切な階層を選択し、新たな概念を登録する手法を研究する。
- (2)(a): ロボットとユーザが視野を共有しない状況下で、ロボットが環境認識結果を利用してユーザ指示のあいまいさを解消するための質問を生成する手法を研究する。
- (2)(b): ユーザがロボットの動作空間を観察できる状況下で、ロボットに適切な助言を行うためのシステムを設計する。
- (2)(c): ユーザとロボットが同じ環境で分担して物体探索を行う際に、ロボットがユーザの探索行動を推定、予測する手法を研究する。
- (2)(d): 遠隔操作型ロボットにおいて、ユーザ操作の一人称視点画像を解析し、その操作意図を早期に推定する手法を研究する。
- (3)(a): 動的環境下で意味的情報を用いて動的物体の影響を減らすことによる VisualSLAM の高精度化を研究する。
- (3)(b): 未探索領域の解消に基づく物体探査手法を研究する。
- (3)(c): 完全にもしくは部分的に隠蔽された物体の認識手法と目標物体を把持するためのハンド動作計画を研究する。
- (3)(d): 深層強化学習を用いて障害物回避と指定位置移動を両立する行動を獲得する手法を研究する。
- (3)(e): (1)(a)と(3)(b)の成果を基に、国際ロボット競技会に参加し、実環境に近い環境での有効性を検証する。

## 4. 研究成果

(1)(a): ロボットに探索対象物体や環境に関する知識を与えるための枠組みとしてオントロジを用い、オントロジ記述システム KnowRob を拡張して、サービスロボット用オントロジシステムを構築した。ユーザのあいまいな指示(例“飲み物を取ってきて”)に対し、オントロジを参照し不足情報を補完するとともに、必要に応じてユーザへの質問によってさらに情報を得ることにより、指示を実行できるロボットシステムを構築した。ユーザがタスクを指示された場合の行動との比較を行い、同程度の性能が出せることを確認した(図1参照)[Villamar Gómez, 2021a]。

(1)(b): 新たな物体に関する概念を獲得するために、与えられた画像と文字列(物体クラス名)を基に、画像特徴の抽出、WordNet に基づく上位概念候補の獲得、候補文字列に基づく画像検索と画像特徴ベースの類似性判断を組合せ、新たな概念を既存のオントロジに追加するメカニズムを考案した(図2参照)[Villamar Gómez, 2021b]。

(2)(a): 指示された物体クラスに属する物体が複数あった場合に、画像から得られる各物体の特徴の強さの分布から、より有効な(discriminative な)回答が得られる質問を生成する手法を考案し、実環境で動作することを示した(図3参照)[Morohashi, 2019]他。

(2)(b): 視野・視線方向をロボットと独立に制御できるインタフェースを考案し、ユーザが遠隔地のロボットに適宜助言を行うことができるシステムを開発し、遠隔操作など他の手法に対しユーザの使用感が向上することを示した(図4参照)[Matsushita, 2021]他。

(2)(c): ロボットとユーザが同一環境で分担して物体探索を行う際に、環境の構造を考慮して、ユーザの過去の探索行動の推定と未来の探索行動の予測を行う手法を考案し、その結果を利用して自己の探索範囲を効率的に決定するシステムを開発した(図5参照)[石井, 2021]。

(2)(d): 遠隔地のロボットのカメラ映像を見ながらロボットを遠隔操作する場合の手の動きを含む画像系列を解析し、さらに物体ごとのアフォーダンスの情報を加えて、ロボットの操作意図(どの物体をつかもうとするか)を推定する手法を考案し、実ロボットによる動作で検証した(図6参照)[Kojima, 2019]他。

(3)(a): VisualSLAM(画像ベースのSLAM)において、セマンティックセグメンテーションの結果を効率的に統合利用することにより、環境中の動的物体の影響を減らし、カメラ移動とマッピングの精度を上げつつ、実時間で動作するアルゴリズムを考案した(図7参照)[Liu, 2021]他。

(3)(b): 効率的な物体発見のために、未知領域の探査、部屋形状の取得、物体候補の発見・検証を効率的に行うための、統一的視点計画アルゴリズムを考案した(図8参照)[Sasongko, 2017, 2018]。また、部屋の3次元構造も考慮して探索を行う手法を考案した(図9参照)[三明, 2020]。

(3)(c): 物体の山から特定物体を発見し把持するために、部分的に隠されている物体の認識手法と特定物体を見えるようにするための払い動作を含むハンド動作の計画手法を考案した[Miura, 2018]。

(3)(d): 深層強化学習によって移動ロボットの行動方策を獲得する際に、状態の遷移を確実に方策の改善に反映させるとともに、適切なカリキュラム学習を行うことで速くて安全な動きを学習することを可能にした(図10参照)[Dewa, 2020]。また、複雑な行動を学習する際に、要素行動の学習とその統合方法の学習の2段階で学習する方法を考案した[Dewa, 2021]。

(3)(e): 国際ロボット競技会(World Robot Summit(WRS)2018, Partner Robot Challenge(Real Space))に参加した。知識管理と対話(項目(1)(a))と自律物体探索(項目(3)(b))を基にソフトウェアを開発し、14チーム中3位の成績を収めた(図11参照)。



図 1 : ロボットと人の比較実験



図 3 : 質問生成実験

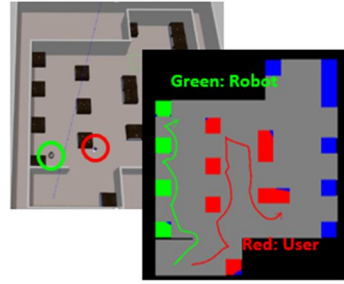


図 5 : 共同物体探索

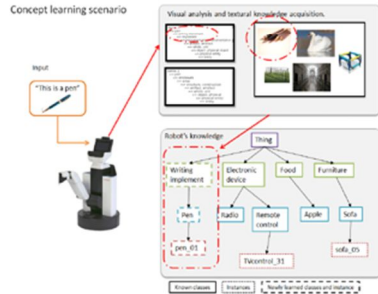


図 2 : 概念学習の枠組み

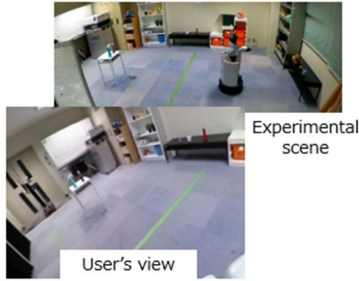


図 4 : 独立視点インタフェースによる助言



図 6 : 操作意図推定実験



図 7 : 意味情報を用いた特徴分類

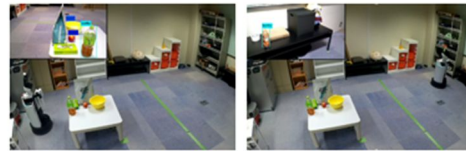
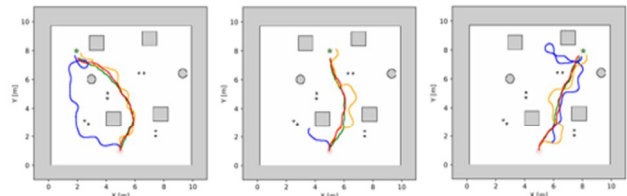


図 9 : 物体探索実験



Green: efficient but slow policy Red: efficient and fast policy (proposed)

図10 : 行動学習結果

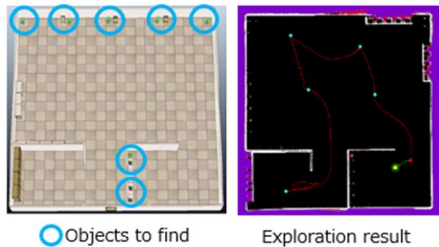


図 8 : 物体探索のための視点計画

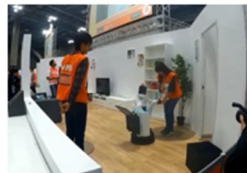


図11 : WRS2018の様子

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Villamar Gomez L., Miura J.	4. 巻 140
2. 論文標題 Ontology-based knowledge management with verbal interaction for command interpretation and execution by home service robots	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Robotics and Autonomous Systems	6. 最初と最後の頁 103763 ~ 103763
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.robot.2021.103763	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 Liu Yubao, Miura Jun	4. 巻 9
2. 論文標題 RDS-SLAM: Real-Time Dynamic SLAM Using Semantic Segmentation Methods	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 23772 ~ 23785
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2021.3050617	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Dewa Chandra Kusuma, Miura Jun	4. 巻 8
2. 論文標題 A Framework for DRL Navigation With State Transition Checking and Velocity Increment Scheduling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 191826 ~ 191838
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2020.3033016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Dewa Chandra Kusuma, Miura Jun	4. 巻 9
2. 論文標題 Integrating Multiple Policies for Person-Following Robot Training Using Deep Reinforcement Learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 75526 ~ 75541
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2021.3082136	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 14件）

1. 発表者名 Jun Miura
2. 発表標題 Query Generation for Resolving Ambiguity in User's Command for a Mobile Service Robot
3. 学会等名 2019 European Conf. on Mobile Robots (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jun Miura
2. 発表標題 EarlyEstimation of User's Intention of Tele-operation using Object Affordance and Hand Motion in a Dual First-Person Vision
3. 学会等名 ICCV-2019 Workshop on Egocentric Perception, Interaction, and Computing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三明優介
2. 発表標題 移動ロボットによる机上物体探索のための視点計画
3. 学会等名 2020年ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jun Miura
2. 発表標題 Sweeping Motions for Finding and Picking Up a Specific Object in a Pile of Objects
3. 学会等名 IROS-2018 Workshop on Towards Robots that Exhibit Manipulation Intelligence (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jun Miura
2. 発表標題 An Integrated Planning of Exploration, Coverage, and Object Localization for an Efficient Indoor Semantic Mapping
3. 学会等名 15th Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jun Miura
2. 発表標題 Machine Learning Applications for Personal Service Robots
3. 学会等名 IAS-15 Workshop on Learning Applications for Intelligent Autonomous Robots (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jun Miura
2. 発表標題 Machine Learning Applications for Personal Service Robots
3. 学会等名 10th Int. Conf. on Information Technology and Electrical Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jun Miura
2. 発表標題 An Integrated Planning of Exploration, Coverage, and Object Localization for an Efficient Indoor Semantic Mapping
3. 学会等名 15th Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Diar Fahrudin Sasongko
2. 発表標題 An Integrated Exploration and Observation Planning for an Efficient Indoor 3D Mapping
3. 学会等名 2017 Int. Conf. on Mechatronics and Automation (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Jun Miura
2. 発表標題 Object Placement Estimation with Occlusions and Planning of Robotic Handling Strategies
3. 学会等名 2017 IEEE Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Liliana Villamar Gomez
2. 発表標題 Ontology Learning of New Concepts combining Textural Knowledge and Visual Analysis for Service Robot Application
3. 学会等名 2021 IEEE Int. Conf. on Intelligence and Safety for Robotics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Liu Yubao
2. 発表標題 RTS-vSLAM: Real-time Visual Semantic Tracking and Mapping under Dynamic Environments
3. 学会等名 16th Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Liu Yubao
2. 発表標題 KMOP-vSLAM: Dynamic Visual SLAM for RGB-D Cameras using K-means and OpenPose
3. 学会等名 2021 IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kotaro Hayashi
2. 発表標題 An Operator and Observer Style Teleoperation User Interface for Remote Object Search
3. 学会等名 2021 IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jun Miura
2. 発表標題 Deep Learning Applications for Robotics
3. 学会等名 2020 Int. Electronics Symp. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三明 優介
2. 発表標題 屋内物体探索における3次元未観測領域推定に基づく視点計画
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石井 雄大
2. 発表標題 人間の探索行動の推定と予測に基づく人間とロボットの共同物体探索の効率化
3. 学会等名 2021年ロボティクスメカトロニクス講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

豊橋技術科学大学行動知能システム学研究室（三浦研究室） <a href="http://www.aisl.cstut.ac.jp/">http://www.aisl.cstut.ac.jp/</a>
--

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

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
---------	---------