

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14102

研究課題名（和文）環境と自己機能評価に基づき柔軟な意思決定が可能な生活支援ロボット

研究課題名（英文）Human support robot capable of flexible decision-making based on environment and self-functional assessment

研究代表者

萬 礼応（Ayanori, Yorozu）

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：40781159

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：人の生活環境下で、ロボットが複雑なタスクを実行するためには、ロボット自身の機能と周囲の状況に基づいて、目標の状態になるように、必要な行動・動作を適宜選択し、動作を実行できる必要がある。先端にRGB-Dカメラを搭載した移動マニピュレータ型ロボットの3次元環境地図生成に対して、観測範囲と未観測領域を観測可能な量を考慮して、移動とカメラ姿勢を逐次決定する方法を提案し、効率的な探索行動が実現できることを確認した。また、テーブルや棚の拭き掃除に対して、マニピュレータの先端が届く範囲と掃除対象領域を考慮して、集合被覆問題を適用することで、経路長と作業時間の観点で効率的な作業が実行できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生活支援ロボットの研究が盛んに行われ、要求されるタスクも複雑になりつつある。本研究では、移動マニピュレータ型ロボットを対象に、移動・マニピュレーション・観測の機能の観点から行動・動作計画を行う方法を提案した。3次元環境地図生成において、移動とカメラ姿勢を逐次決定することで、効率的な3次元環境探索手法を提案した。また、テーブルや棚の拭き掃除に対して、マニピュレータの先端が届く範囲と掃除対象領域を考慮して、集合被覆問題を適用することで、経路長と作業時間の観点で効率的な掃除動作計画を提案した。提案のフレームワークは拭き作業だけでなく、探索や片付けなど生活環境で求められる作業への応用も可能である。

研究成果の概要（英文）：In order for a robot to perform complex tasks in a human living environment, it must be able to select the necessary actions and behaviors as appropriate to achieve the target state and execute them based on its own functions and surrounding environments. For a 3D environmental mapping by a mobile manipulator-type robot equipped with an RGB-D camera at its tip, we proposed a method to sequentially determine the movement and camera posture, taking into account the observation range and the amount of unobserved area that can be observed. It was confirmed that the proposed method can realize efficient search behavior. For wiping and cleaning tables and shelves, we also showed that efficient work can be performed in terms of path length and work time by applying the set covering problem, considering the range reached by the tip of the manipulator and the area to be cleaned.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：行動・動作計画 移動マニピュレータ型ロボット 未知環境探索 掃除計画 集合被覆問題

1. 研究開始当初の背景

生活環境で人をサポートする生活支援ロボットの研究が盛んに行われており、目的地への自律移動のような一つの行動・動作で完結するタスクだけでなく、掃除・片付けなどロボットへ要求されるタスクも複雑になりつつある。さらに、人の生活空間のように、複数の物体が乱雑に存在する環境下において、ロボットが複雑なタスクを実行するためには、周囲の状況を解釈して、目標の状態になるように、移動やマニピュレーションなどの必要な行動・動作を適宜選択（意思決定）し、行動が切替わる際にも動作をシームレスに実行できる必要がある。

この **Task and Motion Planning (TAMP)** では、上位設計として、動作フローの生成や行動を決定するために、環境や実行可能な行動を離散化（記号化）して表現し、事前の知識で与えた実行可能条件（充足制約）などを基に、目標状態になるように、行動のフローや次に取るべき動作を実際の物理空間を考慮して計画する問題として扱われている。しかし、上位の知識表現された離散的な空間での行動計画(**Task/Action Planning**)と実際の物理的な空間での動作計画(**Motion Planning**)には未だ大きな乖離がある。例えば、アームを搭載した移動マニピュレータ型のロボットが扉を開けて移動する際に、扉のどの位置まで接近して、移動機構とアームをどのように活用して、どの角度まで扉を開くなど、計画したフローに従って、行動をシームレスに実行するためには、ロボットが有するセンシングや可動範囲などの機能に応じた動作のための目標設計が必要である。

本研究では、概念的な環境中の物体の属性などの知識情報と物理的コンフィギュレーション空間、ロボットが有するセンシング領域やアクチュエータによる可動範囲などの機能から、複合的に状況判断を行い、柔軟な意思決定／行動選択が可能な生活支援ロボットの実現を目指す。

2. 研究の目的

生活支援ロボットの研究が盛んに行われ、要求されるタスクも複雑になりつつある。ロボットが複雑なタスクを実行するためには、周囲の状況を解釈して、目標の状態になるように、移動やマニピュレーションなどの行動・動作を適宜選択して実行できる必要がある。この **Task and Motion Planning** において、事前に定義された知識に基づき、動作フローを生成するアプローチが提案されているが、状況に応じた柔軟な意思決定／行動選択、計画された動作フローをシームレスに実行することは難しい。本研究では、ロボットが有する要素機能を実行可能な空間と行動の目標動作空間をつなぐように経路／軌道計画を行うことで、柔軟に意思決定／複数の行動から計画された動作を実行するフレームワークを提案し、実機検証を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 移動マニピュレータ型ロボットの3次元地図生成のための未知環境探索

生活支援ロボットが自己位置推定や移動可能な空間を把握して動作計画を行うためには、3次元環境地図を生成する必要がある。本研究では、ロボットが様々な物体が置かれた人の生活空間で動作するために、物体の位置・形状が詳細に記録された3次元格子地図を自動生成する方法に着目する。掃除ロボットなど2D-LiDARやカメラを搭載した移動ロボットで、環境を移動しながら環境地図を自動生成する探索手法は提案されている。しかし、人の生活空間のように、テーブルやいすなど様々な高さの物体が存在する環境においては、センサがロボットに固定されている場合には、観測できない領域が発生してしまう。

本研究では、図1に示すように、先端にRGB-Dカメラが付いたマニピュレータを搭載した移動マニピュレータ型ロボットの未知環境での3次元環境地図の自動生成を対象として、行動・動作計画手法の提案を行う。テーブルやいすなど様々な高さの物体が存在する人の生活環境において、早く正確に3次元地図を生成するために、未観測な領域を定義し、観測のための移動目的地およびカメラ姿勢を計画する必要がある。すなわち、ロボットの機能と実行可能な空間（ここではRGB-Dカメラの観測範囲とロボットベースが移動可能な範囲）に応じて、移動台車の移動とマニピュレータの姿勢を決定する必要がある。環境に対しての行動の目標空間を、ある位置・姿勢で未観測な領域を観測可能な量を記録した観測量マップで表現し、未知環境探索のための目標位置とカメラ姿勢を観測量マップに基づき逐次決定する方法を提案する。また、未観測領域を多く観測できるようにカメラの位置・姿勢を変化させながら移動すること、テーブルの下などにはアームの姿勢を低くしながら移動させることで、移動距離の短い効率的な探索を行う。

(2) 移動マニピュレータ型ロボットの拭き掃除動作計画

床面を掃除するロボットは普及しているが、テーブルや机などの拭き掃除を行うロボットは実用化されていない。本研究では、図2に示すように、移動マニピュレータ型ロボットの人の生活環境におけるテーブルや棚の拭き掃除タスクにおいて、行動・動作計画手法の提案を行う。

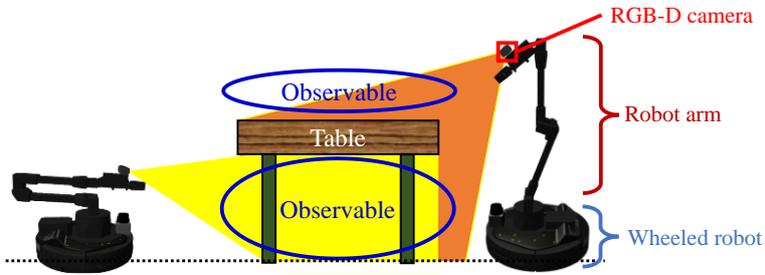


図1 RGB-Dカメラ搭載移動マニピュレータ型ロボットによる3次元センシングのイメージ

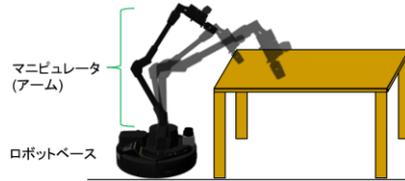
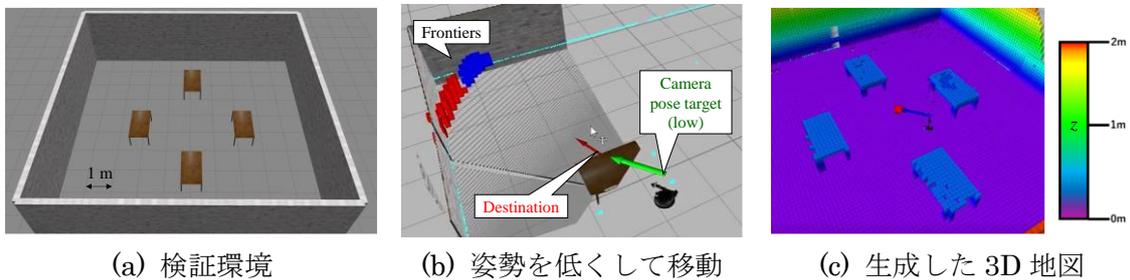


図2 移動マニピュレータ型ロボットによるテーブル拭き掃除のイメージ



(a) 検証環境

(b) 姿勢を低くして移動

(c) 生成した3D地図

図3 移動マニピュレータ型ロボットによる3D地図生成結果

テーブルや棚などを効率よく掃除するためには、ロボットの機能と実行可能な空間（ここではマニピュレータの先端が届く掃除可能な範囲とロボットベースが移動可能な範囲）に応じて、移動台車の位置とマニピュレータの姿勢を決定する必要がある。本研究では、予め作成した3次元地図に基づき、テーブルや棚などの掃除が必要な天板、棚板の掃除対象領域（目標動作空間）を抽出する。抽出した掃除対象領域に対して、マニピュレータの動作可能領域を考慮して、逐次的にマニピュレータの先端の位置およびロボットベースの移動位置を決定する方法を提案した。

しかし、逐次的な行動の決定では、往復するような動きが生じてしまい、時間や経路長の観点から効率的な動作が実現できないことが分かった。これの問題に対して、抽出した掃除対象領域に対して、マニピュレータの動作可能領域を考慮して、マニピュレータの動作可能領域を部分領域として捉えて、集合被覆問題を適用し、移動台車の経路を計画する方法を提案した。

4. 研究成果

(1) 移動マニピュレータ型ロボットの3次元地図生成のための未知環境探索

独立二輪移動ロボット（ロボットベース）に5自由度のロボットアームを搭載し、その先端にRGB-Dカメラを搭載したロボットを想定し、Gazeboシミュレータ上で検証を行った。

1つ目の検証では本研究の探索法の特徴の1つである移動中にカメラの向きを変えることの効果を検証した。複数の物体が置かれている環境、通路のような環境いずれの環境においても、提案のカメラ姿勢を未観測領域に向くように変更しながら移動させる方法によって、短い時間と移動距離で領域を探索できることを確認した。

2つ目の検証ではロボットベースの目的地の決定方法において、ロボットからの距離・角度を考慮した補正の効果を検証した。複数の物体が置かれている環境、通路のような環境いずれの環境においても、補正を行うことによる効果があった。ただし、環境に応じて、距離、角度による効果の大きさは異なることが分かった。

また、図3に複数台テーブルがある環境での3D地図生成結果の一例を示す。図3(b)のようにアームの姿勢を低くしてテーブルの下を潜り抜けて移動することで、移動時間と経路を短くした効果的な探索ができることを確認した。

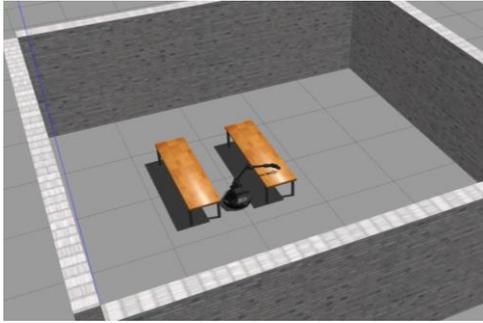


図4 シミュレーションでの
テーブル拭き動作の様子



図5 実機実験の様子

(2) 移動マニピュレータ型ロボットの拭き掃除動作計画

独立二輪移動ロボット（ロボットベース）に5自由度のロボットアームを搭載し、Gazebo シミュレータおよび実機において、テーブルや棚が置かれている環境下での検証を行った。

3つの手法を比較した。ロボットベースから近い未掃除のエリアを選んで移動し、アームが届く範囲に未掃除エリアがなくなったら次の位置へ移動することを繰り返すリアルタイムで行動を決定する逐次法である。次に、事前に掃除エリアとアームが届く範囲を考慮して、ロボットベースの掃除のための停止位置の候補に対して、集合被覆問題を解いて、最小の掃除停止位置を決定しておき、近い位置から順番に辿って掃除をする方法である。最後に、集合被覆問題で決めた掃除定位置に対して、巡回セールスマン問題を基に予め移動順番も決める方法である。

図4に2つのテーブルが置かれている環境での一例を示す。逐次移動する場所を決定する方法では、行ったり来たりするような移動が見られて、移動距離と時間が長くなってしまった。これに対して、ロボットの機能と実行可能な空間（ここではマニピュレータの先端が届く掃除可能な範囲とロボットベースが移動可能な範囲）と掃除対象領域（目標動作空間）に基づいて、適切な移動位置を決定することで、移動距離と作業時間を大幅に低減することができた。また、巡回セールスマン問題で移動の順序を予め定めることで、移動距離と時間がさらに短い作業を実現できた。また、図5に示すように、実機実験においても同様の結果を確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 由利倫太郎, 大矢晃久, 萬礼応
2. 発表標題 モバイルマニピュレータロボットの机拭き掃除動作計画
3. 学会等名 第41回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 魚躬良太, 萬礼応, 大矢晃久
2. 発表標題 カメラ付きアームの能動的な姿勢変更による3次元地図生成のための未知環境探索
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryota Uomi, Ayanori Yorozu, Akihisa Ohya
2. 発表標題 Autonomous Exploration for 3D Mapping Using a Mobile Manipulator Robot with an RGB-D Camera
3. 学会等名 17th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-17) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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