

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月4日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2011

課題番号：20360120

研究課題名（和文） 複数ロボットシステムの動的環境情報取得と非完全拘束型協調作業の統合に関する研究

研究課題名（英文） System Integration of Information Acquisition of Dynamic Environments and Caging based Cooperative Object Handling for Multiple Robot System

研究代表者

王 志東 (WANG ZHIDONG)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：40272017

研究成果の概要（和文）：

広範囲での移動や組み立て作業を行うため、非拘束型協調搬送を実現する協調型動的作業環境情報システムを考案し、環境センシングおよび作業の不確かさを考慮した基本要素システムの設計を行った。動的環境における人間の存在履歴及び行動履歴を確率的表現する人間行動マップというコンセプトを提案し、環境のマップと同時に構築する手法を確立した。マップのデータ構造を設計し、異なる観測実験データの蓄積・統合アルゴリズムも実装し、有効性の検証を行った。

研究成果の概要（英文）：

In this research, we proposed an information acquisition system for performing caging based cooperative task, such as object transportation and handling in dynamic environments with human activates. For representing the human existence, posture and motion histories, we proposed a concept called *Human Motion Map* which is a hybrid multiple states probabilistic map system. A *Human Motion Map* generation and high accuracy map data fusion algorithm is developed for recording and integrating human motion data obtained via multiple experiments. Experiment results illustrate the validity and scalability of the proposed system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2009年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011年度	1,800,000	540,000	2,340,000
総計	13,500,000	4,050,000	17,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：ロボット工学、知能機械、制御工学、計測工学、システム工学、協調ロボットシステム、人間協調

## 1. 研究開始当初の背景

ロボットシステムが作業や環境の変化に応じて多様な組織形態を実現できることは、応用からみると非常に重要な意味を持つ。動

的な協調作業を実現しながら、未知または変化している環境と、環境中にある人の行動や移動物体の運動などの作業情報を取得し、複数ロボット間でこれらの情報を共有できるのは、協調システムの高性能化への必須条件

と考える。

本研究では、申請者グループが従来開発した力学相互作用に基づく複数ロボットの Leader-Follower 型分散協調作業技術に、環境情報の動的取得と非拘束型作業手法を導入し、実世界での物体ハンドリング作業への実現を目的として、これらの基礎技術を統合・発展し、高機能かつ実用性のある協調作業システムの開発を目指す。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究は、協調に必要な作業環境情報の取得・交換・共有技術と、柔軟な協調作業技術との統合の観点から、複数移動ロボットシステムにおいて、実作業環境でのセンサと通信情報に基づいて力協調を有する搬送作業において協調の実現を目指している。

(2) 人間が多く活動している動的室内環境で協調作業を遂行しているロボットシステムによる人間行動情報の取得及び行動データの表現の枠組みの構築を目指し、その上、蓄積型人間行動データの取得と行動情報の利用の基本アーキテクチャの設計を行う。

## 3. 研究の方法

(1) ロボットの自律搬送作業の進行と同時に作業環境情報の動的取得手法の開発

広範囲での移動や組み立て作業を行うため、力協調及び動的役割交代を実現する協調戦略に適用できる作業環境情報システムを考案・構築する。そして、作業に関する環境モデルを形成し、SLAM 手法を、動的環境情報特に人間行動情報を取得し、環境モデルを形成するアルゴリズムを構築する。

(2) 非完全拘束型協調作業システムの設計

作業対象となる物体の運動特性やロボットの作業能力を考慮したケーシングフォーメーションの構築アルゴリズムを確立し、ダイナミックケーシングに基づく非完全拘束型協調物体ハンドリング作業計画法を確立し、作業と情報取得の二つの目的を同時遂行できるシステムを構築する。

(3) 作業環境にいる人間の行動推定アルゴリズムの提案

マネージャロボットが取得した3次元レンジ情報と画像情報に基づいて、作業環境中に存在する人を抽出し、確率手法を用いて人間の位置・運動情報を推定する。作業指示者の運動推定器によって得た位置・運動情報と合わせ、人間の随意参加に対応できる柔軟な協調作業システムの基礎技術を確立する。

(4) 動的環境及び人間行動情報に関するマ

## ップデータアーキテクチャの提案と構築

構築し動的環境及び人間行動情報取得システムから生成する行動マップデータのデータアーキテクチャを考案し、協調作業に利用しやすい環境データと人間行動及び作業指示など異なる性質な情報を利用できるシステムを確立し、作業要求に対応できる行動情報ベース複数ロボットシステムの基礎を構築する。

## 4. 研究成果

広範囲での移動や組み立て作業を行うため、非拘束型協調搬送を実現する協調戦略に適用できる動的作業環境情報システムを考案し、環境センシングおよび作業の不確かさを考慮したマルチロボットの基本要素システムの設計を行った。

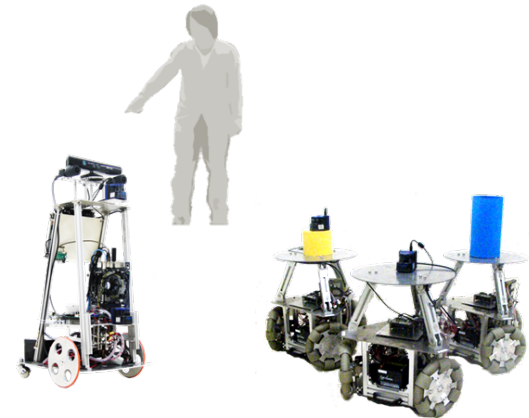


図 1 Multiple Robot Systems Developed for Human Motion Map Generation and Caging based Manipulation with Human Instruction.

構築したマルチロボットシステム（図 1）は、作業情報の生成と協調作業の計画を目的とするマネージャロボットと複数台ワーカーロボットを有するものである。3台のワーカーロボットが全方向移動機能を有するよう設計され、ホールボディにより物体のハンドリングができるよう構築した。マネージャロボットは、広域の人間存在情報を取得する複数のレーザレンジセンサ、カメラ及び人間動作情報を取得できる Kinect モーションセンサを搭載し、環境及び作業指示を含む人間の人間行動情報の取得と地図情報システムの構築ができるように構築した。

非完全拘束型協調物体ハンドリングに関して、物体の運動特性やロボットの作業能力を考慮した動的ケーシングフォーメーションをモデル化し、軌道余裕とケーシング余裕に基づく不確かさを考慮した動的フォーメーションの準最適解を求めるアルゴリズムを提案した。そして、リーダーロボットの動的ケーシングを保証できる最大ケーシング保

障領域の定式化及び算出アルゴリズムを確立した。さらに、リーダフォロベースの局所情報のみに依存するロボットの協調制御手法を考案した。製作したマネージャロボットが取得したレンジ情報に基づいて、作業環境中に存在する人を抽出し、確率手法を用いて人間の位置・運動情報を推定するアルゴリズムを確立し、検証実験を行った。人間の作業指示による協調搬送の基本検証実験を行い、提案する手法の正当性を示した。

本研究では、環境における人間の存在履歴及び行動履歴をマップとして表現する Human Motion Map というコンセプトを提案した。環境マップ生成と自己位置推定を同時に実現できる SLAM の技術を用い、拡張し、動的環境のマップを生成と同時に Human Motion Map を生成するアルゴリズムを構築した。通常のロボットの活動空間の表現として SLAM で生成した環境マップと異なり、本研究で提案した Human Motion Map のアーキテクチャ (図 2) として、日常屋内空間での人間の存在履歴としての Human Existence Map と人間の行動履歴としての Human Posture and State Map という二層構造となり、確率的な多状態ハイブリッドマップ (図 3) となる。

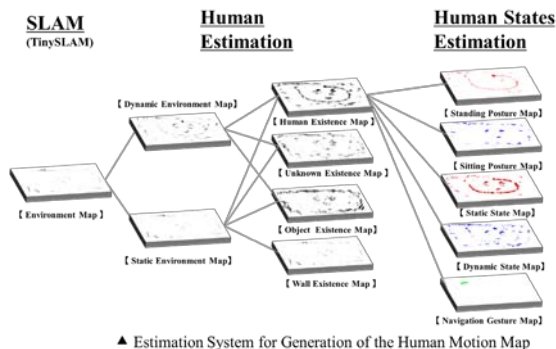


図 2 Human Motion Map Architecture

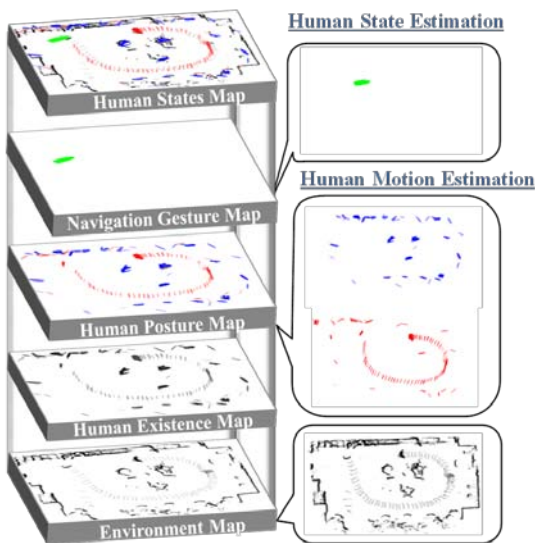


図 3 Human Motion Map Data Structure for Human State Estimation and Human Motion Estimation

マネージャロボットに実装した実時間人間行動推定システムにより、人間の自由空間移動と作業指示の行動データを分離でき、作業指示位置を高精度の観測が実現できるロボットの運動制御手法を実装した。観測した人間行動の確率型データは、構造化した Human Motion Map サブマップシステムに蓄積し、人間の日常行動空間で活動するロボットの行動決定の新たな基礎情報となる。このコンセプト及び基本検証実験結果を初めて発表した論文は、国際会議 IEEE ROBOT2010 に大会最優秀論文 Finalist に選ばれ、表彰された。

本研究では、日常活動空間で観測した着席、歩行や作業指示を含む人間の行動状態に関する行動マップ構成用のデータ構造を設計した。人間行動の基本要素として、実験データから異なる環境における人間の歩行行動パターンを求め、離散的な観測の補間アルゴリズムを提案した。静的な環境マップと異なり、人間行動を表現する Human Motion Map の構築には、ロボットの異なる場所での情報取得及び異なる期間及び時間の情報取得という優位性を有する。本研究において、異なる観測実験で得た人間行動データの蓄積・統合アルゴリズムも提案し、マネージャロボットに実装したうえ、Cloud 型環境情報システムの構築と協調作業により精度高い推定に基づく実装を行った。

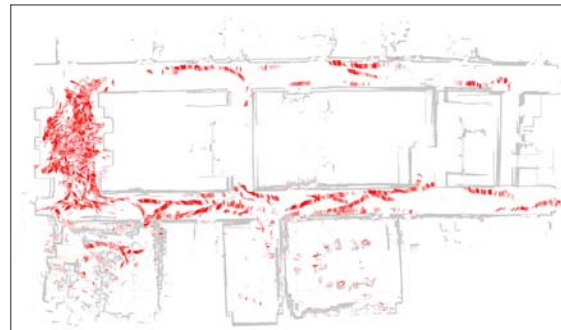


図 4 Experiment Result of Human Motion Map

実装した人間行動の実時間取得システムを用いて、人間行動マップのデータ統合に関する位置精度の評価を行った。広域人間行動マップに関する検証実験では、異なる 50 組のデータから Human Motion Map への統合を行い、提案するコンセプト、マップアーキテクチャ及び行動データ構築手法の有効性を例証した。また、蓄積型データ構造に基づく Human Motion Map のデータから異なる場所での行動特徴の定量化について検討・考案し、構築した Human Motion Map を用いて検証し、動的環境における協調搬送作業に適用した際の有効性を検証した。これらの技術は、人間行動マップに基づく動的環境における作業指示の推定に重要な基礎を構築できた。さ

らに、蓄積型人間行動マップのデータ構造に対して領域特徴を導入することで、近年開発・利用されている検索ベースの地図利用の技術と融合することで、空間依存型と非依存型の人間行動情報の作業計画への提供に堅実な基礎を構築した。

本研究で得た成果は、今後複数ロボットにおける人間活動環境での協調作業の高度化に寄与するのみではなく、大規模空間領域における多要素な人間行動マップの構築の研究の基礎技術及び要素データを提供している。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計7件)

- ① 和田哲也、小川 祐司、王 志東、平田泰久、小菅 一弘、屋内動的環境における人間行動マップの生成とアップデート、ロボティクス・メカトロニクス講演会2012、2012年5月29日、浜松。
- ② Y. Ogawa, Z. D. Wang, T. Wada, K. Tomiyama, Y. Hirata, K. Kosuge, Building Human Motion Map with Human States Estimation in Indoor Dynamic Environments. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetic Systems, pp. 1090-1095. 2011年12月10日、タイ・プーケット。
- ③ 小川祐司、和田哲也、王 志東、富山 健、屋内環境における移動ロボットのための人間活動状態の推定と人間行動マップの構築、ロボティクス・メカトロニクス講演会2011、2011年5月28日、岡山。
- ④ T. Wada, Z. D. Wang, T. Matsuo, Y. Ogawa, Y. Hayashibara, Y. Hirata, K. Kosuge, Building Human Motion Map for Mobile Robot in the Indoor Dynamic Environment, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetic Systems, pp. 543-548, 2010年12月16日、中国・天津、(Best Conference Paper Finalist受賞)。
- ⑤ 和田哲也、松尾智和、金田修、王 志東、屋内動的環境における移動ロボットのための人間行動マップの生成、ロボティクス・メカトロニクス講演会2010、2010年6月14日、旭川。
- ⑥ Z. D. Wang, H. Matsumoto, Y. Hirata, K. Kosuge, A Path Planning Method

for Dynamic Object Closure by using Random Caging Formation Testing, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5923-5929, 2009年10月14日、アメリカ・セントルイス。

- ⑦ 松本英統、王 志東、平田泰久、小菅一弘、協調搬送のための動的ケーシングを実現する複数ロボットの軌道計画、ロボティクス・メカトロニクス講演会2009、2009年5月24日、福岡。

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

王 志東 (WANG ZHIDONG )  
千葉工業大学・工学部・教授  
研究者番号：40272017

##### (2) 研究分担者

小菅 一弘 (KOSUGE KAZUHIRO)  
東北大学・工学研究科・教授  
研究者番号：30153547

平田 泰久 (HIRATA YASUHISA)  
東北大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：20323040

富山 健 (TOMIYAMA KEN)  
千葉工業大学・工学部・教授  
研究者番号：30207625