

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04019

研究課題名(和文) 環境モニタリングのための人間・モバイルセンサネットワークの階層型協調制御

研究課題名(英文) Hierarchical Cooperative Control of Human-Mobile Sensor Networks for Environmental Monitoring

研究代表者

藤田 政之 (Fujita, Masayuki)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：90181370

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、人間・モバイルセンサネットワークの階層型協調制御システムの構築に向けて、(1)運動と人間の決定を受動性という共通概念で包括する理論の構築、(2)実験から得たデータによる人間の受動性解析、(3)ネットワークのオンライン最適化システムの構築に取り組んだ。(1)に関しては、予定通り理論構築に成功し、国際会議や論文誌に採択された。(2)に関しては、東京-金沢間を通信により接続した遠隔実験システムを構築し、受動性解析を行った。本結果は国際学術雑誌の特別号に掲載された。(3)に関しては、時相論理混合型予測制御問題を混合整数計画問題として定式化し、オンライン最適化コードの自動生成に成功した。

研究成果の概要(英文)：This project aimed at (1)proposing a theoretical framework in which motion and human decision process are fused by passivity, (2)analyzing human passivity from data obtained by experimental systems, (3)proposing online optimization system of networks for a hierarchical distributed cooperative control system of human-mobile sensor network. On topic (1): We succeeded in deriving theoretical results. The results were presented at international conferences and published in international journals. On topic (2): We built a remote experimental system connecting Tokyo and Kanazawa, and analyzed human passivity. The result is published in an international magazine as a special issue. On topic (3): We formulated mixed temporal logic model predictive control problem as a mixed integer programming problem, and succeeded in automatic generation of online optimization codes.

研究分野：システム制御

キーワード：制御工学 環境モニタリング 人間・モバイルセンサネットワーク 協調制御 階層制御

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 自然災害や犯罪に向けて、高度な環境モニタリングシステムの重要性が高まっていた。

(2) 広域・極地のモニタリングにおいて、効率性・耐故障性・安全性等の観点から、個々のセンサに移動能力を課すモバイルセンサネットワークが有望な手法の一つであると期待されていた。

(3) 複数の制御対象を分散的な制御により協調的に振る舞わせる協調制御が精力的に研究されていた。また、協調制御の枠組みがモバイルセンサネットワークの効率的な運用に有効であると考えられていた。

(4) 協調制御に関する多くの研究は、センサ群の自律性を高めることに集中していた一方、優れた適応能力を有する人間を上位機構として組み込むシステム構築に向けた研究が海外で注目され始めていた。しかし、国内での取り組みはほとんど行われていない状況であった。

### 2. 研究の目的

本研究は主に以下の3つの課題に取り組むことを目的とした。

(1) まず、人間とセンサを搭載した移動ロボット群により構成されたネットワーク全体を協調させる制御システムの提案を目的とした。このとき、人間オペレータとロボット群が安定な相互作用を行えることが重要であり、システムの入出力に関する受動性という概念に着目することで達成を目指した。

(2) 制御構造の提案の際に、人間オペレータは受動的なシステムであると想定していたが、この仮定が妥当であるかは自明ではなかった。そのため、Human-In-The-Loopシミュレータと遠隔地をつなぐ実験システムを構築し、実際の間オペレータから得られたデータから人間の受動性解析を行うことも目的とした。

(3) 人間の受動性はロボット群の動特性に深く関連していることが予想された。また、ロボット群の動特性は、ロボット間の通信構造が支配的に関連していることがわかっていった。そこで、予測制御の概念に基づき、状況に応じた最適なネットワーク構成をオンラインで決定する手法の提案を3つ目の目的とした。

### 3. 研究の方法

課題(1)に関する研究方法は以下の通りである。

(1-1)人間オペレータが受動的に振る舞うと仮定したもとの、人間オペレータとロボット群が安全に相互作用可能な制御構造を提案した。さらに、人間の所望する運動をロボット群が達成可能であることを理論的に証明した。

(1-2)上記制御構造内において、ロボット間の通信に遅れがある状況においても人間オペレータとの安定した相互作用を保証する制御構造へと拡張した。さらに、人間の所望する運動をロボット群が達成可能であることを理論的に証明した。

(1-3)人間オペレータが受動的であるという仮定を緩和するため、受動性不足理論を導入し、新たな制御構造へと拡張した。さらに、受動性不足理論に基づき、収束性の証明に取り組んだ。

(1-4)二輪ロボットを想定した際の、視覚センサによる対象ロボットへの追従制御問題に取り組んだ。

(1-5)ロボット群がある拘束を満たしつつ人間オペレータの指令に従う制御アルゴリズムの提案に取り組んだ。

(1-6)人間オペレータの力指令に時変な通信遅れがある状況下でも遠方のロボットマニピュレータに伝達し、安定な制御を行う双方向テレオペレーションシステムの提案をした。さらに安定性を理論的に証明した。

課題(2)に関する研究方法は以下の通りである。

(2-1)人間オペレータが受動的に振る舞うという仮定の妥当性を検証するため、Human-In-The-Loopシミュレータの構築を行った。

(2-2)構築したシミュレータにより、複数名からデータを取得し、受動性の解析に取り組んだ。

(2-3)個人差やロボット群の動特性の影響により受動性が満たされない際に、受動性を回復するための機構の提案に成功した。

(2-4)提案した制御構造の有効性の検証に向け、東京-金沢間を実際の通信により接続し、遠隔でロボット群を人間オペレータが操作可能な実験システムの構築に取り組んだ。

(2-5)人間が受動不足性を有するという新たな仮定の妥当性を検証するためのHuman-In-The-Loopシミュレータの構築に取り組んだ。

(2-6)人間オペレータの受動不足性の解析を複数人に対して実施した。

課題(3)に関する研究方法は以下の通りである。

(3-1)まず、当初の計画通り、論理混合型予測制御の文献調査を行うとともに、その求解ソフトの利用法を習得した。

(3-2)時間的拘束を表現可能な時相論理を組み入れた時相論理混合型予測制御問題を混合整数計画問題として定式化した。

(3-3)上記で定式化した問題を解くためのオンライン最適化コードの自動生成に取り組んだ。

#### 4. 研究成果

課題(1)に関する研究成果は以下の通りである。

(1-1)ある動特性を満たすロボットを考える際、通信により結合されたロボット群全体が受動性を有する制御則を提案した。また、人間オペレータにフィードバックする情報とロボット群に送信する情報を受動性に基づき決定した。さらに、受動性理論により、人間が所望する運動にロボット群が同期することを理論的に証明した。本結果はBook ChapterとしてSpringer社から出版された学術本に掲載された。

(1-2)上記制御構造では、ロボット間の通信に遅れが存在することを考慮していなかった。そこで、通信路を受動化する機構を導入することで安定な相互作用が可能な機構を提案した。さらに、理論的に収束性を解析した。本結果は国際会議および国内論文誌に採択・掲載された。

(1-3)人間オペレータが受動不足性を有すると仮定するとき、ロボット群と安全な相互作用を可能とする協調制御則を受動不足理論に基づいて提案することに成功した。受動不足理論に基づき、人間の目標とする位置および速度にロボット群が同期することを理論的に証明することに成功した。本結果は国際会議論文誌とSpringer社が出版する国際学術論文誌に採択・掲載された。

(1-4)二輪ロボットに視覚センサが搭載されている状況を考え、対象ロボットの情報は画像情報のみとしたときの制御アルゴリズムの提案を行った。さらに、理論的に目標運動への収束性を議論することに成功した。本結果は国際会議論文誌と国際学術論文誌に採択・掲載された。

(1-5)分散リファレンスガバナと目標値に対する合意アルゴリズムを導入することで、人間オペレータの指令を受け取ることができないロボットがいる状況下でもロボット群全体が拘束を満たす制御構造を提案した。さらに、シミュレーションと実験により有効性を確認することに成功した。本結果は国際会議論文誌に採択・掲載された。

(1-6)通信遅れの最大遅延時間に対して、人間オペレータと通信により接続されているマニピュレータが安全に運動するための制御ゲインの条件を導出することに成功した。さらに、理論的に運動同期することを証明した。

課題(2)に関する研究成果は以下の通りである。

(2-1)ソフトウェア上にロボット群の運動を再現し、人間オペレータがタブレットなどのインターフェースを通してロボット群を操作可能なシミュレータを構築した。また、実際の移動ロボットを用いた実験システムも構築した。

(2-2)人間がロボット群を操作する際の視覚情報と速度指令値から、人間の意思決定過程のモデルを導出し、受動性の検証を行った。さらに、複数人のデータを用いることで個人差の影響も検証した。

(2-3)人間オペレータがロボット間の通信構造と個人差によらず受動性を満たすための機構を提案した。実際に、すべての被験者が通信構造によらず受動性を満たすことを確認することに成功した。

(2-4)構築した実験システムにより、金沢からタブレット経由で東京の実験システムに接続し、ロボット群を目標位置に制御する実験を行った。本結果はアメリカ機械学会が出版している学術雑誌に特別号として掲載された。

(2-5)人間オペレータの受動性解析のために構築したシミュレータをもとに、受動性不足性解析に向けたシミュレータ構築を行った。さらに、実際のデータから、ある被験者が受動不足性を有していることを確認した。

(2-6)複数人に対して受動不足性解析を行い、全員が満たしていることを確認した。この結果より、受動不足性は受動性よりも人間オペレータの特性を表現するのに妥当な性質であることを確認することに成功した。

課題(3)に関する研究成果は以下の通りである。

(3-1) ロボット制御に限らず広く論文調査を行うことで、自動車の軌道生成に論理混合型予測制御が応用されていることがわかった。また文献調査を通して、本研究課題に対して性能、價格的に最適な求解ソフトウェアを決定した。

(3-2) ロボット制御では、時々刻々と状況が変化する中で行動を決定する必要があるため、時相論理を拘束条件として取り入れることが必要となった。時相論理混合型の最適化問題をモデル予測制御の枠組みで定式化することに成功した。

(3-3) 上記問題を求解ソフトに実装することでオンライン最適化計算を行うことに成功した。シミュレーションにより、その有効性を確認することに成功した。

#### 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)

〔雑誌論文〕(計 6 件)

M. W. S. Atman, T. Hatanaka, Z. Qu, N. Chopra, J. Yamauchi and M. Fujita, Motion Synchronization for Semi-autonomous Robotic Swarm with a Passivity-short Human Operator, International Journal of Intelligent Robotics and Applications, 査読有, Vol. 2, No. 2, 2018, 1-17

山内淳矢, Made Widhi Surya Atman, 畑中健志, 藤田政之, ロボット間の通信遅れを考慮した人間-ロボティックネットワークの協調制御: 受動性アプローチ, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 53, No. 12, 2017, 663-670

T. Hatanaka, N. Chopra, J. Yamauchi, M. Doi, Y. Kawai and M. Fujita, A Passivity-based System Design of Semi-autonomous Cooperative Robotics Swarm, ASME Dynamic Systems and Control Magazine, 査読有, Vol. 5, No. 2, 2017, 14-18

S. Nakano, T. Ibuki and M. Sampei, Visual Feedback Position Tracking and Attitude Analysis of Two-wheeled Vehicles Integrating a Target Vehicle Motion Model, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 10, No. 3, 2017, 204-213

向井正和, 青木博, 川邊武俊, 1車線道路における交通信号機情報と前方車両の挙動に基づく省燃費加減速制御, 自動車技術会論文誌, 査読有, Vol. 48, No. 1, 2017, 161-166

向井正和, 野口凌介, 川邊武俊, 混合整数計画法を用いたモデル予測制御による1車線道路への合流経路生成, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 52, No. 11, 2016, 625-630

〔学会発表〕(計 9 件)

M.W.S. Atman, Two Variations of Passivity-Short-Based Semi-autonomous Robotic Swarms and Their Experimental Analysis, SICE International Symposium on Control Systems 2018, Mar. 9-11, 2018, Tokyo, Japan

T. Murao, Bilateral Control of Nonlinear Teleoperation for 2 DOF Robot Manipulators with Antagonistic Bi-articular Muscles, 2017 Asian Control

Conference, Dec. 17-20, 2017, Gold Coast, Australia

M. Mukai, Model Predictive Control with a Mixed Integer Programming for Merging Path Generation on Motor Way, 1st IEEE Conference on Control Technology and Applications, Aug. 27-30, 2017, Hawaii, US

J. Yamauchi, Performance Analysis of Visual Feedback Leader-Following Pose Synchronization with Stochastic Uncertain Leader in Three Dimensions, 1st IEEE Conference on Control Technology and Applications, Aug. 27-30, 2017, Hawaii, US

T. Nguyen, A Passivity-Based Distributed Reference Governor Applied to Robotic Networks, 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control, July 9-14, 2017, Toulouse, France

J. Yamauchi, Passivity-Based Control of Human-Robotic Networks with Inter-Robot Communication Delays and Experimental Verification, 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 3-7, 2017, Munich, Germany

小山瞭, 姿勢を考慮した人間・ロボティックネットワークの分散協調制御に関する一考察, 第17回 SICE システムインテグレーション部門 講演会論文集, 2016年12月15日~2016年12月17日, 札幌

向井正和, 複数交差点の交通信号機に対するモデル予測制御に関する一考察, 第59回自動制御連合講演会, 2016年11月10日~2016年11月12日, 福岡

T. Hatanaka, Passivity-Based Bilateral Human-Swarm-Interactions for Cooperative Robotic Networks and Human Passivity Analysis, 54th IEEE Conference on Decision and Control, Dec. 15-18, 2015, Osaka, Japan

〔図書〕(計 3 件)

T. Hatanaka, N. Chopra, J. Yamauchi and M. Fujita, Springer-Verlag, Trends in Control and Decision-Making for Human-Robot Collaboration Systems, Y. Wang and F. Zhang (eds.), 2017, 31

畑中 健志, 近代科学社,  
ロボット制御学ハンドブック, 2017

T. Hatanaka, N. Chopra, M. Fujita and  
M. Spong, Springer Verlag, Passivity  
Based Control and Estimation in  
Networked Robotics, 2015, 349

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤田 政之 (FUJITA MASAYUKI)  
東京工業大学・工学院・教授  
研究者番号: 90181370

### (2) 研究分担者

村尾 俊幸 (MURAO TOSHIYUKI)  
金沢工業大学・工学部・講師  
研究者番号: 00447038

畑中 健志 (HATANAKA TAKESHI)  
東京工業大学・工学院・准教授  
研究者番号: 10452012

伊吹 竜也 (IBUKI TATSUYA)  
東京工業大学・工学院・助教  
研究者番号: 30725023

向井 正和 (MUKAI MASAKAZU)  
工学院大学・工学部・准教授  
研究者番号: 50404059

河合 宏之 (KAWAI HIROYUKI)  
金沢工業大学・工学部・准教授  
研究者番号: 70410298

河合 康典 (KAWAI YASUNORI)  
石川工業高等学校・その他部局等・准教授  
研究者番号: 90413765

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号:

### (4) 研究協力者

マデ ウィディ スリア アトマン (MADE  
WIDHI SURYA, Atman)  
山内 淳矢 (JUNYA, Yamauchi)  
タム グエン (TAM, Nguyen)  
小山 瞭 (RYO, Koyama)