

## 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25年6月24日現在

機関番号：37301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22500169

研究課題名（和文）空間光通信を用いたロボット相互通信・相互位置検出に基づく隊列形成と相互連携

研究課題名（英文）Multi-robot Formation and Synchronization Control based on a Space-Division Optical Inter-Robot Communication and Localization System

研究代表者

安田元一（YASUDA GEN'ICHI）

長崎総合科学大学・情報学部・非常勤講師

研究者番号：10174509

研究成果の概要（和文）：本研究はアドホックなロボット・チームの編成と複数ロボットの共同作業・連携動作を実証する実装モデルの開発を目的とし、そのために必要となるロボットの行動を拡張ペトリネットに基づき階層的にモデル化し、モデルにしたがって実際に実空間で複数ロボットを動作させるための Web Service を用いた階層制御システムの設計と実装法の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：This research deals with a systematic methodology for modeling multi-robot tasks based on Petri nets. To overcome some difficulties in the real-time multi-robot formation and synchronization control, a hierarchical modeling approach has been developed, and the extended net representation of the robotic behaviors has been embedded into a web service based distributed control architecture.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	900,000	270,000	1170,000
2011年度	900,000	270,000	1170,000
2012年度	900,000	270,000	1170,000
総計	2700,000	810,000	3510,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学、知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：センサ融合、統合、ロボット相互通信、協調的位置同定

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 複数の移動ロボットによる共同作業においてはロボット同士が互いに近傍に位置して相互に位置や姿勢、作業状況がわかり、タイミングを計って作業を進める必要がある。そのためにはロボット単独の動作機能に加えて、サッカーロボットのチームプレイにみられるような動作のインタロックや、荷物の共同搬送のような隊列行動型作業にみられる動作の同時開始、終了など非同期並行システムとしての動作の制御機能が必要となる。また、複数の移動ロボットが臨機応変に

チームを編成するために、全体の決定的なアルゴリズムではなく、各ロボットの自律的、非決定的な意思決定も必要と考えられる。そのほかに互いに作業協力するための条件としては、干渉が少なく実時間で相互に通信する手段や、互いの持つ情報の種類や表現形式の交換機能は当然必要となる。

(2) 我々はこれまで中枢をもたない群れつくりロボットの構想、設計、試作研究を30年以上にわたり行い、また実用的には非同期並行プロセスの表現形式であるペトリネット

に基づくロボットシステムの作業や動作の解析、設計法の研究を積み重ねてきた。さらに近年は赤外線を用いた移動ロボットの相互通信やロボット相互の相対的な位置の検出、レーザスリット光を用いた画像や超音波センサなどのセンサ情報を統合した環境や障害物の位置検出とロボット間相互通信による共通作業空間地図の作成など複数の移動ロボットによる共同作業と連携動作に関わる研究を進めてきた。そこでこれまでの非同期並行プロセスの研究成果と複数ロボット間の情報共有・連携手法の検討の研究を組み合わせることで、複数の移動ロボットが臨機応変にチームを編成し、互いに作業協力するための研究条件が整い、災害救助や未知環境の探索、共同作業に応用できる群知能移動ロボットの開発が可能になると考えた。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、アドホックなロボット・チームの編成と複数ロボットの共同作業・連携動作を実証する実装モデルの開発を目的とする。

(2) そのために必要となるロボットの行動のモデル化の方法をペトリネットに基づき開発する。またモデルにしたがって実際に実空間で複数ロボットを動作させるために Web Service を用いたサービス指向の制御アーキテクチャによる実装法を開発する。

## 3. 研究の方法

(1) ロボット間の相互無線通信装置として用いる赤外線送受信モジュールのハードウェアの高性能化と相互通信および相互位置算出アルゴリズムの平面上での精度実証試験を行い、製作した車輪移動ロボットに実用実験装置として搭載する。

(2) ペトリネットは生産システムの性能評価等実績があるが、ロボットシステムへの応用の成功例は少ない。自律的に共同作業するロボットの行動を設計し実装するためには、ロボットの活動を個体としての行動からアクチュエータ動作まで抽象的かつ階層的にとらえる必要がある。そこで本研究では従来のペトリネットを拡張し、グローバルな行動の記述から、必要なレベルでのモデル化と制御への応用を可能とするモデル詳細化の方法を確立し、移動ロボットやヒューマノイドロボットによる作業に応用する。また階層化されたモデルを用いて、生物のように柔軟な階層制御を実現するためのモデルの分割法を確立する。さらにペトリネットの実行シミュレーションの高速化アルゴリズムを設

計しロボットに実装可能とする。

(3) 相互連携・共同作業の制御プログラム開発ではまず、ロボットの単独行動、通信・協調行動、環境センシング、局所地図作成、大域地図作成、障害物回避などをモジュールとして含むロボットシステム全体を非同期並行プロセスとみなしてペトリネットで表現し、その状態遷移により各ロボットの行動プログラムを呼び出し、遠隔指示を行うシステムを設計する。次に複数ロボットの協調行動をペトリネットで表現し、空間光通信システムを用いた相互通信のモデルを各ロボットが自律的に実行するペトリネットモデルとして設計する。さらに、複数移動ロボットによる隊列の形成と移動中の障害物などの外乱に対する形状維持のための、個々のロボットの隣接ロボットへの通信と移動動作の行動制御アルゴリズムをペトリネットモデルとして表現しシミュレーションを行う。

(4) 実際のロボットを用いた実装モデルの開発として、インターネットを通じて複数コンピュータの連携に用いられる Web Service を使った複数ロボット間の情報共有と連携動作について検討を行い、Linux を搭載した組み込みコントローラに Web Service のサーバ/クライアントをインストールした移動ロボットの遠隔操作システムを開発し、製作した車輪移動ロボットを用いて複数ロボット相互の情報共有と連携動作について実験を行う。

## 4. 研究成果

(1) 赤外線送受信モジュールの高輝度広帯域赤外 LED、広帯域増幅器などを用いたハードウェア設計、製作を完了し、モジュールを入射角センサとして用いたロボット間相対位置算出の協調計算アルゴリズムが隊列形成のためのチーム内位置計測に使用可能であることを実験により確認した。

(2) ペトリネットによるロボットの行動のモデル化は、赤外線空間光システムからの隣接ロボットまでの距離と方位の入力を用いたファジィ制御による移動決定を含む移動ロボットのペトリネットモデルを作成し、製作した高速シミュレータ上で移動の動作確認を行った。シミュレータはマルチタスク OS のもとで実際のハードウェアに近い非同期並列動作を分散的に実現している。

(3) ペトリネットのサブシステムへの分割に基づく階層分散制御のアルゴリズムを設計し、ロボット間の相互通信行動を含めた分散シミュレータの開発を行った。シミュレー

ションにより、ネットの分割の前後で非同期並行プロセスの状態遷移が同一の挙動を示し、分割によるシステムのデッドロックがないことを確認した。

(4) サーバ/クライアント機能の切り替えによる Web Service を用いたロボット間相互通信と動作制御のソフトウェアを開発し、ロボットの行動モジュールのネットモデルによる実装と実ロボットの相互連携が可能であることを基本動作実験により確認した。

#### 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)

- ① G. Yasuda: Modeling and Distributed Implementation of Synchronization and Coordination in Multi-robot Systems, *Procedia Engineering*, Vol. 41, 2012, 1051 – 1057 (査読有)  
DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.282
- ② G. Yasuda: Implementation of Real-time Distributed Control for Discrete Event Robotic Systems using Petri Nets, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 16, No. 4, 2012, 537-541, Springer (査読有)  
DOI:10.1007/s10015-011-0984-y
- ③ G. Yasuda: Discrete Event Net Based Modeling and Control System Design for Real-Time Concurrent Control of Multiple Robot Systems, *Intelligent Control and Automation*, Vol. 3, No. 2, 2012, 132-139 (査読有)  
DOI:10.4236/ica.2012.32015
- ④ G. Yasuda: Model Based Hierarchical and Distributed Control of Discrete Event Robotic Systems Using Extended Petri Nets, *International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*, Vol. 2, No.1, 2011, 139-153 (査読有)
- ⑤ G. Yasuda: Model Based Design and Implementation of Hierarchical and Distributed Control for Robotic Flexible Manufacturing Cells using Petri Nets, *Advanced Materials Research*, Vols. 211-212, 2011, 856-860 (査読有)  
DOI:  
10.4028/www.scientific.net/AMR.211-212.856
- ⑥ G. Yasuda: Implementation of Hierarchical and Distributed Control for Discrete Event Robotic Manufacturing Systems, *Journal of Software Engineering and Applications*, Vol.3, No.5, 2010, 436-445 (査読有)  
DOI: 10.4236/jsea.2010.35049

[学会発表] (計 10 件)

- ① G. Yasuda: Implementation of Hierarchical and Distributed Multitasking Control for Industrial Multiple Robotic Systems, *Proc. of 2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, October 14-17, 2012, COEX, Seoul, Korea pp. 1761-1766, (査読有)
- ② G. Yasuda: A Distributed Autonomous Control Architecture for Synchronization and Coordination of Multiple Robot Systems, *Proc. of SICE Annual Conference 2012*, August 20-23, 2012, Akita University, Akita, Japan, pp. 1864-1869 (査読有)
- ③ G. Yasuda: Hierarchical and Distributed Implementation of Synchronization and Coordination for Discrete Event Multiple Robot Systems, *Proc. of the 8th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA12)*, July 8-10, 2012, Suzhou, China, pp. 302-307 (査読有)
- ④ G. Yasuda: Petri Net Based Hierarchical and Distributed Implementation of Multiple Robotic Manufacturing Systems, *Proc. of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (IEEE-ROBIO 2011)*, December 7-11, 2011, Phuket, Thailand, pp. 696-701 (査読有)
- ⑤ G. Yasuda: Modeling, Simulation and Distributed Control of Robotic Systems Using Petri Net Based Multitask Processing, *Proc. of SICE Annual Conference 2011*, September 13-18, 2011, Waseda University, Tokyo, Japan, pp. 1944-1949 (査読有)
- ⑥ G. Yasuda: Distributed Cooperative Control of Industrial Robotic Systems using Petri Net based Multitask Processing, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, vol. 6425 (*Proc. 3rd International Conference of Intelligent Robotics and Applications*), pp. 32-43, 2010 (査読有)
- ⑦ G. Yasuda: Petri Net Model Based Specification and Distributed Control of Robotic Manufacturing Systems, *Proc. of the 5th International Conference on the Advanced Mechatronics (ICAM2010)*, October 4-6, 2010, Osaka University, Suita, Osaka, Japan, pp. 410-414 (査読有)
- ⑧ G. Yasuda: Petri Net Based Implementation of Hierarchical and Distributed Control for Discrete Event Robotic Manufacturing Systems, *Proc. of the 2010 IEEE International Conference on Control Applications*, September 8-10, 2010,

Yokohama, Japan, pp. 251-256 (査読有)

- ⑨ G. Yasuda: Design and Distributed Control of Robotic Manufacturing Systems Based on Concurrent Process Modeling, Proc. of the 8th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN2010), July 13-16, 2010, Osaka, Japan, pp. 1098-1103 (査読有)
- ⑩ G. Yasuda: Petri Net Model Based Hierarchical and Distributed Control of Robotic Manufacturing Systems, Proc. of 2010 ISFA International Symposium on Flexible Automation, Tokyo, Japan, July 12-14, 2010, ID JPL-2661 (査読有)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

安田 元一 (YASUDA GEN' ICHI)

長崎総合科学大学・情報学部・非常勤講師

研究者番号：10174509

### (2) 研究分担者

高井 博之 (TAKAI HIROYUKI)

広島市立大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：20264963