

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20510141

研究課題名(和文)

移動エージェントと進化アルゴリズムを用いた群ロボットの効率的な制御の研究

研究課題名(英文)

A study on controlling multiple mobile robots using multiple software agents with evolutionary algorithms

研究代表者

神林 靖 (KAMBAYASHI YASUSHI)

日本工業大学・工学部・准教授

研究者番号：40269527

研究成果の概要(和文)：本研究は、きわめて多数の群ロボットを効率よく任意の集団へとまとめることを目的としている。考えられるアプリケーションは空港などで見かけるカートである。カートは決められた場所から旅行者によって取られ、不要になった時点で任意の場所に放棄される。再度集めるのはかなりの重労働であるが、現在では世界中の空港ですべて人手によって集められている。われわれは、現実的な解決法として、カートであるロボットが、最小のコスト(移動距離)で、ある程度の集団にまとまり、それを人手で回収する方法を提案した。これまで研究してきた階層型移動エージェントとアントコロニー最適化手法あるいは遺伝アルゴリズムを組み合わせることにより、知的な振舞いをするロボットが実現できた。以上が、当初計画に記載した研究の成果であるが、単に集合させるだけでなく整列もさせるべく実装を進めている。

研究成果の概要(英文)：This project addresses optimizing distributed robotic control of systems using an example of an intelligent cart system designed to be used in common airports. This framework provides novel control methods using mobile software agents. In airport terminals, luggage carts used by traveler are taken from a depot but are left after use at arbitrary points. It would be desirable that carts be able to draw themselves together automatically after being used so that manual collection becomes less laborious. In order to avoid excessive energy consumption by the carts, we employ mobile software agents and RFID (Radio Frequency Identification) tags to identify the location of carts scattered in a field and then cause them to autonomously determine their moving behavior using a clustering method based on the ant colony optimization (ACO) algorithm.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：移動エージェント、最適化アルゴリズム、群知能、移動ロボット

1. 研究開始当初の背景

| 複数のロボットに対して中央集権的な制

御を施すことが困難な場合がある。そのような場合とは、次のとおり。

- (1) 勘案しなければならない状況が多すぎるために、最適な制御を施そうとすると計算量が爆発的に増加してしまうような場合。
- (2) 安定した通信が期待できない場合
- (3) 現地の状況を中央で十分に把握できない場合

このような状況で使用できるロボットとして、われわれは移動エージェントを用いた群ロボットを提案し研究してきた。種類が異なる多くのロボット（以降、群ロボットと呼ぶ）を効率的に連携させ、多くのジョブを短時間で達成することが可能なロボット制御システムの確立を目指してきた。

すなわち、ある決められた範囲に散在し、複数のジョブを実行できる程度の長期に渡って動作するロボットを制御する方法として、次のような枠組みを採用することにより、拡張可能な制御システムを構築することができる。すなわち、制御プログラムとして移動エージェントを採用した。移動エージェントは、ネットワークを介して自律的にホスト間を移動することができるプログラムユニットなので、各ロボットが無線ネットワークを利用できることを仮定すると、ロボットを制御するために移動エージェントを利用することができる。このような移動エージェントによる制御システムでは、ジョブとそのジョブ専用の制御プログラムを、ロボットの外部（他のロボットや、ホストコンピュータ）から得ることができるので、ロボット上に存在する固有の制御プログラムの変更を必要とせず、ジョブの分配方法もジョブごとに決定することができる。さらに、必要な機能ごと移動するという移動エージェントの性質は、ロボット間の通信量を低減し、複数ロボットの連携において、頑健性を高めることに貢献する。その結果として、現地の状況に応じて役割を動的に変更する枠組みを提案し実現可能なことも示した。

以前の研究では、移動エージェントとして、移動エージェントを他の移動エージェントによって拡張することができる階層型移動エージェントを用いた。この階層型移動エージェントの拡張性は、制御プログラムの動的な再利用を可能にし、制御プログラムの実装コストを低減することに貢献した。

翻って、われわれは進化計算を用いることによって複雑な問題を実現可能な計算時間内で解決する技法についても研究を進めてきた。有力な進化計算としてアントコロニー最適化手法というものがある。多数のエージェントに限定的な知能と限定的な知識を持たせることにより、全体として高度に知的な作業を行わせることが可能になると考えら

れている。

以上の背景に基づいて、われわれが開発してきたエージェント技術を利用して、研究成果の概要にあるような成果を目指して研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、きわめて多数の群ロボットを効率よく任意の集団へとまとめることを目的とする。考えられるアプリケーションは空港などで見かけるカートである。カートは決められた場所から旅行者によって取られ、不要になった時点で任意の場所に放棄される。再度集めるのはかなりの重労働であるが、現在では世界中の空港ですべて人手によって集められている。考えられる自動化の方法としては、決められた集合場所へ自動的に戻るようにカートを設計すればよいように思われるが、それは現実的ではない。長距離を移動できるようなモーターとバッテリーを搭載することは、費用がかかりすぎるからである。われわれは、現実的な解決法として、カートであるロボットが、最小のコスト（移動距離）で、ある程度の集団にまとまり、それを人手で回収する方法を提案した。

3. 研究の方法

どのように散在しているか予想できないロボット群を、ある程度の集団という曖昧な概念のもとに集合させるためには、次のような問題を解決しなければならない。

- (1) 個々のロボットの位置を把握する。
- (2) それらの位置から、移動距離が最小になる集合位置を計算する。
- (3) 小規模なマイクロコンピュータで実現できる程度に単純なアルゴリズムで実現する。

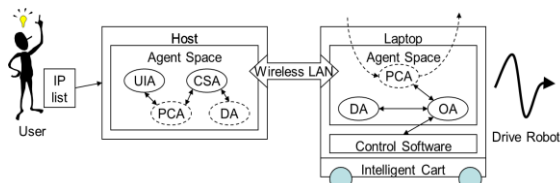
これらの問題を解決するためには、アントコロニー最適化手法あるいは遺伝アルゴリズムが有用と考えて、われわれは両者をもちいた実装を行った。基本アルゴリズムは、次のとおり。

- (1) 散在している移動ロボットを順に移動エージェントが巡回し、個々のロボットの位置を回収する。
- (2) 位置の回収が済むと静的な計算エージェントがアントコロニー最適化手法あるいは遺伝アルゴリズムを用いて、近似的に最適な集合位置を計算する。
- (3) 再び移動エージェントが個々のロボットに乗り移り、計算された位置へと操縦する。

具体的には、下の図のような複数の静的動的エージェントの共同作業として、このアルゴリズムを実装した。

各エージェントの詳細は、次のとおり。

- (1) ユーザインタフェース・エージェント



(User Interface Agent, UIA) : このエージェントは、ホストコンピュータにおける静的エージェントであり、ユーザとのインタフェースを司る。またロボットに搭載したノート PC の IP アドレスの表をもち、位置回収エージェントを生成して、その表を渡す。

- (2) オペレーション・エージェント(Operation Agent, OA) : このエージェントはロボット上のノート PC に常駐するエージェントであるが、移動エージェントとして実装する。そうすることにより、動的にロボットを操縦するソフトウェアを変更できるからである。現状の OA には、RFID の読み取りと衝突回避行動のみがプログラムされている。OA は、カーペット下の RFID を読み取ることにより、それが駐在するロボットの正確な位置とロボットの正面方向を知る。各カーペットタイルには、次のように RFID タグを張り付けてある。



- (3) 位置回収エージェント (Position Collecting Agent, PCA) : このエージェントは、UIA によって生成され発行される移動エージェントであり、渡された IP アドレスの表にしたがってロボットを 1 台ずつ巡回し、OA と交信することにより各ロボットの位置情報を取得する。すべてのロボットの巡回が終了すると、PCA はホストコンピュータに戻り、ロボットの位置情報を、次のクラスタリング・シミュレーション・エージェントに渡す。

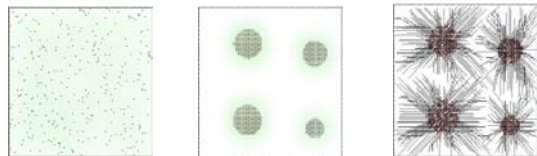
- (4) クラスタリング・シミュレーション・エージェント(Clustering Simulation Agent, CSA) : このエージェントは、ホストコンピュータに静的に常駐するエージェントであり、PCA から渡されたロボットの位置情報をもとにアントコロニークラスタリング(ACC)を実行し、最適なロボットの集合位置を計算する。ACC においては、ロボットを回収すべきオブジェクトとみなし、それが集まると強いフェロモンを出すようにアルゴリズムを設計した。更にある程度集合したクラスタを崩すことがないように、ロックという機構も考案し実装

した。ACC アルゴリズムの詳細は、雑誌論文③に詳述した。CSA は、シミュレーションを完了し、各ロボットが取るべき行動を命令列の形で生成すると、ロボット毎に操縦エージェントを生成し発行する。

- (5) 操縦エージェント(Driving Agent, DA) : このエージェントは、ロボット毎に生成される移動エージェントであり、ホストコンピュータから指定された IP アドレスをもつロボット (具体的には、ロボットを制御するノート PC) に移動し、与えられた命令列に従って、指定された集合場所へとロボットを運転操縦する。

CSA による ACC の実行によって最適集合場所 (移動の際のエネルギー消費量が最低) が求めたとしても、それで各ロボットを運転操縦する命令列が求められるわけではない。したがって、各ロボットが衝突を回避しつつ最適な位置に移動させるための経路と衝突回避行動を求めるシミュレーションも必要である。また、ある程度移動すると計算した値と実際の座標との誤差が生じる。したがって PCA による位置情報の回収→CSA による最適移動位置の計算とそのための命令列の生成→DA による実行を繰り返さなければならない。このとき、移動エージェントによる実装の利点が生きてくる。すなわち、命令列が生成される度に新しい DA を生成し、発行するだけでよい。新しい移動エージェントが到着すると、古い操縦エージェントは自動的に消滅するからである。

次に、シミュレータによるロボットの集合の様子を図示する。



左の図は初期状態である。灰色の小さな四角がロボット一台ずつを表している。真ん中の図は、この状態から ACC を実行して得られたクラスタを示している。右の図は、初期状態からこの図のような集合状態へと導く命令列 (前進・回転・待機の各命令の組合せ) を生成し、実行させた様子を示している。黒い線文は、各ロボットが、初期位置からどのような経路をたどって目的の集合位置へ移動したかを示す軌跡である。

右の図は ACC ではなくロボット移動のシミュレータにより実行された結果を示しているが、ACC により生成されたクラスタと驚くほど類似したクラスタを生成している。

ロボットの行動をシミュレートするにあたり、移動の様子や誤差の生じ方、また回転半径等の値は、交付された科学研究費により購入したロボットキットにより実測し、その

値を採用してシミュレータを製作した。ロボットキットを次に示す。



本システムの実装の詳細は、書籍①と②に記載されている。

4. 研究成果

本研究は、きわめて多数の群ロボットを効率よく任意の集団へとまとめることを目的としている。考えられるアプリケーションは空港などで見かけるカートである。カートは決められた場所から旅行者によって取られ、不要になった時点で任意の場所に放棄される。再度集めるのはかなりの重労働であるが、現在では世界中の空港ですべて人手によって集められている。われわれは、現実的な解決法として、カートであるロボットが、最小のコスト（移動距離）で、ある程度の集団にまとめ、それを人手で回収する方法を提案した。これまで研究してきた階層型移動エージェントとアントコロニー最適化手法あるいは遺伝アルゴリズムを組み合わせることで、知的なロボットが実現できた。成果は次のとおり。

- (1) ロボット制御用言語によって記述されたモバイルエージェントには、群ロボットを一つずつ巡回し、位置の測定を行なう。位置とロボットの向きの測定には **RFID** を用いた。正確なデータが取得できた。
- (2) 回収された位置から最適な集合場所を、進化計算を用いて算出することができた。
- (3) 効率のよい集合場所を算出するアントコロニー最適化のアルゴリズムを、シミュレータを作成して考案し実装した。
- (4) アントコロニー最適化の手法を使って移動場所を計算するだけでなく、個々のロボットの経路と、その経路を辿るための命令列を生成することができた。
- (5) さらに、誤差等の実践的な問題に対処するために、シミュレータによる経路と命令列の生成、移動エージェントによるロボットの操縦、新しい座標に基づいた移動先の再計算を繰り返すことにより、実用的な操縦エージェントを実現することができた。
- (6) 単に最適な集合場所を求めるだけでなく、

具体的な軌跡を各ロボットに与える再帰的なアントコロニー最適化のアルゴリズムを、(3)で作成したシミュレータに実装した。これにより衝突回避運動を巧みにかつ省エネルギーとなるように経路を算定できることが期待できるようになった。シミュレータの中に別のシミュレータを組み込むことで実装した。

- (7) 最適な集合位置と、そこへの経路の算出を繰り返し行うことにより、ロボットの移動に合わせて、新しい経路を求める。1.のシミュレータを複数回実行させることにより、可能になった。最適な回数を求める実験を行った。
- (8) ロボットを集合させ、全体で要した費用（モーターの駆動時間、移動距離、バッテリー容量等）を計測した。

以上が、当初計画に記載した研究の成果である。更に、単に集合させるだけでなく整列させる必要があるとの観点に立ち、次のような研究を最終年度に実施した。

- (1) 新たにフェロモンエージェントという移動エージェントを導入し、群ロボット全体で群知能を実装した。

当初の計画では、すべて集中して行っているアントコロニー最適化の計算を分散させることを試みた。すなわち、分散アントコロニークラスタリングアルゴリズムを考案した。実装のアルゴリズムを複数作成し、試行と評価を繰り返している。

具体的には、アントエージェントとフェロモンエージェントという移動エージェントを導入し、移動ロボットを含めたシステム全体でアントコロニー最適化の実装を行った。

なぜそのようにしたかという点、ロボットを整列させるためである。ある程度集合したロボット群の中の中心的なロボットにフェロモンエージェントを生成させ、これが周囲に移動することで、フェロモンの拡散をシミュレートさせる。フェロモンエージェントは、最寄りの孤立したロボットに移動すると、御操縦エージェントに働きかけて、自分が生成された元のロボットの位置にロボットを移動させようとする。この際にフェロモンエージェントの行き先を整列しているロボットの最後尾に誘導することにより整列を実現できる見通しとなっている。そのためには、フェロモンエージェントをベクトルとして表現している。

これまで提案され報告されているアントコロニー最適化システムはシミュレータ上のものであり、実際のロボットを使った実装は、われわれが初めてである。移動ロボットによる実装ではなく、移動ソフトウェアエー

ジェントによる実装なので、効率上の問題は無い。中央制御を不要にする目途をつけることができた。フェロモンをソフトウェアエージェントで実装することにより、単にロボットを集合させるのみならず一列に整列させる実装の実験も行なっている。

整列のアルゴリズムは、複数考案し、現在実験中である。フェロモンエージェントを用いた分散アントコロニークラスタリングの詳細については、雑誌論文②に記載がある。今後とも新たな挑戦と実験を続けて、積極的に研究成果を発表していく予定である。

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)

[雑誌論文] (計 15 件)

- ① Distributed Ant Colony Clustering Using Mobile Agents and Its Effects, Ryotaro Oikawa, Masashi Mizutani, Munehiro Takimoto, Yasushi Kambayashi, _ Proceedings of Fourteenth International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, LNAI 6276, 査読有, 2010, pp. 198-208
- ② Ant Colony Clustering Using Mobile Agents as Ants and Pheromone, Yasushi Kambayashi, Hidemi Yamachi, Munehiro Takimoto, Proceedings of Second Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems, LNAI 5990, 査読有, pp 435-444, 2010
- ③ Integrating Ant Colony Clustering Method to Multi-Robots Using Mobile Agents, Yasushi Kambayashi, Masataka, Ugajin, Osamu Sato, Yasuhiro Tsujimura, Hidemi Yamachi, Hisashi Yamamoto, Munehiro Takimoto, Industrial Engineering and Management Systems, An International Journal, 査読有, Vol. 8, No. 3, pp. 181-193, 2009
- ④ Design of an Intelligent Cart System Used in Common Airport, Yasushi Kambayashi, Osamu Sato, Yoshikuni Harada, Munehiro Takimoto, Proceedings of Thirteenth IEEE International Symposium on Consumer Electronics, 査読有, CD-ROM, 2009
- ⑤ Design of Multi-Robot System Using Mobile Agents with Ant Colony Clustering, Yasushi Kambayashi, Yasuhiro Tsujimura, Hidemi Yamachi, Munehiro Takimoto, Hisashi Yamamoto, Proceedings of Hawaii International Conference on System Sciences 42, 査読有, CD-ROM, 2009
- ⑥ Suppressing the Total Costs of Executing Tasks Using Mobile Agents, Takashi Nagata, Munehiro Takimoto, Yasushi Kambayashi, Proceedings of Hawaii International

Conference on System Sciences 42, 査読有, CD-ROM, 2009

[学会発表] (計 5 件)

- ① 井戸川一馬, 篠崎寛幸, 薩田佳祐, 神林 靖, 自律走行ロボットの整列, 電子情報通信学会 2010 年総合大会講演論文集 情報・システム 1, p.68, 2011 年 3 月 14 日, 東京都市大学
- ② 山崎 洵, 神林 靖, モバイルエージェントとミツバチのアルゴリズムを用いた資源探索, 電子情報通信学会 2010 年総合大会講演論文集 通信 2, p.67, 2010 年 3 月 19 日, 東北大学
- ③ 山崎 洵, 原田義邦, 神林 靖, ACO とモバイルエージェントを用いた資源探索, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 108, No. 326, pp.19-24, 電子情報通信学会知能ソフトウェア工学研究会, 2008 年 11 月 27 日, 福岡工業大学
- ④ 佐藤 修, 神林 靖, 辻村泰寛, 山地秀美, 山本久志, アントコロニークラスタリングによる移動エージェントを用いた群ロボット集合問題の研究, 日本経営工学会平成 20 年度春季大会予稿集, pp.36-37, 2008 年 5 月 11 日, 電気通信大学

[図書] (計 2 件)

- ① Cristina Turcu, ed., RFID Book 2, Intech, 2011 刊行予定
- ② Shu-Heng Chen, Yasushi Kambayashi, Hiroshi Sato, eds., Multi-Agent Applications with Evolutionary Computation and Biologically Inspired Technologies: Intelligent Techniques for Ubiquity and Optimization, IGI Global, pp.174-191, 2011

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神林 靖 (KAMBAYASHI YASUSHI)
日本工業大学・工学部・准教授
研究者番号：40269527

(2) 研究分担者

辻村 泰寛 (TSUJIMURA YASUHIRO)
日本工業大学・工学部・准教授
研究者番号：80240977
山地 秀美 (YAMACHI HIDEMI)
日本工業大学・工学部・准教授
研究者番号：20327018
滝本 宗宏 (TAKIMOTO MUNEHIRO)
東京理科大学・理工学部・准教授
研究者番号：00318205

(3) 連携研究者

()
研究者番号：