

# 群知能ロボットの自己組織的役割形成

東京大学・人工物工学研究センター・教授 太田 順

## 1. 研究の目的

本研究では群ロボットの役割形成に関する研究をいくつか行ったが、ここでは、その中の代表的な成果として、受け渡し位置の変更する研究に絞って、以下その概要を述べる。(成果論文にはすべて記載)

群ロボットによる再配置作業では、その高速性ならびに確実性が求められている。しかしながら、この問題では物体や障害物などで作業空間が混み合っている環境においては、他ロボットおよび障害物との衝突回避が困難になる。よって、それに対処するためには各ロボットが作業を開始する際に以下のことを決定することが重要となる。

- 作業分担(Task Apportionment)：どの物体をいつ、どのような作業形態で運ぶか
- 移動経路：各ロボットが物体を運ぶ際に移動する経路をどのように形成するか

ここで、上記の作業分担(Task Apportionment) は以下の複数の段階に分けて順に処理を行われるのが一般的である。

- 作業分割(Task Decomposition)：目標状態に至る過程で至るべき中間状態を設定する。設定した中間状態に至ることを「サブタスク」と定義する。

- 作業割り付け(Task Allocation)：どのロボットが、どのサブタスクを、どの順番で実行するかを決定する。分割した各サブタスクを実行する上で、従来の知見から、再配置作業において有効で実用的な作業分割の方法として「受け渡し」がある。しかし、従来では、障害物配置に応じて適応的に受け渡しを適応する方法論が提案されておらず、その受け渡しを決定した後の作業割り付け(Task Allocation) と移動経路の決定法も確立されていない。

このような背景の基、本申請では、多数物体の探索/搬送作業を行う群知能ロボット系(マルチエージェント系)の自己組織的役割形成アルゴリズムの開発を目指す。ここで自己組織的とは、個々のロボットの適応的振る舞いの相互作用として、搬送スタイルに関するある種の秩序が自動的に(自己組織的に)掲載されることを意味している。

具体的には、物体や壁などの障害物配置に応じた高速な多数物体搬送作業の実現を行う。手法提案に先立ち、以下の状況を想定する。

- ある境界で囲まれた環境を想定し、搬送対象とする物体数を数個~数十個とする。
- ロボット台数としては数台のオーダー(たかだか5台程度)とする。

## 2. 研究の内容(手法、経過、評価など。)

上記の目的を達成するための課題として以下の設定を行った。

課題(1) 物体や壁などの障害物配置に応じた受け渡し位置の決定法を構築すること

課題(2) 受け渡し位置を決定した後、つまり作業分割(Task Decomposition)を行った後の作業割り付け(Task Allocation)・移動経路の決定法を構築すること

課題解決のためのアプローチとしてそれぞれ以下を採用した。

(I) 課題(1) に対して：障害物配置に応じて受け渡し位置を必要最小限にする。具体的には隘路(1台しか通れない通路)で条件を満たしたものにのみ設ける。条件は障害物の配置によって決める。

(II) 課題(2) に対して:メタヒューリスティクス解法(Simulated Annealing)を用いて作業割り付け・移動経路を探索しながら実用的な時間で準最適解を求める。

アプローチ(I) に対しては、受け渡しは1台しか通れない通路(隘路)で複数台のロボットが対向する場合に発生する問題を回避するために設けるもので、その問題が発生しうる場合にのみ設けるべきであるという考えに基づいて手法を構築した。また、計算時間の短縮という観点から、入力から得られる情報のみで受け渡しが必要な場合をあらかじめ想定し、実行可能な場所に設置し、搬送順序を決定した後に、微修正を行う手法を提案した。

アプローチ(II) に対しては、問題を単純化するために本研究の移動ロボット群による多数物体再配置問題を、評価関数を全体の作業時間とする $k$ -Stacker Crane Problem ( $k$ -SCP)としてモデル化した。その際、単純なヒューリスティクス解法を用いて短い計画時間で、実行可能な初期搬送順序・移動経路を算出する。また、それらおよび解の改善によって得られた搬送順序・移動経路から初期スケジュールを生成する。次に、他ロボットとの経路干渉優先度法および受け渡しによる時間的制約から生じる優先度設定を用いて初期スケジュールに対して時間調整することで初期解および改善解を算出する手法を提案した。改善の際には搬送順序・移動経路を探索し、搬送順序ではサブタスクの交換・譲渡によるノードの交換、移動経路ではSecond shortest path の導入によりアークのコスト変換を行うことにより探索操作を行う。

また、ここでは各ロボットが作業を開始する前に立てる作業割り付け手法に焦点を置き、新たに提案した。各ロボットが作業をしている最中に、実環境と事前に立てた計画での環境との違いへの対処法は既存の手法を用いた。次に、提案した作業計画立案手法を壁や障害物配置の異なるいくつかの作業環境において、搬送シミュレーションを通して従来手法と比較・評価した。図1にシミュレーション環境のいくつかを示す。それにより以下のことを行った。

- ・シミュレーションで用いる環境に対してどのような障害物配置で提案手法が従来と比べて有効かを知るために、Sparsity および VOIGP (Variation of Object's Initial and Goal Positions) を導入することにより作業環境の指標化した。

- ・シミュレーション結果から提案手法を用いることにより、シミュレーションに用いたどの作業環境でも、実用的な計画時間内(60sec 以内) で従来法 (物体ごとに作業を分担する方法(Continuous transportation) と領域ごとに作業を分担する方法(Territorial Approach)の二手法) よりも平均19%短い時間で多数物体再配置作業を達成できることを示した。

- ・Sparsity と VOIGP による考察を行ってから、主成分分析と重回帰分析を用いて、提案手法の適用範囲を考察した。その結果、提案手法の適用範囲が一番広範にわたっており、障害物配置に応じて受け渡しを必要最小限にできていることを示した。特に、平均的に、完全な隘路が少なく、物体の初期位置から目標位置までの距離のばらつきが大きく、迂回路のない隘路へ必ず通る物体の数が多環境で有効であることを示した。

最後に、「提案した作業計画立案手法が従来手法と比べて実環境で有効であるか確かめること」を目指して、実機検証により従来手法と比較・評価を行った(図2)。以下のことが分かった。

- ・全ての実験結果を総合すると、提案手法は従来手法に対して平均18%の作業時間短縮ができた。
- ・他手法との相対的作業時間が増大する理由は主に各ロボットの動作計画によるものであった。これにより実環境でも提案手法を用いることで障害物配置に応じて受け渡しを最小限にできることを示した。
- ・シミュレーションにおける作業時間より長い原因は主にセンシング手法および誤差によるものであった。
- ・再配置作業失敗する場合の最も大きな原因は主にセンシング手法および誤差によるものであった。受け渡し位置設置による作業失敗のリスクは仕切りのない空間で物体が多いほど大きい。また、隘路を通る際には、センサの精度・誤差に対する対処法を通常より厳しく設定する必要があった。
- ・事前に立てる作業計画に要した計算時間は60sec 以内であり実用的であった。

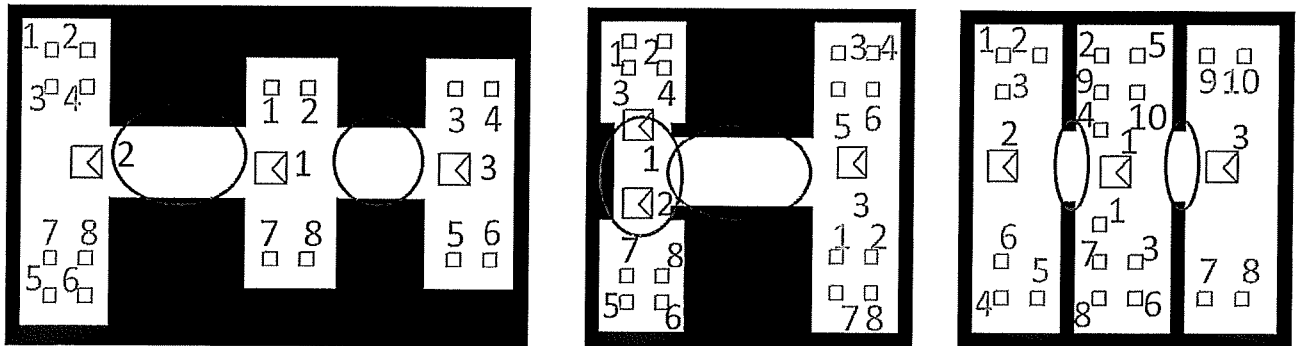
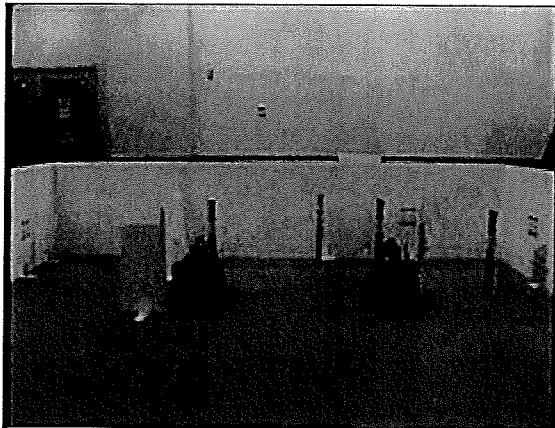
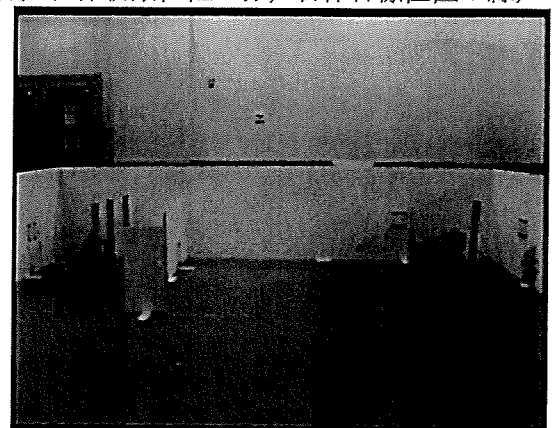


図1 評価シミュレーション環境の例 (ロボット：青，物体初期位置：赤，物体目標位置：緑)



(a) 途中経過



(b) 搬送完了

図2 実験の状況

### 3. 研究の結論、今後の課題

結論を以下に述べる。

多数物体の探索／搬送作業を行う群知能ロボット系(マルチエージェント系)の自己組織的役割形成アルゴリズムの開発を行った。シミュレーションと実機実験により、提案手法の有効性を示した。従来提案されてきた二手法(物体ごとに作業を分担する方法(Continuous transportation)と領域ごとに作業を分担する方法(Territorial Approach))よりも平均18%の作業時間短縮が可能となった。提案手法は障害物配置の異なる作業環境への適用範囲が広く、かつ高速な再配置作業を実現できる手法であることがわかった。結果として、ロボットの群知能の発現により、適応的な振る舞いを自己組織化する新しい方法論を確立することができた。

今後の展望を以下に示す。

#### 多様な壁形状への対処

ここでは、壁の配置の異なる作業環境を想定した。しかし、壁の形状が曲面であったり、ロボットに対して上方から斜めの壁の形状に対する想定はしていなかった。例えば、隘路(1台しか通れない通路)が通路中心線に沿って非対称な場合については扱っていない。現実の再配置作業ではそういった場合も含まれる。よって現実の再配置作業をどうモデル化するかなども含めて、多様な壁形状への対処は今後検討すべき課題の一つともいえる。

#### 実環境における環境認識手段の改善

ここでの実機検証において、提案手法において、ロボットの認識能力の欠如により動作途中でロボットが停止してしまうこともあった。ゆえに、実環境での作業完遂率を上げる改善案の一つとしてロボットの自己位置同定を支援するランドマークの新たな設計等が必要と考えられる。

#### 作業中の障害物の大きな変動に対する対処

ここでは、作業中に壁が大きく変動するなどの、環境の動的変動に対する問題については扱っていない。実際の再配置作業では環境の動的変動が起こり得るので、新たな受け渡し位置の決定など作業分割(Task Decomposition)の段階で再計画を必要とする場合も生じてくる。従来それらに対して高確率で作業を完遂させる手法はない。ゆえに動的変動に対し、高確率で作業を完遂させる手法を構築することが必要である。

#### 4 成果の価値(とくに判りやすく書いてください。)

##### 1. 社会的価値

昨今ルンバに代表される掃除ロボットが広く世の中に出回っており、多くのユーザが利用している。しかしながら、これらのロボットはすべて、人間が事前に環境を整備する(余分なものは机の上に置いておく等々)ことを前提としている。これは考え方によってはロボットに人間が使われている状況と考えることができ、決して理想的な状態ではない。

本研究の成果は、本来ロボットが有すべき自律的機能をより発展させることで人間がロボットに使われることなしに、ロボットが真に人間の役に立つという方向性に向けた一歩となる研究であった。本研究では、その実現を複数台のロボットの自己組織化という方策により具体的に実現した点に、大きな社会的な価値がある。

##### 2. 学術的価値

一般的なマルチエージェント系における群知能ロボット系の特徴は身体が存在ならびにその影響による競合回避である。自己や他者の身体が邪魔になり協調の際の効率が悪くなる、というのは長年に渡る問題であった。ここでは、受け渡しを自己組織化するという考え方により、その問題(の一部)を解決したものであり、得られた知見は極めて重要である。

また、群知能ロボットの協調に関する研究は20年以上行われているが、その多くは知的興味に基づいたものであり、定量的な評価がなされていなかった。そのため、多くの研究が相互に比較検討されることなく、発展することが妨げられる状況にあった。ここでの成果は従来手法との定量的な比較に基づいているものであり、群知能ロボット研究に対する貢献は極めて高いと考えられる。

##### 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いてください。未発表のものは公表予定を書いてください。)

- 大山 直樹, 劉 兆甲, 太田 順, 物体の空間的疎密に応じた作業役割分担法を用いた群ロボットの多数物体再配置問題, 日本ロボット学会学術講演会第28回学術講演会予稿集, RSJ2010AC3G3-1, 1/4 (2010).
- Naoki Oyama, Zhaojia Liu, Lounell B. Gueta and Jun Ota, Rearrangement Task of Multiple Robots Using Task Assignment Applicable to Different Environments, Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2010), 300/305 (2010).
- Norisuke Fujii, Reiko Inoue, Yoshihiro Takebe and Jun Ota, Multiple Robot Rearrangement Planning Using a Territorial Approach and an Extended Project Scheduling Problem Solver, Advanced Robotics, 24, 1-2, 103/122 (2010).
- Norisuke Fujii and Jun Ota, Territorial and Effective Task Decomposition for Rearrangement Planning of Multiple Objects by Multiple Mobile Robots, Advanced Robotics, 25, 1, 47/74 (2011).
- Reiko Inoue, Norisuke Fujii, Ryunosuke Takano and Jun Ota, Realization of a Multiple Object Rearrangement Task with Two Multi-Task Functional Robots, Advanced Robotics, 25, 11, 1365/1383 (2011).
- Hiromasa Kamogawa, Zhaojia Liu, and Jun Ota, Handling of a Large Irregularly Shaped Object by Two Mobile Robots, Proceedings of the 2011 IEEE Int. Conf. Robotics and Biomimetics (ROBIO2011), 847/852 (2011).
- Zhaojia Liu, Hiromasa Kamogawa, and Jun Ota, Fast and Automatic Robotic Grasping of Unknown Objects, Proceedings of the 2011 IEEE Int. Conf. Robotics and Biomimetics (ROBIO2011), 1096/1101 (2011).
- Zhaojia Liu, Lounell B. Gueta, and Jun Ota, Feature Extraction from Partial Shape Information for Fast Grasping of Unknown Objects, Proceedings of the 2011 IEEE Int. Conf. Robotics and Biomimetics (ROBIO2011), 1332/1337 (2011).
- Zhaojia Liu, Hiromasa Kamogawa and Jun Ota, Motion Planning for Two Robots of an Object Handling System Considering Fast Transition between Stable States, Advanced Robotics, accepted (2012).
- Zhaojia Liu, Hiromasa Kamogawa and Jun Ota, Fast Grasping of Unknown Objects through Automatic Determination of the Required Number of Mobile Robots, Advanced Robotics, accepted (2012).
- Naoki Oyama, Zhaojia Liu, Lounell B. Gueta, and Jun Ota, Task Apportionment in a Rearrangement Problem of Multiple Mobile Robots, Advanced Robotics, accepted, (2012). (代表的な論文)