

## 分業する群ロボットのための比率制御に関する研究

### Dynamics of Task Allocation and Division of Labor for Multi-robot System

○ 木村友徳, 菅原 研

○ Tomonari Kimura, Ken Sugawara

東北学院大学 教養学部 情報科学科

Department of Information Science, Tohoku Gakuin University

キーワード: 群ロボット(mulri-tobot)、分業(division of labor)、比率制御(proportion regulation)、  
確率変動モデル(dynamic probability model)

連絡先: 〒981-3193 仙台市泉区天神沢 2-1-1 東北学院大学教養学部情報科学科  
菅原研, Tel/Fax:022-773-3306, E-mail: sugawara@cs.tohoku-gakuin.ac.jp

## 1. はじめに

これまで多くの研究者によって、複数台のロボットが協調し機能する群ロボットシステムの研究が進められてきている。効率的に機能する群ロボットシステムでは、ロボット間のコミュニケーションが不可欠であるが、一般的にロボット間のコミュニケーションでは電波、光、音など物理的なメディアが主に用いられている。一方、生物の個体間コミュニケーションに目を向けると、物理的なメディアのほかにフェロモンと呼ばれるような化学的なメディアも積極的に用いられている。

化学的なメディアを用いる情報伝達の最大の特徴として、情報の発信元が発信場所から移動しても情報が場に残るといったものがある。つまり、空間を介して個体間で情報を授受することが可能となる。この特徴を活かした群ロボットシステムの可能性について論ずるひとつのテーマとして、本研究では群ロボットの分業および比率制御にこのコミュニケーション手段を応用し、その有効性を議論することを目的とする。

## 2. 群ロボットの分業と比率制御

群ロボットに求められる作業が複雑化していくと、そこには分業を行う必要性が出てくる。その際、作業全体の効率を考慮すると作業の種類や難易度によって各作業に割り当てられるべきロボットの台数には最適な比率というものが存在する。作業効率を低下させないために、故障やトラブルなどで機能しなくなったロボットが出てきた場合、他のロボットが作業を切り替えることでその比率を一定に維持し続けることが必要となる。また、作業の切り替えにはツール交換のための時間ロスなどが発生するため、携わっている作業から他の作業への不必要な作業変更を極力行わないようにすることが重要となる。

そこで、台数比率を予め設定した最適な比率に調整されるよう制御することが必要となり、そのための比率制御モデルを構築することが求められる。比率を制御するアルゴリズムはいろいろ考えられているが<sup>1), 2)</sup>、ここでは遷移確率に基づいた比率制御手法を提案する。

### 3. 比率制御モデル

#### 3.1 単純確率モデル

単純確率モデルとは、予め決めた比率を一定に維持するために遷移確率を設定するモデルである。例として3種類の作業がある状況を想定する。他の作業から作業1に変更する確率を $a_1$ 、同様に作業2に変更する確率を $a_2$ 、作業3に変更する確率を $a_3$ とすると(図1)、遷移確率 $a$ と台数比率 $n$ の関係は次のようになる。

$$a_1 : a_2 : a_3 \approx n_1 : n_2 : n_3 \quad (1)$$

したがって、遷移確率を決めるだけで、各作業に携わるロボット台数の比率を容易に制御することが可能となる。

しかし、この単純確率モデルには次のような問題点が存在する。一つはロボットが頻繁に作業を変更してしまうので、作業変更に起因するロスが生じる、という点である。もう一つは、確率的な操作であるため、ロボットの総台数が少ない場合には最適な比率が常に保たれるとは限らないという点である。よって、これらの問題点を避けることが可能なモデルの構築が必要となる。

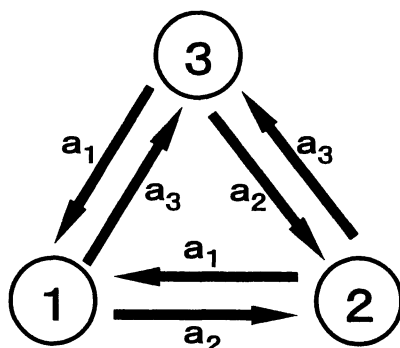


図1：作業変更の際の遷移確率

#### 3.2 確率変動モデル

単純確率モデルでは、各作業に携わるロボットの比率を遷移確率の相対的な比で表すことができた。一方、遷移確率の値自体は遷移のしやすさそのものを意味する。この点に着目し、

ここでは遷移確率を変動させる係数 $w$ を導入し、作業の変更確率を $a/w$ で表現するモデルを提案する。 $w$ の値を大きくすると遷移確率が小さくなるので、変更頻度を少なくすることができる。一方、 $w$ の値を小さくすると遷移確率は大きくなり、変更頻度を多くすることができる。

ここで問題となってくるのが遷移確率を変動させる係数 $w$ をどのように表現するかという点である。この問題を解決するために本研究では化学物質を導入する。各ロボットが作業場に各作業に対応した化学物質を残すことによって、それぞれのロボットはその物質の濃度から状況の情報を共有するものとした。

ここで、化学物質 $P$ は揮発性を有すると定義するとその変化量を次式で表すことができる。作業 $i$ に関わる化学物質の濃度を $P_i$ の変化量として、化学物質の蒸発(右辺第1項)と作業 $i$ に携わるロボットが散布することで増加する量(右辺第2項)からなっている式である。

$$\delta P_i = -\tau P_i + cn_i \quad (2)$$

この化学物質の濃度 $P_i$ を用いたシグモイド関数で $w$ を表すことで、遷移確率を変動させるモデルとなっている。

### 4. シミュレーション

本提案の有効性を議論するためにコンピュータシミュレーションを行った。シミュレーションでは一つの作業場から三箇所の荷物置き場へそれぞれ対応した荷物を運ぶ「荷物運び作業」を想定している。この際用いたパラメータは以下の通りである。

遷移確率： $a_1=0.5$ 、 $a_2=0.3$ 、 $a_3=0.2$ 、ロボット台数：100台、ステップ数：1000000回、また確率変動モデルにおいて化学物質の減少率 $\tau=0.1$ 、化学物質の撒布率 $c=0.1$ とした。

以下のグラフはステップ毎の台数比率の誤差を表したものである。

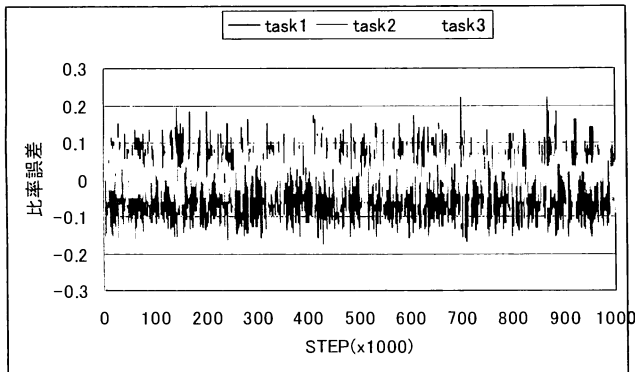


図 2 : 単純確率モデルの台数比率誤差の偏移

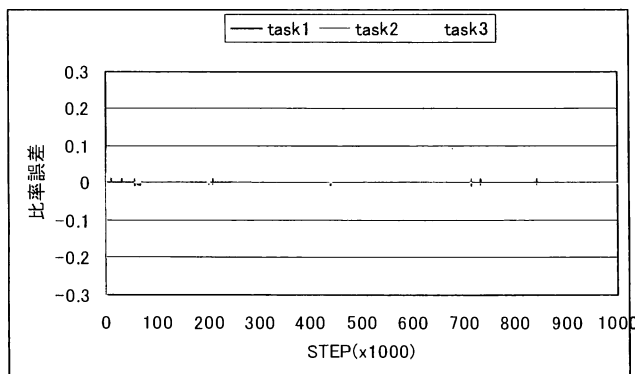


図 3 : 確率変動モデルの台数比率誤差の偏移

### 4.3 考察

#### 4.3.1 システムの安定性

単純確率モデルに比べ、確率変動モデルは台数比率誤差が安定していることは図 2、図 3 より明らかであるが、ここではさらに 1 ステップの比率誤差の平均値を以下のように求め検証した。

$$\text{比率誤差の平均値} = \frac{\sum_{t=0}^{\text{総 step 数}} (x_{it} - a_i)^2}{\text{総 step 数}} \quad (3)$$

比率誤差の平均値を 2 つの両モデルで各作業ずつ求め、さらに作業の変更頻度をまとめると、表 1 のようになる。確率変動モデルは単純確率モデルの誤差のわずか 10000 分の 1 であり、また作業の変更頻度も 400 分の 1 であることがわかる。以上のことから数値の上でも単純確率モデルより確率変動モデルは比率が安定していて、作業の変更頻度も少ないことがわかる。

表 1. 比率誤差の平均値および変更頻度

|      | task1       | task2       | task3       | 変更頻度  |
|------|-------------|-------------|-------------|-------|
| 単純確率 | 3.13655E-03 | 3.65998E-03 | 2.81661E-03 | 60167 |
| 確率変動 | 4.10041E-07 | 1.05011E-06 | 2.80028E-07 | 165   |

#### 4.3.2 外乱に対するロバスト性

次に、外乱に対するロバスト性を検証するために 500,000 ステップ目に作業 1 実行中のロボットを強制的に作業 2 へ変更した。

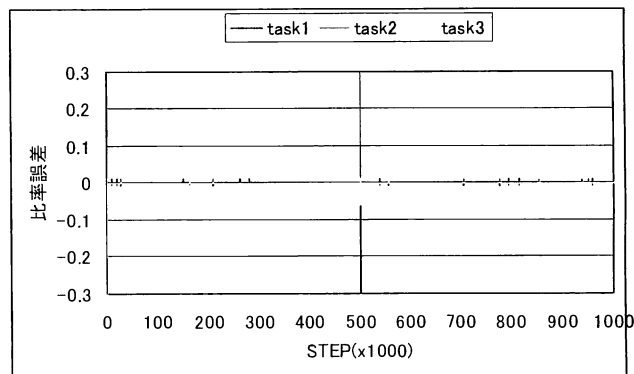


図 4 : 外乱による台数比率誤差の偏移

図 4 から分かるように、500,000 ステップ目で台数比率は大きく乱れるが、すぐにもとの比率に戻り安定することが分かる。

## 5. おわりに

本研究では化学物質を介した間接的なコミュニケーションによる分業ならびに比率制御モデルの構築を目的として、単純確率モデルを拡張した確率変動モデルを提案した。そして、シミュレーションにより、目標比率からの誤差、外乱に対する応答性から提案モデルの有効性を示した。今後は、実際のロボットへ実装し、その有効性を検証していく予定である。

## 参考文献

- 1). E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz: *Swarm Intelligence*. Oxford University press, Oxford (1999).
- 2). T. Mizuguchi, K. Sugawara: *Proportion regulation in task allocation systems*, Trans. IEICE, E89A, No.10, 2745/2751 (2006).