平 成 16 年 度　　修 士 論 文 概 要

自律分散ロボット群による協調問題に関する研究	和田・犬塚 研究室	糟谷 政夫
	No. 15417527	Kasuya Masao

1　はじめに

近年，自律性を持つロボット群が協調的に動作することにより全体でひとつの目的を達成する自律分散ロボット群の研究が盛んに行われている．このような自律分散ロボット群は耐故障性，柔軟性に優れており，深海，宇宙などの環境での作業に適している．

本研究では自律分散ロボット群を計算論的な観点からとらえ，その協調問題のひとつである形状形成問題について考える．形状形成問題に関する従来の研究では，あらかじめロボット群が共有する座標系に関する知識の程度による問題の可解性が議論されてきた．その中で設計されたアルゴリズムの解析では正当性の証明のみがなされ，効率に対する解析はほとんど行われていない．そこで本研究ではこの効率に焦点をあて，アルゴリズムを設計することを考える．効率を考える指標として，形状を形成するまでに要するすべてのロボットの移動距離の合計である「総移動距離」，どれだけロボットが同時に移動できるかを表す「移動の並行性」のふたつに注目する．この立場から，完全に座標系を共有したロボット群で新たに定義した形状形成問題に対して，総移動距離が最小で移動の並行性に優れたアルゴリズムを提案する．また，提案したアルゴリズムが従来の形状形成アルゴリズムのサブルーチンとして用いることができ，その効率を向上させられることを示す．

2　モデルと問題定義

2.1　ロボットのモデル

本研究で扱うロボットのモデルを以下に示す．

- すべてのロボットは非同期で動作する．
- ロボットは共通の座標系を持たず，それぞれが x-y 直交座標系を持つ．
- ロボットは体積を持たない点として扱われ，平面を自由に動くことができる．
- ロボットは待機，観測，計算，移動の 4 つの動作を 1 サイクルとして，サイクルを繰り返す．
- ロボットは過去のサイクルで得られた情報を記憶しておくことができない．
- ロボットは他のロボットを外見で区別できない．
- すべてのロボットが同一のアルゴリズムを実行する．

2.2　形状形成問題

形状形成問題とは，初期状態として任意の位置に配置されたロボット群が与えられた形状を形成する問題である．形状はロボットと同数の座標点集合で与えられる．ロボット群が形状を形成しているとはロボット群の配置が与えられた形状を平行移動，回転，反転，拡大縮小したものと一致することをいう（図 1）．また，座標系の知識を完全に共有するロボット群に対して，上記の変換を許さず入力形状とロボット群の配置が完全に一致することを形状形成の定義とした問題を，変換を許さない形状形成問題という．

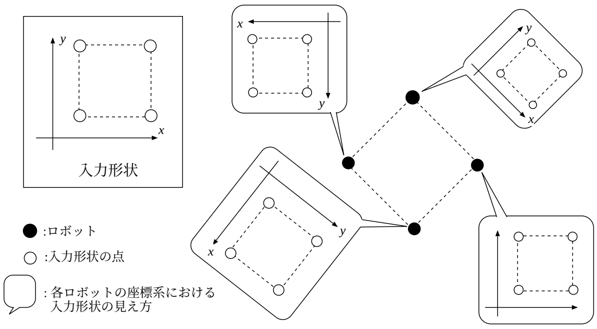


図 1: 形状を形成しているロボット群

本モデルでは，形状形成問題は形状を形成する過程において複数のロボットが同時に一点に重なる（衝突する）ことを許さない．なぜなら，形状形成問題を解くにはロボットと形状の点を一対一で対応させなくてはならないが，過去のサイクルにおける情報を持たないロボットは同一の点に重なったロボットを区別できないためである．

2.3　本研究の目的

従来の形状形成アルゴリズムではロボット群は主に「1. 基準の作成」,「2. 目的地への移動」,「3. その他の移動」の 3 段階の移動を経て形状を形成する．このうち，1. および 3. はロボット間で座標系の統一をはかるためのものであり，数台のロボットが移動を行う．2. は基準に関与しないすべてのロボットが目的地に移動する段階であり，アルゴリズムの効率に大きな影響を与えている．先の段階で既に座標系の統一がなされているため，2. の段階の問題は座標系の知識を完全に共有するロボット群に対する変換を許さない形状形成問題とみなすことができる．そこで本研究では，この問題に対して，総移動距離が最小で，移動の並行性に優れたアルゴリズムを提案する．

ただし，従来のアルゴリズムにおいて 3 段階の移動は完全には独立していない．すなわち，先の問題に対するどんなアルゴリズムでも従来手法のサブルーチンとして用いることができるわけではない．

2.4　諸定義

辞書式順序

ふたつの k 組 $(a_1,\ldots,a_k)$，$(b_1,\ldots,b_k)$ に対する辞書式順序を次のように定義する．ただし，各 a_i，b_j はある全順序集合に属するものとする．

$$(a_1,\ldots,a_k) < (b_1,\ldots,b_k) \iff {}^{\exists}l, 1 \le {}^{\forall}m \le l-1, a_m = b_m \wedge a_l < b_l$$

3　アルゴリズム

3.1　アルゴリズムの概要

ロボットの配置 $\mathbf{R}$ と入力形状 $\mathbf{P}$ から，頂点集合 $\mathbf{V} = \mathbf{R} \cup \mathbf{P}$，辺集合 $\mathbf{E} = \mathbf{R} \times \mathbf{P}$ としたグラフ $\mathbf{G} = (\mathbf{V}, \mathbf{E})$ を考える．$\mathbf{G}$ の辺の重みをロボットと点の距離で定義すると，総移動距離が最小なロボットと目的地の一対一の対応とは，$\mathbf{G}$ の最小重みマッチングに相当する．ロボットは最小重みマッチングから自らの目的地を決定し，移動禁止条件を満たさなければ移動する．アルゴリズムの概要を図 2 に示す．

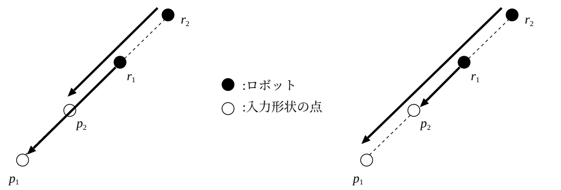
formation_MinWM$(\mathbf{R}, \mathbf{P}, self)$
　　% $\mathbf{R}$: 観測したロボットの座標点集合
　　% $\mathbf{P}$: 与えられた形状（点集合）
　　% $self$: 自分の座標（$self \in \mathbf{R}$）
　　% 出力: 目的地（$null$ は移動しない）
　$\mathbf{M}_{min} :=$ **computeMMinWM**$(\mathbf{R}, \mathbf{P})$;
　$(r, p) := \mathbf{M}_{min}$ 内で自分を含む組;
　if unmovable$(\mathbf{M}_{min}, \mathbf{R}, \mathbf{P}, self)$ **then**
　　return $null$;
　else return p;
computeMMinWM$(\mathbf{R}, \mathbf{P})$
　　% ある最小重みマッチングを返す
unmovable$(\mathbf{M}_{min}, \mathbf{R}, \mathbf{P}, self)$
　　% 移動禁止条件を満たすとき真

図 2: 最小重みマッチングアルゴリズムの概要

3.2　移動禁止条件

移動禁止条件 1. 経路の重なり

本モデルにおける形状形成問題では，移動経路が重なる二台のロボットが同時に移動してはならない．最小重みマッチングに従ったロボットの移動経路は交差せず，図 3(b) のように重なりもしない．しかし，図 3(a) のようには重なりうる．そこで,「ロボットは自らの移動経路上に他のロボットがいる場合には移動しない」という移動禁止条件を設ける．



(a)　　　　(b)

図 3: 重なる移動経路について

移動禁止条件 2. 順序最小のマッチングの変化

一般に，グラフ $\mathbf{G}$ に対して，最小重みマッチングは複数存在しうる．そこで，最小重みマッチングの集合 $\mathcal{M}_{min}$ に対して順序を考え，その順序に対して最小のものをロボットは移動に用いる．2 つのマッチング $\mathbf{M}_1 = \{(r_1^1, p_1), \ldots, (r_n^1, p_n)\}$，$\mathbf{M}_2 = \{(r_1^2, p_1), \ldots, (r_n^2, p_n)\}$ に対する順序 $\prec$ を

$$\mathbf{M}_1 \prec \mathbf{M}_2 \Leftrightarrow (p(r_1^1), \ldots, p(r_n^1)) < (p(r_1^2), \ldots, p(r_n^2))$$

と定義する．この順序 $\prec$ はロボットの配置 $\mathbf{R}$ を用いてマッチングを順序付けしているため，ロボットの移動により順序最小のマッチングが変化することがある．そこで，そのような可能性を持つロボットの移動を禁じる移動禁止条件を設ける（図 4）．

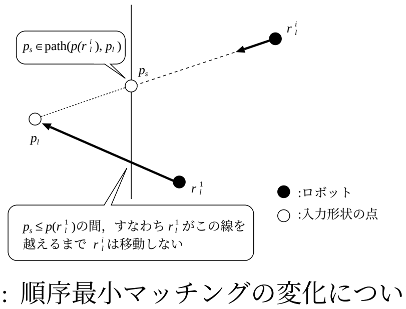


図 4: 順序最小マッチングの変化について

4　アルゴリズムの解析

4.1　既存手法との比較

変換を許さない形状形成問題に対する既存手法である GREEDY アルゴリズム [1]，辞書式順序アルゴリズム [2,3] と提案アルゴリズム（以降，それぞれ Greedy，LexOrder，MinWM とする）を比較する．

総移動距離

$W(\mathbf{M}_{gre}(\mathbf{G}_n))$，$W(\mathbf{M}_{lex}(\mathbf{G}_n))$，$W(\mathbf{M}_{opt}(\mathbf{G}_n))$ をそれぞれ初期状態 $\mathbf{G}_n$ に対する Greedy，LexOrder，MinWM の総移動距離とする．

定理 1　任意のロボットの台数 $n \geq 2$ と任意の実数 $a \geq 1$ に対して，

$$\frac{W(\mathbf{M}_{lex}(\mathbf{G}_n))}{W(\mathbf{M}_{min}(\mathbf{G}_n))} \geq a$$

となる $\mathbf{G}_n$ が存在する．

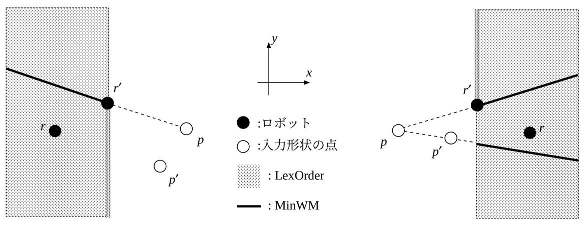
定理 2　任意のロボットの台数 $n \geq 2$ と任意に小さい実数 $\varepsilon > 0$ に対して

$$\frac{W(\mathbf{M}_{gre}(\mathbf{G}_n))}{W(\mathbf{M}_{min}(\mathbf{G_n}))} \geq 2 - \varepsilon$$

となる $\mathbf{G}_n$ が存在する．

移動の並行性

Greedy は同時に一台のロボットしか移動できない．LexOrder と MinWM は同時に n 台まで移動できる場合が存在する．しかし，p を目的地とするロボット r が移動不可となる配置領域が，他のロボット r' と目的地 p' に対して LexOrder が面であるのに対して MinWM は線で表される（図 5）．このことから，MinWM の方が移動の並行性に優れていると考えられる．



(a)　$p(r') < p$　　　(b)　$p < p(r')$

図 5: 移動の並行性

4.2　従来の形状形成アルゴリズムへの適用

部分的に座標系の知識を共有する場合に対して提案された従来の形状形成アルゴリズムを，提案アルゴリズムをサブルーチンとして用いるよう変更することで，より効率のよい形状形成アルゴリズムを得ることができる．

参考文献

[1] G. Prencipe. *Distributed Coordination of a Set of Autonomous Mobile Robots.* PhD thesis, Università di Pisa, Apr 2002.

[2] 糟谷政夫, 伊藤暢浩, 犬塚信博, 和田幸一. 片軸方向の共通知識をもつ自律分散ロボット群に対する形状形成アルゴリズム. 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol. J87, No. 7, pp. 747–757, Jul 2004.

[3] 山中信岳, 伊藤暢浩, 片山喜章, 犬塚信博, 和田幸一. 軸の方向に関する共有知識を持たない自律分散ロボット群に対する形状形成アルゴリズム. 電子情報通信学会論文誌 D-I, 2005.