平成 17 年度　修士論文概要

自律分散ロボット群に対する一点集合問題に関する研究

和田・犬塚 研究室　今津 裕之
No. 16417511　Imazu Hiroyuki

1 はじめに

自律分散ロボット群とはそれぞれのロボットが自律的かつ協調的に動作することにより，ロボット群全体として目的を達成するようなシステムである．人の直接作業が難しい場所での利用が期待されている．

本論文では，文献 [1] のモデルでの自律分散ロボット群における一点集合問題を扱う．一点集合問題とはロボット群をあらかじめ決められていない一点に集合させる問題である．

既存研究では，ロボットにどのような追加能力を与えれば，一点集合できるのかが議論されてきた．

本論文では，ロボットの観測可能な範囲に制限がある場合に，すべてのロボットで観測可能な半径が等しいと仮定しない場合の一点集合問題の不可能性について述べる．また，ロボットの観測可能な範囲に制限がない場合に，ロボット間で方向にずれを持つ可能性のあるコンパスをロボットに与えた場合についての一点集合問題を考える．そして，コンパスの方向が高々45° 異なっていても一点集合問題を解くアルゴリズムを提案する．

2 ロボットモデルと問題定義

2.1 ロボットモデル

- ロボットは待機，観測，計算，移動を一回ずつ順番におこない（サイクルという），それを繰り返す．
- ロボットは 2 次元平面を自由に移動できる．
- ロボットを外見から区別することはできない．
- ロボットの観測可能な範囲には制限がある場合とない場合がある．
- ロボットは過去のサイクルにおける情報を記憶しておくことができない．
- ロボットは体積を持たない点として扱う．
- ロボットは通信能力を持っていない．
- すべてのロボットは同じアルゴリズムを実行する．
- ロボットが計算で用いる $x-y$ 直交座標系については，すべてのロボットで共通の座標系を持たず，それぞれのロボットが独自の座標系を持つ．

α-不一致なコンパス

すべてのロボットは x, y 軸の正負の向きが右手系の座標系を持つとする．角度 α に対して，任意の二台のロボットの座標系の傾き (つまり，角度) の違いが α 以下であるとき，ロボットが α-不一致なコンパスを持つという．

本論文では，x, y 軸の傾きと正負の向きがすべてのロボットで一致している場合とロボットが 45°-不一致なコンパスを持つ場合を扱う．両方の場合とも，単位距離・原点は一致している必要はない．ただし，原点はその座標系を持っているロボット自身の位置と仮定する．

2.2 一点集合問題

一点集合問題とは，任意の位置に配置されたロボット群をあらかじめ決められていないある一点に集合させる問題である．

3 一点集合問題の不可能性

ロボット群は非同期で動作をおこなうとする．ロボットの観測可能な半径が等しいと仮定しない場合の一点集合問題の不可能性について述べる．ロボット群の座標系は，x, y 軸の傾きと正負の向きがすべてのロボットで一致しているとする．

3.1 ロボットの観測可能な範囲

各ロボット r_i は，r_i を中心とした半径 $v_i > 0$ の円の境界線も含む内部だけを観測可能であるとする．

3.2 観測可能な範囲を表すグラフ

有向グラフ $G_0 = (N, E_0)$ の定義

時刻 t でのグラフ $G_0 = (N, E_0)$ は，頂点集合 N をロボットの集合とし，$r_1, r_2 \in N$ において，$dist(r_1, r_2) \leq v_1 \Leftrightarrow (r_1, r_2) \in E_0$ とする．

無向グラフ $G_1 = (N, E_1)$ の定義

G_1 は G_0 を無向化したグラフである．つまり，時刻 t でのグラフ $G_1 = (N, E_1)$ は，頂点集合 N をロボットの集合とし，時刻 t のグラフ G_0 において $(r_1, r_2) \in E_0 \Leftrightarrow \{r_1, r_2\} \in E_1$ とする．

無向グラフ $G_2 = (N, E_2)$ の定義

時刻 t でのグラフ $G_2 = (N, E_2)$ は，頂点集合 N をロボットの集合とし，時刻 t のグラフ G_0 において $(r_1, r_2) \in E_0$ かつ $(r_2, r_1) \in E_0 \Leftrightarrow \{r_1, r_2\} \in E_2$ とする．

3.3 一点集合の不可能性

本研究で示した一点集合の不可能性の証明結果を表 1 に示す．

表 1 不可能性の結果

G_1	G_2	重複感知	台数	結果
非連結	非連結	なし・あり	任意	不可能
連結	非連結	なし・あり	二台	不可能
			三台以上	未解決
	仮定なし	なし・あり	任意	不可能
	連結	なし	三台	不可能
			四台以上	未解決
		あり	四台	不可能
			三台 五台以上	未解決

4 二台に対する一点集合アルゴリズム

ロボット群は非同期で動作をおこなうとする．そして，ロボットの観測可能な範囲に制限がないとし，45°-不一致なコンパスを持つとする．

二台のロボットに対する一点集合アルゴリズムを図 1 に示す．ここで，領域 ① ∼ ⑧ は図 2 に示すように，ロボットの座標系において，角度 45° で八つに分割した領域を表す．境界線は，原点から境界線

を見て左の領域に含まれるとする．たとえば，y 軸の正の部分は領域 ⑧ に含まれる．

If (周りにロボットを観測していない)
　　動かない;
Else
　　If (領域 ①, ⑦, ⑧ に相手を観測)
　　　p = 相手のロボットの位置;
　　　$Move(p)$;
　　If (領域 ④, ⑤, ⑥ に相手を観測)
　　　動かない;
　　If (領域 ②, ③ に相手を観測)
　　　p = 相手のロボットの位置が
　　　　領域 ④ になる真上の点;
　　　$Move(p)$;

図 1: 二台に対する一点集合アルゴリズム

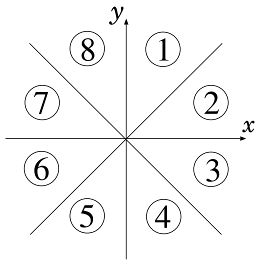

図 2: 領域 ① ～ ⑧ に関する図

アルゴリズムのアイデア

図 1 のアルゴリズムのアイデアを示す．二台の観測領域の関係を補題 1 に示す．

補題 1 二台のロボットを r_1, r_2 とする．r_1 が領域 ⓘ$(1 \leq i \leq 8)$ にいる r_2 を観測する場合，r_2 は r_1 を図 2 に関して ⓘ と原点対称な領域 ⓙ$(1 \leq j \leq 8)$ もしくはその両隣の領域で観測する．

補題 1 の観測領域の関係を表した無向グラフ $G^2_{45^\circ}$ を考える．$G^2_{45^\circ} = (V, E)$（図 3 参照）の，頂点集合 V は観測領域 ① ～ ⑧ にそれぞれ対応した頂点 $v_1 \sim v_8$ である．辺集合 E は補題 1 より ⓘ$(1 \leq i \leq 8)$ と原点対称な領域を ⓙ，領域 ⓙ の両隣の領域を ⓚ, ⓛ とすると，$\{v_i, v_j\}, \{v_i, v_k\}, \{v_i, v_l\} \in E$ である．

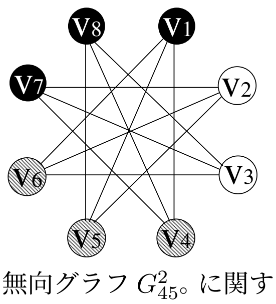

図 3: 無向グラフ $G^2_{45^\circ}$ に関する図

$G^2_{45^\circ}$ の隣接する頂点の色が異なるように，頂点に色付けをおこなうことを頂点彩色ということにする．もし $G^2_{45^\circ}$ が二色 (赤, 青) で頂点彩色できるなら，45°-不一致なコンパスを持つ二台のロボットの一点集合は簡単におこなえる．赤色の領域に相手を観測したとき動かず，青色の領域に相手を観測したとき相手に向かって移動するようにアルゴリズムを構成すればよい．

しかし，$G^2_{45^\circ}$ は二色で頂点彩色できない．$G^2_{45^\circ}$ を三色で頂点彩色すると図 3 のようになる．三色を赤, 青, 白とする．二台とも赤・青の領域に相手を観測した場合は二色での頂点彩色と同様に一点集合できる．そして，二台のうち白の領域に相手を観測したロボットがいる場合は，二台とも赤・青の領域に相手を観測できるように移動すれば一点集合できる．このように，それぞれの色に対して，ロボットの計算方法を考えた結果が図 1 に示したアルゴリズムである．

図 1 のアルゴリズムに関し，以下の定理を得た．

定理 1 二台のロボットがアルゴリズムに従って移動をおこなうことで，有限時間以内に一点集合できる．

5　三台に対する一点集合アルゴリズム

4 節と同じ仮定の三台のロボットに対する一点集合問題を検討した．ただし，問題を簡単にするためロボット群は同期して動作すると仮定する．

各ロボットが最も近いロボットに対して図 1 のアルゴリズムを実行するアルゴリズムを与え，これをシミュレーターで実行し，三台と五台に対して一点集合することを確認した．

予想 三台以上のロボットがアルゴリズムに従って移動を行なうことで有限時間以内に一点集合できる．

活動するペアを制限し，ロボット群の中で最短距離のロボットペアが図 1 のアルゴリズムを実行するアルゴリズムの理論的解析をおこなった．以下の補題は，初期配置を制限した一点集合問題を解くことができることを示す．

補題 2 三台のロボットが二点にいるとき，アルゴリズムに従って移動をおこなうことで，有限時間以内に一点集合できる．

6　おわりに

ロボットの観測可能な半径が等しいと仮定しない場合の一点集合問題の不可能性を示した．ロボットが 45°-不一致なコンパスを持つ場合の，二台のロボットに対する一点集合問題を解くことができるアルゴリズムを提案し，そして，三台のロボットに対する一点集合問題を解くことができると予想できるアルゴリズムも示した．

ロボットの観測可能な半径が等しいと仮定しない場合に関しての今後の研究課題は，x, y 軸の傾きと正負の向きの一致以外に，どんな能力をロボットに持たせれば一点集合が可能であるかを考えることがあげられる．また，不一致なコンパスに関する今後の研究課題は，三台以上のロボットに対するアルゴリズムの理論的解析を完成させること，ずれが 45° より大きい場合についてのアルゴリズムを考えることがあげられる．

参考文献

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