

## 1 はじめに

自律分散ロボット群とは自律分散システムの一つであり、サブシステムとしてロボット群を用いて、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。それぞれのロボットが自律的に動作するので、人による管理が難しい場所でも問題なく動作することができる。

自律分散ロボット群の二次元平面における協調問題を扱った計算論的な研究として、鈴木、山下らによる研究 [1] と G.Prenceipe らの研究 [2] がある。

本研究では、[1,2] で提案されたロボットモデルに対する一点集合問題を取り扱う。既存結果では、 $x$ - $y$  座標の方向が異なるロボット群に対して、一点集合が不可能であること、そして追加能力を与えることで一点集合が可能になることが分かっている。近年の結果では、二台のロボットに対してコンパスの方向が高々  $\frac{\pi}{4}$  異なっていて固定されている場合において、一点集合できるアルゴリズムが提案されている。

本論文では、二台のロボットに対して、コンパスの違いが  $\frac{\pi}{2}$  未満で固定されている場合の一点集合アルゴリズムと、コンパスが絶対軸に対して  $\frac{\pi}{6}$  未満の違いでサイクルによって変化する場合の一点集合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

- ロボットは体積を持たない点として扱う。
- ロボットは 2 次元平面上を自由に移動できる。
- 他のロボットを外見で区別することができない。
- ロボットは待機、観測、計算、移動の四つの動作を一回ずつ順番に行なう。これをサイクル動作という。ロボットはサイクルを繰り返し動作する。
- サイクル中の各動作はすべて非同期に変化する。
- ロボットの観測可能な範囲に制限はない。
- ロボットは過去のサイクルにおける情報を記憶することができない。
- 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。
- ロボットは共通の座標系を持たず、それぞれ独自の  $x$ - $y$  直交座標系を持つ。

### 2.2 コンパスと座標系

各ロボットは一つのコンパスを持つとする。ロボットが持つ座標系は、コンパスが指し示す方向と、 $y$  軸の正の方向が一致する  $x$ - $y$  直交座標系とする。

本研究で扱うロボットの座標系のモデルを示す。

- 系はすべてのロボットが右手系で一致している。
- 単位距離は一致しているとは限らない。
- 原点は、ロボット自身のその時刻での位置とする。
- コンパスが示す方向と  $y$  軸の正の方向がいつも一致している。

また、ロボットの移動は座標系に依存するものとする。したがって、移動中にコンパスの方向が変化したとき、移動する方向も変化するモデルである。

### 2.3 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 コンパスの故障モデル

本研究ではコンパスの故障モデルを、コンパスの変化及び絶対軸との関係の二つの性質から提案した。そしてそのモデルに対する一点集合問題の可解性を考えた。

### 3.1 動的なコンパス

コンパスの方向が常に変化しない性質（不変性）に対する故障として以下のコンパスモデルを提案した。

**定義 1 Full Dynamic Compass (FDC)**  
任意の時刻で指し示す方向が変化する可能性のあるコンパスを Full Dynamic Compass とする。

**定義 2 Semi Dynamic Compass (SDC)**  
任意のサイクルとその次のサイクルの間で指し示す方向が変化する可能性のあるコンパスを Semi Dynamic Compass とする。1 サイクルの間は指し示す方向が変化しない。

**定義 3 Fixed Compass (FXC)**  
すべての時刻で指し示す方向が変化しないコンパスを Fixed Compass とする。

### 3.2 不一致なコンパス

コンパスの共通の方向を指す性質（統一性）に対する故障として以下のコンパスモデルを提案した。

**定義 4  $\alpha$ -相対不一致コンパス**  
ロボット群のコンパスが  $\alpha$ -相対不一致コンパスであるとは、任意の二台のロボットのコンパス間で指し示す方向の角度の違いが、高々  $\alpha$  である場合をいう。

**定義 5  $\alpha$ -絶対不一致コンパス**  
ロボット群のコンパスが  $\alpha$ -絶対不一致コンパスであるとは、コンパスとは独立に絶対座標が存在するものとし、すべてのロボットのコンパスが絶対座標  $y$  軸の正方向ベクトルとの方向の角度の違いが高々  $\frac{\alpha}{2}$  である場合をいう。

### 3.3 故障コンパスの表現

動的なコンパスと不一致なコンパスは独立な性質である。例えば、FDC かつ、 $\pi$ -相対不一致コンパスを本研究では  $\pi$ -相対不一致 FDC と表現する。ほかのコンパスについても同様な表現する。理想的なコンパスは、0-絶対不一致 FXC である。

## 4 アルゴリズム

ロボットが持つコンパスの指す方向が異なっている場合でも、一点集合を可能とするアルゴリズムの基本的なアイデアは、二台のロボットの内、一方のロボットを動かさないようにし、もう一方のロボットを相手のロボットの位置まで移動させる方法をとらせることである。以下のように、原点を中心として方向に色の名前を付けて三種類に分ける（図 1）。

- 赤の方向：0 以上  $(\pi - \alpha)$  未満の方向
- 白の方向： $(\pi - \alpha)$  以上  $(\pi + \alpha)$  未満の方向
- 青の方向： $(\pi + \alpha)$  以上  $2\pi$  未満の方向

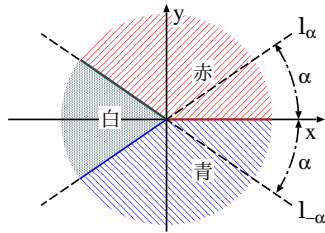


図 1: 方向の色分け

図 1 の色分けは、一方のロボットの赤の方向に相手ロボットが存在するとき、相手ロボットのコンパスの違いが  $\alpha$  以下であれば、相手の座標系に対して赤以外の方向に自分が存在する。青についても同様である。図 1 の色分けを用いて、以下の図 2 の様なアルゴリズムをロボットに与える。二台のロボット間でコンパスの違いが  $\alpha$  以下であれば、二台ロボットが両方とも動かない場合や、二台とも相手の位置まで移動することはない。

```

If(周りにロボットを観測していない)
    動かない; //一点に集合している
Else
    If(赤の方向相手を観測)
        動かない;
    If(青の方向に相手を観測)
        相手ロボットの位置へ移動;
    If(白の方向に相手を観測)
        調整移動 ( $\alpha \theta$ );
    
```

図 2: ( $\alpha \theta$ )-アルゴリズム

アルゴリズム中の調整移動は、図 3 のように目的地を決め移動する。この調整移動を行なうと、白の方向に存在していたロボットが赤の方向へと変化する。

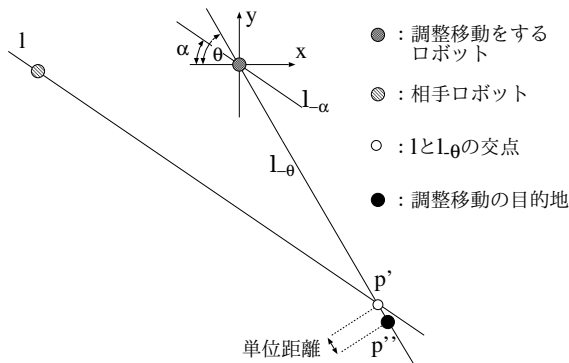


図 3: 調整移動 ( $\alpha \theta$ )

## 5 一点集合問題の可解性

### 5.1 FXC を持つ場合

定理 1  $\alpha$ -相対不一致 FXC ( $\alpha < \frac{\pi}{2}$ ) または  $\alpha$ -絶対不一致 FXC ( $\alpha < \frac{\pi}{2}$ ) を持つ二台のロボットについて、( $\alpha \frac{\pi}{2}$ )-アルゴリズムは有限時間内に一点に集合する。

### 5.2 SDC を持つ場合

定理 2  $\alpha$ -絶対不一致 SDC ( $\alpha < \frac{\pi}{3}$ ) を持つ二台のロボットについて、( $\alpha \frac{\pi}{3}$ )-アルゴリズムは有限時間内に一点に集合する。

定理 3  $\alpha$ -相対不一致 SDC ( $\alpha > 0$ ) を持つ任意の数のロボットについて、一点集合問題を解くアルゴリズムは存在しない。

### 5.3 FDC を持つ場合

定理 4  $\alpha$ -相対不一致 FDC ( $\alpha \geq 0$ ) または  $\alpha$ -絶対不一致 FDC ( $\alpha > 0$ ) を持つ任意の数のロボットについて、一点集合問題を解くアルゴリズムは存在しない。

## 6 おわりに

本研究では、コンパスの故障モデルを提案し、各モデルでの一点集合問題の可解性について示した。本研究で示したアルゴリズムは以下の二つである。

- 時刻によって方向が変化しないコンパスを持つ二台のロボットで、コンパス間の角度の違いが  $\frac{\pi}{2}$  ( $90^\circ$ ) 未満のとき、一点に集合できるアルゴリズム。
- 任意のサイクル間で方向が変化する可能性のあるコンパスを持つ二台のロボットで、絶対軸とコンパスの指す方向の違いが  $\pm \frac{\pi}{6}$  ( $\pm 30^\circ$ ) 未満のとき、一点に集合できるアルゴリズム。

表 1 コンパスの故障モデルと本研究の結果 (一点集合可能な  $\alpha$  の範囲)

	$\alpha$ -絶対不一致	$\alpha$ -相対不一致
FXC	$\alpha < \frac{\pi}{2}$	$\alpha < \frac{\pi}{2}$
SDC	$\alpha < \frac{\pi}{3}$	$\alpha = 0$
FDC	$\alpha = 0$	存在しない

今後の課題は、一点集合が可能となった故障モデルの角度の限界を求めたり、ロボットが三台以上の場合のアルゴリズムの提案があげられる。また、コンパスの故障モデルを形状形成問題などのほかの問題へも適応し、その可解性を求めることも考えられる。

## 参考文献

- [1] I.Suzuki and M.Yamashita. Distributed anonymous mobile robots -formation and ageement problems. SIROCCO 96, Jun 1996.
- [2] G.Prencipe. Corda: Distributed coordination of a set of autonomous mobile robots. ERSADS 2001, May 2001.

## 発表論文

- 富田祐一, 片山喜章, 犬塚信博, 和田幸一. 不一致なコンパスを持つ自律分散ロボット群に対する一点集合問題. 第二回 情報科学ワークショップ, 2006.
- 富田祐一, 今津裕之, 片山喜章, 犬塚信博, 和田幸一. 時間変化する不一致なコンパスを持つ自律分散ロボット群の一点集合問題. 信学技報 COMP2006-45, 2006.
- 富田祐一, 泉泰介, 片山喜章, 犬塚信博, 和田幸一. 故障したコンパスを持つ二台の自律分散ロボットに対する一点集合問題の可解性について. 情報処理学会 アルゴリズム研究会, 2007 (発表予定)
- Y. Katayama, Y. Tomida, H. Imazu, N. Inuzuka, and K. Wada. Dynamic Compass Models and Gathering Algorithms for Autonomous Mobile Robots. 和田・犬塚研究室テクニカルレポート, 2007.