

# 未知環境での通信路形成における群ロボットシステムの研究

## A Study of Multi-Robot System Forming Communication Networks in Unknown Environment

伊藤 友貴  
Tomotaka ITO

赤石 美奈  
Mina AKAIISHI

堀 浩一  
Koichi HORI

東京大学大学院工学系研究科  
School of Engineering, The University of Tokyo

In this paper, we intend to elucidate the nature of multi-robot system, such as robustness and emergence, as a system to apply to planetary exploration. We make a group of simple robots accomplish the mission to form communication networks in unknown environment with a computer. Also, the mission is simulated in the cases where the performance of each robot is different and the function of the robot is broken.

### 1. はじめに

航空宇宙工学の分野、特に宇宙開発において、宇宙環境下では人間の生命維持活動を行うことが非常に厳しいため、人間の代わりに賢い機械やロボットが作業を行うことが不可欠である。宇宙で活動する機械やシステムは、ミッション成功のための行動選択を適宜行い、また予期しない故障に対する頑健性を持つ必要がある。

こうした要求に対して盛んに研究されているのが、群ロボットやマルチエージェントシステムである。このようなシステムにミッションを遂行させることのメリットは、一部の故障が与えるシステム全体の挙動への影響が極めて小さいということである。故障に耐え得るための、必要最低限のものにプラスされるシステムの余裕のことを冗長性と呼ぶ。また、複数のロボットが互いに相手の行動に影響を及ぼすことによって、一体のロボットのみでは得ることが難しい、新たな知的行動を生み出すことができるという側面もある。このような現象は創発と呼ばれ、群ロボットシステムの特長の1つとされている。群ロボットシステムの実現のためには、冗長性、創発といったシステムの性質や挙動について、様々な方向から研究していく必要がある。

そこで本研究では、未知の惑星における探査という状況を想定し、様々な制約条件をかけて未知環境での通信路形成ミッションのシミュレーションを行った。その結果より、群ロボットシステムの冗長性や創発について考察する。

### 2. 関連研究

市川純章、原文雄らは、単純な機構の移動ロボットを用いて空間探索能力の創発現象を起こし、さらに局所的な通信を利用して探査空間に通信ネットワークを形成する研究を行っている。[伊藤 2000]

用意されたロボットは、「移動機能」と「障害物検知機能」を持つ。検知した障害物の位置とロボットの移動をうまく対応させることで、障害物を回避しながら移動していくことが可能になる。この行動原理をもった複数台のロボットをある探査空間に投入し、空間探査をさせている。

さらに、これらのロボットに局所的通信機能をもたせ、「障害物回避動作」「反転逆戻り動作」「通信中継動作」の3つの動作モードを設定することで、空間内にロボットの通信ネットワークを形成させることができる。

以上のような群ロボットシステムは、全体を集中的に管理するようなリーダーがおらず、個々のロボットがそれぞれの判断で行動している。よって、一部のロボットが故障してもシステム全体の挙動には影響が出にくく、冗長性が高いといえる。

本研究では、市川、原らの通信ネットワーク形成の手法をある程度踏襲しつつ、惑星探査といった具体的なミッションを想定して問題設定を行い、シミュレーションを行った。

特に、群を構成するロボットの機能に差異がある場合や、機能が故障する場合の全体パフォーマンスについて調べ、システムを効果的に動かすための条件を見つけ出し、考察していくことにした。

### 3. 問題設定

#### 3.1 概要

想定するミッションは、惑星に着陸した母船から空間探索機能と通信機能を持ったロボット群を送出し、母船近くの目標地点を発見して、母船から目標地点までの通信経路を形成するというものである。ロボットの行動範囲は、母船からある程度近い範囲に制限している。

#### 3.2 未知環境のモデル化

未知環境は次のように設定する。

- 100×100の2次元格子空間を用意する。
- 2次元格子空間の中心に該当する場所を母船の着陸地点とし、ロボットが送出される出発地点とする。
- 空間内にランダムに100個の障害物を配置する。
- 目標地点の座標をランダムに決定する。

障害物と目標地点の位置をランダムに決定することで、未知であることを実現している。

連絡先:伊藤 友貴

東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻  
〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1  
t-ito@ailab.t.u-tokyo.ac.jp

### 3.3 ロボットの機能

個々のロボットは次の機能を有している。

#### (1) 障害物検知

ロボットは、自分の進む方向にある障害物を検知することができる。検知するセンサーは 2 つあり、障害物の位置によって図 1 のように「左前もしくは直進方向にあり」と「右前にあり」を検出できる。また、他のロボットも障害物と同様にみなし、検知する。

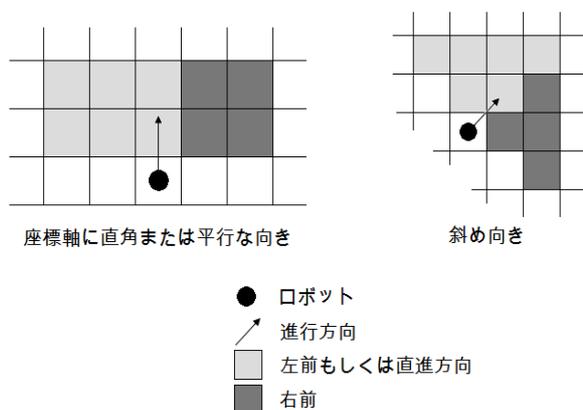


図 1: 障害物検知

#### (2) 移動

ロボットは、障害物と他のロボットを避けながら移動していく。具体的には、障害物検知機能と対応して表 1 のように行動する。

表 1: 障害物回避の行動原理

障害物検知機能	移動機能
なし	前進
左前もしくは直進方向にあり	右回転
右前にあり	左回転
両方あり	左回転

#### (3) 通信

ロボットは、近くのロボットと信号を送受信する局所的通信機能を持つ。基本的には、ロボットの座標±5 の範囲、すなわちロボット周りの 11×11 の範囲に含まれる他のロボットには、信号を送信することができる。各ロボットは移動中には送信機能を用いず、受信機能のみが使える。

送信機能を用いるようになるのは、次の条件を満たすときである。

- 目標地点を発見したとき
- 他ロボットが送信した信号を受信したとき

送信機能が発動したら、ロボットは移動を停止する。停止したロボットは通信の中継を行うようになる。このようにして、目標地点からロボットの通信ネットワークを広げていく。

#### (4) 目標地点の発見

目標地点の近くにロボットが到達すると、ロボットは目標を知覚することができる。ここでは、目標地点の座標±3 の範囲、すなわち目標地点周りの 7×7 の範囲にロボットが進入すると、「目標を発見」という状態になる。

#### (5) 1 ステップ時間での行動

ロボットは 1 ステップ時間で、以下の 3 つの行動のうちいずれかを行う。

1. 周囲の障害物の状況によって、座標 1 つ分直進する。
2. 周囲の障害物の状況によって、45° 回転する。
3. 信号送信の状態のまま停止する。(その後はずっと静止)

### 3.4 達成するミッション

ロボットは、1 ステップ時間あたりに 1 体ずつ出発地点から送出される。図 2 のように 8 方向に順番にロボットを送出し、決められたロボット数まで繰り返す。送出されたロボットの最初の向きは、送出された方向と同じとする。

こうしてロボット群に未知環境内を探索させ、目標地点を発見したロボットから通信ネットワークを広げていく。信号が母船に到着すれば、母船から目標地点までの通信路が形成されたことになる。この通信路の形成を今回のミッションとする。

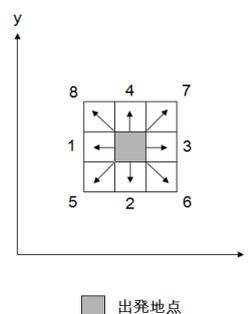


図 2: ロボット送出の方向と順番

### 4. シミュレーション

#### 4.1 得られる結果

様々な条件下でシミュレーションを行い、それぞれについて次の 3 つの結果を得た。なお、計算ステップを 500 とし、ロボット数を 16 から 160 まで 8 ずつ変化させて全ての結果を得ている。

- 500 ステップ以内に通信路が形成されればミッション成功、されなければミッション失敗とし、1000 回シミュレートして成功確率を得る。
- ミッション成功回数が 1000 回になるまでシミュレートし、ミッション成功までの時間ステップの 1000 回平均を得る。
- 同じ操作を、出発地点と目標地点の距離がほぼ一定になるようにして行う。具体的には、出発地点を中心とした 61×61 の正方形の辺上に位置する座標に目標地点を設置する。こうして、成功までの時間ステップ平均を得る。

#### 4.2 考える条件

条件として、次のようなものを考える。

##### (1) 機能に個性をもつロボット群

- 障害物回避方法に差異があるロボット群

問題設定で設定したロボットの他に、表 2 のように行動する「右回転優先ロボット」と表 3 のように行動する「左回転優先ロボット」を送出する。

表 2: 右回転優先ロボット

障害物検知機能	移動機能
なし	前進
左前もしくは直進方向にあり	右回転
右前にあり	左回転
両方あり	右回転

表 3: 左回転優先ロボット

障害物検知機能	移動機能
なし	前進
左前にあり	右回転
右前もしくは直進方向にあり	左回転
両方あり	左回転

○ 信号送信範囲に差異があるロボット群

問題設定で設定した 11×11 の範囲に送信できるロボット 1 種類だけを送出する場合の他に、次のような場合も考える。

- 7×7, 11×11, 15×15 の送信範囲をもつ 3 種類のロボットを送出
- 「送信機能なし」、11×11, 21×21, の送信範囲をもつ 3 種類のロボットを送出
- 7×7, 9×9, 11×11, 13×13, 15×15 の送信範囲をもつ 5 種類のロボットを送出
- 3×3, 7×7, 11×11, 15×15, 19×19 の送信範囲をもつ 5 種類のロボットを送出

(2) 機能が故障するロボット群

○ 一定時間で故障するロボット群

場に送出されたロボットは、送出から 200 ステップ時間後に機能を故障するとする。移動機能が故障する場合は移動ができなくなり、送信機能が故障する場合は信号送信ができなくなる。

○ 一定確率で故障するロボット群

場に送出されたロボットは、各ステップ時間に 0.25% の確率で機能が故障するとする。機能の故障は、一定時間故障の場合と同様とする。

4.3 条件の組み合わせ

4.2 の条件を様々に組み合わせでシミュレーションをし、群ロボットシステムのパフォーマンスを調べる。次のような組み合わせを検証した。

- 個性なし、故障なしの場合
- 障害物回避方法に差異がある場合 (移動個性)
- 信号送信範囲に差異がある場合 (通信個性)
- 移動機能が故障する場合
- 送信機能が故障する場合
- 移動個性かつ一定時間移動故障の場合
- 移動個性かつ一定確率移動故障の場合
- 移動個性かつ一定時間送信故障の場合
- 移動個性かつ一定確率送信故障の場合
- 通信個性かつ一定時間移動故障の場合

- 通信個性かつ一定確率移動故障の場合
- 通信個性かつ一定時間送信故障の場合
- 通信個性かつ一定確率送信故障の場合

それぞれについて 4.1 で示した成功確率と時間平均を結果として得た。成功確率が高く、成功までの時間平均が小さいシステムほどパフォーマンスがよく、優れたシステムだとみなす。

5. シミュレーション結果と考察

5.1 結果

シミュレーションより、次のようなことが確認された。

1. 個性なしロボット群と移動機能に個性があるロボット群ではパフォーマンスに差異はほとんどなかったが、個性なしロボット群と通信機能に個性があるロボット群では結果に差がみられた。
2. 移動機能と送信機能のどちらが故障したとしても、その故障が同じ故障のしかたであれば、同じような結果が出た。
3. 成功確率が高い条件では、成功するまでの時間平均も大きくなった。
4. ロボット群の機能の個性が結果に与える影響は、一定時間故障の場合も一定確率故障の場合もあまり変わらなかった。
5. 個性なしロボット群と機能に個性があるロボット群のパフォーマンスの差異は、ロボットが故障しない場合よりも故障する場合のほうが大きく出た。

5.2 考察

それぞれの結果に対する考察を次に示す。

1. 今回設定した移動機能の個性については、例えば右回転優先ロボットと左回転優先ロボットを比較しても、ミッション達成への有利さに差がない。対して、通信機能の個性については、送信範囲が広い方が明らかに有利である。このように、ミッションに対して機能の有利不利の差があるロボットの組み合わせで構成されたロボット群は、差がない組み合わせとは異なった挙動を示すことがわかる。
2. ミッションに対する移動機能の重要度と、通信機能の重要度は同程度だと考えられる。
3. 高確率でミッションを成功させることができるシステムは、通信路を作りにくい環境であっても、時間をかければミッションを達成できるのだと考えられる。対して、ミッション成功確率が低いシステムは、時間をかけてもミッションを達成できないので、その分が今回得られる時間平均には反映されていない。
4. 一定時間故障に強いシステムの条件と一定確率故障に強いシステムの条件は、ある程度重複していると考えられる。つまり、故障に強いシステムは、一定時間故障にも一定確率故障にも強い。
5. 個性があるロボット群は、ロボット間で性能に差があるので、性能がいいロボットがシステム全体のパフォーマンスに与える影響が大きい。よって、性能がいいロボットの故障も結果に大きく影響することになるのだと考えられる。

また、今回の研究の範囲内では、通信機能の個性の分散が大きいシステム(「送信機能なし」、11×11, 21×21 の送信範囲

をもつ 3 種類のロボットで構成されたロボット群)のミッション成功確率が大きく、冗長性も高かった。

## 6. 今後の展望

本研究の後に目指すべき課題として、次のようなものが挙げられる。

### (1) 実験結果に対する理由付け

今回の考察は、得られた結果のみから類推したものである。この考察の裏付けをするためには、ミッション達成までのロボットの挙動の途中過程を詳しく調べ、検証していく必要がある。

### (2) 条件の追加

本研究では、ロボットの機能を移動機能と通信機能に限定し、故障パラメータも 2 パターンのみを想定して行った。しかし、群システムの実世界への応用を目指すなら、さらに様々な条件を追加して詳細な検証を行う必要がある。パラメータの振り方の工夫やロボットの機能の追加等により、様々な条件下におけるシミュレーションを行うことによって、群ロボットシステムの新たな性質を発見していくことが求められる。

### (3) 実世界への応用

始めに述べたように、本研究が最終的に目指すべき目標は、惑星探査等の実世界への応用である。そのためには、より実世界に近いモデルの構築や、応用に適したアルゴリズムの考案が必要になる。さらに、実際のロボット群を用いて運用実験をしていくことも求められる。

## 参考文献

- [Reynolds 1987] Craig W. Reynolds: “Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model”, Computer Graphics (1987).
- [Johnson 2004] D. B. Johnson, D. A. Maltz, J. Brock: “The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (DSR)”, Internet Draft (2004).
- [竹安 2010] 竹安功, 藤野剛, 小山徳章: 「創発の考え方をを用いたデジタル機器向け情報ナビゲーションシステム」, 東芝レビュー, Vol.65, No.2 (2010).
- [阪田 2006] 阪田史郎, 青木秀憲, 間瀬憲一: 「アドホックネットワークと無線 LAN メッシュネットワーク」, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J89-B, No.6, pp.811-823 (2006).
- [伊藤 2000] 伊藤宏司: 「知の創発—ロボットは知恵を獲得できるか」, NTT 出版 (2000).