

## 6.1 はじめに

本章では、局所的な通信による情報伝播の効率化を目的とし、移動方法の設計を行なう [吉田 94] [吉田 95d] [Yoshida94] [Arai95].

3.2節で述べたように、多数ロボットの局所的な通信では、情報提示時間  $T_{ann}$  の設計の他に、ロボットの移動方法  $M$  も設計要素となる。本章で対象とするのは、ロボットの移動が作業に制限されず、移動方法  $M$  の設計に自由度がある場合である。これに該当するのは、主に情報の探索・拡散を目的とする、作業情報の目標伝達台数  $n_e$  への周知の通信 (1) である。また、作業時の通信 (2) においても、ランダム移動による環境の掃引・探索の場合に本章の設計が応用可能である。特に、作業情報周知の通信 (1) は、どの協調作業にも利用されるので、これを効率化することは系全体の作業の効率化に重要な役割を果たす。本章の解析は、移動が情報伝達の効率に影響を与える場合、すなわち 3.4節の最大情報伝達数  $N_{max}$  による分類では (A)(B) の場合に適用される。

移動方法が情報伝達特性に与える効果は大きく、そのとり方によっては、かえって通信効率を低下させてしまうおそれもある。そこで、必要なロボットへの効率的な伝達のための移動方法を決定する必要がある。

5章では、局所的な通信による情報伝達特性の基本的な解析を行った。この解析では、各ロボットは独立に移動するとした。しかし、以下に述べるように、移動方法の設計が可能となるときは、他ロボットと協調した移動法を採用することにより、情報伝達がさらに効率化されることが考えられる。

局所的な情報伝達を効率化する移動方法として、自然界で見られる敵の発見・餌探しなどのための群による移動があげられる [ウィルソン 83]。これは、次のような理由による。

- 単独で行動するよりも、他の数個体とともに移動するほうが敵や餌の発見の効率が高い。
- 敵や餌を発見したとき、四方に逃げて敵を覚醒させる、なるべく多くの餌を運ぶなど、数個体いるほうが対処しやすい。

もちろん、群の規模が大きすぎたり小さすぎたりすれば、逆に偏りすぎによる弊害などが生じるため、自然界では群の規模が適正に調節されている。

このように生物の群行動を規範としたモデルを用いて、サンプル採取や空間探索などの作業が効率化されることを示唆した研究結果はいくつか示されている。協調サンプル集め作業で、基本行動であるランダム移動に、拡散場やフェロモン、サンプル受渡しなどによる行動を加えることで作業効率の向上を示したものの [Steels90] [Drogoul93]、さらに協調による空間探索の効率を示したものの [Gage92] などがある。また、ロボット研究の分野でも、最近では多数のロボットを群としてとらえる群ロボット [SICE92] [RSJ94] [RSJ95] の研究も盛んになっている。

これらの研究では、探索やサンプル採取などの移動を伴う作業を局所的に行なうロボットが多数存在するとき、これらが群を形成して行動することにより、独立行動の場合より作業効率が向上することを示している。この知見は、多数ロボットの局所的な通信による情報伝達の効率化においても、特に移動方法の設計に利用できると期待できる。しかし、上記のいずれの研究でも、シミュレーションでその効果を示しただけで、解析は行われていない。そのため、群としての移動形態や群の大きさなど、行動の設計に関する指針は明らかにしていない。

そこで本章では、局所的通信による情報伝達の時間的な効率化を行なう目的で、ロボットの移動法として群による移動を導入し、その設計法について述べる。まず、5章で行なった情報伝達の解析を拡張してこの群移動が局所的な通信にどのような影響を与えるかを調べる。その結果をもとに、目標伝達台数  $n_e$  が確率分布で与えられるとき、それらのロボットへ情報を伝達する時間を最小にする最適な群規模を設計する。

Fig. 6.1に局所的通信の解析・設計における本章の位置付けを示す。設計パラメータは移動方法  $M$  である。

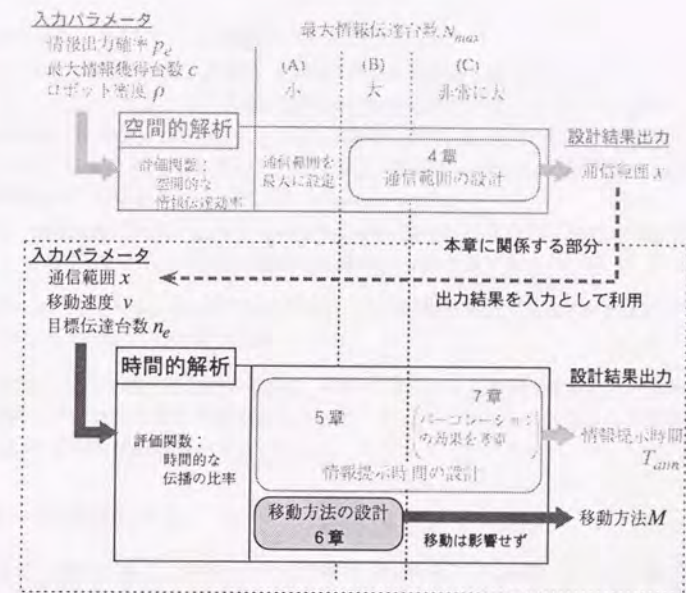


Fig. 6.1 局所的通信の解析・設計における本章の位置付け



まず、6.2節では、5章で行なった情報伝播の基礎的な解析を応用して、群移動モデルを導入した場合の情報伝播の解析を行う。さらに、6.3節で必要な数のロボットに情報伝達に必要な時間の算出法を述べ、それを最小化する最適な群規模を導出する。6.4節で、シミュレーションによって解析の有効性の検証を行う。最後に6.5節で群の再構成を想定して、群形成のアルゴリズムについて述べる。

## 6.2 群移動モデルと情報伝播の解析

本節では、群移動を行うロボット間の情報伝播を解析する。

6.1節でも述べた通り、従来研究では、ロボットが局所的な作業能力を持ち、多数で移動を伴う作業を行なう場合、群行動によって作業が効率的に実行されることが示されている。多数移動ロボットの局所的な情報伝達においても、移動方法の設計に対してこの群行動を採り入れることにより、通信の効率化が期待される。

そこで本章では、ロボットの移動方法として群による移動を導入し、情報伝達の解析を行なってその設計法を示す。6.1節で述べたように、ここではロボットの移動が作業によって制限されず、その設計に自由度がある場合を設計の対象とする。

本章における設計パラメータは、移動方法  $M$  である。具体的には、群行動を設計するので、

### 群を構成するロボット台数

が設計の対象となる。これを群規模と呼び、 $k$ で表す。

本章でも、5章と同様に、複数台への時間的な情報伝播を解析する。設計における評価量は、Fig. 6.1に示したように、時間的な情報の伝播比率である。すなわち、時間  $t$  において情報が伝播した比率  $p(t)$  が最大となる群規模  $k$  を設計するわけである。具体的には、「必要な台数に」「無駄なく」伝達することを考慮し、具体的には目標伝達台数  $n_e$  への伝播時間を評価指標として用いる。

また、情報の提示時間  $T_{ann}$  は、導出された群行動を行なうロボット間の情報伝播過程に対して、5章5.4節で示した手法を適用して設計することができる。

設計におけるその他の入力パラメータは、設計対象が移動方法  $M$  であることを除いて5章で示した Table 5.1と同様である。

本節では、以下の構成で解析を進める。6.2.1で隊列による単純な群移動モデルを示す。群間と群内部では情報伝播の性質が異なるので、6.2.2で5章の手法を応用して群間の情報伝播、6.2.3で群内の情報伝播の解析を行う。

### 6.2.1 群移動モデル

6.1節でも述べた通り、ロボット行動の研究 [Steels90], [Gage92] から、他ロボットを認識した行動を加えることにより、局所的通信による情報収集・伝達がより効率化されることが期待される。

ロボットの群移動として、ここでは、単純な隊列移動を用いる。この形態の利点として、



- (1) 円形の群移動や追従に比較して群の幅が広い
- (2) 単位時間に新たに掃引する未掃引領域の面積が大きい
- (3) 局所的な通信のみを用いて容易に実現できる

ということがあげられる。ここでは、環境内ではあらかじめ群が形成されているとし、群規模は時間的に変化しないとする。群の形成については、6.5節で述べることにする。

また、簡単のため各ロボットの視野は  $360[\text{deg}]$  でロボット群は直進移動を行うとし、衝突回避は考慮しない。隊列による群移動を以下に定義する (Fig. 6.2)。

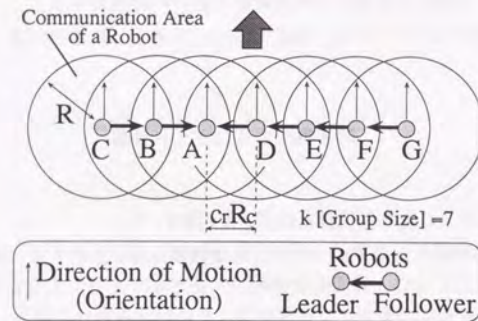


Fig. 6.2 ロボットの群移動のモデル

- 隊列内では、進行方向 (Fig. 6.2の細い矢印) を合わせるために他の 1 台を見て移動する (Fig. 6.2の太い矢印)。見る側をフォロー、見られる側をリーダーと呼ぶ。Fig. 6.2ではロボット B は A のフォローで、C のリーダーとなっている。
- 結果的に、自ら進行方向を決定するリーダーロボットが 1 群に 1 台存在することになる (Fig. 6.2で A)。
- 先に述べたように、群を構成するロボット数  $k$  を群規模とする。Fig. 6.2では  $k = 7$  である。また、相対距離を  $c_r R_c$  とする ( $c_r < 1$ )。
- ロボット系における各ロボット群の群規模  $k$  は同一とする。

### 6.2.2 ロボット 群間の情報伝播の解析

本節では、隊列移動するロボット群を一台のロボットと考え、群間の情報伝播を 5.3節の方法を応用して定式化する。

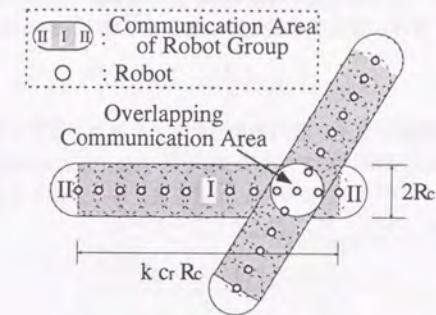


Fig. 6.3 ロボット群の通信範囲

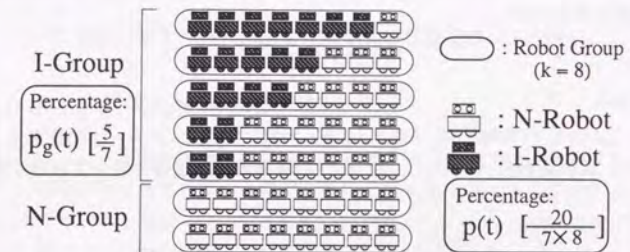


Fig. 6.4 ロボット 群間の情報の伝播

Fig. 6.3 の細長い図形はロボット群の通信範囲を示し二つのロボット群が通信可能である状態を示している。群の通信範囲の面積  $A_g$  は、I と II の部分に分けて求められる。I の部分を長方形により近似すると、 $A_g$  と群内の密度  $\rho_g$  は以下ようになる。

$$A_g = R_c^2 \{ 2c_r(k-1) + \pi \}, \quad \rho_g = \frac{k}{A_g} \quad (6.1)$$

ここで、少なくとも I-ロボットを 1 台含む群を「I-グループ」と呼び、全ての群に対する I-グループの比率を  $p_g(t)$  と定義する。N-グループは 1 台も I-ロボットを含まない群である。 $p(t)$  は 5 章同様 I-ロボットの比率とする。Fig. 6.4 は、群規模  $k = 8$  の群が 7 個ある系の場合を示している。I-ロボットを 1 台含む群が 5 個あるので  $p_g(t) = 5/7$ 、また I-ロボットは全部で 20 なので  $p(t) = 20/(7 \times 8)$  である。

群は密度  $\rho/k$  で存在するから、群内に存在する他の群の平均の数は  $\frac{\rho}{k} A_g$  である。



また, Fig. 6.3のように, 群どうしの重なり部分の面積を, ロボット1台分の通信範囲面積  $A$  で近似すると, 群内に存在する他の群に属するロボット数の平均  $x_g$  は,

$$x_g = \frac{\rho}{k} \{A_g \rho_g A\} \quad (6.2)$$

となる. 群の情報獲得確率  $P_g$  を, 群内の少なくとも1台のロボットが他の群から情報を得る確率とする. これは, 4章4.3.3で示した式(4.18), (4.19)における通信範囲  $x$  を, 群内に存在する他の群のI-ロボット数の平均  $x_g$  で置き換えることにより求められる.  $P_g$  は, 衝突あり・なしの場合について,  $P_{Ig}$ ,  $P_{Ng}$ としてそれぞれ

$$P_{Ig}(c, p_e, x_g, t) = e^{-p_e x_g} \sum_{i=0}^c \frac{(p_e x_g)^i \{1 - (1 - p(t))^i\}}{i!} \quad (6.3)$$

$$P_{Ng}(c, p_e, x_g, t) = e^{-p_e x_g} \sum_{i=0}^c \frac{(p_e x_g)^i \{(1 - p(t))^c - (1 - p(t))^i\}}{i!} + 1 - (1 - p(t))^c \quad (6.4)$$

と求められる. 告知板からの直接の情報伝達も考慮する場合には, 告知板は群内に平均  $\rho_{sign} A_g$  個存在するので,

$$p(t) \rightarrow p(t) + \frac{\rho_{sign} A_g}{p_e x_g}$$

とすればよい.

さらに,  $\Delta t$  の  $p_g(t)$  の増分は, 5章5.3.3項と同様に  $P_g$  と  $N$ -グループの比率  $1 - p_g(t)$  に比例するから, 比例定数  $\beta_g$  を導入し, 式(6.5)の群間の情報伝播の微分方程式が導出される.

$$\frac{dp_g(t)}{dt} = \beta_g(v, \mathcal{M}, x) \{1 - p_g(t)\} P_g \quad (6.5)$$

式(6.5)は, 情報伝播の方程式(5.3)の拡張形となっており, 群規模  $k=1$  とすれば, 式(5.3)に帰着されることに注意されたい.

また, 3.4節における分類で, 最大情報伝達数  $N_{max}$  が十分小さい(A)の場合には, 5章5.3.4と同様に, 衝突の有無に関係なく, 次のように求まる.

$$P_g = 1 - e^{-p_e x_g \{p(t) + \frac{\rho_{sign} A_g}{p_e x_g}\}} \quad (6.6)$$

$$\frac{dp_g(t)}{dt} = \beta_g(v, \mathcal{M}, x) \{1 - p_g(t)\} \{1 - e^{-p_e x_g \{p(t) + \frac{\rho_{sign} A_g}{p_e x_g}\}}\} \quad (6.7)$$

$$\simeq \beta(v, \mathcal{M}, x) \{1 - p_g(t)\} p_e x_g \{p(t) + \frac{\rho_{sign} A_g}{p_e x_g}\} \quad (6.8)$$

式(6.8)は指数関数の線形近似を行った式である.

比例定数  $\beta$  は, 5章5.3.1でのランダム移動の場合と同様の考察により求められる. ここでは, 群の直進移動のみを考え, 視野は  $360[\text{deg}]$  としたから, 単位時間・単位速度あたり

の掃引面積  $S_g$  は, 式(5.8)で  $\theta=0$ ,  $\phi=2\pi[\text{rad}]$  の場合に相当する.  $S_g$  は通信半径  $R_c$  と群規模  $k$ ,  $c_r$  の関数  $S_g(R_c, k, c_r)$  となり以下のように算出される.

$$S_g(R_c, k, c_r) = R_c \{(k-1)c_r + 2\} \quad (6.9)$$

この掃引により, 単位時間にロボット1台が通信範囲に見る平均ロボット数は,  $x_g$  を導出したときと同様に  $\frac{\rho}{k} \rho_g A S_g(R_c, k, c_r) v$  である. ランダム移動の場合の  $\beta$  を求める式(5.12)を用いて,  $\beta_g(v, x, R_c, k, c_r)$  は

$$\beta_g(v, x, R_c, k, c_r) = \frac{1 - e^{-\frac{\rho}{k} \rho_g A S_g(R_c, k, c_r) v}}{1 - e^{-x_g}} \quad (6.10)$$

と求められる.

また,  $N_{max}$  が小さい場合には, 式(5.22)と同様の方法で

$$\beta_g(v, x, R_c, k, c_r) = \frac{S_g(R_c, k, c_r) v}{A_g} \quad (6.11)$$

となり, ランダム移動の場合と同様に  $\beta_g$  はロボットの移動速度  $v$  に比例する.

### 6.2.3 ロボット群内の情報伝播の解析

本節では, ロボット群内の情報伝播について考察する. 群内では, 隣接する通信範囲内のロボットに情報が受け渡されていくので, その過程を定式化する必要がある.

Fig. 6.4に示すように,  $p(t) \leq p_g(t)$  であり,  $p(t)$  はI-グループの比率  $p_g(t)$  に近付くように変化する. 群内で, 一台のロボットに隣接する平均ロボット数  $\alpha$  は以下ようになる.

$$\alpha = 1 \cdot \frac{2}{k} + 2 \cdot \frac{k-2}{k} \quad (k \geq 2) \quad (6.12)$$

情報出力確率が  $p_e$  であるから, 各ロボットが情報を獲得する確率  $p_\alpha$  は,  $\alpha < 2$  より

$$p_\alpha = \begin{cases} 1 - (1 - p_e)^\alpha - p_e^\alpha & (\text{衝突あり}) \\ 1 - (1 - p_e)^\alpha & (\text{衝突なし}) \end{cases} \quad c=1$$

$$1 - (1 - p_e)^\alpha \quad c \geq 2 \quad (6.13)$$

とすることができる.

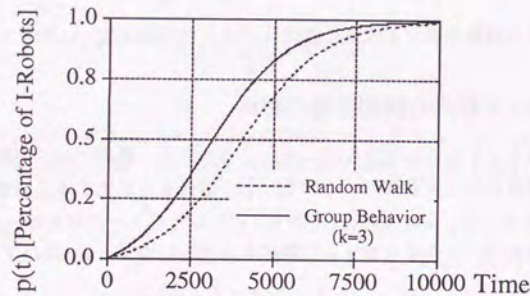
群内では,  $N$ -ロボットの比率は  $1 - p(t)/p_g(t)$  であり, 単位時間にそのうちの  $\alpha/k$  が情報を得ることになる.  $\Delta t$  あたりのI-ロボットの増分を考え,  $p(t)$  の微分方程式は以下のようになる.  $\alpha' = \alpha p_\alpha$  として,

$$\frac{dp(t)}{dt} = p_g(t) \frac{\alpha'}{k} \left(1 - \frac{p(t)}{p_g(t)}\right) \quad (6.14)$$



Table 6.1 局所的通信システムのパラメータ

$m$	(Total Robot Number)	24
$\rho$	(Robot Density)	0.0024
$\rho_{sign}$	(Density of Event)	0.001
$v$	(Velocity)	0.2
$R_c$	(Radius of Comm. Area)	1.0
$c_r$	(Following Distance)	0.8
$c$	(Information Acquisition Capacity)	1
$p_e$	(Information Output Probability)	1.0

Fig. 6.5 群移動を行なった場合の情報伝播 (衝突なし,  $k=3$ )

式 (6.5), (6.14) が群移動による情報伝播を表す式である。これらは非線形の連立微分方程式であり、Runge-Kutta 法などにより I-ロボットの比率  $p(t)$  を求めることができる。Fig. 6.5 は、Table 6.1 のパラメータを用いて、群規模  $k=3$  の場合に式 (6.5), (6.14) から求めた  $p(t)$  の時間変化を、独立なランダム移動の場合 ( $k=1$ ) と比較したものである (衝突なしの場合)。群移動を行なったほうがランダム移動よりも情報が速く伝播し、情報伝達の効率化における群移動の有効性が確認できる。

### 6.3 伝播時間と最適群規模の導出

群移動の利点として、前章で示した情報伝達の高速度化、そして協調態勢への速やかな移行がある。しかし、群が大きすぎると、イベント発見に時間がかかったり、必要な台数以上のロボットに情報が伝播したりし、かえって非効率になる。そこで、群規模を最適化する必要がある。本節では、イベント処理のため情報を伝達すべきロボット数である目標伝達台数  $n_e$  へ情報を伝達する時間を最小とする最適群規模  $k_{opt}$  を求める。

まず 6.3.1 節で伝播時間に関する考察を行う。これを用い、目標伝達数  $n_e$  が一定の場合、確率分布を持つ場合について、 $k_{opt}$  をそれぞれ 6.3.2 節、6.3.3 節で導出する。

#### 6.3.1 伝播時間の算出

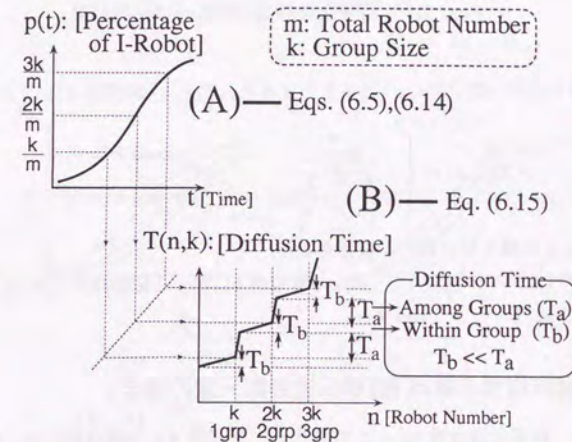


Fig. 6.6 伝播時間の計算

前章の解析では、式 (6.5), (6.14) による Fig. 6.6 の左上 (A) の情報伝播の時間的経過を導出した。伝播時間の考察のため、群間・群内の伝播時間を  $T_a$ ,  $T_b$  とする。Fig. 6.6 の (A) で、 $p(t) = i \times k / N$  となって  $i$  群に情報が伝播したあと、 $i+1$  番目の群の 1 台目に情報が伝わるまでの時間が  $T_a$  である。 $T_b$  は、群内だけの情報伝播を考え、式 (6.14) の  $\alpha'$  を用いて  $T_b = k / \alpha'$  と求められる。密度が非常に大きい環境以外では、 $T_a$  は  $T_b$  より十分大きな値となるから、群規模  $k$  のときの  $n$  台のロボットへの伝播時間  $T(n, k)$  は、Fig. 6.6 の右下 (B) のように階段状になる。

式 (6.5), (6.14) の情報伝播過程  $x = p(t)$  から求めた、比率  $x$  への伝播時間  $t$  を  $t = q(x)$



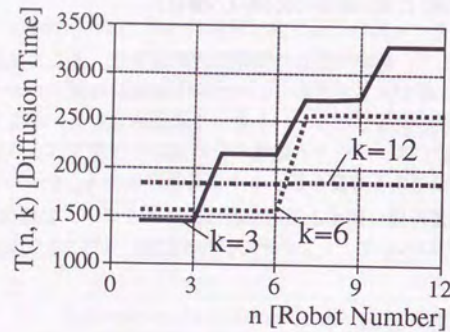


Fig. 6.7 群移動を行なった場合の伝播時間

とする。伝播した群の数  $i$  を  $i = \lfloor \frac{n}{k} \rfloor + 1$  とすると、 $T(n, k)$  は式 (6.15) のようになる。

$$T(n, k) = \begin{cases} q(\frac{n}{m}) & (n \bmod k = 0) \\ q(\frac{ki}{m}) - \frac{T_b}{k}(ki - n) & (n \bmod k \neq 0) \end{cases} \quad (6.15)$$

ただし、 $[a]$  は  $a$  を超えない最大の整数を表す。

Table 6.1 のパラメータを用いて、異なる群規模  $k$  に対する伝播時間  $T(n, k)$  を式 (6.15) より求めると、Fig. 6.7 のようになる。

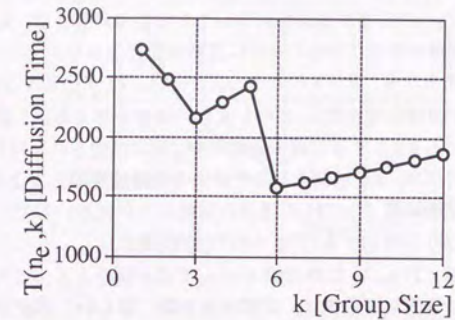
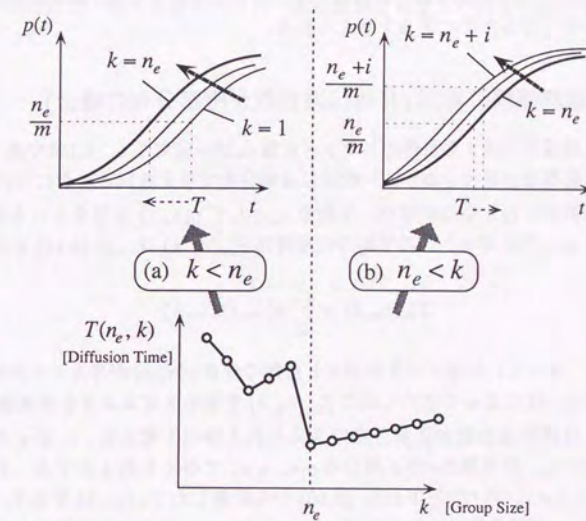
### 6.3.2 最適群規模の導出 (目標伝達台数一定の場合)

Fig. 6.8 は、目標伝達台数  $n_e = 6$  の場合の、群規模  $k$  と伝播時間  $T(n_e, k)$  の関係を式 (6.15) から求めたものである。

Fig. 6.8 で、群規模  $k = 6$  のときが最も伝播時間が小さく、これが最適群規模  $k_{opt}$  となっている。他の  $n_e$  の場合を解析した場合にも、最適群規模は目標台数に等しく、 $k_{opt} = n_e$  となった。

$k_{opt}$  の最適性に関する考察を行なう。ここでは、その概略を示すにとどめる。詳しくは、本章末の付録を参照されたい。Fig. 6.5 から分かるように、情報伝播過程を示す  $p(t)$  の曲線は群規模  $k$  が増加するに従って、上方に移動し、伝播が速くなる。しかし、実際には  $k$  が大きければ大きいほど伝播時間  $T(n_e, k)$  が小さくなるわけではなく、Fig. 6.8 に示すように  $k = n_e$  で  $T(n_e, k)$  は最小値をとり、最適な群規模は  $k_{opt} = n_e$  となる。これを説明したのが、Fig. 6.9 である。

まず、群規模  $k$  が目標伝達台数  $n_e$  よりも小さい場合は、ロボット総数を  $m$  とすれば情報


 Fig. 6.8 群規模と伝播時間の関係 ( $n_e=6$ )

 Fig. 6.9 最適な群規模  $k_{opt}$  に関する考察

は比率  $\frac{n_e}{m}$  まで伝達されなければならない。よって、 $k \leq n_e$  の範囲では  $k$  が増加するに従い伝播時間  $T(n_e, k)$  は減少する傾向を示す (Fig. 6.9 の (a) の部分)。この範囲で途中  $T(n_e, k)$



が増加するところがあるが、これは  $n_e$  が  $k$  で割り切れない場合に、より多くの群に情報を伝達しなければ  $n_e$  台への伝達が達成されないからである。例えば、 $n_e = 6$  で  $k = 4$  のときには、2つの群に情報を伝達しないと6台に情報が伝達されない。 $k = 3$  でも2つの群に伝達すれば良いのであるから、 $k$  が3のときの方が  $T(n_e, k)$  が小さくなる。

次に、群規模  $k$  が目標伝達台数  $n_e$  よりも大きい場合を考える。1群のロボット数  $k$  が  $n_e$  より多いので、 $k = n_e + i$  とすると情報は比率  $\frac{n_e + i}{m}$  に伝達されなければならない。ロボット密度が小さい場合には、 $k$  が増加することによる伝播速度の上昇よりも、比率  $\frac{n_e + i}{m}$  に伝達することによる伝播時間  $T(n_e, k)$  の増加の効果の方が大きいので、結局  $k$  が  $n_e$  から増加するに従って  $T(n_e, k)$  も増加する (Fig. 6.9の(b)の部分)。

このような理由で、 $T(n_e, k)$  は群規模  $k = n_e$  で最小値をとり、これが最適な群規模  $k_{opt}$  となる。すなわち、最適な群規模は、目標伝達台数に等しいことが分かった。

また、Fig. 6.8では、 $k > k_{opt}$  のときより  $k < k_{opt}$  のほうが  $T(n_e, k)$  の  $k$  に対する変化率の絶対値が大きくなっている。これは、群規模が  $k_{opt}$  より小さくなると群間の伝達の必要性が増え、伝播時間が飛躍的に増大するのに対し、 $k_{opt}$  より大きくなる場合にはイベントの発見時間の増加が伝播時間増加の要因となり、前者に比較して  $k$  に対する伝播時間の変化のしかたが小さくなるためであると考えられる。

### 6.3.3 最適群規模の導出 (目標伝達台数が確率分布の場合)

本節では、情報を伝達する目標のロボット台数  $n_e$  は一定でなく、6.1章で述べたようにイベント処理に必要な台数の分布が、一般的に確率分布で与えられる場合について解析する。

目標伝達台数が  $i$  台となる確率が、平均を  $n_e$  として  $p(n_e, i)$  で与えられるとする。群規模  $k$  のときの  $n_e$  台のロボットへの平均の伝播時間  $T_{av}(n_e, k)$  は、式 (6.15) を用いて

$$T_{av}(n_e, k) = \sum_{i=1}^N p(n_e, i) T(i, k) \quad (6.16)$$

と求められる。よって、伝達すべきロボット台数の分布  $p(n_e, i)$  が与えられた場合、最適群規模  $k_{opt}$  は式 (6.16) によって求められた  $T_{av}(n_e, k)$  を最小とするような群規模  $k$  となる。

例として、目標伝達台数が正規分布で与えられる場合を考える。 $n_e$  が  $i$  台である確率  $p(n_e, i)$  が平均  $n_e$ 、標準偏差  $\sigma$  の正規分布  $\varphi(n_e, i, \sigma)$  で与えられるとする。Fig. 6.10は、 $n_e = 6.0$ 、 $\sigma = 1.0$  について式 (6.15)、(6.16) から計算した  $T_{av}(n_e, k)$  を示す。この場合にも  $k_{opt}$  は存在し、解析的に求められるが、 $k_{opt} = 8$  となり、必ずしも前節のように  $k_{opt} = n_e$  とはならないことがわかる。

一般には、前節の Fig. 6.8で、 $k < k_{opt}$  のときに  $T(n_e, k)$  の増加のしかたが  $k > k_{opt}$  よりも大きいため、 $\sigma$  が増加すると、 $k_{opt}$  の値は増加する方向に変化すると考えられる。

本節では、 $n_e$  の分布が確率分布する場合にも、その分布が与えられれば、最適な群規模  $k_{opt}$  を式 (6.15)、(6.16) から解析的に求めることができることが示された。最適な群規模

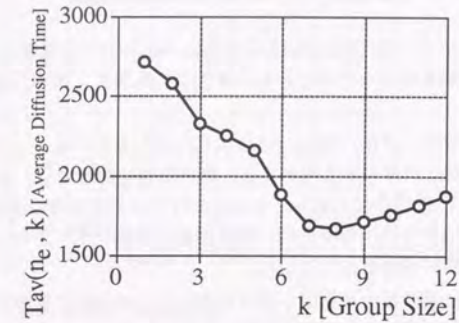


Fig. 6.10 群規模と平均伝播時間  $T_{av}$  の関係 ( $n_e=6.0$ ,  $\sigma=1.0$ )

は、目標伝達台数が一定のときのように一意には決まらず、それより増加する傾向があることが分かった。



## 6.4 シミュレーションによる解析の検証

解析の有効性を示すため、Fig. 6.11のような  $100 \times 100$  の領域にロボットが24台存在する環境で、群移動を行なうロボットを計算機上に実現し、情報伝播のシミュレーションを行った。

ロボット系のパラメータは、Table 6.1に示したものをを用いる。イベントは時間0で発生し、群は最初から組まれているものとする。群の形成に関しては、6.5節で扱う。ロボットの初期位置を変えて25回のシミュレーションを行い、その平均の値をシミュレーション値として用いた。6.2.1節で述べたように、衝突回避は考慮せず、またロボットが境界を越えた場合には、反対側に現れるようにした。

本章では、情報伝達に対する影響を調べるため、このように簡単な形で群移動を実現した。しかし、境界やロボットとの衝突回避を考慮した場合にも、回避開始距離は通常通信半径に対して小さく、ポアソン分布への効果はその二乗となり、4章で述べたように、無視できる範囲内である。また、通信範囲も環境に比較的小さいから、衝突の頻度は十分小さくなり、その効果も無視できる。よって、回避行動を行う場合にも解析は適用可能であると考えられる。

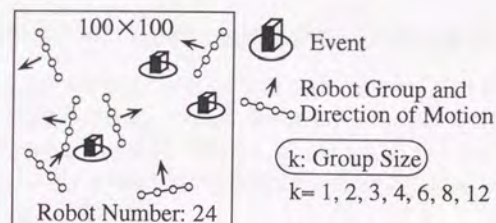


Fig. 6.11 シミュレーション環境

群による情報伝播過程と、伝播時間、最適群規模についてシミュレーション結果と解析による理論値を比較し、解析結果の検証を行った。

### 6.4.1 情報伝播の方程式の検証

I-ロボットの比率  $p(t)$  の時間変化について、シミュレーション結果と解析から求めた理論値とを比較した。群規模  $k=3$ 、 $k=6$  の場合を Fig. 6.12、Fig. 6.13にそれぞれ示す。図中で、Theory は式(6.5)、(6.14)から得られた理論値、Simulation はシミュレーション結果を示す。

式(6.1)では群の通信範囲の面積  $A_g$  を、長方形を用いて大きめに近似した。群の通信範

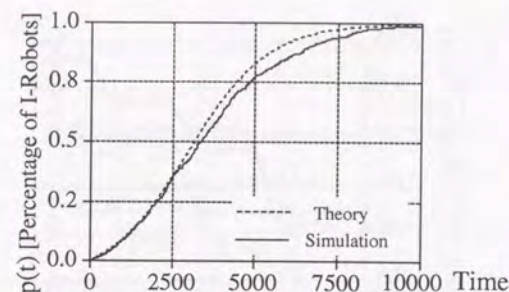


Fig. 6.12 情報伝播のシミュレーション ( $k=3$ )

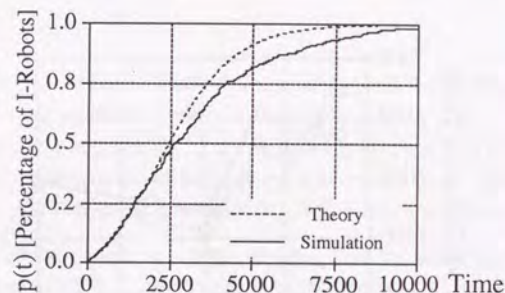


Fig. 6.13 情報伝播のシミュレーション ( $k=6$ )

囲の面積が実際より大きく見積もられているため、理論値のほうがシミュレーションよりも情報が速く伝播することが予想される。

実際、Fig. 6.12、Fig. 6.13を見ると、その誤差により、理論値での伝播がシミュレーション結果よりやや速くなっている。しかし、このモデル化誤差も10%以下で、 $k=3, 6$ の場合ともに解析値とシミュレーション結果がほぼ一致し、群移動による情報伝播の方程式の有効性が示されている。

### 6.4.2 伝播時間と最適群規模の検証

6.3章で示した伝播時間と最適群規模に関する考察を検証する。Fig. 6.14に、ロボット台数  $n$  とそれに対する伝播時間  $T(n, k)$  のシミュレーション結果を示す。



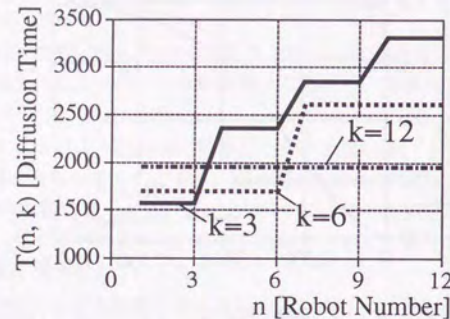
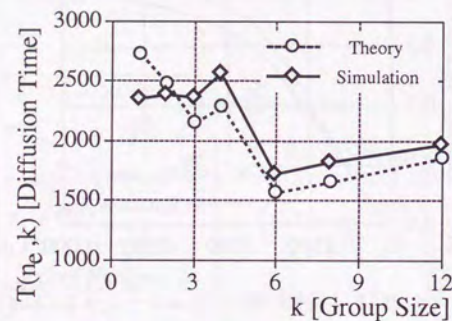


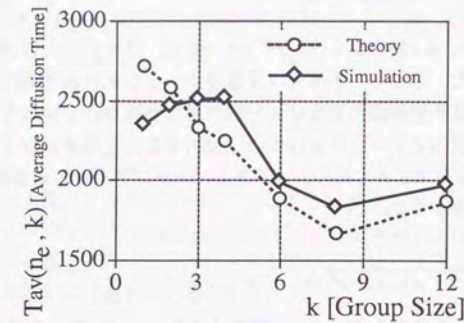
Fig. 6.14 群移動を行なった場合の情報伝播のシミュレーション結果

Fig. 6.15 群規模と伝播時間の関係 ( $n_e=6$ )

ロボット台数  $n$  に対する伝播時間  $T(n, k)$  の関係において、Fig. 6.14のシミュレーション結果は、Fig. 6.7に示す解析による理論値と、群の通信範囲の大きめに見積もったことによるモデル化誤差の範囲内ではほぼ一致している。

目標伝達台数  $n_e$  に情報を伝達する場合、群規模  $k$  と伝播時間  $T(n_e, k)$  の関係を調べると、Fig. 6.15のようになる。6.2.1節で系における群規模  $k$  は同一であるとしたので、本節では  $k=1, 2, 3, 4, 6, 12$  を解析とシミュレーションの対象とする。シミュレーションによる値は、前節のモデル化誤差の範囲で理論値と傾向が一致し、 $k_{opt} = n_e$  となっている。

さらに、6.3.3節のように目標伝達台数  $n_e$  が正規分布で与えられるとき、 $n_e$  の平均が6、標準偏差  $\sigma$  が1.0の場合について群規模  $k$  と平均の伝播時間  $T_{av}(n_e, k)$  の関係を Fig. 6.16

Fig. 6.16 群規模と平均伝播時間  $T_{av}$  の関係 ( $n_e=6.0$ ,  $\sigma=1.0$ )

に示す。

この場合についても、平均の伝播時間  $T_{av}(n_e, k)$  が最小となる群規模  $k_{opt}$  が一致していることがわかる。

本章では、解析による理論値が群による情報伝播を正確にモデル化していることが示された。これにより、多数ロボットの情報伝播シミュレーションを行う手間なしに、伝達すべきロボット数に対する最適な群規模を解析的に決定することができる。

本章で導入した群移動の場合にも、目標伝達台数  $n_e$  に対する情報提示時間  $T_{ann}$  は、5章と同様の手法で、最適な群規模  $k_{opt}$  を用いた場合の伝播時間  $T(n_e, k_{opt})$  あるいは  $T_{av}(n_e, k_{opt})$  に標準偏差の3倍の許容範囲を加えて求めることができる。



## 6.5 群形成アルゴリズム

6.2, 6.3節の解析, 6.4節のシミュレーションでは, はロボット群がすでに形成されている, と仮定していた。しかし, 本研究は分散ロボットシステムの局所的通信を対象としているので, 群形成は集中管理者なしに, 分散的になされなくてはならない。

本章では, 群形成のアルゴリズムについて説明する。このアルゴリズムは, 局所的通信のみを用いて隊列を形成するためのものである。アルゴリズムの有効性を, 群形成のシミュレーションにより検証する。

### 6.5.1 群形成のアルゴリズム

本節では, 局所的な通信を用いて, 分散的な方法でロボットが群を形成できるようなアルゴリズムについて説明する。

アルゴリズムの記述の前に, 環境とロボットの内部状態について以下のような仮定をおく。

- 各ロボットは, 識別番号  $ID$  を持ち, この  $ID$  によって識別される。
- ロボットは, 目的とする群のサイズ  $S_d$ , 現在の群のサイズ  $S_c$ , グループの識別番号  $ID_g$  を内部状態を表す情報として持つ。
- 初期状態では,
  - $S_c$ ,  $ID_g$  はそれぞれ 1, そのロボットの識別番号  $ID$  に設定しておく。
  - $S_d$  はあらかじめ与えられているとする。
  - ロボットは, リーダがないときはランダムに移動している。
- ロボットは, 他のロボットの内部状態量を, 群内の隣接するロボットのみから読み込めるとする。
- 隊列の両端にあるロボットのみがその群から離脱できるものとする。あるロボットが他の群に加入するときは, 適当なロボットの間に配置される。

局所的通信による, 自己組織化のための簡単なアルゴリズムを以下に示す。

まず, ロボット  $X$  が群  $A$  を抜けて別のグループ  $B$  に入るとき, その手続きを以下に示す。  $A \rightarrow ID_g$  は, グループ  $A$  の識別番号を示す。

```
quit-group(A):
   $X \rightarrow S_c$  を 1 にリセット
   $X \rightarrow ID_g$  を  $X \rightarrow ID$  にリセット
  (グループ  $A$  でロボット  $X$  に隣接していたロボットは  $S_c$  を 1 減らす)
```

```
enter-group(B):
```

```
  グループ  $B$  で新しく隣接するロボットから  $S_c$  と  $ID_g$  を読み込む
   $X \rightarrow S_c$  に 1 を加える
   $X \rightarrow ID_g$  を  $B \rightarrow ID_g$  にセットする
  (グループ  $B$  で新しく隣接するロボットは  $S_c$  に 1 を加える)
```

以下のアルゴリズムは, これらを用いて, どのようにグループ  $A$  の端部にあるロボット  $X$  が, グループ  $B$  のロボット  $Y$  に出会ったときどのように振舞うかを示している。群内には情報の伝達に遅れが存在するので, 目的とする群のサイズ  $S_d$  よりも大きな群が形成されてしまうことがあることに注意する必要がある。

```
if  $Y \rightarrow S_c < Y \rightarrow S_d$            [グループ  $B$  で目的のサイズ達成されていない]
  if  $X \rightarrow S_c < X \rightarrow S_d$            [グループ  $A$  で目的のサイズ達成されていない]
    if  $X \rightarrow S_c < Y \rightarrow S_c$          [グループ  $A$  のサイズが  $B$  より小] -- Case 1
       $X$  : quit-group(A) enter-group(B) を呼ぶ
    else if  $X \rightarrow S_c == Y \rightarrow S_c$    [same size of group] -- Case 2
       $X$  または  $Y$  : 確率  $\frac{1}{2}$  で quit-group() を呼び,
      もう一つのグループに enter-group() を用いて入る
    else if  $X \rightarrow S_c > X \rightarrow S_d$      [グループ  $A$  で目的の群サイズをオーバー] -- Case 3
       $X$  : quit-group(A) と enter-group(B) を呼ぶ
```

このアルゴリズムでは, ロボットが群を離脱するケースが3通りある。それらを Fig. 6.17 に示す。

この方法を用いることにより, 結果として1つのグループには1台だけランダムに移動するロボットが存在することになる。 $ID_g$  や  $S_c$  などの内部状態量の変更は, それが発生したところからグループに伝播する。大きな群の形成ではこのような情報伝播の遅れが顕著になる。

### 6.5.2 群形成のシミュレーション

前節で述べたアルゴリズムにより, すべてのロボットがランダムに分布する初期状態から, 目的とするサイズの群が形成されることを, 計算機シミュレーションによって示す。シミュレーション環境は,  $40 \times 40$  とし, すべてのロボットが初期状態でランダムに分布しているとする。システムのパラメータを Table 6.2 に示す。

Fig. 6.18(a) ~ (d) は,  $k = 10$  のときの群形成過程を示す。これらのシミュレーション結果から, 目的とするサイズの群が形成されていることがわかる。Fig. 6.18 (a) のようにすべ



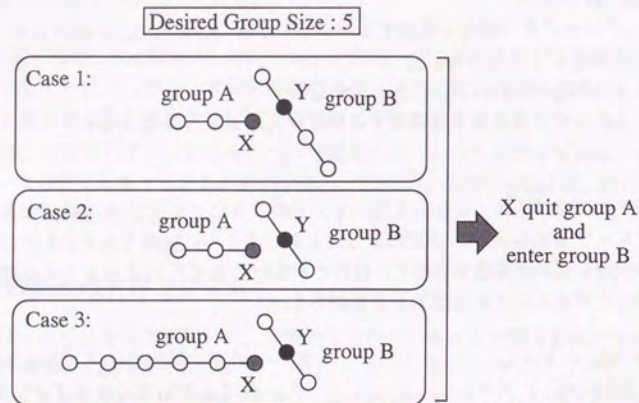
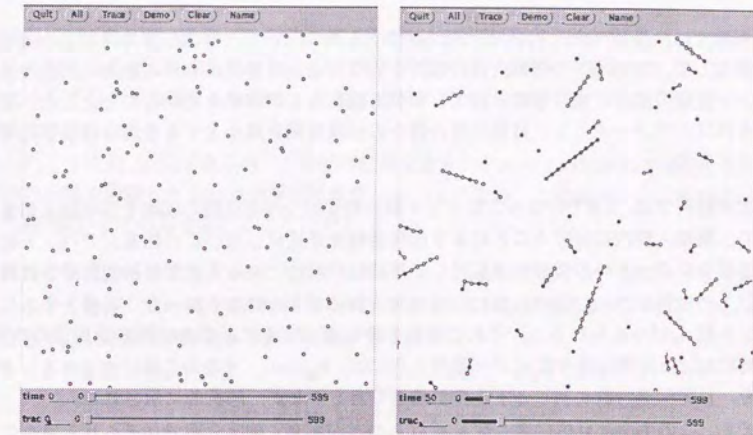


Fig. 6.17 ロボットが群を離脱する場合

でのロボットがランダムに配置されている初期状態 (時間 0) から始まって, Fig. 6.18(d) でほとんどすべての群が時間 600 で達成されていることが分かる. これにより, アルゴリズムの有効性が示された.

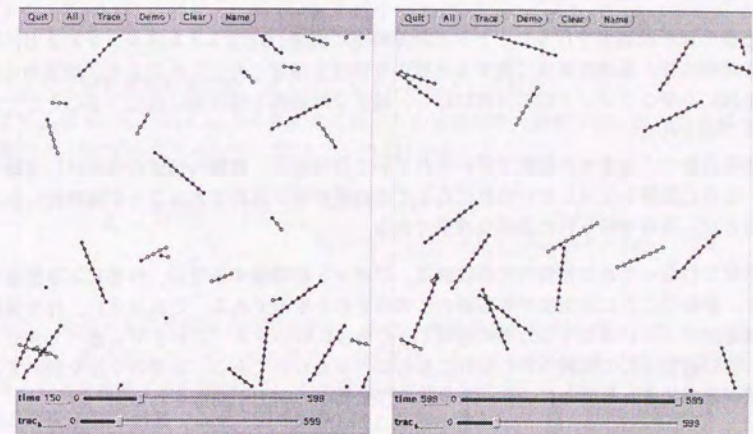
Table 6.2 群形成シミュレーションのパラメータ

$m$	Robot number	160
$\rho$	(Density of Robot Population)	0.1
$v$	(Velocity of Random Walking)	0.2
$R_c$	(Radius of Communication Area)	1.0
$c_r$	(Ratio of following distance to Communication Area)	0.8
$\phi$	(Visual Angle of Communication Area)	360[deg]



(a)  $t = 0$

(b)  $t = 50$



(c)  $t = 150$

(d)  $t = 600$

Fig. 6.18 (a)~(d) 群形成のシミュレーション



## 6.6 おわりに

本章では、多数ロボットが局所的に通信する系において、情報伝播の時間的な効率化を設計として、ロボットの移動方法の設計を行なった。自然界における動物の行動や多数ロボット協調の他の研究に示唆を得て、移動方法として群移動を用いることとした。群の規模を設計パラメータとし、目標伝達台数への伝達時間を最小とする最適な群規模の導出を目的とした。

まず解析では、5章で行なったロボット間の時間的な情報伝播の解析を群移動を対象に拡張し、群間・群内に分けることにより伝播過程を定式化した。この結果、イベントの処理に必要なロボットへの情報伝達に対して群移動が有効であることが解析的に示された。

以上の解析をさらに進め、次に伝播時間と群規模  $k$  の関係を調べた。目標とする伝達ロボット数  $n_e$  が与えられると、それに情報を最も速く伝達する最適な群規模  $k_{opt}$  が存在する作業における目標伝達台数  $n_e$  が一定のときには、 $k_{opt}=n_e$ 、すなわち群に含まれるロボット数を、目標伝達台数と同じとするのが最適であることが、解析的に示された。

また、この手法は目標伝達台数  $n_e$  にばらつきがあり、確率分布で与えられる場合にも応用できる。 $n_e$  が変化したときの伝播時間を重ね合わせれば、最適な群規模が求められる。このときには、一般に  $k_{opt} > n_e$  であり、目標伝達台数よりも多くの台数で群を組むほうが最適であるという傾向が見られた。

多数の局所的通信を行うロボットを計算機上に実現したシミュレーションにより、これらの情報伝播、最適群規模に関する解析の有効性を確認した。これにより、環境やイベント処理に必要なロボット数の分布に応じ、適正な群規模を解析的に決定することができることが示された。

動物行動やこれまでの研究で用いられていた群移動が、情報の伝達の効率化に有効であり、さらに情報を伝達したい台数に応じてその群規模が設計できることが解析的に示されたことが、本章で得られた重要な成果である。

本章で行なってきた移動方法の設計は、ロボットが移動する際に、作業により制限をうけず、移動の仕方に自由度がある場合に適用されるものである。これは主に、作業情報に必要なロボットに周知するための通信 (1) の場合に対応する。これまで述べてきたように、この過程はどの協調作業の実行にも必要となるものである。本章の手法を用いてこの通信が効率化されることにより、系全体の作業効率の向上が期待される。

付録: 最適群規模  $k_{opt}=n_e$  となることの証明

群規模が  $k$  のとき、情報が  $n_e$  台のロボットに伝達されるまでの時間  $T(n, k)$  は式 (6.15) のように表されることを示した。Fig. 6.6 に示したように、群間の伝播時間  $T_a$  は、群内の  $T_b$  に比べて十分大きな値となるため、伝播時間のグラフは  $k$  おきに値が離散的变化する階段状のグラフとなる。

このように  $T_a \gg T_b$  であるので、群間の伝播を表す I-グループの比率の時間変化  $p_g(t)$  は、群内の伝播も考慮した  $p(t)$  と結果的に非常に近いものなる。この理由から、以降では群間の伝播過程  $p_g(t)$  のみを考えることにする。

群間の情報伝播を式 (6.8) のようにロジスティック関数で近似する。群規模が  $k$  であるとき、 $n_e$  台 (ここでは  $n_e$  は  $k$  で割り切れるとする) へ情報が伝播するまでの時間  $T(n_e, k)$  は、5章の伝播時間の算出の式 (5.25) を適用して、

$$T(n_e, k) = -\frac{1}{a+b} \log \frac{(1-p_{n_e})(p_g(0) + \frac{b}{a})}{(p_{n_e} + \frac{b}{a})(1-p_g(0))} \quad (6.17)$$

$$(a = \beta_g v \rho A, \quad b = \beta_g v \rho_{sign} A, \quad p_g(0) = \rho_{sign} A_g)$$

となる。式 (6.17) において、式 (6.8) で  $p(t) \simeq p_g(t)$  とし、 $\frac{\rho}{k} A_g p_g(t) A p(t)$  を計算すると  $\rho A p(t)$  となる。これより、 $a$  は  $\beta_g v \rho A$  と求められる。

ここで、解析を進めるため、式 (6.17) を  $k$  の関数として整理しておく。

まず  $\beta_g$  は  $v$ ,  $R_c$ ,  $c_r (< 1)$  をそれぞれロボットの移動速度、通信半径、群内のロボット間距離の  $R_c$  に対する比率として、式 (6.1), (6.11) から、

$$\beta_g = \frac{S_g(R_c, k, c_r) v}{A_g} = v \frac{R_c(c_r(k-1) + \frac{\pi}{2})}{R_c^2(2c_r(k-1) + \pi)} = v \frac{c_r k + y}{R_c(2c_r k + 2y)} = \frac{v}{2R_c}$$

$$\text{ただし, } y = \frac{\pi}{2} - c_r (> 0)$$

となる。ロボットの視野は  $360^\circ$  とする。また、直進移動の掃引の幅  $S_g(R_c, k, c_r)$  を計算するとき、群の両端のロボットの掃引への寄与は、それらの間にあるロボットよりも小さくなることを考慮する必要がある。群の両端のロボットの掃引する幅は  $2R_c$  でなく、 $2R_c$  の (円の面積)/(円に外接する正方形の面積) 倍となると考え、

$$S_g(R_c, k, c_r) = R_c(c_r(k-1) + \frac{\pi}{2})$$

とした。これを用いると、 $a, b, p_g(0)$  は

$$a = \beta_g \rho A = \frac{v R_c \rho \pi}{2} \quad (6.18)$$



$$b = \beta_g \rho_{\text{sign}} A_g = v R_c \rho_{\text{sign}} (c_r k + y) \quad (6.19)$$

$$p_g(0) = \rho_{\text{sign}} A_g = 2 R_c^2 \rho_{\text{sign}} (c_r k + y) \quad (6.20)$$

$$\text{ただし, } y = \frac{\pi}{2} - c r (> 0) \quad (6.21)$$

となる. 式 (6.17) の  $T(n_e, k)$  の  $\frac{1}{a+b}$  の部分は, 式 (6.18), (6.19) から

$$\begin{aligned} \frac{1}{a+b} &= \frac{1}{\frac{v R_c \rho \pi}{2} + v R_c \rho_{\text{sign}} (c_r k + y)} \\ &= \frac{2}{v R_c (\rho \pi + 2 \rho_{\text{sign}} (c_r k + y))} \end{aligned} \quad (6.22)$$

となる.

$n_e$  台までの伝達時間  $T(n_e, k)$  は式 (6.17) において,  $\frac{1}{a+b}$  に対数関数

$$\log g(k) = \log \frac{(1 - p_{n_e})(p_g(0) + \frac{b}{a})}{(p_{n_e} + \frac{b}{a})(1 - p_g(0))} \quad (6.23)$$

を乗じて求められる. 対数関数の真数部分  $g(k)$  の分子から分母を引くと

$$(1 - p_{n_e})(p_g(0) + \frac{b}{a}) - (p_{n_e} + \frac{b}{a})(1 - p_g(0)) = (p_g(0) - p_{n_e})(1 + \frac{b}{a})$$

となり, 情報を伝達すべきロボットの比率  $p_{n_e}$  は明らかに初期値  $p_g(0)$  より大きいから, 上の値は負である. よって, 分母 > 分子であり, 対数関数  $g(k)$  の真数は 1 より小さく,  $g(k) < 0$  である. よって, 式 (6.17) により計算される伝達時間  $T(n_e, k) > 0$  となることが保証される.

また, 式 (6.23) の  $\frac{b}{a}$  は, 次のように計算される.

$$\frac{b}{a} = \frac{\beta_g \rho_{\text{sign}} A_g}{\beta_g \rho A} = \frac{\rho_{\text{sign}} A_g}{\rho A} = \frac{2 \rho_{\text{sign}}}{\rho \pi} (c_r k + y) \quad (6.24)$$

よって, 式 (6.23) の対数関数は, その真数部分を  $k$  の関数  $g(k)$  として,

$$\begin{aligned} \log g(k) &= \log \frac{(1 - p_{n_e})(p_g(0) + \frac{b}{a})}{(p_{n_e} + \frac{b}{a})(1 - p_g(0))} \\ &= \log \frac{(1 - p_{n_e})(R_c^2 \rho_{\text{sign}} + \frac{2 \rho_{\text{sign}}}{\rho \pi})(c_r k + y)}{(p_{n_e} + \frac{2 \rho_{\text{sign}}}{\rho \pi}(c_r k + y))(1 - 2 R_c^2 \rho_{\text{sign}}(c_r k + y))} \end{aligned} \quad (6.25)$$

と表される.

以上の準備を踏まえ, 6.3節 6.3.2の Fig. 6.9で説明したように, 目標伝達台数  $n_e$  に対して群規模  $k$  が (a)  $k \leq n_e$  のとき, (b)  $k > n_e$  のときに分け, それぞれについて, 次の方針で解析していく.

(a)  $k \leq n_e$  のとき

- 目標伝達台数  $n_e$  に伝達する.
- 式 (6.17) の  $T(n_e, k)$  が単調減少であることを示す.

(b)  $k > n_e$  のとき

- 一群のロボット数  $k$  が目標伝達台数  $n_e$  よりも多いため,  $n_e$  台への情報伝達には, 1つの群への伝達するだけの時間が必要である. よって, 目標伝達台数は  $k$  としなければならない.
- 式 (6.17) の  $T(n_e, k)$  が単調増加であることを示す.

(a)  $k \leq n_e$  のとき

群規模  $k$  が目標伝達台数  $n_e$  よりも小さい場合である. ここでは,  $k$  が増加するに従って式 (6.17) の伝達時間  $T(n_e, k)$  が減少することを示す.

さて, まず式 (6.17) における  $a+b$  が次の性質を満たすことを述べておく.

#### 補題 1

$a+b$  に  $k$  の 1 次関数  $uk + w$  ( $u, w > 0$ ) を乗じた

$$f_a(k) = (uk + w) \frac{v R_c (\rho \pi + 2 \rho_{\text{sign}} (c_r k + y))}{2}$$

は  $k > 0$  で  $k$  の単調増加関数である.

#### 証明

$f_a(k)$  を  $k$  で微分すれば明らかである.

さて, 式 (6.17) で, 伝達時間  $T(n_e, k)$  の逆数をとると, 式 (6.25) の対数関数  $g(k)$  を用いて

$$\frac{1}{T(n_e, k)} = - \frac{(a+b)}{\log g(k)}$$



$$= - \frac{(a+b)}{\log \frac{2(1-p_{ne})(R_c^2 \rho_{sign} + \frac{\rho_{sign}}{\rho\pi})(c_r k + y)}{(p_{ne} + \frac{2\rho_{sign}}{\rho\pi}(c_r k + y))(1 - 2R_c^2 \rho_{sign}(c_r k + y))}} \quad (6.26)$$

となる。\$g(k)\$ を \$k\$ で微分すると、\$p\_{ne}\$ が定数であることを考慮して、

$$\begin{aligned} \frac{dg(k)}{dk} &= \frac{d}{dk} \left\{ \log \frac{2(1-p_{ne})(R_c^2 \rho_{sign} + \frac{\rho_{sign}}{\rho\pi})(c_r k + y)}{(p_{ne} + \frac{2\rho_{sign}}{\rho\pi}(c_r k + y))(1 - 2R_c^2 \rho_{sign}(c_r k + y))} \right\} \\ &= \frac{2(1-p_{ne})(R_c^2 \rho_{sign} + \frac{\rho_{sign}}{\rho\pi})\{(\rho_{sign} R_c(c_r k + y))^2 + \rho\pi p_{ne}\}}{(p_{ne} + \frac{2\rho_{sign}}{\rho\pi}(c_r k + y))^2 (1 - 2R_c^2 \rho_{sign}(c_r k + y))^2} \\ &> 0 \quad (k > 0) \quad (\text{式 (6.18) で } y > 0 \text{ より}) \end{aligned} \quad (6.27)$$

となり、これも \$k\$ の単調増加関数である。よって、\$-\log g(k)\$ は単調減少関数、その逆数の

$$l_g(k) = -\frac{1}{\log g(k)} \quad (> 0) \quad (6.28)$$

は単調増加関数となる。

\$m\$ をロボット総数として、\$k\$ は \$[1, m]\$ の範囲を動く。以下では、これを便宜的に \$k\$ は \$[0, m]\$ の範囲とする。式 (6.26) に示した伝播時間 \$T(n\_e, k)\$ の逆数

$$\frac{1}{T(n_e, k)} = -\frac{(a+b)}{\log g(k)} = l_g(k)(a+b) \quad (6.29)$$

に対し、\$k\$ が \$[0, m]\$ の範囲を動くとき、

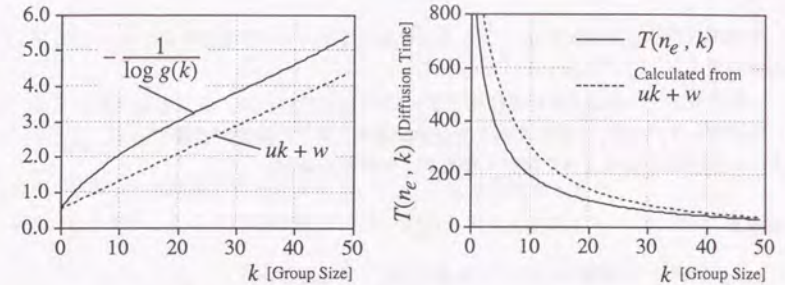
- 単調増加関数 \$l\_g(k)\$ と \$k=0\$ での初期値が一致する。
- 単調増加関数 \$l\_g(k)\$ よりも増加率が常に小さくなる。

という条件を満たす一次関数 \$uk+w\$ (\$u, w > 0\$) が必ず存在する。\$w = l\_g(0)\$ とし、\$u\$ は正である限り 0 にいくらでも近づけられるからである。

この \$u, w\$ を用ることにより、\$k\$ が \$[0, m]\$ の範囲にあるとき

$$\begin{aligned} l_g(k) &> uk + w \\ \frac{dl_g(k)}{dk} &> u \end{aligned} \quad (6.30)$$

が成立する。補題 1 で、\$(uk+w)(a+b)\$ は \$k\$ に関して単調増加であることを示した。これと式 (6.30) と合わせて、式 (6.26) に示す \$\frac{1}{T(n\_e, k)}\$ が単調増加することが示された。よって、伝播時間 \$T(n\_e, k)\$ は単調減少する。



(1) \$l\_g(k) = -\frac{1}{\log g(k)}\$ と \$uk+w\$ のグラフ

(2) 伝播時間 \$T(n\_e, k)\$

Fig. 6.19 (a) \$k \leq n\_e\$ における伝播時間の計算 (\$\rho=0.01\$, \$\rho\_{sign}=0.001\$, \$m=50\$, \$n\_e=10\$, \$R\_c=1.0\$, \$c\_r=0.8\$)

ここで、計算例を示しておく。\$\rho=0.01\$, \$\rho\_{sign}=0.001\$, \$m=50\$, \$n\_e=10\$, \$R\_c=1.0\$, \$c\_r=0.8\$ のとき、\$l\_g(k) = -\frac{1}{\log g(k)}\$ は Fig. 6.19(1) のようになる。このグラフ上に点線で示した直線は、補題 1 で示した一次関数 \$uk+w\$ である (\$u=0.078\$, \$w=5.55\$)。先に述べたように \$w\$ を \$k=0\$ での初期値が同じとなるように \$w=l\_g(0)\$ とし、また \$uk+w\$ の増加率 \$u\$ は \$u < \frac{dl\_g(k)}{dk}\$ より常に小さくなるように \$u\$ を決定した。\$u=0.078\$ は \$[0, m]\$ の範囲での \$\frac{dl\_g(k)}{dk}\$ の最小値である。Fig. 6.19(1) では、式 (6.28) の \$l\_g(k)\$ が \$k\$ に関して単調増加し、式 (6.30) が成立していることが確かめられる。

またこの \$l\_g(k)\$ に \$a+b\$ を乗じ、逆数をとって得られる伝播時間 \$T(n\_e, k)\$ を Fig. 6.19(2) に示す。\$k\$ が増加するに従い、\$T(n\_e, k)\$ が単調減少することが確認できる。“Calculated from \$uk+w\$” と示された点線は、\$uk+w\$ に \$a+b\$ を乗じ、逆数をとったものである。これが単調減少し、伝播時間 \$T(n\_e, k)\$ を上から押えていることが分かる。

ここでの解析では、目標伝達数 \$n\_e\$ は常に群規模 \$k\$ で割り切れるとして考えてきた。実際には、Fig. 6.8 に示すように、\$k \leq n\_e\$ で \$T(n\_e, k)\$ は単調減少せず、途中で増加することもある。Fig. 6.8 の例では \$n\_e=6\$ である。\$k=1 \sim 3\$ のときは \$n\_e\$ は \$k\$ で割り切れるので \$T(n\_e, k)\$ はこれまでの解析に示した通り単調減少する。これに対し、\$k=4, 5\$ では \$n\_e=6\$ を割り切ることができないので、6 台に伝達するためには、2 群に情報が伝播する必要がある。それぞれ 8, 10 台への伝達が必要となるため、\$T(n\_e, k)\$ が増加する現象が見られるわけである。

しかしながら、\$k \leq n\_e\$ の範囲では \$T(n\_e, k)\$ が \$k=n\_e\$ で最小値をとることは変わらないため、解析は有効である。



(b)  $k > n_e$  のとき

群規模  $k$  が目標伝達台数  $n_e$  よりも大きい場合である。 $k$  が増加するに従って式 (6.17) の伝播時間  $T(n_e, k)$  が増加することを示す。

一群のロボット台数  $k$  が目標伝達台数  $n_e$  よりも大きいため、先にも述べたように、 $n_e$  台に伝達するまでには、1 群すなわち  $k$  台に伝達するまでの時間が必要である。そこで、ここでは目標伝達台数  $n_e$  を  $k$  とおいて考えなければならない。

## 補題 2:

$\frac{1}{a+b}$  に  $k$  の一次関数  $uk$  ( $u > 0$ ) を乗じた

$$f_b(k) = uk \cdot \frac{1}{a+b} = uk \cdot \frac{2}{vR_c(\rho\pi + 2\rho_{sign}(c_r k + y))}$$

は  $k > 0$  で  $k$  の単調増加関数である。

## 証明

$f_b(k)$  を  $k$  で微分する。

$$\begin{aligned} \frac{df_b(k)}{dk} &= \frac{d}{dk} \left\{ uk \cdot \frac{2}{vR_c(\rho\pi + 2\rho_{sign}(c_r k + y))} \right\} \\ &= \frac{2u(2y\rho_{sign} + \rho\pi)}{(\rho\pi + 2\rho_{sign}(c_r k + y))^2} \\ &> 0 \quad (k > 0) \quad (\text{式 (6.18) で } y > 0 \text{ より}) \end{aligned} \quad (6.31)$$

よって、 $f_b(k)$  は単調増加である (証明終)。

$T(n_e, k)$  はこの  $\frac{1}{a+b}$  に式 (6.25) の  $-\log g(k)$  を乗じることにより得られる。 $n_e = k$  とおくから、ここでは  $p_{n_e} = \frac{k}{m}$  である。これを式 (6.25) に適用すると、 $g(k)$  は

$$g(k) = \frac{2(1 - \frac{k}{m})(R_c^2 \rho_{sign} + \frac{\rho_{sign}}{\rho\pi})(c_r k + y)}{(\frac{k}{m} + \frac{2\rho_{sign}}{\rho\pi}(c_r k + y))(1 - 2R_c^2 \rho_{sign}(c_r k + y))} \quad (6.32)$$

となる。

式 (6.32) で、分母の  $1 - 2R_c^2 \rho_{sign}(c_r k + y)$  の部分は式 (6.17) における  $1 - p_g(0)$  に相当する。ロボットの密度が小さいと考えると、 $p_g(0)$  も十分小さく、 $1 - p_g(0) \simeq 1$  と近似できる。これを式 (6.32) の  $g(k)$  に適用して

$$g(k) \simeq \frac{2(1 - \frac{k}{m})(R_c^2 \rho_{sign} + \frac{\rho_{sign}}{\rho\pi})(c_r k + y)}{(\frac{k}{m} + \frac{2\rho_{sign}}{\rho\pi}(c_r k + y))} \quad (6.33)$$

と近似される。これを  $k$  で微分すると、

$$\begin{aligned} \frac{dg(k)}{dk} &= -2 \frac{\frac{2\rho_{sign}}{\rho\pi n}(c_r k + y)^2 + \frac{y}{m} + c_r \frac{k^2}{n^2}}{(\frac{k}{m} + \frac{4\rho_{sign}}{\rho\pi}(c_r k + y))^2} \\ &< 0 \quad (k > 0) \quad (n > 0, \text{ また式 (6.18) で } z > 0 \text{ より}) \end{aligned} \quad (6.34)$$

となり、近似的に単調減少する。よって、 $-\log g(k)$  は単調増加する。

また、 $k = 0$  のときの  $g(k)$  初期値  $g(0)$  は、近似した式 (6.33) から

$$g(0) \simeq \frac{2y(R_c^2 \rho_{sign} + \frac{\rho_{sign}}{\rho\pi})}{\frac{2y\rho_{sign}}{\rho\pi}} = 1 + \rho\pi R_c^2 = 1 + \rho A \quad (6.35)$$

となる。ここで、 $\rho A$  は通信範囲に存在する平均のロボット数を示す。ロボット密度が十分小さいと考えると、 $\rho A \ll 1$  で、 $g(0) \simeq 1$  とできる。よって、対数関数  $-\log g(k)$  の初期値は 0 と近似することができる。

(a) の  $k \leq n_e$  の場合と同様に、 $k$  が  $[0, m]$  の範囲を動くとする。伝播時間

$$T(n_e, k) = -\frac{1}{a+b} \log g(k) \quad (6.36)$$

における単調増加関数  $-\log g(k)$  の初期値は 0 である。そして、原点を通る  $k$  の一次関数  $uk$  の増加率が単調増加関数  $-\log g(k)$  よりも常に小さいという条件を満たす正の値  $u$  が必ず存在する。

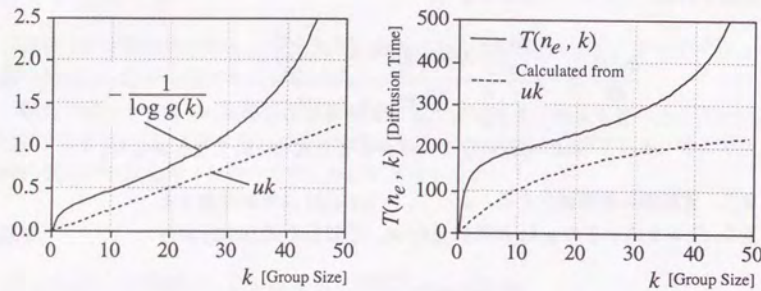
$$\begin{aligned} -\log g(k) &> uk \\ \frac{-d \log g(k)}{dk} &> u \end{aligned} \quad (6.37)$$

補題 2 で、 $uk \cdot \frac{1}{a+b}$  は単調増加であることを示したから、式 (6.37) と合わせて、式 (6.36) で示される  $T(n_e, k)$  は単調増加する。

Fig. 6.19 の計算と同じパラメータを用い、まず  $-\log g(k)$  を Fig. 6.20(1) に示す。点線で示した直線は、補題 2 で用いた原点を通る  $k$  の一次関数  $uk$  である ( $u=0.026$ )。この傾き  $u$  は、 $-\log g(k)$  の傾きよりも常に小さくなるように、 $[0, m]$  の範囲での  $\frac{-d \log g(k)}{dk}$  の最小値とした。Fig. 6.20(1) では、式 (6.37) が成り立っていることが分かる。

またこれに  $\frac{1}{a+b}$  を乗じて得られる  $T(n_e, k)$  を Fig. 6.20(2) に示す。 $T(n_e, k)$  が  $k$  の単調増加関数であることが確認できる。また、“Calculated from  $uk$ ” と示された点線は、 $uk$  に  $\frac{1}{a+b}$  を乗じたものである。これが単調増加の傾向を示し、伝播時間  $T(n_e, k)$  の単調増加を保証している。

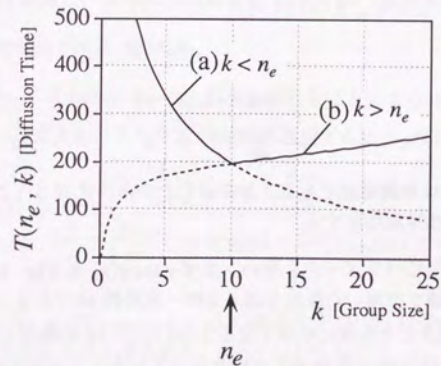



 (1)  $-\log g(k)$  と  $uk$  のグラフ

 (2) 伝播時間  $T(n_e, k)$ 

 Fig. 6.20 (b)  $k > n_e$  における伝播時間の計算 ( $\rho=0.01$ ,  $\rho_{sign}=0.001$ ,  $m=50$ ,  $R_c=1.0$ ,  $c_r=0.8$ )

最後に、これまでの計算例で用いたパラメータに対して、ある  $n_e (=10)$  をとったときの伝播時間  $T(n_e, k)$  を Fig. 6.21 に示す。このグラフは、Fig. 6.19(2) と Fig. 6.20(2) を重ね合わせ、(a)  $k \leq n_e$  では Fig. 6.19(2) を、(b)  $k > n_e$  では Fig. 6.20(2) をを用いることにより求められる。群規模  $k = n_e$  で  $T(n_e, k) = 196.36$  となり最小値をとっていることが分かる。


 Fig. 6.21 伝播時間の計算 ( $\rho=0.01$ ,  $\rho_{sign}=0.001$ ,  $m=50$ ,  $n_e=10$ ,  $R_c=1.0$ ,  $c_r=0.8$ )

再び付け加えると、厳密には、Fig. 6.8 のように  $k \leq n_e$  の範囲で  $T(n_e, k)$  が増加する現象が生じる。ただし、ここでは  $n_e$  で  $T(n_e, k)$  が最小となることを示すことが目的であるので、その修正はしていない。



## 第 7 章 パーコレーションを用いた情報 伝播モデルの検討

---

7.1 はじめに . . . . .	224
7.2 ロボット移動の伝播への影響に関する解析 . . . . .	226
7.2.1 シミュレーション環境 . . . . .	226
7.2.2 回帰分析を用いた速度の影響の解析 . . . . .	227
7.2.3 パーコレーション理論における浸透閾値との関係 . . . . .	230
7.3 情報伝達数が多い場合の伝播モデル . . . . .	233
7.4 おわりに . . . . .	235

---



## 7.1 はじめに

5章, 6章での情報伝播の解析は, 移動も情報伝播に寄与する場合に対してであった。これは, 3.4節の分類で (A)(B) の場合であり, 最大情報伝達数  $N_{max}$  がパーコレーションを生じさせる臨界値  $N_{cr}$  よりも小さい範囲である。

$N_{max}$  が大きい場合に対応する分類 (C) は,  $N_{max} \geq N_{cr}$  であり, 最大情報獲得台数  $c$  が十分大きい場合である。3.4節の Table 3.8 に示したように, この場合にもまず 4 章の空間的な設計により通信範囲  $x$  を決定してから, 情報の伝播過程を調べて情報提示時間の時間的设计を行なうことになる。しかしこのときには, 無限の通信経路の繋がりができ, 移動は情報の伝播にほとんど寄与しなくなる。これは, 情報伝達数が大きくなるに従い, 伝播において重要な役割を果たす要素が, ロボットの移動から「パーコレーション (浸透)」的な通信範囲の繋がりに遷移するからである。したがってこの場合には, 速度を考慮した情報伝播の一般式 (3.2) とは異なる手法で解析する必要がある。

このように大きな情報伝達数に対する通信は, 密に存在する多数のロボットが協調するときが必要となる。例えば, [福田 94b] [小西 94] [小西 95] [坂尾 95] に見られるような固定されたロボットあるいは搬送機構が多数存在し, これらが協調して大きな対象物を搬送する場合に対応する。

本章では, ロボットで混雑した環境における局所的通信を解析し, 情報伝播過程を明らかにする。このことは, 局所的通信の設計論をより一般的に適用できるものにするためにも重要である。

そこで, 本章ではまず, 7.2 節で情報伝播に対する速度の寄与が消失し, パーコレーション効果が顕著となる情報伝達数の閾値  $N_{cr}$  について考察する。次に, 7.3 節においてパーコレーションの効果を考慮した, 離散的な情報伝播のモデルを検討する。

Fig. 7.1 に局所的通信の解析・設計における本章の位置付けを示す。設計パラメータは, 情報の提示時間  $T_{ann}$  である。

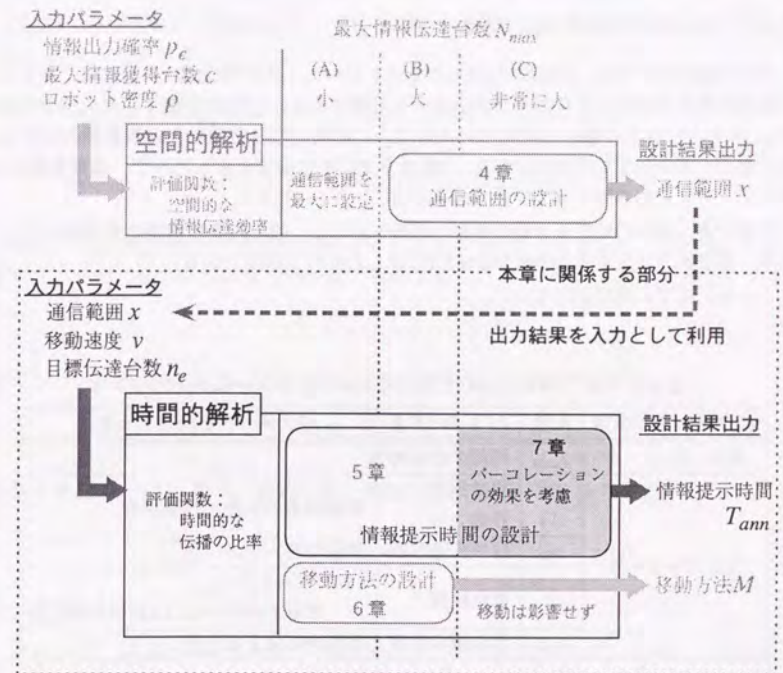


Fig. 7.1 局所的通信の解析・設計における本章の位置付け



## 7.2 ロボット移動の伝播への影響に関する解析

本節では、通信範囲を変えて多数ロボットの情報伝播シミュレーションを行ない、情報伝播に果たす中心的な役割が、ロボットの移動から通信経路の無限の繋がりによるパーコレーション(浸透)に変化する閾値を、回帰分析から求める。また、求められた閾値とパーコレーション理論によって求められている浸透閾値との関係も示す。

## 7.2.1 シミュレーション環境

局所的通信モデルは、3.2節に定義したものをを用いる。系の情報源は、告知板に提示された作業情報あるいは、各ロボットが出力する情報である。3.2節の分類で、最大情報伝達数  $N_{max}$  が大きい (C) の場合を考えているので、この場合には空間的な通信範囲の設計も必要である。空間的な設計については、4章ですでにその手法を示したので、通信範囲  $x$  は、それによりすでに求められているものとする。

本章でも、複数のロボット間の情報の伝播を解析し、設計対象は情報の提示時間  $T_{ann}$  である。主なパラメータは5章の Table 5.1 に示したものと同様である。

これを、以下に再び示しておく。

Table 7.1 本章において重要なロボットシステムのパラメータ

パラメータの種類	記号	パラメータ名	パラメータを決定する要因
設計パラメータ	$T_{ann}$	情報の提示時間	
入力パラメータ	$v$	移動速度	移動機構の性能・作業内容
	$\mathcal{M}$	移動方法	
	$n_c$	目標伝達台数	作業内容
	$x$	通信範囲	4章で設計した $x_{opt}$ 本章で扱うのは 3.4 節の分類 (C)
	$\rho_{sign}$	告知板の密度	環境から決まる定数

情報伝播のシミュレーションでは、多数 (20 台) のロボットを計算機上に実現し、環境の大きさや通信範囲を変化させていくつかの情報を伝播させ、情報の伝播率の平均  $p(t)$  を求めた。ここでは、ランダム探索を考え、ロボットの移動法  $\mathcal{M}$  は、ランダム移動とする。4章でモデル化した他の作業である「協調搬送」「分割された領域探索」に対しても、ランダム探索と同様に解析を進めることができるので、省略する。

## 7.2.2 回帰分析を用いた速度の影響の解析

局所的通信による「クチコミ」的な情報の伝播を表す I-Robot の比率  $p(t)$  に関する微分方程式は、式 (5.3) に示したように、情報獲得の確率  $P(c, p_e, x, t)$  を用いた情報伝播の方程式

$$\frac{dp(t)}{dt} = \beta(v, \mathcal{M}, x) P(c, p_e, x, t) \{1 - p(t)\} \quad (7.1)$$

となる。

各ロボットがランダム移動するときには、干渉あり・なしの場合の情報獲得の確率  $P_I(c, p_e, x, t)$ ,  $P_N(c, p_e, x, t)$  はそれぞれ

$$P_I(c, p_e, x, t) = e^{-p_e x} \left( \sum_{k=0}^c \frac{(p_e x)^k}{k!} - 1 \right) - e^{-p_e x} \left( \sum_{k=0}^c \frac{\{p_e x(1 - p(t))\}^k}{k!} - 1 \right)$$

$$P_N(c, p_e, x, t) = e^{-p_e x} \sum_{i=0}^c \frac{(p_e x)^i \{(1 - p(t))^c - (1 - p(t))^i\}}{i!} + 1 - (1 - p(t))^c \quad (7.2)$$

である。本章では、最大情報伝達台数  $c$  が十分大きい場合を考えている。式 (7.2), (7.2) において、総和の部分の  $c \rightarrow \infty$  とすれば、両式とも

$$P(c, p_e, x, t) = 1 - e^{-p_e x p(t)} \quad (7.3)$$

となる。告知板からの直接の情報獲得を考えるときは、告知板の密度を  $\rho_{sign}$  として、

$$p(t) \rightarrow p(t) + \frac{\rho_{sign}}{p_e \rho} \quad (7.4)$$

と置き換えればよい。結局、情報伝播の方程式は式 (7.1), (7.3) から一般に

$$\frac{dp(t)}{dt} = \beta(v, \mathcal{M}, x) \{1 - e^{-p_e x \{p(t) + \frac{\rho_{sign}}{p_e \rho}\}}\} \{1 - p(t)\} \quad (7.5)$$

と求められる。

式 (7.5) で、速度が関係する部分は係数  $\beta(v, \mathcal{M}, x)$  である。ランダム移動を、4章 4.3.1 に示したように  $\tau$  単位時間ごとに  $\pm\theta$  ( $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{4}$ ) の範囲でランダムに進行方向を変化する移動とする。これを 5.3 節で示したように  $\mathcal{R}(\theta, \tau)$  と表したとき、単位時間・単位速度あたりの掃引面積を示す式 (5.8) を用いて、 $\beta(v, \mathcal{M}, x)$  は式 (5.12) に示したように

$$S(R_c, \phi, \theta, \tau) = W(R_c, \phi) \frac{(\tau - 1) + a(\theta)}{\tau} \quad (7.6)$$

$$W(R_c, \phi) = 2R_c \quad (\phi > \pi), \quad 2R_c \sin \phi / 2 \quad (0 \leq \phi \leq \pi)$$

$$\beta(v, \mathcal{R}(\theta, \tau), x, R_c, \phi) = \frac{1 - e^{-p S(R_c, \phi, \theta, \tau) v}}{1 - e^{-x}} \quad (7.7)$$

となる。



$\beta$ の式(7.7)において、分子に線形近似を行なうと、

$$\begin{aligned}\beta(v, \mathcal{R}(\theta, \tau), x, R_c, \phi) &= \frac{1 - e^{-\rho S(R_c, \phi, \theta, \tau)v}}{1 - e^{-x}} \\ &= \frac{S(R_c, \phi, \theta, \tau)v}{x}\end{aligned}\quad (7.8)$$

となり、 $\beta$ は移動速度  $v$  に比例する。

環境の幅全体を数単位時間で移動してしまうような大きな速度  $v$  は現実的でないで、本章では  $20 \times 20$  以上の環境に対して、ロボット速度の最大値  $v_{max}$  は 0.5 とする。実際の例を考えると、これは最大速度が 50[cm/sec] の移動ロボットが四方が 20[m] 以上の環境を移動する場合であり、妥当な仮定である。

7.2.1のシミュレーション環境設定では、環境の大きさが  $E \times E$  に視野 360[deg] のロボットが 20 台以上存在するとした。 $v$  を最大値 0.5 にとったとき、線形近似を行なった式(7.7)の分子における指数部分  $\rho S(R_c, \phi, \theta, \tau)v$  の最大値は

$$\frac{\sqrt{20x}}{\pi E} p_c p(t) \quad (7.9)$$

である。通信範囲  $x=10$  と  $x$  を非常に大きい値にとっても、環境 20,  $p_c=1$ ,  $p(t)$  の平均 0.5 として、式(7.9)の値は 0.23 であり、線形近似を行なった式(7.8)の誤差は 10% 程度に収まる。環境が大きくなるに従って式(7.9)の値は小さくなる。よって情報伝播の方程式(7.5)に従って情報が伝播する限りは、式(7.8)の  $\beta$  の近似値は  $x=10$  程度までの  $x$  に対して十分適用できる。すなわち、 $x$  がこの範囲では  $\beta$  は移動速度  $v$  に比例すると考えてよい。

しかしながら、本節冒頭で述べたように、通信範囲  $x$  が増加すると、「パーコレーション(浸透)」の効果により、情報の伝播過程が、速度を考慮に入れた式(7.5)自体に必ずしも従わなくなると考えられる。

そこで、以下の手順で、速度  $v$  が情報伝播において主要な役割を果たす通信範囲  $x$  の範囲を求める。

- (1)  $x$  と  $v$  の値を変化させて情報伝播のシミュレーションを行ない、伝播過程を表す  $p(t)$  (I-ロボットの比率)を求める。
- (2) 式(7.5)で  $\beta$  の値を変化させてシミュレーション結果と比較し、最小 2 乗法により最もフィットする値  $\beta_{sim}$  を求める。
- (3) 求められた  $\beta_{sim}$  に対して、 $v$  との相関を調べるための重回帰分析を行ない、以下の形で係数を求める。

$$\beta_{sim} = av + b \quad (7.10)$$

重回帰分析とは、ある目的変数  $y$  (結果) が、説明変数(原因)  $x_1, x_2, \dots, x_n$  と強い相関がある(1次式)と予想されるとき、誤差を最小とする予測値

$$y \mapsto b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n + b_0$$

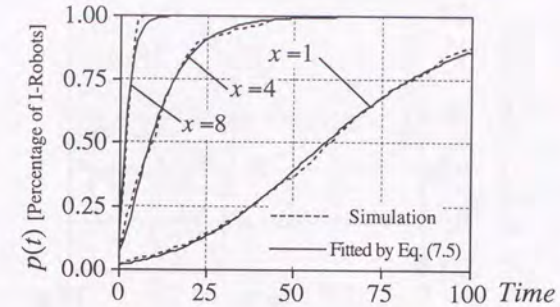


Fig. 7.2 シミュレーション結果への情報伝播式のあてはめ

の係数  $b_0, b_1, \dots, b_n$  を求めるものである[養谷 85][石村 92]。このとき、あてはまりの良さを示す量として重相関係数  $R$  (1 に近いほど良い) などが求まる。

式(7.8)に関するこれまでの議論より、係数  $\beta$  が  $v$  に比例すると予測されることから、式(7.10)は  $v$  に関する 1 次式とした。

シミュレーションでは、ロボットは 50 台、環境は  $20 \times 20$ 、情報出力確率  $p_c=1$ 、ランダム移動の角度変化間隔  $\tau$ , 範囲  $\theta$  はそれぞれ 3, 90[deg] とした。速度  $v$  は、先ほども述べた通り、 $v=0.5$  を最大値とする。

$x$  がある程度小さい範囲では、回帰モデル(7.10)において  $a$  は式(7.5)で表される情報伝播の方程式に従い、式(7.8)に示される  $v$  の係数を  $a_{theo}$  として、

$$\beta_{sim} = a_{theo}v$$

となり、 $b=0$  であると予想される。 $x$  を 0.2→10 まで変化させたときの、シミュレーション結果 (Simulation) への式(7.5)のあてはめ (Fitted by Eq.(7.5)) を Fig. 7.2 に、回帰分析の結果として式(7.10)における  $a, b$  を、通信範囲  $x$  を横軸にとって理論値  $a_{theo}$  とともに Fig. 7.3 に示す。また Fig. 7.4 には、回帰分析のあてはまりの良さを示す重相関係数  $R$  の通信範囲に対する変化を示す。

Fig. 7.2 では、式(7.5)のシミュレーション結果へのあてはめが有効に行なわれていることが分かる。また、Fig. 7.3 に示す通り、 $x < 5$  の範囲では、モデル化誤差がやや大きいものの回帰分析から求められた  $a$  は  $a_{theo}$  と傾向が一致し、 $b$  についても、予測された通り  $b \approx 0$  となっている。

この  $x < 5$  範囲では、Fig. 7.4 に示した重相関係数も 1 に近い 0.95 以上の値であり、回帰モデル(7.10)が有効であることが分かる。しかし、 $x > 5$  では  $a$  の値は急激に変化してしばらく一定の傾向が見られず、やがて 0 に近づく。これに連動する形で、 $b$  は 0 から増加



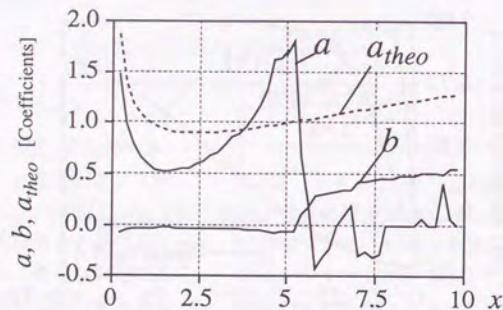
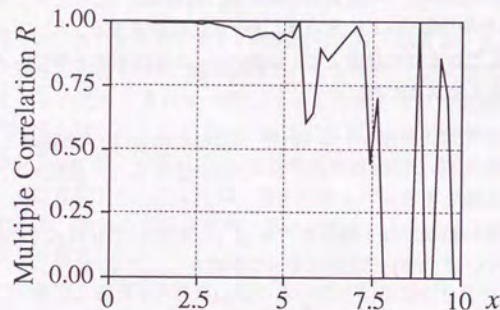
Fig. 7.3 回帰分析により求めた係数  $a, b$  と理論値  $a_{theo}$ 

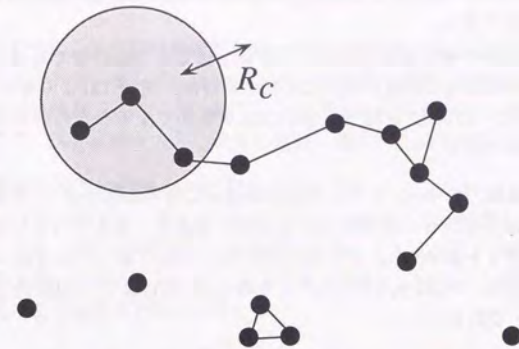
Fig. 7.4 回帰分析における重相関係数

することがFig. 7.3から観察される。また、この間の重相関係数はFig. 7.4は0.8以下となり、情報伝播の式(7.5)における回帰モデル(7.10)が有効ではなくなっていることを示している。これらの結果について、次節で考察する。

### 7.2.3 パーコレーション理論における浸透閾値との関係

このように多くのロボットが通信範囲に存在すると、パーコレーション効果の情報伝播への寄与が、速度よりも大きくなると考えられる。

2章2.4.3で示したように、パーコレーション理論は、要素間の繋がりが主要な働きをな

Fig. 7.5 平面内に分布する点のうち、半径  $R_c$  内の点同士が繋がりを作るパーコレーション

す系の取り扱い方を与えるものであり、粒子などの無限の繋がりについて調べる理論である。Fig. 2.21や、Fig. 2.22に示したように、例えば絶縁体中にカーボン粒子を分散させたときにどの密度で非金属から金属への転移が起こるか、あるいは、強磁性元素と引磁性元素の混晶系の磁性において、強磁性元素が全体のどのくらいの割合で混合されていれば混晶系の強磁性を示すようになるか、などを調べるのに応用することができる。この転移が起こる密度を浸透閾値という。この密度を超えるとカーボン粒子の無限の繋がりが生じ金属への転移が起こったり、強磁性スピンの無限の繋がりが生じて混晶系が強磁性を示すようになったりする[小田垣 93]。

局所的な通信を行なうロボットがランダムに存在する場合には、Fig. 7.5に示するような連続空間の離散パーコレーションの理論が適用できる[Pike74]。それによると、ロボット間に無限の繋がりができる通信半径の浸透閾値  $R_{cr}$  は、計算機シミュレーションから次のように求まっている。 $R_s$ は、ロボット密度から決まるロボット間の平均距離に相当するものである。

$$\frac{R_{cr}}{R_s} = 1.06 \pm 0.01 \quad \text{ただし} \quad \rho \pi \left(\frac{R_s}{2}\right)^2 = 1 \quad (7.11)$$

これを通信範囲の平均ロボット数で表すと、浸透閾値  $x_{cr}$  は、

$$x_{cr} = 4.48 \pm 0.08 \quad (7.12)$$

となる。つまり、 $x$  が約 4.5 を超えるとロボット間に通信経路の無限の繋がりができ始めるわけである。この値は、Fig. 7.3, 7.4のシミュレーション結果において速度の影響を考慮した式(7.5)に対する回帰モデル(7.10)が当てはまらなくなる  $x$  の値 5 に近い。このことが



ら、浸透閾値  $x_{cr}$  に近い  $x$  からパーコレーションの効果が現れ始めることがシミュレーション結果からも確認できる。

ただし、式 (7.12) の値は無限の繋がりが存在しはじめる臨界値であって、速度の影響もまだ残るため、伝播過程の挙動が顕著に変化するの、式 (7.12) よりやや大きい  $x=5$  程度からとなっている。これが、回帰モデル (7.10) が有効でなくなるのが  $x$  が5を超えてからである理由と考えられる。

これまで、情報出力確率  $p_e=1$  として通信範囲  $x$  に関する臨界値  $x_{cr}$  を見てきたが、これを一般化した情報伝達数  $N$  の境界値  $N_{cr}$  も同様に求まる。あるロボットの通信範囲内で情報を出力するロボット数  $N=p_e x$  が5以上のとき、上記で示したようなパーコレーション現象が生じる。結局、 $N_{cr}$  は  $p_e=1$  としたときの  $x_{cr}$  と同じ値で、3.4節の (C) の分類に用いる境界値  $N_{cr}$  は5である。

### 7.3 情報伝達数が多い場合の伝播モデル

以上に示したように、通信範囲が増加しパーコレーションによる伝播が支配的になると、周囲に多くのロボットが存在しはば確実に1台以上に情報が伝えられる。このため、確率を考慮した連続的な微分方程式より、離散的な差分方程式の方が系の挙動を表しやすいと思われる。そこで、通信範囲が多い場合の情報伝播の離散モデルを検討する。

移動による確率的な情報伝播をモデル化した方程式 (7.5) では、 $x$  が増加すると  $1 - e^{-p_e x \{p(i) + \frac{m_{sign}}{p_e x}\}}$  が1に近づく。特に  $x > 6$  くらいからは、 $x$  が変化しても式 (7.5) の解はほとんど変化せず、実際の伝播過程との誤差が非常に大きくなる。これは、式 (7.5) の連続的な情報伝播モデルがパーコレーションの効果を考慮していないためであると考えられる。そこで、次のような差分方程式を考える。

$$p(i) = p(i-1) + \frac{x}{m} \{1 - p(i-1)\} \{p(i-1) + m_{sign}\} \quad (7.13)$$

ここで、 $p(i)$  はイベント発生から  $i$  単位時間後のI-ロボットの比率、 $m, m_{sign}$  は環境のロボット数、告知板の数である。式 (7.13) は、単位時間ごとのI-ロボットの増加率をモデル化したもので、ロボット速度  $v$  が含まれないことに注意されたい。

$x=6$  について、式 (7.13) から求めた伝播過程  $p(i)$  (Discrete) をシミュレーション (Simulation) による伝播と Fig. 7.6 で比較する。また、式 (7.5) で式 (7.13) に対応させて  $\beta=1$  とした場合の解 (Continuous) も同様に示す。

式 (7.5) の誤差が大きいのに対して、式 (7.13) ではより正確に伝播過程がモデル化されており、差分方程式による伝播のモデル化が有効であることが分かる。

情報の提示時間  $T_{ann}$  は、式 (7.13) に示す離散的な差分方程式から求まる伝播時間に、標

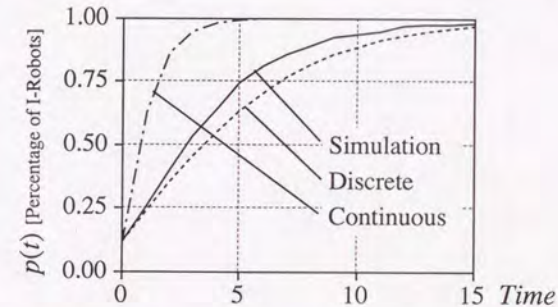


Fig. 7.6 差分方程式による情報伝播のモデル化 ( $x=6$ , 環境  $20 \times 20$ )



標準偏差の3倍の許容範囲を加えて算出することができる。

## 7.4 おわりに

本章では、3.4で設定した「最大情報伝達数が非常に大きい場合(C)」に対しての情報伝播の解析を示した。

情報を出力しているロボットが最大で何台かを示す  $N_{max}$  が非常に大きいときには、通信範囲による無限の繋がりによる「パーコレーション」が発生するため、5章、6章のように移動が与える影響を考慮した伝播モデルは当てはまらなくなると予想された。

そこで、情報伝播シミュレーションに対して回帰分析を適用し、移動を考慮したモデルが有効な範囲を検証した。

その結果、予想通りにパーコレーション理論 [Pike74] で示されている臨界値  $N_{cr}$  を境界値として、移動を考慮したモデルの当てはまりが急激に低下することが観察された。 $N_{cr}$  は4.5と計算され、周囲で約5台以上のロボットが情報を出力しているときには、移動による確率的な伝播ではなく、パーコレーションによる連鎖的な伝播の効果が大きくなることが分かった。

よって、最大情報伝達数  $N_{max}$  が臨界値  $N_{cr}$  を超えた場合に対しては、これまでの移動を考慮した連続的なモデルに代えて別のモデルを用いる必要がある。そこで、パーコレーションの効果を表すのにより適すると考えられる離散時間のモデルを用いて情報の伝播を解析し、その妥当性をシミュレーション結果を用いて検証した。

これまでに行なってきた4章~7章の解析により、3.4で行なった  $N_{max}$  に基づく分類の全ての場合に対し、多数移動ロボットの局所的通信の解析・設計がカバーされる。

よって、1章で示した通信に対する要求仕様である情報を「必要なロボットに、速く無駄なく伝達する」ための局所的通信システムの設計論が構築されたことになる。

次章では、大域的通信と局所的通信の比較を行ない、その評価を試みる。



## 第8章 評価

8.1	はじめに . . . . .	238
8.2	大域的通信のモデルと解析 . . . . .	240
8.3	局所的通信のモデルと解析 . . . . .	244
8.4	伝達時間による比較 . . . . .	248
8.5	おわりに . . . . .	254



## 8.1 はじめに

本章では、これまで行なってきた多数ロボットの局所的な通信の設計論について、他の通信手法と比較することにより、その評価を行なう。比較対象は、全てのロボットが共通の通信媒体を用いる大域的な通信とし、具体的なモデルとして、時分割で送信権を割り当てる形式のものを用いる。これは、2章で紹介した従来の研究でも複数ロボットシステムに頻繁に用いられているものである。局所的な通信手法では、4章・5章で設計した最適な通信範囲を用い、時間的な情報の伝播を利用する。

従来の研究でしばしば用いられてきた大域的な通信は、2章で述べたように、

- 多数のロボットに単一の通信媒体を割り当てると、同期が困難なうえ、媒体を利用できる率が小さいため、情報伝達の効率が低下する。
- 通信媒体を中継局が集中的に管理する場合には、通信負荷の増大によるボトルネック、耐故障性が問題となる。

が主要因となって、多数ロボットには適さないことを述べた。本論文では、これらの問題による効率低下を防ぎ、通信を分散化・並列化するため、局所的な通信を導入した。これまで、多数のロボットが存在する場合の局所的な通信の設計を、空間的・時間的の両側面から行なってきた。

これまで設計を行なってきた局所的な通信の効率化を評価するため、大域的な通信による情報伝達との比較を行なう。これにより、どのような場合に局所的な通信が有効であるか、あるいは局所的な通信が有効であるための条件などについて解析する。

以下で進めていく大域的な通信と局所的な通信の比較において、通信の目的は、

ある  $n_f$  台のロボットから、それぞれ  $n_e$  台のロボットへ情報を伝達する

こととする。両者の比較は、この情報伝達に必要な時間  $T$  を用いて行なう。

情報パケットの内容に関しては、3章 3.2.2 で述べたように、作業情報周知の通信 (1) では、作業の存在を知らせるのが目的であり、1つの情報パケットに複数の作業情報が含まれるようにする。また、作業時の情報伝達 (2) では、各ロボットは行なっている作業に関する情報だけを伝達すればよい。よってどの作業においても、伝達する情報の形式は各ロボット共通とし、書き換える部分があれば、必要な部分だけ更新して情報を出力する。このように、(1)(2) の通信の両方において、必要な情報伝達はロボット間での1回のパケットの伝達により行なわれる。

まず、8.2節、8.3節では、大域的通信と局所的通信について、モデルを示し、伝達時間について解析する。これらの解析をもとに、8.4において比較・評価を行なう。



## 8.2 大域的通信のモデルと解析

複数ロボットの大域的な通信では、2章 2.2.1に示したように、ほとんどの研究で単一の通信媒体を用いてそれを時分割で割り当てる方式が採用されている。

そこで、本章でもその方式を用いることにし、以下のようにモデル化する。

- 情報は、パケット単位で伝達される。
- 情報の伝達は1単位時間で行なわれ、1単位時間の長さは局所的な通信の場合と同じとする。
- ある一つのロボットが送信した情報は、自分自身を含む全てのロボット（総数  $m$ ）に伝えられる。
- 各ロボットはIDを用いて識別することができる。
- 全てのロボット間の同期は保証されている。

大域的な通信においては、情報の局所性は情報伝達には影響しない。よって、一般に送信権が得られればロボットは情報を出力し、かつ出力した情報は大域的に全てのロボットに伝達されると仮定できる。よって、(1) 作業情報周知、(2) 作業時の情報伝達どちらの通信においても、 $n_f$ 台が送信権を獲得したところで、通信の目的は達成される。よって、情報の伝達に必要な時間  $T$ は、 $n_f$ 台の送信権獲得までの時間である。

大域通信には、[プレム 91a]の CAR-Net のトークンリング方式と、[Wang94b]で用いられるランダムアクセス割り当て方式、[矢向 94]で用いられる時分割方式などが考えられる。この中でランダムアクセス方式は、台数が多い場合には待ち時間が非常に長くなってしまふ。 $n_f$ 台がランダムに情報を出力するとき、各ロボットの情報出力確率を  $\frac{1}{n_f}$ としたときに最も伝達の成功確率が大きい [Metcalfe73]。そのときの一度の送信で送信権が獲得できる確率  $P$ は、情報を出力する確率  $\frac{1}{n_f}$ に、そのときに成功する確率  $\{1 - \frac{1}{n_f}\}^{n_f-1}$ を乗じた

$$P = \frac{1}{n_f} \cdot \left\{1 - \frac{1}{n_f}\right\}^{n_f-1} \quad (8.1)$$

である [Metcalfe76]。そして、 $n_f$ 台の送信が成功するまでに要する時間  $W$ が  $w$ 単位時間である確率  $\Pr(W=w)$  は負の二項分布に従うので

$$\Pr(W=w) = {}_{w-1}C_{n_f} P^{n_f} (1-P)^{w-n_f} \quad (8.2)$$

となる。時間  $W$ の平均は、 $\frac{n_f}{P}$ である。このランダムアクセス方式は、通信負荷が非常に小さいときには有効である。しかし、多数ロボット系において、複数の作業を周知したり、別々の場所で異なる作業実行のために通信したりするときには、通信効率が低くなってし

まう。例えばロボット総数  $m=20$  中の  $n_f=5$  台が情報を伝達しようとする場合でも、情報伝達が成功する確率  $P$ は式 (8.1) から 0.081 と小さい。よって、5 台全てが送信し終わるまでには平均で  $\frac{5}{0.081}=61.04$  単位時間を要してしまう。

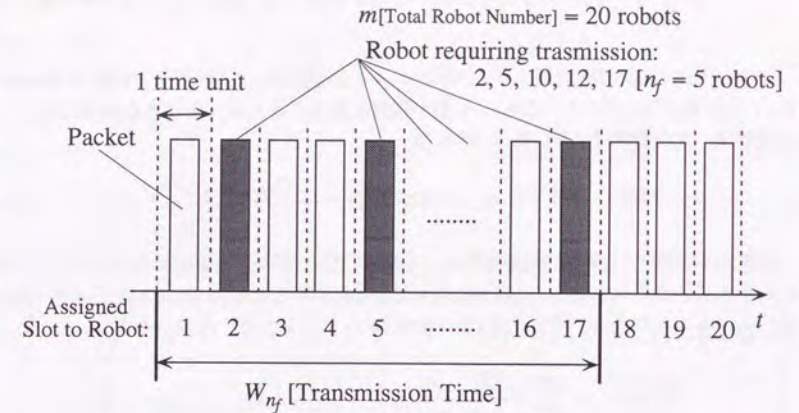


Fig. 8.1 時分割・割り当て型の大域的な通信による情報伝達のモデル

トークンリング方式や時分割による割り当て方式は、ロボット総数  $m$  として最大でも  $m$  単位時間内に送信権が獲得できる。ロボット総数  $m=20$  の上の例では、20 単位時間以内に送信できるので、ランダムアクセスよりも伝達効率が良いといえる。

よって本章では、大域的な通信のモデルとして、トークンリングあるいは時分割の割り当て方式を用いることにする。情報を出力する  $n_f$  台のロボットは任意であると考え、よって、Fig. 8.1に示すように、各ロボットに1回ずつ送信権を  $m$  台のロボットに割り当てていき、 $n_f$ 台が送信し終わった時点で通信は終了する。Fig. 8.1の例では、ロボット総数  $m=20$ 、 $n_f=5$  である。情報の出力を希望するのはロボット 2, 5, 10, 12, 17 であり、この場合にはロボット 1 から順番にスロットを割り当てているので、ロボット 17 が情報を出力したときにこの通信は終了する。この例では、通信時間  $W$  は 17 である。

このトークンリング式の大域的な通信モデルを用いたときに、 $n_f$ 台が情報を出力するまでに必要な時間の平均  $W(n_f)$  を求めておく。

$W$ は、時間  $1, 2, \dots, m$  に1台ずつ任意にロボットを選んでいって、 $n_f$ 台が送信するまでの



時間の期待値である。これは、以下の形で計算される。

$$\begin{aligned} W(n_f) &= \sum_{i=n_f}^n \Pr[\text{時間 } i \text{ で } n_f \text{ 台が送信}] \times i \\ &= \sum_{i=n_f}^n \Pr[\text{時間 } i-1 \text{ までに } n_f-1 \text{ 台が送信}] \times \Pr[\text{時間 } i \text{ で } n_f \text{ 台目が送信}] \times i \end{aligned} \quad (8.3)$$

さて、上式の確率  $\Pr[\text{時間 } i-1 \text{ までに } n_f-1 \text{ 台が送信}]$  は、ロボット総数  $m$  台中から  $i-1$  台を選んで、そのうちの  $n_f-1$  個が送信を希望するロボットである確率である。この確率は、次の超幾何分布に従う [岡本 79]。

$$\Pr[\text{時間 } i-1 \text{ までに } n_f-1 \text{ 台が送信}] = \frac{i-1 C_{n_f-1} \cdot n-i-1 C_{n_f-(n_f-1)}}{n C_{n_f}} \quad (8.4)$$

時間  $i-1$  の時点でまだ送信権を割り当てられていない  $m-(i-1)$  台のロボットのうち、送信を行なう  $n_f$  台のうちの最後の1台が時間  $i$  で送信権を得る確率  $\Pr[\text{時間 } i \text{ で } n_f \text{ 台目が送信}]$  は、 $\frac{1}{m-(i-1)}$  である。これと式 (8.4) を式 (8.3) に代入して、 $W(n_f)$  は

$$\begin{aligned} W(n_f) &= \sum_{i=n_f}^m \frac{i-1 C_{n_f-1} \times m-i-1 C_{n_f-(n_f-1)}}{m C_{n_f}} \times \frac{1}{m-(i-1)} \times i \\ &= \sum_{i=n_f}^m \frac{i-1 C_{n_f-1}}{m C_{n_f}} \times i \end{aligned} \quad (8.5)$$

となる。ロボット数  $m=20$  台、50 台のときについて、 $W(n_f)$  と時間  $t$  の関係を Fig. 8.2 に示す。

Fig. 8.2においては、全てのロボットが送信権を得るまでの時間は最大でも  $m$  単位時間である。しかし、 $n_f$  が比較的小さくても、 $n_f$  台が送信するまでの平均時間  $W(n_f)$  は急激に  $m$  に近付くことが分かる。ロボット総数  $m=20$  のとき、 $n_f=2$  で 14、 $n_f=5$  のとき  $W(n_f)=17.5$ 、 $n_f=10$  のとき  $W(n_f)=19.1$  となっている。

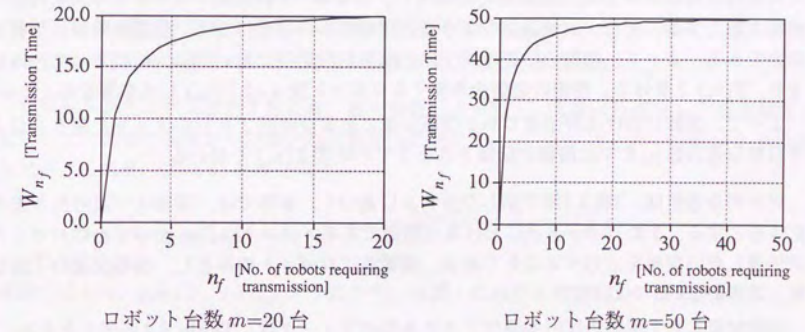


Fig. 8.2 時分割・割り当て型の大域通信における送信台数  $n_f$  と伝達時間  $W(n_f)$  の関係



### 8.3 局所的通信のモデルと解析

本節の冒頭で述べた通り、通信の目的はある  $n_f$  台のロボットから、それぞれ  $n_e$  台のロボットへ情報を伝達することである。

これは、局所的通信においては、次のような場合に相当する。

周知のための通信 (1) イベント発見など伝達したい情報を持つ  $n_f$  台のロボットから、作業に必要な数  $n_e$  のロボットに情報を伝達する。

作業時における情報伝達の通信 (2) 協調作業中に、周囲とともに作業を行なっている  $n_e$  台のロボットへ情報を伝達する。

局所的通信においては、3章で述べたように、各ロボットは局所ブロードキャストの形で情報を出力する。また、大域通信のような送信権待ちの必要はなく、任意の時間に情報を出力できる。よって、情報の伝達時間  $T$  は、局所的な通信においては、 $n_e$  によってのみ決まり、 $T(n_e)$  と書ける。情報の送信を希望するロボット数  $n_f$  は  $T(n_e)$  には影響を与えない。

よって、比較における評価値である情報伝達に必要な時間  $T$  としては、「また聞き」により目標伝達台数  $n_e$  までに情報が伝播されるまでの時間  $T(n_e)$  を用いる。

局所的な通信は、3章 3.2 節で示したモデルに基づく。本章では、環境は一辺の長さ  $E$  の正方形とする。またロボット系における情報源であるイベントは、 $m$  台中 1 台のロボットが伝達したい情報を出力することである。情報源はロボットのみとし、情報伝達の「告知板」は用いないことにする。

比較対象として用いる局所的通信システムのパラメータは、Table 8.1 の通りとする。

Table 8.1 比較対象とする局所的通信システムのパラメータ

$m$	: ロボット総数	20, 50, 100
$E$	: 環境の一辺の長さ	20, 50
	: 情報の衝突	あり
$c$	: 最大情報獲得台数	1
$p_e$	: 情報出力確率	1.0
$x(=\rho A)$	: 通信範囲	5章で設計した $x_{opt}$
$\phi$	: 視野角	$360^\circ$
$v$	: ロボット移動速度	後述
$\mathcal{M}$	: 移動方法	ランダム移動
$\theta, \tau$	: ランダム移動の移動方向 変化の間隔と角度範囲	$3, 90^\circ$

ロボット総数  $m$  と環境の一辺の長さ  $E$  を変化させ、ロボット密度の異なるいくつかの局

所的通信を考え、8.2 で示した大域的な通信と比較を行なっていく。Table 8.1 に示した環境は、次の条件を想定したものである。

- 最もロボット通信能力の低い場合を考えて、最大情報伝達台数  $c$  (1 単位時間に情報を獲得できるロボット数) は 1 台とし、情報の衝突ありの場合を考える。
- 通信範囲  $x$  は、5章 5.3.2 で設計した複数台への情報伝達を考慮した最適な通信範囲  $x_{opt}$  とする。
- ロボットの移動方法は、単純で、解析による比較が行ないやすいランダム移動とする。その他のロボットの空間分布の場合にもこれに準じて、数値的に比較が可能である。

これらの条件のもとでは、通信範囲  $x$  や最大情報伝達台数  $c$ 、情報出力確率  $p_e$  が固定である。よってロボットの移動速度  $v$  によって、情報の伝播速度が異なってくる。そこで  $v$  については、8.4 節で大域的な通信との比較を行ないながら議論することにする。

ここで、局所的な通信における情報の伝播時間  $T(n_e)$  を求めておく。

ロボットがランダム移動するとき、最大情報伝達台数  $c$ 、情報出力確率  $p_e$ 、通信範囲  $x$  に対して、情報の衝突ありの場合の情報獲得の確率  $P(c, p_e, x, t)$  は、式 (5.14) により求められる。これを、式 (8.6) に再び示す。

$$P(c, p_e, x, t) = e^{-p_e x} \sum_{i=0}^c \frac{(p_e x)^i \{1 - (1 - p(t))^i\}}{i!} \quad (8.6)$$

本節では  $c=1$ ,  $p_e=1.0$ ,  $x=x_{opt}$  としたから、時間  $t$  における情報獲得の確率  $P(t)$  は

$$P(t) = p_e x e^{-p_e x} p(t) = x_{opt} e^{-x_{opt}} p(t) \quad (8.7)$$

となる。情報伝播の方程式は、3章 3.3 節で導出した式 (3.2) に、式 (8.7) の  $P(t)$  と、5章 5.3 節の式 (5.12) で導出したランダム移動  $\mathcal{R}(\theta, \tau)$  に対する係数  $\beta$  を代入し、

$$\begin{aligned} \frac{dp(t)}{dt} &= \beta(v, \mathcal{R}(\theta, \tau), R_c, \phi) x_{opt} e^{-x_{opt}} p(t) \{1 - p(t)\} \\ \beta(v, \mathcal{R}(\theta, \tau), R_c, \phi) &= \frac{1 - e^{-\rho S(R_c, \phi, \theta, \tau) v}}{1 - e^{-x_{opt}}} \\ S(R_c, \phi, \theta, \tau) &\sim 2R_c \quad [\text{式 (5.8) より}] \end{aligned} \quad (8.8)$$

となる。ただし、通信半径  $R_c$  は  $x$  と密度  $\rho$  から決まり、視野角  $\phi$  は  $2\pi$ 、ランダム移動の定数  $\theta, \tau$  は Table 8.1 に示す通りである。

式 (8.8) は単純なロジスティック方程式であり、解は式 (5.24) から次のように求まる。

$$p(t) = \frac{1}{1 + \frac{1 - p(0)}{p(0)} e^{-\frac{\beta x_{opt}}{e^{x_{opt}}} t}} \quad (8.9)$$



ロボット総数  $m$  台中  $n_e$  台, すなわち比率  $p_{n_e} = \frac{n_e}{m}$  に情報が伝播するまでの時間  $T(n_e)$  は, 式 (5.25) から

$$\begin{aligned} T(n_e) &= -\frac{e^{x_{opt}}}{\beta x_{opt}} \log \left\{ \frac{p(0)(1-p_{n_e})}{(1-p(0))p_{n_e}} \right\} \\ &= -\frac{e^{x_{opt}}}{\beta x_{opt}} \log \left\{ \frac{m-n_e}{(m-1)n_e} \right\} \end{aligned} \quad (8.10)$$

と求まる.

ロボット台数  $m=50$  のとき, 式 (8.10) から求まる伝播時間  $T(n_e)$  と目標伝達数  $n_e$  との関係を図 8.3 の移動速度  $v$  について計算し, 環境の一边  $E=20, 50$  の場合の結果を Fig. 8.3 に示す.

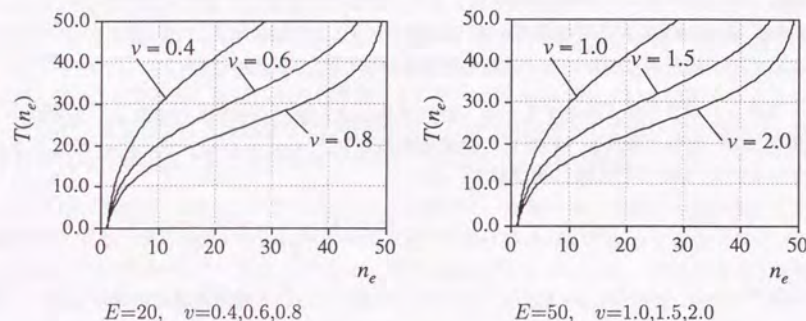


Fig. 8.3 局所通信における目標伝達台数  $n_e$  と伝播時間  $T(n_e)$  の関係 (ロボット台数  $m=50$  台)

Fig. 8.3 から, 速度  $v$  の値が大きいくほど情報の伝播が速いことが分かる. また, 環境の一边の長さ  $E$  が変化したとき, 速度  $v$  をそれに比例して変化させれば, 伝播過程はほぼ同じになることがわかる. 例えば, 環境の一边の長さが  $E=20 \rightarrow E=50$  と 2.5 倍になったとき,  $v$  も同様に 0.4 から 2.5 倍して 1.0 のときにグラフの形が等しくなっている. ほかの速度  $v$  の場合も同様である.

このことは, 式 (8.10) を用いて示すことができる. まず, 式 (8.8) において,  $x=x_{opt}$  より通信半径  $R_c$  は, 密度  $\rho = \frac{m}{E^2}$  であるから,

$$R_c = \sqrt{\frac{x_{opt}}{\rho\pi}} = \sqrt{\frac{x_{opt}}{\frac{m}{E^2}\pi}} = \sqrt{\frac{x_{opt}}{n\pi}} E$$

となり, 環境の一边の長さ  $E$  に比例する. よって, 式 (8.8) で単位速度・単位時間あたりの掃引面積を表す  $S$  は  $R_c$  に比例するので, 以下のように  $E$  に比例する.

$$S(R_c, \phi, \theta, \tau) \sim 2R_c \sim 2\sqrt{\frac{x_{opt}}{n\pi}} E \sim E \quad (8.11)$$

$n_e$  台までの情報伝播を表す式 (8.10) における  $\beta$  は式 (8.9) に示す通りである. 以下で扱う場合のほとんどにおいては,  $\beta$  の式 (8.9) の分子の指数部分  $-\rho S v$  は 1 より十分小さい. そこで, 指数関数を

$$1 - e^{-\rho S v} \simeq \rho S v$$

と線形近似する. 例えば, 環境の一边の長さ  $E=20$ , ロボット数  $m=20$  のとき,  $v$  を大きく 1.0 としても  $\rho S v = 0.25$  で誤差 10% 程度である.

式 (8.9) でこの線形近似を行ない,  $x = x_{opt}$  を代入すると,

$$\begin{aligned} \beta(v, R(\theta, \tau), R_c, \phi) &= \frac{1 - e^{-\rho S(R_c, \phi, \theta, \tau)v}}{1 - e^{-x_{opt}}} \\ &\simeq \frac{\rho S v}{1 - e^{-x_{opt}}} \end{aligned} \quad (8.12)$$

となる. これと式 (8.11) から結局

$$\beta \sim \rho S v \sim \frac{m}{E^2} E v \sim \frac{v}{E} \quad (8.13)$$

である.

環境  $E$  が変化したとき, 式 (8.10) でこの影響を受けるのは  $\beta$  の部分だけである. 式 (8.13) に示される  $v$  と  $E$  の関係から,  $E$  が  $a$  倍になったとき, 速度  $v$  も  $a$  倍すれば  $\beta$  は不変であるので, 情報の伝播時間  $T(n_e)$  も同じ値に保たれる.

このように,  $E$  と  $v$  の比例関係を維持すれば伝播過程は等しいことが分かったので, 局所通信の環境は固定して考えて良い. よって, 以降の比較では, 環境の一边の長さ  $E=20$  とする.



## 8.4 伝達時間による比較

8.2, 8.3でそれぞれ設定した大域的な通信を、設計してきた局所的な通信システムと比較する。

本節では、冒頭で述べたように、

ある  $n_f$  台のロボットから、それぞれ  $n_e$  台のロボットへ情報を伝達する

ことを通信の目的とした。

大域的な通信と局所的な通信との比較を、送信を希望する  $n_f$  台から、目標伝達台数  $n_e$  台への通信に要する平均の伝達時間  $T$  を用いて行なう。

大域的な通信では、この伝達時間は、8.2で計算した  $n_f$  台が送信権を得るまでの待ち時間  $W(n_f)$  となる。送信権が獲得されれば、情報は大域的に全てのロボットに伝達されるので、 $W(n_f)$  は目標伝達数  $n_e$  には影響されない。

また、局所的な通信では、 $T$  は「また聞き」により目標伝達台数  $n_e$  までに情報が伝播されるまでの伝播時間である。局所的通信においては、各ロボットは任意の時間に局所ブロードキャストの形で情報を出力できる。よって、伝播時間は情報の送信を希望するロボット数  $n_f$  とは関係なく  $n_e$  のみによって決定され、 $T(n_e)$  と書ける。

よって両者の比較は、大域的通信の送信の待ち時間  $W(n_f)$  と局所的な通信の伝播時間  $T(n_e)$  との関係を調べることに由り行なう。

Table 8.1のパラメータを用いて、式(8.5)、(8.10)からそれぞれ求まる局所的通信による目標伝達台数  $n_e$  までの伝播時間  $T(n_e)$  と、大域的な通信による  $n_f$  台の送信までの待ち時間  $W(n_f)$  を比較する。Table 8.2に、比較に用いる  $n_f$ ,  $n_e$  を示す。 $n_f$  としては、1台しか送信しない場合と、ロボット総数  $m$  の20%, 40%が情報を送信する場合を考える。 $n_e$  も、ロボット総数  $m$  の20%, 40%に相当する台数に設定する。

Table 8.2 比較に用いる送信ロボット台数  $n_f$  と目標伝達台数  $n_e$

$m$ (ロボット総数)	$n_f$ (送信ロボット台数)	$n_e$ (目標伝達台数)
20	1, 4, 8	4, 8
50	1, 10, 20	10, 20
100	1, 20, 40	20, 40

大域的な通信と局所的な通信の比較を行なう前に、グラフの見方について、ここで説明しておく。Fig. 8.4に示すように、局所的通信における  $n_e$  と  $T(n_e)$  との関係を太い点線で(Local)、大域通信で  $n_f$  を変化させたときの伝達時間  $W(n_f)$  を示す直線を実線(Global)で

示すことにする。 $W(n_f)$  が  $n_e$  軸に平行な直線で示されるのは、 $W(n_f)$  は、目標伝達台数  $n_e$  とは関係なく送信ロボット台数  $n_f$  のみから決められるからである。

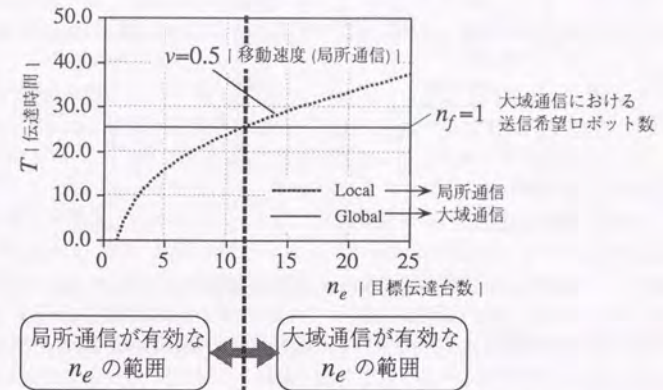


Fig. 8.4 局所通信と大域的通信との伝達時間の比較

Fig. 8.4に示すように、局所的・大域的な通信の伝播時間のグラフの交点の  $n_e$  の値よりも目標伝達台数  $n_e$  が

- 大きいときは、局所的な通信が有効
- 小さいときは、大域的な通信が有効

となる。

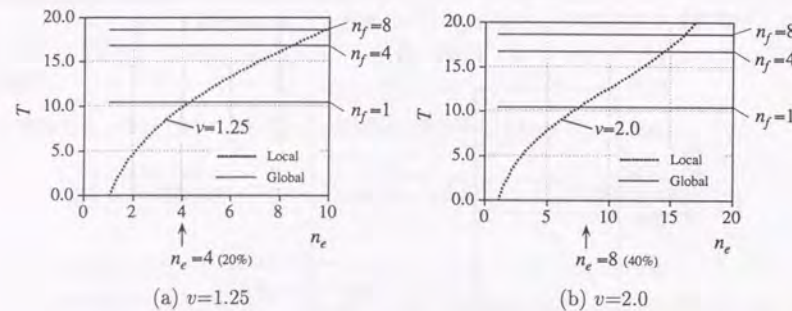
環境の一辺の長さ  $E$  を20として、Table 8.2のパラメータのうちロボット台数  $m=20, 50$  について、局所的な通信と大域的な通信の伝達時間の比較を Fig. 8.5, Fig. 8.6にそれぞれ示す。

大域的な通信の伝達時間  $W(n_f)$  は、Table 8.2に示した  $n_f$  を用いて式(8.5)から求めた。この計算は、情報を出力するのが  $n_f=1$  台の場合と、そして総数  $m$  のうち20%, 40%の場合について行なった。8.2節でも見たように、 $m=20, 50$  の両方の場合に対して、 $n_f=1$  台しか情報を出力しない場合でも、送信には  $m/2$  の時間が必要であり、 $n_f$  が  $m$  の20%, 40%のときには  $W(n_f)$  は  $m$  にほぼ等しくなる。

局所的通信における伝達時間  $T(n_e)$  は、 $n_e$  に関して単調増加していること、また、速度  $v$  が大きくなると、同じ台数に伝達するまでの時間が短くなることが分かる。

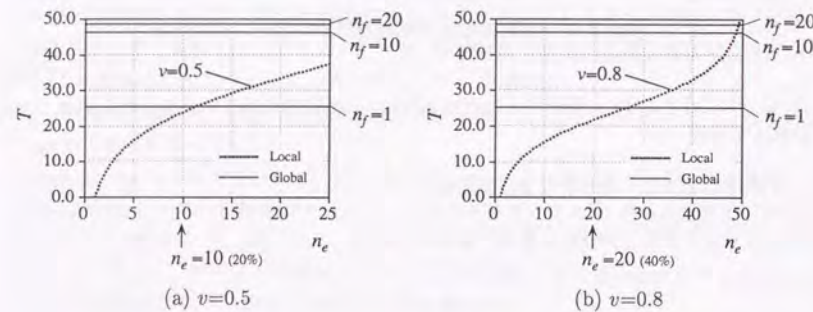
Fig. 8.5, Fig. 8.6 から、次のことが分かる。





$v$ :速度,  $n_e$ :目標伝達台数,  $n_f$ :情報を送信するロボット数

Fig. 8.5 局所通信・大域通信による伝達時間  $T$  の比較 ( $m=20$  台,  $E=20$ )



$v$ :速度,  $n_e$ :目標伝達台数,  $n_f$ :情報を送信するロボット数

Fig. 8.6 局所通信・大域通信による伝達時間  $T$  の比較 ( $m=50$ ,  $E=20$ )

- (1) 局所通信が有効な場合 多くのロボットから、比較的少ない数 (上の例でロボット総数  $m$  の 20% 程度) に情報を伝達する場合には、局所通信が有効である。
- (2) 大域通信が有効な場合 少ないロボットから、多くのロボット (上の例でロボット総数  $m$  の 40% 以上) に情報を伝達する場合には、大域通信が有効である。
- (3) ロボット密度の影響 また、ロボット密度が大きいときには、局所通信で要求される移

動速度が小さいので、密度が小さい場合に比較し局所通信の有効性が高まる。

上記の (1) は、局所通信が、多くのロボットがいくつかのグループを作り、並行して協調作業を進めて行く分散的な作業環境に適していることを示している。また逆に、(2) は、大域通信は 1 台から多数のロボットに指令が与えられる、集中的な作業環境に用いれば有効であることを示している。

具体的な例で説明すると、例えば Fig. 8.5(a) は、ロボット台数  $m=20$  で速度  $v=1.25$  の場合を示している。情報を送信するロボット数が 1 台しかない  $n_f=1$  のときに、大域通信の伝達時間  $W(n_f)$  のグラフは  $n_e=4$  で局所通信の  $T(n_e)$  のグラフと交わっている。Fig. 8.4 に説明したように、 $n_e < 4$  では  $T(n_e) < W(n_f)$  となり局所通信を用いた方が大域通信より伝達時間が短くなる。 $n_e > 4$  ではその逆で大域通信を用いた方が伝達時間が短い。もちろん、 $n_f$  が 4, 8 ( $m$  の 20%, 40%) のときにはより大きな  $n_e$  に対しても局所通信が有利となる。

大域通信において 1 台しか情報を送信しない場合と比較しても、ロボットの移動速度  $v$  がある値 (Fig. 8.5(a) では 1.25) 以上ならば、目標伝達数  $n_e$  (総数  $m=20$  の 20% で  $n_e=4$  台) に伝達するのに局所的な通信が大域的な通信よりも有利になるわけである。このときの  $v$  は、1 単位時間に環境の一辺の  $1/20$  程度を動く速度であり、やや大きい実現可能であると考えられる。特に、上に大域通信で  $n_f$  が大きい値のとき、つまり多くのロボットが送信を希望するときには、さらに大きな  $n_e$  に対しても局所通信の有効性が高くなる。このように、多数のロボットがそれぞれ少ない台数に情報を伝達するときには、局所通信のほうが有利となる。これは、上記の (1) 局所通信が有効な場合の場合に対応する。

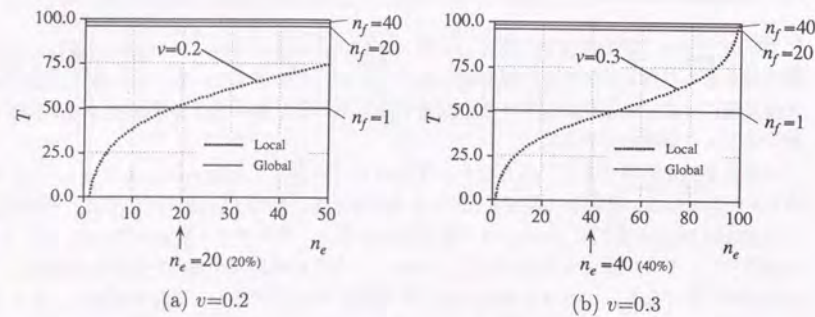
ただし、少数のロボットからより多くのロボットに伝達する場合には、(2) 大域通信が有効な場合に示したように、ロボットの移動速度  $v$  を大きくとらないと局所的な通信が有利にならない。Fig. 8.5(b) の  $m$  の 40% の  $n_e=8$  台への伝達では、 $n_f=1$  で 1 台のみが送信する大域通信よりも局所通信が有利となるためには、 $v > 2$  でなければならない。これは環境の一辺の  $1/10$  を 1 単位時間で移動する速度であり、 $n_e=4$  の場合よりも厳しい要求である。

さらに、同じ環境の大きさとロボット数  $m$  が多くなり密度が大きくなると、Fig. 8.6 に示すように、Fig. 8.5 より小さな移動速度  $v$  で局所通信による伝達時間  $T$  が大域通信よりも短くなる。Fig. 8.6(a) では、 $m=50$  の 20% に対する  $T$  は、 $v=0.5$  で局所通信のほうが  $n_f=1$  の大域通信よりも短い。このように局所通信は、低い移動速度で実現がさらに容易になるので、ロボット数が多い場合にはより有利となる。

ロボット台数をさらに増やして、 $m=100$  の場合には、伝達時間のグラフは Fig. 8.7 のようになる。 $m=100$  台中 1 台しか送信しない  $n_f=1$  の大域通信よりも、伝達時間が短くなる局所通信の移動速度  $v$  は、 $n_e=20, 40$  のときそれぞれ  $v=0.2, v=0.3$  である。(3) ロボット密度の影響として示したように、ロボット台数が多い場合には、実現が容易な低い移動速度  $v$  で局所通信が有利となることがわかる。

情報送信台数と  $n_f$  と目標伝達台数  $n_e$  が与えられたとき、どれだけの移動速度  $v$  があれば、





$v$ :速度,  $n_e$ :目標伝達台数,  $n_f$ :情報を送信するロボット数

Fig. 8.7 局所通信・大域通信による伝達時間  $T$  の比較 ( $m=100$ ,  $E=20$ )

局所通信が大域通信よりも有利になるかは、式 (8.5) の  $W(n_f)$  と式 (8.10), (8.12) から求める  $T(n_e)$  を用い、 $W(n_f)=T(n_e)$  を数値的に解くことによって得られる。

局所通信が大域通信よりも伝達時間  $T$  において有利となる  $v$  を計算し、ロボット台数  $m$  と大域通信の情報送信台数  $n_f$  に対してプロットしたのが、Fig. 8.8である。

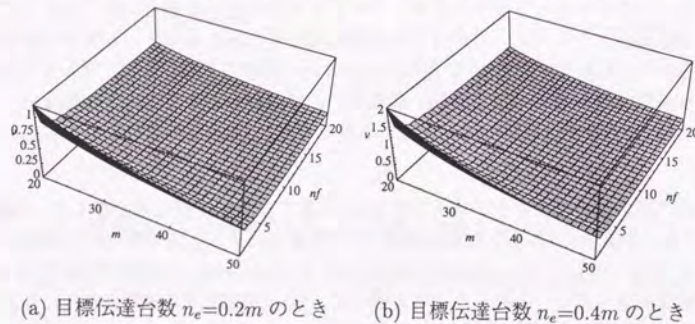


Fig. 8.8 大域通信よりも伝達時間  $T$  が短くなる速度  $v$  と、ロボット数  $m$ , 送信台数  $n_f$  との関係 (環境の一边  $E=20$ )

Fig. 8.8から、これまで述べてきた通り、ロボット数  $m$  と、大域通信におけるロボット台数  $n_f$  が増加すると、局所通信が有利となるための移動速度  $v$  は単調減少することが確認

できる。このグラフから、例えばロボットの移動速度  $v$  の機構的な限界値が与えられているとき、必要なロボット数  $n_e$  に情報を伝達するのに、どの  $(m, n_f)$  の組に対して局所通信が大域通信より有利となるかを知ることができる。

以上のように比較を行ってきたが、大域通信の比較対象として用いた局所通信は、最大情報獲得台数  $c=1$ 、情報の衝突ありの場合であり、最も通信能力の小さい場合を考えたことに注意されたい。このような条件でも、多数ロボットが並行して局所的に通信を行なうときには、大域通信より有効となることが示されたことは重要な結果である。より大きな  $c$  や、衝突なしの局所通信であれば、大域通信よりも有利な範囲は広くなる。また大域通信では、多くのロボットの同期を保証することは簡単ではなく、送信権の確保に時間がかかるときには送信は1単位時間で行えない可能性もある。よって、上記の解析で示したよりも、局所通信の適用範囲は広いと考えることができる。

これまでに行ってきた大域通信・局所通信の比較では、 $n_f$  台のロボットから  $n_e$  に情報が伝達されるのに必要な平均の時間  $T(n_e)$ ,  $W(n_f)$  を用いていた。これは、ロボットが複数の協調作業を行なうとき、その情報伝達に必要な時間コストをトータルで考えた場合に、大域・局所どちらが有利であるかを求めるものである。

ある特定の作業に関して、情報が  $n_f$  台から  $n_e$  台に伝達される時間の上限值を用いて比較を行いたいときには、5.5節で求めた情報提示時間  $T_{ann}$  を用いればよい。比較する大域通信の伝達時間としては、式 (8.5) の  $W(n_f)$  に標準偏差に一定の許容範囲を乗じて足し込んだ値を用いることになる。



## 8.5 おわりに

本章では、本論文でこれまで行ってきた局所的通信の設計を評価するため、大域的な通信手法の比較を行なった。複数台 ( $n_f$ ) のロボットから複数台 ( $n_e$ ) のロボットへの情報伝達を想定し、それに必要な時間を比較に用いる評価対象として用いた。

大域的な通信は、無線などの単一通信媒体を割り当てる方式を用いてモデル化した。これは、従来研究において、複数台の移動ロボット間の通信にしばしば利用されている手法である。

大域・局所の両手法について、情報伝達時間の解析を行ない、どのような場合にどちらの通信が有効であるかを調べた。その結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 多くのロボットから、比較的少ない数に情報を伝達する場合には、局所通信が有効である。
- (2) 少ないロボットから、多くのロボットに情報を伝達する場合には、大域通信が有効である。
- (3) ロボット密度が大きいときには、局所通信で要求される移動速度が小さいので、密度が小さい場合に比較し局所通信の有効性が高まる。

(1) から、局所通信が、多くのロボットが少数台で作業グループを作り、並行して協調作業を進める分散的な作業環境に適していることが分かる。また逆に、(2) は、大域通信は少ないロボットから多数に指令が与えられる、集中的な作業環境に用いれば有効であることを示している。これらは、従来から局所的な通信の特徴とされていることであるが、具体的な解析に基づいて示したものは少なかった。本章における評価は、これらを解析的に検証したものであり、協調作業環境の通信を設計する際の指針として利用することができる。

## 第9章 結論

9.1 結論	256
9.2 今後の展望	258



## 9.1 結論

本論文では、多数の移動ロボットが協調して作業を行なう系に局所的な通信を導入し、情報がどのようにロボット間に伝播していくかを解析した。これにより、環境におけるロボットの密度や移動速度、通信半径などのパラメータと、情報伝播の効率との関係を解析的に明らかにした。

解析に基づき、協調作業において、必要なロボットになるべく短い時間で情報を効率的に伝達するように、局所的な通信を設計することが可能となった。

1章、2章で述べたように、本論文では、

- (1) 作業情報周知
- (2) 作業時の情報伝達

の二つの段階からなる多数ロボットによる協調作業を対象とする。この協調における通信を効率化するためには、情報を「必要な数の」ロボットに、「速く無駄なく」伝達することが要求される。これまで用いられていた大域的な通信を多数のロボットに適用すると、ボトルネックなどの問題により通信効率の低下は避けられない。そこで、限られた範囲のロボットにのみ情報が伝達される局所的な通信を導入した。これは、通信の局所性を考慮しており、通信負荷を分散することができ、しかも単純であるという利点も持つ。

局所的な通信においては、空間的な伝達が繰り返されることにより、時間を経過に伴い「また聞き」の形で情報が複数ロボットに伝播する。このことを考慮し、設計は

- 空間的に情報伝達を効率化し、情報伝達時間を短縮する
- 時間的に情報伝播を調節し、必要な台数へ無駄なく伝達する

という両面において行なう必要がある。しかし現状では、解析的な設計指針が与えられていないため、時間のかかる多数ロボットのシミュレーションから試行錯誤的に設計を行なわなければならない。そこで本論文では、目的を

局所的な通信による複数ロボットへの情報の伝わり方を時間・空間の両面から解析し、それに基づく設計を行なう

ことに設定した。

3章では、解析・設計の基本式として、多数ロボットの情報伝播の一般式を導出した。これを用いて解析を見通し良く進めるため、まず4章で空間的な解析・設計、次に5章、6章で時間的な解析・設計を行なうという立場を示した。また、通信量と作業の性質を考慮した環境パラメータとして、「通信範囲で何台のロボットが情報を出力しているか」を表す「情報獲得台数  $N$ 」を導入して局所的通信を分類し、時間的・空間的な解析のうちどれが必要となるかを示した。

4章の空間的な設計では、「局所的な情報出力の範囲がどれだけのとき情報伝達が効率的か」を明らかにした。情報伝達時間を評価関数とし、これを最小化する最適な通信範囲  $x_{opt}$  を、ロボットの密度、通信範囲、通信能力を入力として求めた。作業としては、基本的なランダム探索、分割された領域の探索、協調搬送を考える。求められた  $x_{opt}$  には、ロボットの通信能力とはほぼ線形な関係があり、また情報出力確率には反比例することが分かった。

5章の時間的な設計では、「どれだけの時間情報を流せば、必要な台数を集められるか」を明らかにした。情報が伝播した比率を評価指標とし、目標のロボット数  $n_e$  に広がりすぎずに情報が伝播されるための情報提示時間  $T_{ann}$  を求めた。特に、情報伝達数  $N$  が小さく、情報伝播がロジスティック関数を用いてモデル化できる場合には、伝播時間がロボットの速度、密度、通信半径に反比例する単純な形で表される。この時間的设计は、作業周知の通信 (1) に広く適用可能で、多数ロボットの作業計画において有用である。

6章でも同様に時間的な解析と設計を扱うが、「どのような群を組めば情報伝播が速くなるか」を設計対象とした。自然界などでよく見られる群による協調移動形態を用いて情報伝播の解析を行ない、群の規模をどのようにしたら情報伝達時間が短縮されるかを調べた。ここでは、情報を伝達したい台数  $n_e$  と同じ数で群を組めば最適である、ということが示された。

7章では、情報伝達数  $N$  が非常に大きい例外的な場合を扱った。通信範囲で情報を出力するロボット数が5より大きい場合には、通信の無限の繋がりによるパーコレーションの効果が伝播において支配的となる。このときには、これまでの連続モデルではなく、離散的な伝播の解析により情報提示時間を設計する必要があることを示した。

以上の4章～7章の解析と設計手法の有効性は、多数ロボットの通信シミュレーションや基礎的な空間情報伝達の実験により確認された。これにより、複雑な多数ロボットの情報伝達シミュレーションを行なう手間なしに局所的な通信の設計を行なうことができる。

最後に、本論文で行なってきた解析・設計の有用性を検証するため、8章で評価を行なった。大域通信と局所通信を比較し、「分散的な作業環境には局所的な通信が有効である」ことが解析的に確かめられた。

以上の解析で、3章の分類の全ての場合に対し、局所的な通信による情報伝播の特性が明らかになり、空間的・時間的设计の手法が示された。これにより、多数ロボットの協調において「必要なロボットに速く無駄なく」情報を伝達するための局所的通信の設計が可能となる。特に、本論文の解析と設計で特徴的であるのは、最適な通信範囲が、通信能力、作業環境の特性を表すパラメータと明示的に関係づけられていることである。これにより、ロボットシステムに変更があった場合にも容易に対応でき、通信を模擬したシミュレーションによる設計のように、設計を最初からやり直す手間は必要でなくなる。



## 9.2 今後の展望

本論文で行なった局所的な通信システムの解析・設計について、今後解決すべき課題として、次のようなものがある。

### 通信範囲の動的な調節

本論文で行なった空間的設計で、最適な通信範囲を求める際には、作業などから与えられるパラメータを定数として扱っている。この設計は、パラメータの平均の値を事前に与えて、それを用いて設計を行なうオフライン形式の設計である。しかし、作業の不確実性が大きかったり、作業内容が作業中に変更されたりすると、この手法だけでは通信の効率化は保証されない。そこで、動的な環境に適應するため、作業の実行中にオンラインで通信範囲を調節することが次の課題となる。設計の基礎的な部分としては、本論文で示した設計手法を適用できると考えられるので、これに周囲の状態の推定手法などを統合して、動的な通信範囲の調節手法を開発する。

### 非同質な系への適用

本論文では、多数移動ロボット系において、各ロボットは同等の通信性能を持ち、また作業における情報出力の確率も同じであると想定した。将来、移動ロボットが普及し、通信装置として量産品が利用されることを考えると、同じ性能を持つロボットが多数存在すると考えるのは妥当であるといえる。

しかしながら、作業の実行においては、3章に示したように、全てのロボットが同じ役割を持つ場合のみとは限らない。異なるパラメータを持つロボットが環境に混在する場合には、パラメータを確率分布モデルとしてとらえる必要がある。3章でも少し触れたように、本論文で示した解析を基本として、これを重ね合わせて解析を行なうことにより対応することになるであろう。例えば、6章の設計では、目標伝達台数  $n_d$  が一定の値ではなく、確率分布する場合も扱い、最適な群規模を導出した。このような考え方を基本として、非同質なシステムに対して本論文で示した解析・設計を拡張し、より一般的なものとした。

### 他の通信手法との併用

実現の容易さやシステムの単純さも、通信システムに要求される重要な要素である。このことから、本論文では各ロボットは局所的な通信のみを用いるとした。これは完全に分散的な手法であり、通信の負荷を分散し、集中管理の必要がないという大きな利点がある。その反面、1章でも述べた通り、情報伝達が確率的であるという欠点のため、同じ情報を繰り返し出力して要求される信頼性を保証する必要がある。

また本論文では、局所的な情報伝達で対応できる (1) 付近の複数ロボットへの作業情報の周知と (2) 作業中の情報伝達を中心に考えたが、非常に離れた場所への情報伝達が必要となる場合には、これだけでは対応できない。もしこのとき、この情報伝達を可能とする遠距離専用の通信が利用可能であるならば、これと局所通信を併用したハイブリッドシステムを用いる必要があるであろう。これは、前項で述べた非同質な系における設計とも関連して、将来扱うべきであると考えられる。

### 協調作業システムへの統合

通信システムの設計を中心にして述べてきたが、最終的には、これを多数移動ロボットによる協調作業システムに統合することが目標となる。4章でも述べたように、近年、群ロボットによって、領域探索 [Hara92] [Singh93] [Beckers94] [倉林95] や協調搬送 [Hashimoto93] [Stilwell94] [Ota95] といった協調作業に関する研究がさかんに行なわれている。これらの協調作業を効率的に実行するため、協調作業の計画・実行システムに本論文で示した局所的通信の解析・設計をどのように組み込んで行くかが、今後重要な課題となるであろう。



## 謝辭



本論文は、筆者が東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程2年次から博士課程にかけて、ほぼ3年間にわたって行なった研究をまとめたものです。その間、常に熱心に御指導くださった指導教官の

東京大学大学院 工学系研究科精密機械工学専攻 教授 新井 民夫 先生

に、心から感謝いたします。先生には、筆者が研究を進めるにあたり、いつも暖かく励ましていただきました。先生とのディスカッションでは、ともすれば細かい点ばかりに目が行く筆者に、高い視点から、豊富な知識に基づいた、示唆に富んだご助言をいただくことができ、研究をまとめる上で非常に参考になりました。そればかりでなく、先生の常に新しい研究領域を求める意欲にも筆者はいつも刺激を受け、楽しく研究生生活を送ることができました。本当にどうもありがとうございました。

また、本論文をまとめるにあたり、貴重な御意見をいただいた

東京大学大学院 工学系研究科機械情報工学専攻 教授 井上 博允 先生

東京大学大学院 工学系研究科電気工学専攻 教授 原島 博 先生

東京大学大学院 工学系研究科精密機械工学専攻 助教授 富山 哲男 先生

東京大学大学院 工学系研究科精密機械工学専攻 助教授 佐々木 健 先生

には、論文全体にわたって、構成や解析の細かい点にいたるまで、建設的な御指摘をいただきました。ここに、謹んで感謝の意を表します。

また、東京大学大学院工学系研究科 精密機械工学専攻講師 太田 順先生には、同じ複数移動ロボット研究グループということで、多岐にわたって御指導いただきました。先生の広い視野を持った研究の進め方、そして適切な修士や学部学生の指導の仕方は、常に筆者の目標となりました。本当にありがとうございました。

中央大学理工学部助教授 大隅 久先生には、筆者が卒論生で、先生が研究室の助手であったときから御指導いただき、中央大に移られてからも、研究の進め方などに関して数々の有益な御助言をいただきました。どうもありがとうございました。また、筆者が学部4年のときから、梅田 和昇先生(中央大学講師)には、身近な研究室の先輩として研究生生活のさまざまな面でお世話になりました。ありがとうございました。東洋大学助教授の松元 明弘先生にも、研究分野が近いことから、研究に関して貴重な御指摘をいただきました。理化学研究所の浅間 一先生にも、学会などで貴重なアドバイスをいただきました。

本論文の理論構成やシミュレーションにおいては、三木 友由氏(現 中村合同特許法律事務所)、山本 正和氏(修士課程在学中・スイスローザンヌ工科大学留学中)、佐々木雄飛氏(4年生在学中)の卒論の研究が大変参考になりました。また、通信の実験においては、本研究室の研究員であった小山 峰乙氏(現 日立製作所)、金田 利彦氏(現 本研究室研究員、日立製作所)に大変お世話になりました。両氏の努力により、良好な環境で実験を行なうことができました。

学部時代からの研究室の同期として、山口 博明氏(現 カリフォルニア大学リバーサイド校)とは、博士課程でともに励まし合いながら研究を進めてきました。氏が研究で発揮する爆発力、発想力にはいつも驚かされてばかりでした。同じく、学部時代の同期である相山 康道氏(現 本研究室助手)には、ひと足先に博士課程を終わった経験から多くのアドバイスをいただきました。分野は違いますが、研究に関しても互いに意見を交換でき、非常に参考になりました。博士課程の同期である林 遠球氏(博士課程在学中)の研究に対する真摯な態度には、いつも感心させられています。また、邱 士軒氏(現 国立台湾大学工業技術学院副教授)、沈 于思氏(現 鹿島建設)、小方 博之(現 NTT)、長尾 武司氏(現 松下電器産業)の諸先輩方には、卒業されてからも、折りにふれてお世話になりました。研究生であった木村 久幸氏(現 神奈川県立商工高校)にも、ハードウェア製作の面でいろいろと御指導いただきました。

さらに、現在は社会に出て研究者として活躍されている同期の石渡 亮伸氏(現 川崎製鉄)、加藤 学氏(現 ノーザンテレコム)、北村 浩一氏(現 日立製作所)とも、ときに企業人の目から、研究に関する考え方などについて議論したりし、視野が狭くなりがちな筆者には新鮮な刺激となりました。複数ロボット研究グループの倉林 大輔氏(現 博士課程在学中)、佐々木 順氏(現 修士課程在学中)、田代 健治氏(現 修士課程在学中・カリフォルニア大学バークレイ校留学中)との議論も、研究を進める上で大変に実りの多いものでした。その他、全ての方々の名前は書くことはできませんが、ともに楽しく研究生生活を過ごさせていただいた研究室の皆様にも深く感謝いたします。

現在新井先生の秘書をなさっている岡田直子さん、篠崎久美子さん、元秘書の牧野 奈緒さんには、さまざまな面でお世話になりました。複雑な事務手続きなどでずいぶんと無理をお願いしたりしましたが、いつも明るくてきばきと仕事を片付けていただき、頼もしいかぎりでした。精密の事務の神戸正休さん、阿部富子さんには、手続きのことなどで、また図書の池田淑子さん、内野有希子さんには、論文の検索などでお世話になりました。また、新井先生の奥様の新井雅世様にも、親身になって励ましをいただき、大変感謝しております。

最後に、このような機会を与え、精神的な支えになってくれた両親と、いつも暖かい励ましの言葉をかけて見守ってくれた婚約者の佐野羊奈子さんに感謝いたします。

平成8年2月

吉田 英一



本書的出版，首先要感謝我的家人，特別是父母，他們的支持和鼓勵，是我完成這部作品的動力。其次，我要感謝我的老師和同學，他們在學習過程中給予我的幫助和啟發，使我能夠不斷進步。最後，我要感謝我的編輯和出版人，他們對本書的精心編排和出版，使本書得以與讀者見面。

本書的出版，首先要感謝我的家人，特別是父母，他們的支持和鼓勵，是我完成這部作品的動力。其次，我要感謝我的老師和同學，他們在學習過程中給予我的幫助和啟發，使我能夠不斷進步。最後，我要感謝我的編輯和出版人，他們對本書的精心編排和出版，使本書得以與讀者見面。

本書的出版，首先要感謝我的家人，特別是父母，他們的支持和鼓勵，是我完成這部作品的動力。其次，我要感謝我的老師和同學，他們在學習過程中給予我的幫助和啟發，使我能夠不斷進步。最後，我要感謝我的編輯和出版人，他們對本書的精心編排和出版，使本書得以與讀者見面。

本書的出版，首先要感謝我的家人，特別是父母，他們的支持和鼓勵，是我完成這部作品的動力。其次，我要感謝我的老師和同學，他們在學習過程中給予我的幫助和啟發，使我能夠不斷進步。最後，我要感謝我的編輯和出版人，他們對本書的精心編排和出版，使本書得以與讀者見面。

## 参考文献

1. 王明賢. 中國經濟史. 北京: 中國人民大學出版社, 1990.
2. 李鴻章. 李鴻章奏摺. 北京: 中國人民大學出版社, 1990.
3. 張之洞. 張之洞奏摺. 北京: 中國人民大學出版社, 1990.
4. 劉坤一. 劉坤一奏摺. 北京: 中國人民大學出版社, 1990.
5. 李鴻章. 李鴻章奏摺. 北京: 中國人民大學出版社, 1990.
6. 張之洞. 張之洞奏摺. 北京: 中國人民大學出版社, 1990.
7. 劉坤一. 劉坤一奏摺. 北京: 中國人民大學出版社, 1990.
8. 李鴻章. 李鴻章奏摺. 北京: 中國人民大學出版社, 1990.
9. 張之洞. 張之洞奏摺. 北京: 中國人民大學出版社, 1990.
10. 劉坤一. 劉坤一奏摺. 北京: 中國人民大學出版社, 1990.



- [Abramson70] Norman Abramson: The Aloha System – Another Alternative for Computer Communications. *AFIPS Proc. of FJCC*, Vol. 37, pp. 281–285, 1970.
- [Arai93] Tamio Arai, Eiichi Yoshida, and Jun Ota: Information Diffusion by Local Communication of Multiple Mobile Robots. *Proc. of 1993 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 4, pp. 535–540, 1993.
- [Arai95] Tamio Arai, Eiichi Yoshida, Tomoyoshi Miki, and Jun Ota: A Study on Group Behavior for Efficient Local Communication in Distributed Mobile Robot System. *Proc. of 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 3292–3297, 1995.
- [Arkin92] Ronald C. Arkin: Cooperation without Communication: Multiagent Schema-based Robot Navigation. *Journal of Robotic Systems*, Vol. 9, No. 3, pp. 351–364, 1992.
- [Arkin93] Ronald C. Arkin, Tucker Balch, and Elizabeth Nitz: Communication of Behavioral State in Multi-agent Retrieval Tasks. *Proc. of 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 588–594, 1993.
- [Beckers94] R. Beckers, O. E. Holland, and J. L. Deneubourg: From Local Actions to Global Tasks: Stigmergy and Collective Robotics. In R. A. Brooks and P. Maes, editors, *Artificial Life IV*, pp. 181–189. MIT Press, 1994.
- [Betancor92] M. J. Betancor, A. Santamaría, F. J. Gabiola, A. Polo, J. Martín Bernardo, V. M. Melián, and F. J. López-Hernández: Infrared Wireless System for Local Area Network and Data Communications. *Proc. of 1992 IEEE International Conference on Wireless LAN Implementation*, pp. 51–55, 1992.
- [Brooks86] Rodney A. Brooks: A Robust Layered Control System For a Mobile Robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-2, p. 1, 1986.
- [Brooks90] Rodney A. Brooks, Pattie Maes, Maja J. Mataric, and Grinnell More: Lunar Base Construction Robots. *Proc. of 1990 IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS '90)*, pp. 389–392, 1990.
- [Cao95] Y. Uny Cao, Alex S. Fukunaga, Andrew B. Kahng, and Frank Meng: Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions. *Proc. of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '95)*, Vol. 1, pp. 226–234, 1995.
- [Cheng86] Yuan-Chieh Cheng and Thomas G. Robertazzi: Critical Connectivity Phenomena in Multihop Radio Models. *Proc. of 1986 IEEE Computer Networking Sym-*

- posium*, pp. 133–140, 1986.
- [Drogoul93] Alexis Drogoul and Jacques Ferber: From Tom Thumb to the Dockers: Some Experiments with Foraging Robots. *Proc. of International Conference on Simulation of Adaptive Behavior "From Animals to Animats 2"*, pp. 451–459, 1993.
- [Dudek93] G. Dudek, M. Jenkin, E. Milios, and D. Wilkes: Taxonomy for Swarm Robots. *Proc. of 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '93)*, pp. 441–447, 1993.
- [Gage92] D. W. Gage: Sensor Abstractions of Support Many-Robot Systems. *Proc. of SPIE Mobile Robots VII Conference*, Vol. 1831, pp. 235–246, 1992.
- [Hara92] Fumio Hara and Sumiaki Ichikawa: Effects of Population Size in Multi-Robots Cooperative Behaviors. *Proc. of International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS '92)*, pp. 3–9, 1992.
- [Ichikawa94] Sumiaki Ichikawa and Fumio Hara: An Experimental Realization of Cooperative Behavior of Multi-Robot System. In H. Asama, T. Fukuda, T. Arai, and I. Endo, editors, *Distributed Autonomous Robotic Systems*, pp. 224–234. Springer-Verlag, 1994.
- [Kamimura86] H. Kamimura, Y. Ichikawa, and N. Ozaki: Radiated Optical Communication System for Mobile Robots. *Proc. of 4th International Conference on Automated Guided Vehicle Systems*, pp. 123–128, 1986.
- [Kleinrock75] Leonard Kleinrock and Fouad A. Tobagi: Packet Switching in Radio Channels: Part I – Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics. *IEEE Transactions on Communication*, Vol. COM-23, No. 12, pp. 1400–1416, 1975.
- [Kura95] Daisuke Kurabayashi, Jun Ota, Tamio Arai, and Eiichi Yoshida: An Algorithm of Dividing a Work Area to Multiple Mobile Robots. *Proc. of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '95)*, Vol. 2, pp. 286–291, 1995.
- [Latombe91] Jean-Claude Latombe: *Robot Motion Planning*. Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [Lesser80] Victor R. Lesser and Lee D. Erman: Distributed Interpretation: A Model and Experiment. *IEEE Transactions on Computers*, Vol. C-29, No. 12, pp. 1144–1163, 1980.



- [Lucarini93] G. Lucarini, M. Varoli, R. Cerutti, and G. Sandini: Cellular Robotics: Simulation and HW Implementation. *Proc. of 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 846-852, 1993.
- [Mataric92a] Maja J. Mataric: Designing Emergent Behaviors: From Local Interactions to Collective Intelligence. *Proc. of 2nd International Conference on Simulation of Adaptive Behavior: From Animals to Animats 2*, pp. 432-441, 1992.
- [Mataric92b] Maja J. Mataric: Minimizing Complexity in Controlling a Mobile Robot Population. *Proc. of 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 830-835, 1992.
- [Matsumoto90] Akihiro Matsumoto, Hajime Asama, Koichi Ozaki Yoshiki Ishida, and Isao Endo: Communication in the Autonomous and Decentralized Robot System ACTRESS. *Proc. of 1990 IEEE Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS'90)*, pp. 835-840, 1990.
- [Metcalf73] Robert M. Metcalfe: Steady-state Analysis of a Slotted and Controlled ALOHA System with Blocking. *Proc. of 6th Hawaii Conference of System Science*, pp. 375-380, 1973.
- [Metcalf76] Robert M. Metcalfe and David R. Boggs: Ethernet: Distributed Packet Switching for Local Computer Networks. *Communications of the ACM*, Vol. 19, No. 7, pp. 395-404, 1976.
- [Hashimoto93] Masafumi Hashimoto, Fuminori Oba, and Toru Eguchi: Dynamic Control Approach for Motion Coordination of Multiple Wheeled Mobile Robots Transporting a Single Object. *Proc. of 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '93)*, pp. 1944-1951, 1993.
- [Noreils92] Fabrice R. Noreils: An Architecture for Cooperative and Autonomous Mobile Robots. *Proc. of 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2703-2709, 1992.
- [Ota95] Jun Ota, Natsuki Miyata, Tamio Arai, Daisuke Kurabayashi Eiichi Yoshida, and Jun Sasaki: Transferring and Regrasping a Large Object by Cooperation of Multiple Mobile Robots. *Proc. of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '95)*, Vol. 3, pp. 543-548, 1995.
- [Parker93] Lynne E. Parker: Designing Control Laws for Cooperative Agent Teams. *Proc. of 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 582-587, 1993.

- [Pike74] G. E. Pike and C. H. Seager: Percolation and Conductivity: A Computer Study. I. *Physical Review B*, Vol. 10, No. 4, pp. 1421-1433, 1974.
- [Sasaki95] Jun Sasaki, Jun Ota, Eiichi Yoshida, Daisuke Kurabayashi, and Tamio Arai: Cooperating Grasping of a Large Object by Multiple Mobile Robots. *Proc. of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1205-1210, 1995.
- [Singh93] Karansher Singh and Kikuo Fujimura: Map Making by Cooperating Mobile Robots. *Proc. of 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 254-259, 1993.
- [Smith80] Reid E. Smith: Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. *IEEE Transactions on Computers*, Vol. C-29, No. 12, pp. 1104-1113, 1980.
- [Steels90] Luc Steels: Cooperation between Distributed Agents through Self-Organization. In Y. Demazeau and J.-P. Muller, editors, *Decentralized AI*, pp. 175-196. North Holland, 1990.
- [Stilwell94] Daniel J. Stilwell and John S. Bay: Optimal Control for Cooperative Mobile Robots Bearing a Common Load. *Proc. of 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 58-63, 1994.
- [Suzuki95] Shoji Suzuki, Hajime Asama, Akira Uegaki, Shin ya Kotosaka, Takanori Fujita, Akihiro Matsumoto, Hayato Kaetsu, and Isao Endo: An Infra-Red Sensory System with Local Communication for Cooperative Multiple Mobile Robots. *Proc. of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '95)*, Vol. 1, pp. 220-225, 1995.
- [Takagi84] Hideaki Takagi and Leonard Kleinrock: Optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals. *IEEE Transactions on Communication*, Vol. COM-32, No. 3, pp. 246-257, 1984.
- [Valadas92] Rui T. Valadas, Adriano C. Moreira, and A. M. de Oliveira Duarte: Hybrid (Wireless Infrared / Coaxial) Ethernet Local Area Networks. *Proc. of 1992 IEEE International Conference on Wireless LAN Implementation*, pp. 21-29, 1992.
- [Wang94a] Jing Wang: On Sign-board Based Inter-Robot Communication in Distributed Robotic Systems. *Proc. of 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1045-1050, 1994.



- [Wang94b] Jing Wang and Suparuk Premvuti: Resource Sharing in Distributed Robotic Systems Based on a Wireless Medium Access Protocol (CSMA/CD-W). *Proc. of 1994 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '94)*, pp. 784-791, 1994.
- [Wang95] Jing Wang, Suparuk Premvuti, and Abdullah Tabbara: A Wireless Medium Access Protocol (CSMA/CD-W) for Mobile Robot Based Distributed Robotic Systems. *Proc. of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2561-2566, 1995.
- [Yoshida94] Eiichi Yoshida, Tamio Arai, Jun Ota, and Tomoyoshi Miki: Effect of Grouping in Local Communication System of Multiple Mobile Robots. *Proc. of 1994 IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '94)*, pp. 808-815, 1994.
- [Yoshida95a] Eiichi Yoshida, Masakazu Yamamoto, Tamio Arai, Jun Ota, and Daisuke Kurabayashi: A Design Method of Local Communication Area in Multiple Mobile Robot System. *Proc. of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2567-2572, 1995.
- [Yoshida95b] Eiichi Yoshida, Masakazu Yamamoto, Tamio Arai, Jun Ota, and Daisuke Kurabayashi: A Design Method of Local Communication Range in Multiple Mobile Robot System. *Proc. of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '95)*, Vol. 2, pp. 274-279, 1995.
- [浅間 91] 浅間一, 尾崎功一, 石田慶樹, 松元明弘, ハビブ, 嘉悦早人, 遠藤勲: 自律分散型ロボットシステム ACTRESS (第5報) - 複数の自立型移動ロボット間のネゴシエーション-. 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 221-222, 1991.
- [浅間 92] 浅間一: マルチエージェントロボットシステム研究の動向と展望. 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 428-432, 1992.
- [新井 92] 新井民夫, 太田順: 複数移動ロボット系の計画. 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 444-449, 1992.
- [新井 94a] 新井民夫, 木村久幸, 前田健太郎, 太田順, 梅田和昇: 移動ロボット相互の位置・姿勢実時間計測システムの開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 3, pp. 472-478, 1994.
- [新井 94b] 新井民夫, 吉田英一, 太田順: 複数移動ロボット系の局所的な通信に関する研究. 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 6, pp. 886-892, 1994.

- [石岡 92] 石岡宏治, 開一夫, 安西祐一郎: 複数の自律移動ロボットによる地図生成システム MARSHA の設計と実装. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'92 論文集, pp. 85-90, 1992.
- [石田 92a] 石田慶樹, 富田昇吾, 尾崎功一, 浅間一, 松元明弘, 遠藤勲: 自律分散型ロボットシステム ACTRESS (第6報) - プロセス間通信による通信機能の実現 -. 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 291-292, 1992.
- [石田 92b] 石田慶樹, 浅間一, 尾崎功一, 松元明弘, 遠藤勲: 自律分散型ロボットシステムのための通信機能の設計と通信シミュレータの開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 544-551, 1992.
- [石田 93] 石田慶樹, 尾崎功一, 琴坂信哉, 横田一隆, 浅間一, 松元明弘, 嘉悦早人, 遠藤勲: 自律分散型ロボットシステム ACTRESS (第10報) - 群ロボットのためのネットワーク・アーキテクチャー. 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 899-900, 1993.
- [石田 94] 石田亨: 自律エージェントのコミュニケーション. 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 6, pp. 802-807, 1994.
- [石村 92] 石村貞夫: すぐわかる多変量解析. 東京図書, 1992.
- [石綿 92] 石綿陽一, 稲葉雅幸, 井上博允: 複数のロボットによる環境の協調認識. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'92 論文集, pp. 79-84, 1992.
- [市川 92] 市川純章, 原文雄: 群ロボットの相互通信を利用した協調移動に関する研究. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'92 論文集, pp. 593-596, 1992.
- [市川 93] 市川純章, 原文雄: 呼びかけ通信を利用した群ロボット協調的経路探索行動の研究 - ロボット相互の衝突の影響を考慮した群行動の特性 -. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'93 論文集, pp. 919-923, 1993.
- [市川 94] 市川純章, 原文雄: 群ロボットにおける協調行動の実験的一検討. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'94 論文集, pp. 11-16, 1994.
- [市川 95] 市川純章, 原文雄: 群ロボットシステムにおける群知能の発現特性に関する研究 - 空間探索能力とその応用 -. 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 8, pp. 1138-1144, 1995.
- [巖佐 90] 巖佐庸: 数理生物学入門. HBJ 出版局, 1990.
- [ウィルソン 83] E. O. ウィルソン, 伊藤監訳: 社会生物学 (第2巻). 思索社, 1983.



- [植山 92] 植山剛, 福田敏男ほか: 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究 (第 10 報、CEBOT の群構造に対するネットワーク・エネルギー評価を用いた組織の分散制御化). 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 58, No. 549, pp. 1466-1473, 1992.
- [植山 93] 植山剛, 福田敏男, 杉浦恒彦, 酒井彰, 上杉武弘: 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究 (第 16 報、情報の局所性と分散型遺伝アルゴリズムを用いた協調分散探索). 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 59, No. 568, pp. 3837-3844, 1993.
- [ACVS95] 機械システム振興協会: 車々間走行データ伝達システムの開発に関するフィージビリティスタディ報告書. 機械システム振興協会, 自動車走行電子技術協会, 1995.
- [太田 94] 太田順, 吉田英一, 倉林大輔, 佐々木順, 宮田なつき, 新井民夫, 大隅久: 複数の移動ロボットの協調による搬送作業の実現 (第 3 報: 持ち替え動作を含んだ障害物回避行動の実現). 第 12 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 395-396, 1994.
- [岡本 79] 岡本栄一: 数理モデル. 新曜社, 1979.
- [奥村 86] 奥村, 進士 (監修): 移動通信の基礎. 電子情報通信学会編, 1986.
- [尾崎 94] 尾崎功一, 浅間一, 石田慶樹, 松元明弘, 嘉悦早人, 遠藤勲: ネゴシエーションによる協調のためのチーム編成. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'94 論文集, pp. 5-10, 1994.
- [小田垣 93] 小田垣孝: パーコレーションの科学. 裳華房, 1993.
- [小山 95] 小山峰乙, 吉田英一, 太田順, 新井民夫: 赤外線を用いた移動ロボット間局所的通信システムの実現. 1995 年度精密工学会春季大会論文集, pp. 185-186, 1995.
- [金森 92] 金森哉史, 梶谷誠: 複数台の移動ロボットのための通信方式. 第 10 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 287-290, 1992.
- [木村 93] 木村, 太田, 新井: 画像を用いた移動ロボット間の通信システム. 1993 年度精密工学会春季大会論文集, pp. 897-898, 1993.
- [木本 95] 木本実: PHS をめぐる最近の動きについて. インターフェース 1995.4, pp. 199-204, 1995.
- [國吉 91] 國吉康夫: 観察に基づく協調 - 第 1 報: 協調行動パターンの分類に関する検討. 第 9 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 583-584, 1991.
- [國吉 92] 國吉康夫, 坂根茂幸: 観察に基づく協調 - 第 2 報: 定型的協調行動パターンの表現方法に関する検討. 第 10 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 303-304, 1992.

- [倉林 94] 倉林大輔, 太田順, 新井民夫: 複数台のロボットによる領域探索行動. 第 12 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1027-1028, 1994.
- [倉林 95] 倉林大輔, 太田順, 新井民夫: 探索作業における複数移動ロボットの協調手法. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 論文集, pp. 812-815, 1995.
- [SICE92] 計測と制御: 特集: 群知能ロボット. 計測と制御, Vol. 31, No. 11, 1992.
- [SICE90] 計測と制御: 特集: 自律分散システム. 計測と制御, Vol. 29, No. 10, 1990.
- [SICE93] 計測と制御: 特集: 自律分散システムの研究の課題と新たな展開. 計測と制御, Vol. 32, No. 10, 1993.
- [小菅 92] 小菅一弘: 複数のマニピュレータによる協調制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 439-443, 1992.
- [小西 94] 小西聡, 藤田博之: 自立分散型マイクロ搬送システム - 搬送制御手法に関する考察 - 第 12 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 479-480, 1994.
- [小西 95] 小西聡, 藤田博之: 分散型マイクロ搬送システム (マイクロ搬送システム). 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 論文集, pp. 427-430, 1995.
- [近藤 93] 近藤晴彦: 分散制御フレキシブル組立ライン. 第 3 回ロボットシンポジウム, pp. 363-368, 1993.
- [坂尾 94] 坂尾知彦, 南都寛, 梅田靖, 富山哲男: 細胞型機械の構築 (第 5 報) - 細胞型自動倉庫の実現 - 1994 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 913-914, 1994.
- [坂尾 95] 坂尾知彦, 南都寛, 梅田靖, 富山哲男: 細胞型機械の構築 (第 6 報) - 細胞型自動倉庫の製作 - 1995 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 327-328, 1995.
- [佐々木 94] 佐々木順, 太田順, 吉田英一, 倉林大輔, 大隅久, 新井民夫: 複数移動ロボットによる協調搬送時における把持位置決定法. 第 12 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 357-358, 1994.
- [下原 94] 下原勝彦: ロボット集団における生物的コミュニケーションと協調制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 6, pp. 808-812, 1994.
- [信学 85] 電子情報通信学会: 移動通信特集. 電子情報通信学会誌, Vol. 68, No. 11, 1985.
- [鈴木 95] 鈴木昭二, 新井義和, 琴坂信哉, 浅間一, 嘉悦早人, 遠藤勲: 移動ロボットの協調のための赤外線センサ通信システム. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 論文集, pp. 824-827, 1995.



- [仙石 86] 仙石正和: 自動車電話の周波数有効利用 - チャネルの割当てアルゴリズム -. 電子情報通信学会誌, Vol. 69, No. 4, pp. 351-356, 1986.
- [津村 93] 津村俊弘, 大久保博志, 小松信雄, 青木伸也: 複数移動体の為のレーザとコーナキューブを用いた光通信システム. 第 11 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 885-886, 1993.
- [土井 89] 土井, 中島, 津谷, 亀井: 移動ロボット用光空間伝送システムの開発 (第 4 報) - システムの総合特性 -. 第 7 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 33-34, 1989.
- [RSJ94] 日本ロボット学会誌: 特集: ネットワーク型ロボットシステム. 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 6, 1994.
- [RSJ95] 日本ロボット学会: 重点領域研究: 群ロボット. 第 13 回日本ロボット学会学術講演会, pp. 1167-1182, 1995.
- [沼岡 92a] 沼岡千里: 自律エージェントの集团的戦略変更. 日本ソフトウェア科学会第 9 回大会, pp. 69-72, 1992.
- [沼岡 92b] 沼岡千里: 自律ロボット集団のチームワーク. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'92 論文集, pp. 69-74, 1992.
- [長谷川 91] 長谷川勉, 坂根茂幸, 佐藤知正: 知能行動のための情報処理. 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 1, pp. 112-121, 1991.
- [バーグ 89] ハワード・C・バーグ, 寺本英他訳: 生物学におけるランダムウォーク. 法政大学出版社, 1989.
- [福田 89] 福田敏男, 中川: 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究 (第 1 報、セル間の自動接近・結合・分離制御). 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 55, No. 509, pp. 114-118, 1989.
- [福田 91] 福田敏男, 植山剛ほか: 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究 (第 7 報、ネットワークのエネルギー評価法に基づくマスタ・セル決定法). 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 57, No. 537, pp. 1652-1660, 1991.
- [福田 94a] 福田敏男, 関山浩介: ネットワーク型ロボットシステム - インテリジェントコミュニケーションを目指して -. 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 6, pp. 780-784, 1994.
- [福田 94b] 福田敏男, 入谷剛, 新井史人, 杉浦恒彦, 酒井彰, 山田康二: 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究 (第 75 報、環境変化に対応する群行動の再構成). 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'94 論文集, pp. 815-816, 1994.

- [ブレム 91a] スバルーク・ブレムウッティ, 油田信一: 簡単な自律型移動ロボットの協調行動モデルのインプリメンテーション. 第 9 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 591-594, 1991.
- [ブレム 91b] スバルーク・ブレムウッティ, 油田信一: 複数台ロボットによる空間資源共有のための自律ロボット間通信ネットワーク. 第 9 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 595-598, 1991.
- [堀内 93] 堀内英一, 谷和男: 分散実行可能な遺伝的アルゴリズムを用いた移動ロボット群の行動学習. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 8, pp. 1212-1219, 1993.
- [松元 89] 松元明弘, 浅間一, 石田慶樹, 遠藤勲: 自律分散型ロボットシステム ACTRESS (第 1 報) - アクター理論に基づく概念設計 -. 第 7 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 415-416, 1989.
- [養谷 85] 養谷千鳳彦: 回帰分析のはなし. 東京図書, 1985.
- [矢向 94] 矢向高弘, 岩沢透, 安西祐一郎: 解放型分散ロボット環境における無線パケット通信のための動的なタイムスロット割り当て機構. 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 8, pp. 1157-1165, 1994.
- [山本 95] 山本正和, 吉田英一, 太田順, 新井民夫: 多数移動ロボット系の局所的通信における最適通信範囲の設計. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 論文集, pp. 820-821, 1995.
- [郵政 93] 郵政省電気通信局電波部移動通信課監修: 移動通信システムガイド. 移動通信研究会編, 1993.
- [油田 92] 油田信一: 複数の自律移動ロボットの協調行動. 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 433-438, 1992.
- [吉田 71] 吉田正昭: 情報の伝播. 情報科学講座 C12.2 共立出版, 1971.
- [吉田 93] 吉田英一, 新井民夫, 太田順: 局所的通信による複数移動ロボットの協調. 第 11 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 895-898, 1993.
- [吉田 94] 吉田英一, 新井民夫, 太田順, 三木友由: 複数移動ロボットの局所的通信に対する群行動の効果. 第 12 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 473-474, 1994.
- [吉田 95a] 吉田英一, 新井民夫, 太田順: 多数移動ロボットの局所的通信に対する環境パラメータの影響に関する研究. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 論文集, pp. 822-823, 1995.
- [吉田 95b] 吉田英一, 太田順, 新井民夫: 多数移動ロボットの最適な局所的通信範囲の設計. 第 13 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1995.



- [吉田 95c] 吉田英一, 太田順, 新井民夫: 複数移動ロボットの局所的通信における環境パラメータの影響に関する研究. 1995 年度精密工学会春季大会論文集, pp. 189-190, 1995.
- [吉田 95d] 吉田英一, 三木友由, 太田順, 新井民夫: 複数移動ロボット系における局所的通信に対する群行動の効果. 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 5, pp. 727-733, 1995.

## 研究業績書



## 査読付き学術論文

新井民夫, 吉田英一, 太田 順:

複数移動ロボット系の局所的な通信に関する研究,  
日本ロボット学会誌, Vol.12, No.6, pp.886-892, 1994.

吉田英一, 三木友由, 新井民夫, 太田 順:

複数移動ロボット系における局所的通信に対する群行動の効果,  
日本ロボット学会誌, Vol.13, No.5, 727-733, 1995.

Jun Ota, Tamio Arai, Eiichi Yoshida, Daisuke Kurabayashi, Jun Sasaki:

**Motion Skills in Multiple Mobile Robot System,**  
Robotics and Autonomous Systems, to be appeared (1996).

佐々木順, 太田 順, 新井民夫, 吉田英一, 倉林大輔:

複数移動ロボットによる未知対象物の協調把持,  
日本ロボット学会誌, 論文査読中.

吉田英一, 山本正和, 新井民夫, 太田 順, 倉林大輔:

多数移動ロボットシステムの最適な局所的通信範囲の設計,  
日本ロボット学会誌, 論文査読中.

## 査読付き講演論文

Tamio Arai, Eiichi Yoshida and Jun Ota:

**Information Diffusion by Local Communication of Multiple Mobile Robots,**  
*Proc. of 1993 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics,*  
Vol.4, pp. 535-540, 1993 (Le Touquet, France).

Hisashi Osumi, Tamio Arai and Eiichi Yoshida:

**Cooperative Control between Multiple Manipulators with Flexibility,**  
*Proc. of 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '93),* pp.1935-1940, 1993 (Yokohama, Japan).

Eiichi Yoshida, Tamio Arai, Jun Ota and Tomoyoshi Miki:

**Effect of Grouping in Local Communication System of Multiple Mobile Robots,**

*Proc. of 1994 IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '94),* pp.808-815, 1994 (München, Germany).

Jun Sasaki, Jun Ota, Eiichi Yoshida, Daisuke Kurabayashi and Tamio Arai:

**Cooperating Grasping of a Large Object by Multiple Mobile Robots,**  
*Proc. of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation,* pp.1205-1210, 1995 (Nagoya, Japan).

Eiichi Yoshida, Masakazu Yamamoto, Tamio Arai, Jun Ota and Daisuke Kurabayashi:

**A Design Method of Local Communication Area in Multiple Mobile Robot System,**  
*Proc. of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation,* pp.2567-2572, 1995 (Nagoya, Japan).

Eiichi Yoshida, Masakazu Yamamoto, Tamio Arai, Jun Ota and Daisuke Kurabayashi:

**A Design Method of Local Communication Range in Multiple Mobile Robot System,**  
*Proc. of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '95),* Vol.2, pp.274-279, 1995 (Pittsburgh, USA).

Daisuke Kurabayashi, Jun Ota, Tamio Arai and Eiichi Yoshida:

**An Algorithm of Dividing a Work Area to Multiple Mobile Robots,**  
*Proc. of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '95),* Vol.2, pp.286-291, 1995 (Pittsburgh, USA).

Jun Ota, Natsuki Miyata, Tamio Arai, Eiichi Yoshida, Daisuke Kurabayashi and Jun Sasaki:

**Transferring and Regrasping a Large Object by Cooperation of Multiple Mobile Robots,**  
*Proc. of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '95),* Vol.3, pp.543-548, 1995 (Pittsburgh, USA).

Tamio Arai, Eiichi Yoshida, Tomoyoshi Miki and Jun Ota:

**A Study on Group Behavior for Efficient Local Communication in Distributed Mobile Robot System,**  
*Proc. of 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics,* pp.3292-3297, 1995 (Vancouver, Canada).



Tamio Arai, Jun Ota, Eiichi Yoshida and Daisuke Kurabayashi:

**Acquisition and Utilization of Motion Skills Planning of Multiple Mobile Robots,**

*Proc. of 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp.3712-3717, 1995 (Vancouver, Canada).

Daisuke Kurabayashi, Jun Ota, Tamio Arai, and Eiichi Yoshida:

**Cooperative Sweeping by Multiple Mobile Robots,**

*Proc. of 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Accepted, In Press, 1996 (Minneapolis, USA).

## 口頭発表

大隅 久, 新井民夫, 吉田英一, 佐藤宏行:

2つの弾性アームにより保持された物体の搬送制御,

第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.403-404, 1989.

吉田英一, 大隅 久, 新井民夫:

複数の弾性アームによる協調制御,

1990年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, pp.363-364, 1990.

吉田英一, 新井民夫, 太田 順:

複数ロボット系における協調作業のための群形成,

第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.301-302, 1992.

吉田英一, 新井民夫, 太田 順, 木村 久幸:

複数移動ロボット間の分散型通信に関する研究,

1993年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, pp.899-900, 1993.

吉田英一, 新井民夫, 太田 順:

分散型の通信による複数移動ロボット協調,

日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'93論文集, pp.954-957, 1993.

吉田英一, 新井民夫, 太田 順:

局所的通信による複数移動ロボットの協調,

第11回日本ロボット学会学術講演会, pp.895-898, 1993.

吉田英一, 新井民夫, 太田 順, 三木友由:

局所的通信を行なう移動ロボットの群行動の効果,

1994年度精密工学会春季大会講演論文集, pp.347-348, 1994.

吉田英一, 新井民夫, 太田 順:

移動ロボット間の局所的通信による情報伝達コストに関する考察,

1994年度精密工学会春季大会論文集, pp.349-350, 1994.

太田 順, 佐々木順, 吉田英一, 倉林大輔, 大隅 久, 新井民夫:

複数の移動ロボットの協調による大型対象物の把持,

1994年度精密工学会春季大会論文集, pp.1061-1062, 1994.

吉田英一, 新井民夫, 太田 順, 三木 友由:

複数移動ロボットの局所的通信に対する群行動の効果,

日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'94論文集, pp.505-508, 1994.

吉田英一, 山本正和, 太田 順, 新井民夫:

複数ロボット系における局所的通信範囲の設計法,

1994年度精密工学会秋期大会講演会論文集, pp.615-616, 1994.

吉田英一, 新井民夫, 太田 順, 三木友由:

複数移動ロボットの局所的通信に対する群行動の効果,

第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.473-474, 1994.

佐々木順, 太田 順, 吉田英一, 倉林大輔, 大隅 久, 新井民夫:

複数移動ロボットによる協調搬送時における把持位置決定法,

第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.357-358, 1994.

太田 順, 吉田英一, 倉林大輔, 佐々木順, 宮田なつき, 新井民夫, 大隅 久:

複数の移動ロボットの協調による搬送作業の実現 (第3報: 持ち替え動作を含んだ障害物回避行動の実現),

第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.395-396, 1994.

小山 峰乙, 吉田英一, 太田 順, 新井民夫:

赤外線を用いた移動ロボット間局所的通信システムの実現,

1995年度精密工学会春季大会論文集, pp.185-186, 1995.



吉田英一, 新井民夫, 太田 順:

複数移動ロボットの局所的通信における環境パラメータの影響に関する研究,  
1995 年度精密工学会春季大会論文集, pp.189-190, 1995.

太田 順, 宮田なつき, 吉田英一, 佐々木順, 新井民夫:

持ち替え動作を伴う複数台の移動ロボットによる大型対象物協調搬送制御,  
1995 年度精密工学会春季大会論文集, pp.593-594, 1995.

山本正和, 吉田英一, 太田 順, 新井民夫:

群ロボットの局所通信における最適通信範囲の設計,  
1995 年度精密工学会春季大会論文集, pp.595-596, 1995.

宮田なつき, 太田 順, 佐々木順, 吉田英一, 倉林大輔, 新井民夫:

持ち替え動作を伴う複数台の移動ロボットによる大型対象物の協調搬送  
日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 論文集, 800-803, 1995.

山本正和, 吉田英一, 太田 順, 新井民夫:

多数移動ロボット系の局所的通信における最適通信範囲の設計  
日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 論文集, 820-821, 1995.

吉田英一, 新井民夫, 太田 順:

多数移動ロボットの局所的通信に対する環境パラメータの影響に関する研究  
日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 論文集, 822-823, 1995.

太田 順, 吉村裕司, 吉田英一, 倉林大輔, 井上康介, 新井民夫:

群ロボットによる多数物体の搬送計画に関する研究 (第2報: 階層型協調搬送アル  
ゴリズムの提案),  
1995 年度精密工学会秋季大会論文集, pp.479-480, 1995.

吉田英一, 山本正和, 太田 順, 新井民夫, 佐々木雄飛:

多数の移動ロボットの最適な局所的通信範囲の設計,  
第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.639-640, 1995.

宮田なつき, 太田 順, 佐々木 順, 吉田英一, 倉林大輔, 新井民夫:

複数の移動ロボットの協調による搬送作業の実現 (第4報: ロボットの速度・加速度  
を考慮した持ち替え戦略),  
第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 851-852, 1995.

太田 順, 吉村裕司, 吉田英一, 倉林大輔, 井上康介, 新井民夫:

群ロボットによる多数物体の搬送計画 (第1報: 階層型搬送アルゴリズムの提案),  
第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 861-862, 1995.

太田 順, 宮田なつき, 佐々木 順, 吉田英一, 倉林大輔, 山下 淳, 新井民夫:

複数の移動ロボットの協調による搬送作業の実現 (第5報: センシングエリアを考慮  
した群れ作り搬送の実現),  
第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.863-864, 1995.

吉村裕司, 太田 順, 吉田英一, 倉林大輔, 井上康介, 新井民夫:

群ロボットによる多数物体の搬送計画 (第2報: 群ロボットの経路生成法),  
第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.865-866, 1995.

## その他

Réalisation d'un outil de communication en programmation orientée objet dans  
un environnement expérimental robotique,

Rapport Scientifique (Scientific Report), submitted to Institut de Microtechnique,  
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Swiss Federal Institute of Technology,  
Lausanne), March, 1992.



1. 研究の目的と意義  
本研究は、日本の経済成長と社会変革の背景にある要因を明らかにすることを目的とする。特に、戦後高度経済成長期の産業構造転換と労働市場の形成に焦点を当て、そのプロセスを多角的に分析する。本研究の意義は、過去の経済史を振り返りつつ、現代の経済政策や社会政策に示唆を与える点にある。

2. 研究の範囲と対象  
本研究の範囲は、戦後から1970年代前半までの日本経済を対象とする。対象となる産業は、製造業、特に重工業と軽工業の両方にわたる。労働市場の形成については、大企業と中小企業の両方の労働者を対象とする。

3. 研究方法  
本研究は、定量的な分析と定性的な分析の両方を用いる。定量的な分析としては、統計データを用いた回帰分析や時系列分析を行う。定性的な分析としては、当時の新聞記事、政府文書、企業資料などを活用し、背景や経緯を明らかにする。

4. 研究の成果  
本研究の結果、戦後高度経済成長期の産業構造転換は、政府の政策と企業の努力の両方によって実現されたことが明らかになった。特に、大企業は技術革新と生産効率の向上を通じて競争力を高め、労働市場の形成に貢献した。一方、中小企業は、大企業との連携を通じて成長を遂げた。労働市場の形成については、大企業は安定な雇用を提供し、中小企業は柔軟な雇用形態を採用したことが特徴である。

5. 今後の研究課題  
本研究は、戦後から1970年代前半までの日本経済を対象としたが、今後の研究課題としては、1970年代後半以降の日本経済の発展と社会変革の背景にある要因を明らかにすることである。特に、グローバル化の影響や技術革新の進展が労働市場に与える影響について、さらなる研究が必要である。



