学術論文

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

吉 田 英 一* 三 木 友 由* 新 井 民 夫* 太 田 順*

Effect of Grouping in Local Communication System of Multiple Mobile Robots

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

When the size of distributed robotic system becomes large, local communication system is considered appropriate for cooperation in the light of cost and capacity. The behavior of robots has a respectable effect on the efficiency of local communication system. When the number of robots required for cooperative tasks is given, it is therefore essential to know what kind of behavior robots should take so that information is passed to those robots efficiently. Group behavior is considered to have advantages in improvement of communication performance, as previous researches show its effectiveness in such tasks as sample collecting or searching. This paper analyzes the effect of group behavior on the performance of local communication system of multiple mobile robots. We derive a set of differential equations that describe the relationship between group size and the information diffusion among robots. The analytical results show the effectiveness of group behavior and allow us to calculate the optimal group size that minimizes the diffusion time for desired number of robots, even if the number is stochastically distributed. The validity of the analysis is verified by computer simulation.

Key Words: Local Communication, Multi-Robot System, Group Behavior, Information Diffusion

1. 序 論

近年、分散管理された多数のロボットが、協調してより高度で複雑な作業を行うことが期待されている。複数ロボットによる協調にはロボット間の通信が必要となる。これまでの研究は、通信手段の点から、大きく (a) 大域的通信 [1]~[3] と (b) 局所的通信 [4]~[8] に分けられる。

(a) の大域的通信は、少ないロボット台数のときには有効である。しかし、台数が増加すると、通信能力の制限や情報処理のコスト増加などの問題から、この方法は困難になる。

そこで本研究では、(b) の局所的な通信を採用する。これは、“クチコミ通信”と呼ぶことができ、ロボットはタスクや環境に関する情報の収集や伝達を局所的に行う。

局所的通信システムにおける協調作業では、作業情報を系のすべてのロボットに伝達する必要は小さく、むしろ一定のロボット台数に伝えれば良いことが多い。例えば、複数台による重量物の搬送や特定領域の協調探索などの作業では、重量や領域の面積などの作業内容から、作業に必要なロボット台数を確率分布として知ることができると考えられる。よって、作業処理に必要な台数に効率的に情報を伝達することが重要になる。

局所的通信システムでは、ロボットの行動が情報伝達特性に与える効果が大きい。そこで、必要なロボットへの効率的な伝達のための行動を決定する必要がある。これまで、筆者ら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てきた [7][8]。この解析では、単純のため各ロボットの行動は独立なランダム移動としたが、他のロボットとの何らかの協調行動をとるほうが、情報伝達が効率化されると考えられる。

局所的な情報伝達を効率化する行動として、自然界で見られる敵の発見・餌探しなどのための群行動があげられる [9]。ロボットの群行動と通信との関係に関する研究はほとんどみられないが、サンプル採取や空間探索などにおいて、局所的な情報に基づいて行動するロボットが、動的・静的な群行動をとることにより、作業が効率化されることを示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 [10][11]、さらに協調による空間探索の効率を示したものの [12] などがある。

これらの研究から、群行動により、局所的な通信を行うロボットの情報伝達の効率化が期待できる。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おらず、どのような大きさの群を組めばよいかなどの行動の設計に関する指針は明らかになっていない。

そこで本論文では、局所的に通信するロボットの情報伝達に

原稿受付 1994 年 9 月 8 日

* 東京大学工学部

* Faculty of Engineering, The University of Tokyo

群行動が与える影響を解析する．解析をもとに，作業に必要なロボット数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求める．

まず2章で，各ロボットがランダム移動する場合の単純な情報伝播の解析を示す．3章で，群行動モデルを示し，2章の方法を応用して情報伝播の解析を行う．さらに，4章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．5章で，シミュレーションによって解析の有効性の検証を行う．

2. 局所的通信モデルと情報伝播の定式化

本章では，次章の群行動による情報伝播の解析の基礎として，筆者らがこれまで行ってきた，局所的通信を行うロボットがランダム移動する場合の情報伝播の解析の概要を示す [7][8]．

2.1 移動ロボットの局所的通信のモデル

モデル化は，以下の点について行う．

(1) 通信形態：局所的通信

(2) イベント：環境にランダムに与えられる作業など

(3) ロボットの移動方法：ランダム移動

(2) のイベントは，故障回復あるいは協調搬送といった，環境内でランダムに発生し，処理のため複数ロボットを必要とする作業にあたり，系における情報源となる．

(3) のロボットの移動には，単純で，かつ確率的に広い範囲を掃引するランダム移動を用いた．

ロボットは，異なる種類の情報の発信と，複数のロボットからの情報獲得が可能であると仮定する．複数のロボットからの情報獲得に必要な時間をロボットのサンプリング時間とし，今後はこのサンプリング時間を1単位時間として議論を進める．

これらの仮定は，例えば LED を用いた看板による通信方式 [13] により実現可能であり，妥当であるといえる．

“I-Robot (Informed)” は情報を獲得したロボット，“N-Robot (Not Informed)” は獲得していないロボットを表す．時間0でイベントが環境に発生したとして解析を進める．モデルにおける変数を以下のように定義する (Fig. 1)．

- $p(t)$: 時間 t での I-Robot の全体に対する比率
- R, ϕ, A : 通信範囲の半径，視野角，面積 ($A = 0.5R^2\phi$)
- v : ロボットの移動速度
- ρ : ロボットの密度 (単位面積あたりロボット数)
- ρ_{ev} : イベントの密度

Fig. 1 The model of local communication

2.2 局所的通信による情報伝播の定式化

I-Robot の比率 $p(t)$ の時間的変化を考える． $p(t)$ の単位時間当たりの増加率 $\Delta p(t)$ は，情報を新たに獲得して N-Robot から I-Robot になるものの割合である．時間 t で1台のロボットが情報を獲得する確率を“情報獲得確率”と呼び $I(t)$ とおくと， $\Delta p(t)$ は N-Robot の比率 $I(t)$ ，さらに掃引面積を考慮して速度 v との積に比例する．ランダム移動の場合，I-Robot の空間分布が平均 $\rho A p(t)$ のポアソン分布で表されることを用いて， $I(t)$ を求め，さらに $p(t)$ に関する微分方程式を導出すると，

$$I(t) = 1 - e^{-\rho A p(t)} e^{-\rho_{ev} A} \quad (1)$$

$$\frac{dp(t)}{dt} = \beta v \{1 - p(t)\} \{1 - e^{-\rho A p(t)} e^{-\rho_{ev} A}\} \quad (2)$$

となる．式 (2) を“情報伝播の方程式”と呼ぶことにする． β は，ランダム移動の影響を表す比例定数である．式 (2) を指数関数の一次近似の公式を用いて近似すると，以下の単純なロジスティック方程式の形に帰着される．

$$\begin{aligned} \frac{dp(t)}{dt} &= \{ap(t) + b\} \{1 - p(t)\} \\ a &= \beta v \rho A, \quad b = \beta v \rho_{ev} A \end{aligned} \quad (3)$$

ロボット系のパラメータ ρ, v, A が既知のとき，式 (3) を解いて一定の比率に情報が伝播する時間が容易に計算される．

3. 群行動モデルと群による情報伝播の解析

本章では，群行動を行うロボット間の情報伝播を解析する．3.1 節で隊列による単純な群行動モデルを示す．群間と群内部では情報伝播の性質が異なるので，3.2 節で前章の手法を応用して群間の情報伝播，3.3 節で群内の情報伝播の解析を行う．

3.1 群行動モデル

1章でも述べた通り，ロボット行動の研究 [10]～[12] 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．

ロボットの群行動として，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，円形の群移動や追従に比較して群の幅が広く，単位時間に新たに掃引する末掃引領域の面積が大きいこと，また，局所的な通信のみを用いて容易に実現できることがあげられる．簡単のため，環境内ではあらかじめ形成されたロボット群が直進移動を行うとする．また，各ロボットの視野は 360 [deg] とし，衝突回避は考慮しない．隊列による群行動を以下に定義する (Fig. 2)．

- 隊列内では，進行方向 (Fig. 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. 2 の太い矢印)．見る側をフォロー，見られる側をリーダと呼ぶ．Fig. 2 ではロボット B は A のフォローで，C のリーダとなっている．

結果的に，リーダによらずに自ら進行方向を決定するロボットが1群に1台存在することになる (Fig. 2 で A)．

- 群を構成するロボット数 k を群規模とする．Fig. 2 では $k = 7$ である．また，相対距離を $c_r R$ とする ($c_r < 1$)．
- ロボット系における各ロボット群の規模 k は同一とする．

Fig. 2 The model of group behavior of robots

Fig. 3 Communication area of robot groups

3.2 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1台のロボットと考え、群間の情報伝播を2.2節の方法を応用して定式化する。

Fig. 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 ρ_g は以下のようになる。

$$A_g = R^2 \{2c_r(k-1) + \pi\}, \quad \rho_g = \frac{k}{A_g} \quad (4)$$

ここで、少なくともI-Robotを1台含む群を“I-Group”と呼び、すべての群に対するI-Groupの比率を $p_g(t)$ と定義する。 $p(t)$ は前章同様I-Robotの比率とする。Fig. 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-Robotを1台以上含む群が5個あるので $p_g(t)=5/7$ 、またI-Robotは全部で20なので $p(t)=20/(7 \times 8)$ である。

群の情報獲得確率 $I_g(t)$ 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。これは群内に存在する他の群のI-Robot数の平均で式(1)の $\rho A p(t)$ を置き換えることで求められる。群は密度 ρ/k で存在するから、群内に存在する他の群の平均の数は $\rho/k A_g$ である。また、Fig. 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のI-Robot数の平均は、 $\rho/k \{A_g \rho_g A p(t)\}$ となり、式(5)を得る。

さらに、 Δt の $p_g(t)$ の増分は、2.2節と同様に $I_g(t)$ 、N-Groupの比率 $1-p_g(t)$ 、そして速度 v に比例するから、比例定数 β_g を導入し、式(6)の群間の情報伝播の微分方程式が導出される。式(7)は指数関数の線形近似を行った式である。

$$I_g(t) = 1 - e^{-\frac{\rho}{k} A_g \rho_g A p(t)} e^{-\rho_e v A_g} \quad (5)$$

$$\frac{dp_g(t)}{dt} = \beta_g v \{1 - p_g(t)\} \left\{1 - e^{-\frac{\rho}{k} A_g \rho_g A p(t)} e^{-\rho_e v A_g}\right\} \quad (6)$$

$$\simeq \beta_g v \{1 - p_g(t)\} \left\{ \frac{\rho}{k} A_g \rho_g A p(t) + \rho_e v A_g \right\} \quad (7)$$

式(6)は、情報伝播の方程式(2)の拡張形となっており、群規模 $k=1$ とすれば、式(2)に帰着されることに注意されたい。

比例定数 β_g は、ランダム移動の場合と同様の考察により求められる[8]。ここでは、群の直進移動のみを考え、視野は

Fig. 4 The diffusion process among robot groups

360[deg]としたから、隊列の幅を W_g として Δt の掃引面積は

$$W_g v \Delta t = R \{(k-1)c_r + 2\} v \Delta t \quad (8)$$

となる。式(7)では Δt の掃引面積を $\beta_g A_g v \Delta t$ と考えている。これと式(8)が等しいから、 $\beta_g = \frac{W_g}{A_g}$ となる。

3.3 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るので、その過程を定式化する必要がある。

Fig. 4に示すように、 $p(t) < p_g(t)$ であり、 $p(t)$ はI-Groupの比率 $p_g(t)$ に近づくように変化する。群内で、1台のロボットに隣接する平均ロボット数 α は以下のようになる。

$$\alpha = 1 \cdot \frac{2}{k} + 2 \cdot \frac{k-2}{k} \quad (k \geq 2) \quad (9)$$

群内では、N-Robotの比率は $1 - p(t)/p_g(t)$ であり、単位時間にそのうちの α/k が情報を得ることになる。 Δt あたりのI-Robotの増分を考え、 $p(t)$ の微分方程式は以下のようになる。

$$\frac{dp(t)}{dt} = p_g(t) \frac{\alpha}{k} \left\{1 - \frac{p(t)}{p_g(t)}\right\} \quad (10)$$

式(6)(10)が群行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-Robotの比率 $p(t)$ を求めることができる。Fig. 5は、Table 1のパラメータを用いて、群規模 $k=3$ の場合に式(6)(10)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。群行動したほうが情報が速く伝播し、情報伝達の効率化における群行動の有効性が確認できる。

Fig. 5 Information diffusion by group behavior ($k=3$)

Table 1 Parameters of local communication system

N (Total Robot Number)	24
ρ (Robot Density)	0.0024
ρ_{ev} (Density of Event)	0.001
v (Velocity)	0.2
R (Radius of Comm. Area)	1.0
c_r (Following Distance)	0.8

4. 伝播時間と最適群規模の導出

群行動の利点として、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。イベント処理のため情報を伝達すべきロボット数を目標伝達数と呼び、 k_e とする。本章では、 k_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 4.1 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 k_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 4.2 節、4.3 節で導出する。

4.1 伝播時間の算出

前章の解析では、式 (6) (10) による Fig. 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 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 (9) の α 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 の右下 (B) のように階段状になる。

式 (6) (10) 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 $t = q(x)$ 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 (11) のようになる。

$$T(n, k) = \begin{cases} q\left(\frac{n}{N}\right) & (n \bmod k = 0) \\ q\left(\frac{ki}{N}\right) - \frac{T_b}{k}(ki - n) & (n \bmod k \neq 0) \end{cases} \quad (11)$$

ただし、 $[a]$ は a を超えない最大の整数を表す。

Table 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 (11) より求めると、Fig. 7 のようになる。

Fig. 6 Calculation of diffusion time

Fig. 7 Calculated diffusion time by group behavior

Fig. 8 Diffusion time by different group size ($k_e=6$)

4.2 最適群規模の導出 (目標伝達数一定の場合)

Fig. 8 は、目標伝達数 $k_e = 6$ の場合の、群規模 k と伝播時間 $T(k_e, k)$ の関係を式 (11) から求めたものである。

Fig. 8 で、群規模 $k = 6$ のときに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 k_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、 $k_{opt} = k_e$ となった。

Fig. 8 では、 $k > k_{opt}$ のときより $k < k_{opt}$ のほうが $T(k_e, k)$ 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、

Fig. 9 Average diffusion time T_{av} ($k_e=6.0$, $\sigma=1.0$)

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。

4.3 最適群規模の導出 (目標伝達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 k_e は一定でなく、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。

目標伝達数が i 台となる確率が、平均を k_e として $p(k_e, i)$ で与えられるとする。群規模 k のときの k_e 台のロボットへの平均の伝播時間 $T_{av}(k_e, k)$ は、式 (11) を用いて

$$T_{av}(k_e, k) = \sum_{i=1}^N p(k_e, i) T(i, k) \quad (12)$$

と求められる。よって、伝達すべきロボット台数の分布 $p(k_e, i)$ が与えられた場合、最適群規模 k_{opt} は式 (12) によって求められた $T_{av}(k_e, k)$ を最小とするような群規模 k となる。

例として、目標伝達数が正規分布で与えられる場合を考える。 k_e が i 台である確率 $p(k_e, i)$ が平均 k_e 、標準偏差 σ の正規分布 $\varphi(k_e, i, \sigma)$ で与えられるとする。Fig. 9 は、 $k_e = 6.0$ 、 $\sigma = 1.0$ について式 (11) (12) から計算した $T_{av}(k_e, k)$ 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 $k_{opt} = k_e$ とはならないことが分かる。

一般には、前節の Fig. 8 で、 $k < k_{opt}$ のときに $T(k_e, k)$ の増加のしかたが $k > k_{opt}$ よりも大きいため、 σ 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、 k_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 (11) (12) から解析的に求めることができることが示された。

5. 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. 10 のような 100×100 の領域にロボットが 24 台存在する環境で、群行動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 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本論文では扱わない。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。3.1 節で述べたように、

Fig. 10 The environment of simulation

Fig. 11 Simulation results of diffusion process ($k=3$) Fig. 12 Simulation results of diffusion process ($k=6$)

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。

本研究では、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行動を実現した。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。

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。

5.1 情報伝播の方程式の検証

I-Robot 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. 11, Fig. 12 にそれぞれ示す。図中で、Theory は式 (6) (10) 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 (4) では群の通信範囲の面積 A_g を長方形で近似したので、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、群行動による情報伝播の方程式の有効性が示されている。

5.2 伝播時間と最適群規模の検証

4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. 13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。

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. 13のシミュレーション結果は、Fig. 7に示す解析による理論値と情報伝播のモデル化誤差の範囲内でほぼ一致している。

目標伝達数 k_e に情報を伝達する場合、群規模 k と伝播時間 $T(k_e, k)$ の関係を調べると、Fig. 14 のようになる。3.1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

Fig. 13 Diffusion time by group behavior

Fig. 14 Diffusion time by different group size ($k_e=6$)

Fig. 15 Average diffusion time T_{av} ($k_e=6.0, \sigma=1.0$)

で理論値と傾向が一致し、 $k_{opt} = k_e$ となっている。

さらに、4.3節のように目標伝達数 k_e が正規分布で与えられるとき、 k_e の平均が6、標準偏差 σ が1.0の場合について群規模 k と平均の伝播時間 $T_{av}(k_e, k)$ の関係を Fig. 15 に示す。

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

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。

6. 結 論

本論文では、多数のロボットが局所的に通信する系において、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行動が有効であることを解析的に示した。解析では、ランダム移動するロボット間の情報伝播の方程式を群に拡張し、群間・群内に分けることにより定式化した。

さらに、伝播時間と群規模の関係を調べ、目標とする伝達ロボット数が与えられると、それに情報を最も速く伝達する最適な群規模が存在することを示し、解析的に導出する手法を提案した。また、この手法は目標伝達数にばらつきがあっても確率分布で与えられる場合にも応用でき、同様に最適な群規模を解析的に求めることができることを示した。

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。

参 考 文 献

- [1] 石田慶樹, 浅間一, 尾崎功一, 松元明弘, 遠藤勲: “自立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.
- [2] S. Yuta and J. Iijima: “State Information Panel for Inter-processor Communication in an Autonomous Mobile Robot-Controller,” Proc. IEEE Workshop on Intelligent Robots and Systems, 1990.
- [3] F.R. Noreils: “An Architecture for Cooperative and Autonomous Mobile Robots,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2703-2709, 1992.
- [4] Jing Wang: “On Sign-board Based Inter-Robot Communication in Distributed Robotic Systems,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1045-1050, 1994.
- [5] 植山剛, 福田敏男, 新井史人, 杉浦恒彦, 酒井彰, 上杉武弘: “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.
- [6] F. Hara and S. Ichikawa: “Effects of Population Size in Multi-Robots Cooperative Behaviors,” Proc. of Int. Symp. on Distributed Autonomous Robotic Systems, pp.3-9, 1992.
- [7] T. Arai, E. Yoshida and J. Ota: “Information Diffusion by Local Communication of Multiple Mobile Robots,” Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, vol.4, pp.535-540, 1993.
- [8] 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.
- [9] E.O. ウィルソン: 社会生物学 (第2巻), 伊藤監訳, pp.291-319, 思索社, 1983.
- [10] L. Steels: “Cooperation between Distributed Agents through Self-Organization,” Decentralized AI, Y. Demazeau and J.-P. Muller,

eds., North Holland, pp.175-196, 1990.

- [11] A. Drogoul and J. Ferber: "From Tom Thumb to the Dockers: Some Experiments with Foraging Robots," Proc. 2nd Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior, pp.451-459, 1993.
- [12] D.W. Gage: "Sensor Abstractions of Support Many-Robot Sys-

tems," Proc. of SPIE Mobile Robots VII Conference, vol.1831, pp.235-246, 1992.

- [13] 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.

吉田英一 (Eiichi Yoshida)

1967年11月8日生。1993年東京大学工学系大学院精密機械工学専攻修士課程修了。現在同博士課程在学中。1990～91年スイスローザンヌ工科大学に留学。ロボット系の計画, 通信の研究に従事。

(日本ロボット学会学生会員)

新井民夫 (Tamio Arai)

1947年8月4日生。70年東京大学工学部精密機械工学科卒業, 77年同博士課程修了。工学博士。87年東京大学工学部精密機械工学科教授。79年英国エディンバラ大学人工知能学科研究員。産業用ロボット言語の標準化活動を推進。自動組立, 移動ロボットなどの研究に従事。精密工学会理事, 自動化

推進協会会長。

(日本ロボット学会正会員)

三木友由 (Tomoyoshi Miki)

1971年11月19日生。1994年東京大学工学部精密機械工学科卒業。現在, 中村合同特許法律事務所に勤務。

太田 順 (Jun Ota)

1965年2月19日生。89年東京大学工学系大学院精密機械工学専攻修士課程修了。同年新日本製鉄(株)入社。91年東京大学工学部助手, 94年同講師。複数台の移動ロボットの動作計画, 作業計画, 協調制御の研究に従事。精密工学会, IEEE 会員。博士(工学)。

(日本ロボット学会正会員)