多数の移動ロボットの局所的通信システムの性能評価* (大域的通信との比較)

吉田 英一^{*1}, 新井 民夫^{*2}, 太田 順^{*2}

An Evaluation Method of Local Communication System in Many Mobile Robots (Performance Comparison with Global Communication)

Eiichi YOSHIDA, Tamio ARAI and Jun OTA

This paper aims to give an analytical view on what kind of inter-robot communication to use for cooperation in distributed mobile robotic systems. The efficiency of local and global communication is compared based on the analysis of information transmission time to multiple robots. Using local communication, the information about a specific task is diffused between robots gradually. We analyze this diffusion and derive the transmission time required for necessary robots to obtain the information. Global communication by time-division access is also analyzed to compare the transmission time. The analysis concludes that local communication is more effective than global one in environments where cooperative tasks are executed by multiple mobile robots in a distributed manner.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Moving Robot, Communication Equipment, Multi-Robot Cooperation, Communication Efficiency

1. 序 論

近年, 多数の移動ロボットが群として協調し, 環境の探索や重量物の搬送など, さまざまな作業を実現することが期待されている. 協調をスムーズに行うために, ロボット間の効率的な情報伝達を実現する通信システムの設計が重要な課題となっている.

従来は, 複数といっても高々数台のロボットが対象であったため, ロボットシステムの通信を一元的に管理する大域的通信が用いられた⁽¹⁾⁽²⁾. しかし, より高度な作業を行ったり, 複数作業を並列に実行したりする場合には, さらに多数のロボットの協調が必要となる. 最近では, 10 台以上のロボットを統合した研究も見られるようになってきた⁽³⁾⁽⁶⁾.

多数ロボット協調における通信は, 図 1 に示す通り

- (i) 作業周知: 必要数のロボットに作業の存在を周知
情報内容: 複数の作業情報 (例: 作業の種類や位置)
- (ii) 作業実行: 作業中のロボット間情報伝達
情報内容: 作業実行状況 (例: 地図生成作業における地図情報)

に大きく分類できる. これには, 環境探索・地図生成や協調搬送など, 多数ロボットによる協調作業におけ

Fig. 1 Two types of communication for cooperation

る通信の多くが当てはまり, 広く適用可能である.

いずれの通信においても, 情報を必要なロボットになるべく短い時間で伝達することが重要となる.

これら多数のロボットの通信に, 従来から用いられてきた大域的通信を適用すると,

- 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.
- 中継局が通信媒体を集中管理すると, 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.

といったことが主な要因となって, 多数のロボットが

* 原稿受付 1997年2月7日.

^{*1} 正員, 機械技術研究所 (☎ 305-8564 つくば市並木1-2).

^{*2} 正員, 東京大学工学系研究科 (☎ 113-8656 東京都文京区本郷7-3-1).

存在する場合には適さない。

そのため、最近では、多数の移動ロボットに局所的な通信を導入する研究も多く見られるようになってきた(4)~(7)。筆者らは、周囲の限られた範囲のロボットにのみ情報を伝達する単純な局所ブロードキャスト方式の通信を導入した。この局所的通信手法の利点には、赤外線⁽⁸⁾や画像⁽⁹⁾などを用いて実現が容易であること、通信が並列に行なわれ、不必要な通信処理の時間が減少することなどがある。

これまでの研究では、まず局所的な通信による複数ロボット間の情報伝播の解析を行い⁽¹⁰⁾、多数のうち作業に必要なロボットへの情報伝達に要する時間を解析的に求めた。また、伝達時間を最小とする局所的通信範囲の設計も行った⁽¹¹⁾。

これらは局所的通信の設計の解析的な指針を与えているが、大域的な通信との比較でその効率を示してはいない。解析に基づいて大域・局所的通信の比較を行った研究は他にも見られない。

よって本論文では、評価関数の一つとして、協調作業実行の効率を大きく左右する次の伝達時間 T をとり、大域的・局所的通信の性能の評価を行う。

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平均時間 T

これにより、どのような場合にどちらの通信が有利となるのかを、解析に基づいて議論する。

2. 局所的通信の解析

2.1 局所的通信のモデル 本論文では、図2に示す単純な局所的通信のモデルを用いる。このモデルでは、通信は次のように行われる。

- 各ロボットは、情報を「パケット」の形で、確率 p_e で面積 A の範囲に出力する。
- ロボットがセンサや他のロボットから伝達された情報を処理して行動を決定するためのサンプリング時間を1単位時間とする。1単位時間は、パケット伝達に十分な長さとする。
- ロボットは1単位時間に複数台から情報を獲得できるとする。その台数の上限を c とする。

Fig. 2 Local Communication Model

また、複数から情報の出力を受けたとき、全く情報を獲得できない衝突ありの場合と、 c 台からは獲得できる衝突なしの場合を考える。

情報パケットには、(i) 作業周知の通信では、各作業情報を作業地点や種類に限定し、複数の情報を含められるようにする必要がある。また(ii) 作業時の通信では、伝達する情報が多いので、各作業ごとに地図などの情報の形式を定義し、必要な部分だけ更新して出力するようにする。よって、パケットの容量は(i)では複数の作業情報を含められる容量、(ii)では作業によって決まる情報形式の容量とする。

1章で示した(i)(ii)において、局所的な情報伝達と移動により、図3のように、情報は複数のロボット間に「また聞き」の形で伝わっていく。これを、情報の伝播と呼ぶ。先に示した容量のパケットを用いることにより、(i)の作業周知、(ii)の作業時の通信において、複数の作業情報、複数のロボットからの情報は、それぞれ独立に伝播すると考えてよい。

ここで、ある特定の情報 I に注目したときに、その情報を獲得したロボットをI-ロボット(Informed)、獲得していないロボットをN-ロボット(Not Informed)と呼ぶことにする。情報発生からの時刻 t におけるI-ロボットの比率を情報伝播率と呼び、 $r(t)$ で表す。評価指標である情報伝達時間 T は、情報が作業に必要なロボット数に伝達されるまでの単位時間数となる。

以下に主なパラメータ・評価量をまとめておく。

- ρ : ロボット密度
- R_c, A : 通信範囲の半径, 面積
- x : 通信範囲内の平均ロボット数 ($=\rho A$)
- p_e : 各ロボットからの情報出力確率
- c : 単位時間に情報を獲得できる最大ロボット数
- $r(t)$: 情報伝播率(時刻 t でのI-ロボットの比率)
- v : ロボットの移動速度
- m : 系のロボット総数
- n_e : 情報を伝達すべきロボット数
- A_E : 作業領域の面積

Fig. 3 Information diffusion among robots

2.2 情報伝達時間の解析 これまでの研究で、伝達時間を最小とする最適な通信範囲の設計方法を示した⁽¹¹⁾。本論文では、この最適な通信範囲を用いて局所的通信における情報伝達時間を計算する。

また解析の対象とする協調作業は、ランダム探索作業とする。これは、(i)の作業周知の通信では、作業情報を集めるため常に用いられる。具体的な作業においても、地図生成⁽¹²⁾やサンプル採取作業⁽¹³⁾など、多くの作業で利用される基本的な移動方法である。協調搬送など他の作業に対しても、同様に以下の解析を適用することができる⁽¹¹⁾ので、本論文では省略する。

最適な通信範囲については、これまでに示した手法を簡単に示しておくにとどめる。

まず、移動を考慮した複数への情報伝播過程を $r(t)$ に関する微分方程式で表す。微小時間 Δt あたりの $r(t)$ の増分 $\Delta r(t)$ は、時刻 t で新たに情報を獲得するロボットの比率である。情報獲得確率 P を時刻 t において情報を獲得する確率と定義すると、 P は c , p_e , x , そして時刻 t の関数となる。解析の簡潔性のため、ここでは情報出力範囲の面積 A でなく、その範囲に存在する平均ロボット数 x を用いている。

以上の考察から、増分 $\Delta r(t)$ は、 N -ロボットの比率 $1-r(t)$ と情報伝達率 P に比例することになる。よって、情報伝播過程は、次の情報伝播の方程式

$$\frac{dr(t)}{dt} = \beta(v, x) P(c, p_e, x, t) \{1 - r(t)\} \quad (1)$$

に従う。この有効性は、シミュレーションによりすでに示されている⁽¹⁰⁾。 $\beta(v, x)$ は移動の影響を表す。 βP の部分を最大化すれば情報伝播速度 $dr(t)/dt$ を最大とする x_{opt} が求まり、 $x = \rho A$ の関係から最適な通信範囲 A_{opt} が導出できる。衝突ありのとき、 $P(c, p_e, x, t)$ は

$$P(c, p_e, x, t) = e^{-p_e x} \sum_{i=0}^c \frac{(p_e x)^i \{1 - (1 - r(t))^i\}}{i!} \quad (2)$$

で与えられる⁽¹¹⁾。局所的通信の有効性を示すため、ここでは最も通信能力が低い $c=1$ の場合を考える。最適な通信範囲を与える x である x_{opt} を用いると、 $P(c, p_e, x, t)$ は次のような $P(t)$ の形で表される。

$$P(t) = p_e x e^{-p_e x} r(t) = x_{opt} e^{-x_{opt}} r(t) \quad (3)$$

ランダム探索では、ロボットが τ [単位時間]ごとに θ [rad]の範囲で角度を変化させる移動方法を用いることにする。式(1)の係数 $\beta(v, x_{opt})$ は、ランダム移動により単位時間に掃引される面積 $S(v)$ を用い、

$$\beta(v, x_{opt}) = \frac{1 - e^{-\rho S(v)}}{1 - e^{-x_{opt}}} \quad (4)$$

$$\text{ただし } S(v) = 2R_c v \frac{(\tau - 1) + a(\theta)}{\tau}$$

$$a(\theta) = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \cos \alpha d\alpha$$

Fig. 4 Transmission time $T_{loc}(n_e)$ ($m=50$)

となる⁽¹⁰⁾。情報出力範囲の半径 R_c は、 $\sqrt{\frac{x_{opt}}{\rho\pi}}$ である。

式(3), (4)から、情報伝播の方程式(1)は、次のロジスティック方程式となり、解は式(6)のロジスティック関数である。

$$\frac{dr(t)}{dt} = \beta(v, x_{opt}) x_{opt} e^{-x_{opt}} r(t) \{1 - r(t)\} \quad (5)$$

$$r(t) = \frac{1}{1 + \frac{1 - r(0)}{r(0)} \exp\left(-\frac{\beta x_{opt}}{e^{x_{opt}}} t\right)} \quad (6)$$

ただし $r(0)$ は時刻0でのI-ロボットの比率

式(6)から、評価関数である n_e 台への情報伝達時間 $T_{loc}(n_e)$ は $r(t) = \frac{n_e}{m}$ となるまでに必要な時間として

$$T_{loc}(n_e) = -\frac{e^{x_{opt}}}{\beta x_{opt}} \log \left\{ \frac{m - n_e}{(m - 1)n_e} \right\} \quad (7)$$

と求められる。最初に一台のロボットが情報を出力するとして、 $r(0) = \frac{1}{m}$ として計算した。パケットには複数の情報が含まれ、局所通信ではそれらが独立に伝播する。よって伝達時間 $T_{loc}(n_e)$ は情報発信台数 n_f には依存しないことに注意されたい。

速度 v の値を変えたとき、 n_e に対する $T_{loc}(n_e)$ の計算例を図4に示す。ロボット総数 $m=50$ 、作業領域の面積 $A_E=400$ である。伝達すべき台数 n_e に対して $T_{loc}(n_e)$ も単調増加している。また、速度 v が大きければ伝達速度は速くなり、 $T_{loc}(n_e)$ の値が小さくなることも分かる。ここで導出された情報伝播時間は、4章において大域的な通信と比較し、評価を行う。

3. 大域的通信の解析

3.1 大域的通信のモデル 大域的な通信には、CAR-Net⁽¹⁾のトークンリング方式、時分割方式⁽¹⁴⁾、ランダムアクセス割り当て方式⁽⁷⁾などがある。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う。

例としてロボット総数 $m=20$ 中の $n_f=5$ 台が情報を伝達しようとする場合を考える。確率を用いた計算によ

れば⁽¹⁵⁾, 5台全てが送信し終わるまでに平均で61.04単位時間を要する。

これに対し, トークンリング方式や時分割方式は, 最大でも m (ロボット総数) 単位時間内に送信権が獲得できる。前述の例でも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伝達効率がよい。よって本論文では, 比較対象の大域的通信としてトークンリング・時分割方式方式を考え, 次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。
- ある一台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。

通信の様子を図5に示す。情報を出力する n_f 台のロボットは任意であると考え, 総数 m 台のロボットに順番に送信権を割り当てていき, n_f 台が送信した時点で通信は終了する。図5の例では, 総数 $m=20$, $n_f=5$ である。情報出力を希望する2,5,10,12,17が情報を出力したとき通信は終了し, $T_{glo}=17$ となる。

大域的な通信においては, 送信権が得られれば, 出力した情報は大域的に全てのロボットに伝達される。よって, (i) 作業情報周知, (ii) 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。このように, 大域的通信における情報伝達時間 T_{glo} は, n_e には依存せず, $T_{glo}(n_f)$ と表すことができる。

$T_{glo}(n_f)$ は, 時刻 $1, 2, \dots, m$ に1台ずつ任意にロボットを選び, n_f 台が送信するまでの時間の期待値で,

$$\begin{aligned} T_{glo}(n_f) &= \sum_{i=n_f}^n \Pr[\text{時刻 } i \text{ で } n_f \text{ 台が送信}] \times i \\ &= \sum_{i=n_f}^n \underbrace{\Pr[\text{時刻 } i-1 \text{ までに } n_f-1 \text{ 台が送信}]}_{\text{A}} \\ &\quad \times \underbrace{\Pr[\text{時刻 } i \text{ で } n_f \text{ 台目が送信}]}_{\text{B}} \times i \end{aligned} \quad (8)$$

Fig. 5 Model of global communication

Fig. 6 Transmission time $T_{glo}(n_f)$ ($m=50$)

と計算される。 $\Pr[\mathcal{E}]$ は, 事象 $\mathcal{E}$ が生起する確率を表す。上式の確率 A の部分は, ロボット総数 m 台中から $i-1$ 台を選び, 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, 次の超幾何分布に従う⁽¹⁶⁾。

$$\begin{aligned} \Pr[\text{時刻 } i-1 \text{ までに } n_f-1 \text{ 台が送信}] \\ = \frac{i-1 C_{n_f-1} \times n-i-1 C_{n_f-(n_f-1)}}{n C_{n_f}} \end{aligned} \quad (9)$$

式(8)の B の部分は, 時刻 $i-1$ の時点でまだ送信権を割り当てられていない $m-(i-1)$ 台のうち, 最後の1台が時刻 i で送信権を得る確率で $\frac{1}{m-(i-1)}$ である。これと式(9)を式(8)に代入し, $T_{glo}(n_f)$ は

$$T_{glo}(n_f) = \sum_{i=n_f}^m \frac{i-1 C_{n_f-1}}{m C_{n_f}} \times i \quad (10)$$

となる。ロボット数 $m=50$ 台のときについて, $T_{glo}(n_f)$ と情報発信ロボット数 n_f の関係を図6に示す。

図6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 $T_{glo}(n_f)$ は急激に m に近付くことが分かる。ロボット総数 $m=50$ のとき, $n_f=2$ で34, $n_f=5, 10$ のとき $T_{glo}(n_f)=42.5, 43.4$ となっている。

4. 伝播時間を用いた評価

1章で述べたように, 本章では

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平均時間 T

を用いて局所的・大域的な通信を比較する。

4.1 評価におけるパラメータ T の値として, 2, 3章の解析でそれぞれ導出した $T_{loc}(n_e)$, $T_{glo}(n_f)$ を比較する。2.2節で述べたように, 局所的な通信に対しては, その有効性を示すため, 表1に示す最も能力の低い, 衝突あり・ $c=1$ の場合を考える。

また, m, n_f, n_e の値は, 表2に示す通りである。ロボット総数 $m=50$ 台とし, n_f, n_e とも10台, 20台(それぞれ総数 $m=50$ 台の20%, 40%に相当)の場合を考える。大域的通信においては, $n_f=1$ の場合も考える。

Table 1 Parameters of local communication

A_E : Area of workspace	400 (20×20)
c : Information acquisition capacity	1
p_e : Information output probability	1.0
x ($=\rho A$) : Communication area	optimal area x_{opt}
ϕ : Visible area	360[deg]
v : Velocity of motion	0.5, 0.8
θ, τ : Parameters of random search	3,90[deg]

Table 2 Parameters for evaluation

m (Total robot number)	50
n_f (No. of robots requiring transmission)	1, 10, 20
n_e (No. of robots to be transmitted)	10, 20

4.2 情報伝達時間の比較 図7は比較の例で、横軸に情報を伝達すべきロボット数 n_e 、縦軸には伝達時間 T をとる。大域的、局所的通信における T を、それぞれを実線(Global)、太い点線(Local)で示す。大域的通信では、伝達時間は n_e には依存しないのでグラフは直線となり、 n_f の増減により上下に移動する。

二つのグラフの交点の両側で $T_{loc}(n_e)$ 、 $T_{glo}(n_f)$ を比較すると、この交点の n_e の値よりも n_e が

- 小さいときには局所的通信が有効
- 大きいときには大域的通信が有効

であることがわかる。

図8と図9のグラフは、表1、表2のパラメータを用いて計算した伝達時間を示す。

大域的な通信に対する $T_{glo}(n_f)$ は、式(10)から求められる。一台のロボットしか送信を希望しない場合、すなわち $n_f=1$ の場合でも、伝達には伝達には平均して

Fig. 7 Evaluation of local/global communication

Fig. 8 Comparison of transmission time ($v=0.5$) Fig. 9 Comparison of transmission time ($v=0.8$)

25.5単位時間必要となる。 m 台全部が送信するまでに $T_{glo}(m) = m = 50$ 単位時間を要するが、これはその約1/2に相当する。また、 n_f が m の20%、40%の場合には、 $T_{glo}(n_f)$ はさらに $m(=50)$ の値に近づく。

一方、局所的通信における伝達時間 $T_{loc}(n_e)$ は、 n_e に関して単調増加し、また、速度 v が増加すると、同じ台数に伝達するまでの時間が短くなる。

図8、図9から、次のことが分かる。

- (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
- (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

上記の(1)は、局所通信が、多くのロボットがグループを作って協調作業を並行して進める分散的な作業環境に適していることを示している。図8では、10台(総数 m の20%)に伝達するとき、局所的通信で速度 $v=0.5$ 程度でも、大域的通信の $n_f=1$ のときより情報伝達が速いことがわかる。

逆に(2)は、大域通信は、1台から多数に指令が与えられる集中的な作業環境に有効であることを示す。図9から、総数 m の50%に当たる25台に伝達する場合、移動速度を $v=0.8$ まで増加させても、 $n_f=1$ の大域的通信のほうが局所的通信よりも伝達時間が短い。

Fig. 10 Critical velocity v_c ($n_e = 0.2m$)

これら (1), (2) は, 結果としては多数ロボットにおける通信に関する一般的な見解と同様である. しかしながら本論文では, このように一般に分散型の局所的通信の利点とされていることを, 解析的に裏付けることができた. この点で, 多数ロボットの通信システム設計に与える本論文の意義は大きいといえる.

4.3 臨界移動速度に関する考察 図 8, 図 9 から, 伝達時間の評価において, 局所的通信の移動速度 v が重要な役割を果たしていることがわかる.

n_f , n_e が与えられたとき, どれだけの移動速度 v があれば, 局所通信が大域通信よりも有利になるかを示す v を臨界移動速度 v_c と呼ぶことにする. v_c は, 式 (10) の $T_{glo}(n_f)$ と式 (4), (7) から求める $T_{loc}(n_e)$ を用い, $T_{glo}(n_f) = T_{loc}(n_e)$ を数値的に解くことによって得られる. 図 10 は, $n_e = 0.2$ の場合に, この v_c を, ロボット総数 m と n_f に対してプロットしたものである. 他のパラメータは表 1, 表 2 と同じである.

図 10 から, 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, 臨界移動速度 v_c は単調減少することが確認できる.

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, n_e 台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有効となるかを知ることができる. これは, 多数の移動ロボット協調における通信システムの設計に活用できる.

5. 結 論

本論文では, 多数ロボットの協調における局所的通信の性能を, 情報伝達時間を評価関数として大域的通信と比較し, 評価した.

解析の結果, 局所的・大域的通信において, 必要なロボットに情報を伝達するための時間を解析的に求めることができた. これにより, 伝達時間による両者の定量的な比較が可能となり, 与えられた作業環境に対してどちらの通信が有利かを知ることができる.

この評価から, 局所的な通信は分散的な協調に, また大域的な通信は集中的な作業実行に有効であることが解析的に確かめられた. これらの解析結果は, 多数のロボットの協調において, 作業や環境の性質に応じた, 効率的な通信システムの設計に有用となる.

参考文献

- (1) プレムウッティ, 油田, 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 (1991), 591-594.
- (2) 金森, 梶谷, 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 (1992), 287-290.
- (3) M. J. Mataric, Designing Emergent Behaviors: From Local Interactions to Collective Intelligence, *Proc. 2nd Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior* (1993), 432-441.
- (4) 福田, 川内, マーチン, 浅間, 動的な最構成可能ロボットシステムに関する研究 (第 3 報, セル構造化ロボット CEBOT の認識, 通信システム), 機論 **56**-523, C (1989), 709-716.
- (5) 福田, 川内, 浅間, 動的な最構成可能ロボットシステムに関する研究 (第 4 報, 分散知能システムとしての Cellular Robotics (CEBOT) の通信量と知識量による解析の評価), 機論 **56**-532, C (1991), 3311-3318.
- (6) S. Ichikawa, F. Hara, An Experimental Realization of Cooperative Behavior of Multi-Robot System, *Distributed Autonomous Robotic Systems* (1994), 224-234, Springer-Verlag.
- (7) J. Wang, Resource Sharing in Distributed Robotic Systems Based on a Wireless Medium Access Protocol (CSMA/CD-W), *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems* (1994), 784-791.
- (8) 鈴木, 新井, 琴坂, 浅間, 嘉悦, 遠藤, マルチ移動ロボット環境における衝突回避のための局所的な通信を利用したセンサシステムの開発, 機論 **62**-692, C (1996), 3752-3758.
- (9) 新井, 木村, 前田, 太田, 梅田, 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, **12**-3 (1994), 472-478.
- (10) 新井, 吉田, 太田, 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, **12**-6 (1994), 886-892.
- (11) 吉田, 山本, 新井, 太田, 倉林, 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, **15**-3 (1997), 394-401.
- (12) K. Singh, K. Fujimura, Map Making by Cooperating Mobile Robots, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2 (1993), 254-259.
- (13) L. Steels, Cooperation between Distributed Agents through Self-Organization, *Decentralized AI*, Y. Demazeau and J. -P. Muller, eds., (1990), 175-196, North Holland.
- (14) 矢向, 岩沢, 安西, 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, **12**-8 (1994), 1157-1165.
- (15) R. M. Metcalfe, Steady-state Analysis of a Slotted and Controlled ALOHA System with Blocking, *Proc. 6th Hawaii Conference of System Science*, (1973), 375-380.
- (16) 岡本栄一, 数理モデル, (1979), 22-33, 新曜社.