

4.3.2.1 情報獲得の確率の導出

情報獲得の確率 P は、ある1台のロボットに注目したとき、周囲で出力された情報を獲得できる確率である。

通信範囲が x であるとき、情報の出力範囲内に i 台のロボットが存在する確率を $\text{Prob}[i|i \in S(x)]$ と定義した。通信範囲に i 台のロボットが存在し、そのうちの j 台が情報を発している確率を Q_{ij} とする。各ロボットが確率 p_e で情報を発信するので、 Q_{ij} は、 $\text{Prob}[i|i \in S(x)]$ と二項分布の積で表され、 p_e 、 x の関数となる。これを $Q_{ij}(p_e, x)$ とおくと、

$$Q_{ij}(p_e, x) = \text{Prob}[i|i \in S(x)] {}_iC_j p_e^j (1 - p_e)^{i-j} \quad (4.6)$$

で表される。

そして、情報を獲得するロボットに関して、生起する事象は次のようになる。

E_0 : 周囲にロボットが1台も存在しない

E_1 : 周囲にロボットが存在するが情報を発していない

E_2 : 周囲のロボットが情報を発しているが、その情報は獲得できない

E_3 : 周囲のロボットが情報を発しており、その情報を獲得できる

これらは互いに排反な事象である。これを、Fig. 4.16に示す。それぞれの事象 E_i が生起する確率を、

$$\begin{cases} P_I(E_i) & (\text{衝突あり}) \\ P_N(E_i) & (\text{衝突なし}) \end{cases}$$

とする。

ここで事象 E_3 が生起する確率 $P_I(E_3)$ 、 $P_N(E_3)$ が情報の伝達が成功する確率を表す。すなわち、情報獲得の確率 P_I 、 P_N はそれぞれ $P_I(E_3)$ 、 $P_N(E_3)$ に等しい。

式(4.6)を用いて、衝突のあるときのそれぞれの事象が生起する確率 $P_I(E_i)$ は

$$P_I(E_0) = Q_{00}(p_e, x) \quad (4.7)$$

$$P_I(E_1) = \sum_{i=1}^{\infty} Q_{i0}(p_e, x) \quad (4.8)$$

$$P_I(E_2) = \sum_{i=c+1}^{\infty} \sum_{j=c+1}^i Q_{ij}(p_e, x) \quad (4.9)$$

$$P_I(E_3) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^i Q_{ij}(p_e, x) + \sum_{i=c+1}^{\infty} \sum_{j=1}^c Q_{ij}(p_e, x) \quad (4.10)$$

となる。

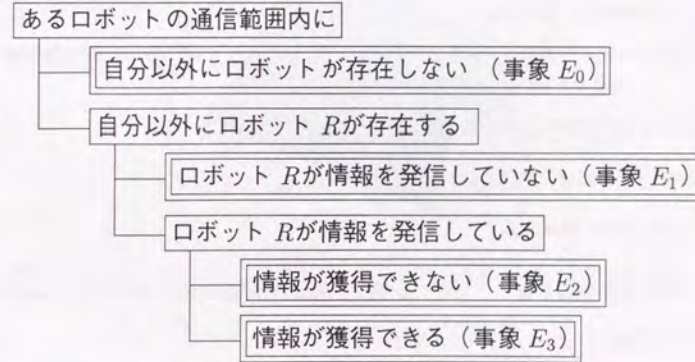
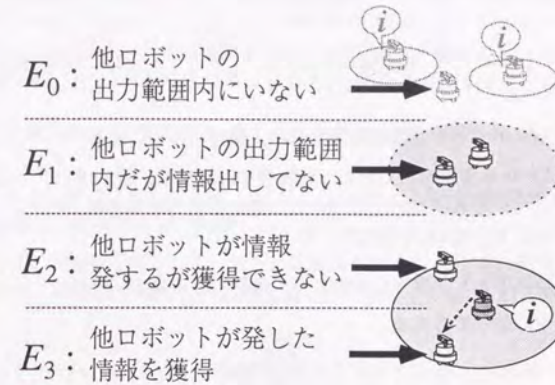


Fig. 4.16 情報を獲得するロボットの可能な事象

$P_I(E_i)$ の導出手順を以下に示す。以下の説明で、 i 、 j は式(4.6)において

i : 通信範囲に存在するロボット台数
 j : i 台のうち、情報を出力しているロボット台数

を示す。 c は、最大情報獲得台数である。

$P_I(E_0)$: E_0 は周囲にロボットが存在しない事象である。

式(4.6)で $i=j=0$ 、すなわち $Q_{00}(p_e, x)$ 。

$P_I(E_1)$: E_1 は周囲にロボットが $i(\geq 0)$ 台存在するが、1 台も情報が出力されていない場合。

式(4.6)で $j=0$ として、 $Q_{i0}(p_e, x)$ となる。これの $i=1, 2, \dots$ の総和をとって式(4.8)を得る。

$P_I(E_2)$: 他のロボットが情報を発信するが、獲得できない場合。

$c+1$ 台以上から情報の出力があった場合を計算する。式(4.6)で、 i は $c+1$ 以上である。そして、それぞれの i について、情報を出力する台数 j も $c+1$ 以上である場合の総和をとり、式(4.8)を得る。

$P_I(E_3)$: 他のロボットが情報を発信して、獲得できる場合。

二つの場合に分けて考える。

- (1) $i \leq c$ の場合。つねに c 台以下からしか情報が出力されないの、 $i \leq c, j \leq i$ の全の場合について情報が獲得可能である。この i, j の範囲で式(4.6)の $Q_{ij}(p_e, x)$ の総和をとればよい。
- (2) $i \geq c+1$ の場合。 i 台中、情報を出力する台数 $j \leq c$ でないと情報が獲得できない。 $i \geq c+1, j \leq c$ の場合について総和をとる。

$P_I(E_3)$ は、これら二つの総和を足し合わせたものとなる。

衝突のないときには、 $P_N(E_i)$ は、

$$P_N(E_0) = Q_{00}(x, p_e) \quad (4.11)$$

$$P_N(E_1) = \sum_{i=1}^{\infty} Q_{i0}(x, p_e) \quad (4.12)$$

$$P_N(E_2) = \sum_{i=c+1}^{\infty} \sum_{j=c+1}^i \frac{j-c}{j} Q_{ij}(p_e, x) \quad (4.13)$$

$$P_N(E_3) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^i Q_{ij}(p_e, x) + \sum_{i=c+1}^{\infty} \sum_{j=1}^c Q_{ij}(p_e, x) + \sum_{i=c+1}^{\infty} \sum_{j=c+1}^i \frac{c}{j} Q_{ij}(p_e, x) \quad (4.14)$$

となる。

この計算では、 $P_N(E_0), P_N(E_1)$ は衝突ありの場合の $P_I(E_0), P_I(E_1)$ と同様である。

以下に、 $P_N(E_2), P_N(E_3)$ の導出について簡単に説明する。

$P_N(E_2)$: ある一つの情報に注目して、それが獲得できない確率を計算する。衝突が生じないので、 j 台中 c 台からは情報が獲得でき、残りの $j-c$ 台からは獲得できない。すなわち、ある一つの情報に注目したとき、それを獲得できない確率は $\frac{j-c}{j}$ である。

よって、式(4.6)の i, j の組が生起する確率 $Q_{ij}(p_e, x)$ に $\frac{j-c}{j}$ を乗じたものの総和を $i \geq c+1, i \geq j \geq c+1$ の範囲でとり、式(4.13)を得る。

$P_N(E_3)$: 衝突ありの場合に情報を獲得できるならば、衝突なしでも獲得できる。よって、式(4.10)の $P_I(E_3)$ に、 $j \geq c+1$ の場合でも衝突がないことにより情報を獲得できる項を加えればよい。この項は、 $P_N(E_2)$ の計算と同様にして、ある情報を獲得できる確率 $\frac{c}{j} Q_{ij}(p_e, x)$ の総和となる。これと $P_I(E_3)$ との和をとり、式(4.14)を得る。

以上の計算結果を用いて、衝突あり、なしの場合の情報獲得の確率 P_I, P_N は、 $P_I = P_I(E_3), P_N = P_N(E_3)$ となる。

式(4.10), (4.14) から分かるように、 $P_I(E_3), P_N(E_3)$ は最大情報獲得数 c 、情報出力確率 p_e 、通信範囲 x の関数であり、 $P_I(c, p_e, x), P_N(c, p_e, x)$ となる。

ここで、ランダム探索を例として、最大情報獲得台数 $c=1$ のとき、衝突ありの場合の情報獲得の確率 P_I と情報出力確率 p_e 、通信範囲 x との関係を Fig. 4.17 に示す。

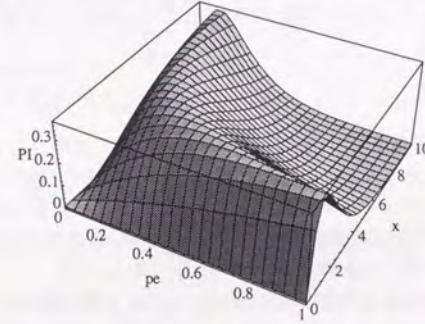


Fig. 4.17 情報獲得の確率 P_I と通信範囲 x 、情報出力確率 p_e の関係 (衝突あり, $c=1$)

以上の解析により、情報獲得の確率 P_I, P_N を、それぞれ c, p_e, x の関数として求めることができた。

4.3.3 情報獲得の確率の導出 (複数台に対する伝達)

Fig. 4.6 に示したように、複数台への情報伝播を考慮した場合の情報獲得確率を導出する。

本節の冒頭で述べたように、この場合には、注目する情報の伝播率によって、 P の値が異なってくる。時間 t における情報の伝播比率は $p(t)$ であるから、情報獲得の確率 P は $P(c, p_e, x, t)$ となり、時間 t にも依存する。

よって、ここでの目的は、

P を c, p_e, x, t の関数 $P(c, p_e, x, t)$ として導出する

ことである。

1台に対する情報伝達に関して、 P を導出するのに用いた4.3.2項の手法を拡張することにより、これを求める。 P の変数となるパラメータの定義は、Table 4.3に示した通りである。

さて、4.3.2項では、衝突あり・なしの場合の情報獲得の確率 P を P_I, P_N として、それぞれ式(4.10)、(4.14)の形で求めた。

情報の伝播比率 $p(t)$ は、ある情報内容 I に注目したとき、時間 t において、情報 I を獲得したI-ロボットが全体のどれだけの比率であるかを示す。このとき、ロボットが情報パッケージを獲得したとき、その中に情報 I が含まれているかどうかを考える。

式(4.6)の $Q_{ij}(p_e, x)$

$$Q_{ij}(p_e, x) = \text{Prob}[i|i \in S(x)] {}_iC_j p_e^j (1-p_e)^{i-j}$$

は、あるロボット r の通信範囲に i 台のロボットが存在し、そのうち j 台のロボットが情報を出力している確率であった。この情報を出力している j 台のロボットのうち、少なくとも1台情報 I に関するI-ロボットがあれば、衝突が生じないとき r は情報 I を獲得することができる。時間 t で情報 I に関するI-ロボットの比率が $p(t)$ であるから、 j 台中少なくとも1台I-ロボットが存在する確率は $1 - (1-p(t))^j$ である。

これらを考慮して情報獲得の確率の式(4.10)、(4.14)を書き換える。これらは時間 t によっても変化するため $P_I(c, p_e, x, t)$ 、 $P_N(c, p_e, x, t)$ と書き、次のようになる。

$$P_I(c, p_e, x, t) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^i Q_{ij}(p_e, x) \{1 - (1-p(t))^j\} + \sum_{i=c+1}^{\infty} \sum_{j=1}^c Q_{ij}(p_e, x) \{1 - (1-p(t))^j\} \quad (4.15)$$

$$P_N(c, p_e, x, t) = P_I(c, p_e, x, t) + \sum_{i=c+1}^{\infty} \sum_{j=c+1}^i Q_{ij}(p_e, x) \{1 - (1-p(t))^c\} \quad (4.16)$$

特に衝突なしの場合の式(4.16)の第3項は、 $c+1$ 台以上のロボットが情報を出力している場合で、このうち c 台から情報を獲得可能である。よってこれに対応する確率は $Q_{ij}(p_e, x) \{1 - (1-p(t))^c\}$ の総和となる。

これらは、ロボットの空間分布から $Q_{ij}(p_e, x)$ の項が決定されれば求められる。例えば、ロボットがランダムに移動する場合を考えると、式(4.15)、(4.16)にランダム分布の場合の $Q_{ij}(p_e, x)$ の式(4.24)を代入して、

$$P_I(c, p_e, x, t) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^i \frac{x^i}{i!} e^{-x} {}_iC_j p_e^j (1-p_e)^{i-j} \{1 - (1-p(t))^j\}$$

$$\begin{aligned} & + \sum_{i=c+1}^{\infty} \sum_{j=1}^c \frac{x^i}{i!} e^{-x} {}_iC_j p_e^j (1-p_e)^{i-j} \{1 - (1-p(t))^j\} \\ & = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^i \frac{x^i}{i!} e^{-x} {}_iC_j p_e^j (1-p_e)^{i-j} + \sum_{i=c+1}^{\infty} \sum_{j=1}^c \frac{x^i}{i!} e^{-x} {}_iC_j p_e^j (1-p_e)^{i-j} \\ & \quad - \left(\sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^i \frac{x^i}{i!} e^{-x} {}_iC_j p_e^j (1-p(t))^j (1-p_e)^{i-j} \right) \\ & \quad + \sum_{i=c+1}^{\infty} \sum_{j=1}^c \frac{x^i}{i!} e^{-x} {}_iC_j p_e^j (1-p(t))^j (1-p_e)^{i-j} \end{aligned} \quad (4.17)$$

となる。式(4.17)の第1項はのちに本章4.4.1.2で示す式(4.32)に示される $P_I(E_3)$ である。また、第2項を計算すると式(4.32)に示される $P_I(E_3)$ において、総和の内部の通信範囲 x を $x(1-p(t))$ に置き換えたものとなるから、結局 P_I は

$$\begin{aligned} P_I(c, p_e, x, t) & = e^{-p_e x} \left(\sum_{k=0}^c \frac{(p_e x)^k}{k!} - 1 \right) - e^{-p_e x} \left(\sum_{k=0}^c \frac{\{p_e x(1-p(t))\}^k}{k!} - 1 \right) \\ & = e^{-p_e x} \sum_{i=0}^c \frac{(p_e x)^i \{1 - (1-p(t))^i\}}{i!} \end{aligned} \quad (4.18)$$

と求められる。また、衝突なしの場合も同様に計算でき、

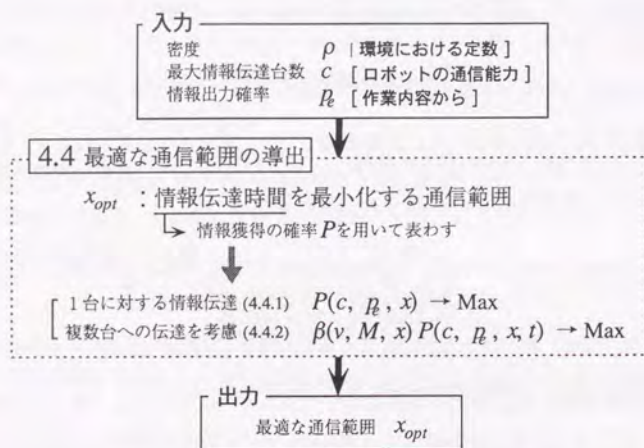
$$P_N(c, p_e, x, t) = e^{-p_e x} \sum_{i=0}^c \frac{(p_e x)^i \{(1-p(t))^c - (1-p(t))^i\}}{i!} + 1 - (1-p(t))^c \quad (4.19)$$

となる。

以上までで、複数台への伝播を考慮した情報獲得の確率 $P_I(c, p_e, x, t)$ 、 $P_N(c, p_e, x, t)$ を求めることができた。

4.4 最適な通信範囲の導出

本節では、これまでに導出した情報獲得の確率 P に関する解析に基づき、最適な通信範囲を導出する手法について述べる。本節の構成を、Fig. 4.18に示す。

Fig. 4.18 最適な通信範囲 x_{opt} の導出

4.1節で述べた通り、本章で行なう空間的な解析は、通信への要求仕様である「情報を必要な台数に、速く無駄なく」伝達するための、「速く」の部分に寄与し、情報伝達時間の短縮を実現を目標とする。よって、最適な通信範囲 x_{opt} は、情報伝達時間を最小化する最適な通信範囲 x として求める。

1 台に対する伝達の場合、複数台への伝達を考慮する場合について、それぞれ 4.4.1項、4.4.2項において、 x_{opt} の導出法を示す。それぞれの場合について、まず、Fig. 4.18に示すように、情報伝達時間を、これまでの解析で導出された情報獲得の確率 P を用いて表現する。

その結果、1 台に対する伝達の場合、情報伝達時間を最小化する x_{opt} は、4.3.2項で導出した情報獲得の確率 $P(c, p_e, x)$ を最大化することにより求められることが分かる。また、複数台への伝達の場合は、4.3.3項で求めた情報獲得の確率に加え、時間的な情報伝播とロボットの移動も考慮し、4章 3.3節で示した情報伝播の一般式 (3.2) における $\beta(v, M, x)P(c, p_e, x, t)$ の最大化が必要となる。

4.4.1 1 台に対する情報伝達

1 台に対する情報伝達における最適な通信範囲は、次のようにして求める。

情報伝達時間 W が $W = \frac{1}{P(c, p_e, x)}$ となることを示す (4.4.1.1)

↓

W を最小化する最適な通信範囲 x_{opt}

⇔ $P(c, p_e, x)$ を最大化する x_{opt} を求める (4.4.1.2)

Fig. 4.19 1 台の情報伝達に対する最適な通信範囲 x_{opt} の導出

4.4.1.1項では、幾何分布を用いて、情報伝達に必要な時間を求める。これにより、情報伝達時間を最小化する最適な通信範囲 x_{opt} は、情報獲得の確率 $P(c, p_e, x)$ を最大化することにより求められることが分かる。そこで、このような x_{opt} を 4.4.1.2項で導出する。

4.4.1.1 情報伝達時間の導出

これまで、1 台のロボットに対する情報伝達において、情報獲得の確率 P を求めてきた。ここで、この P がどのように情報伝達の効率化に寄与するかを考えるため、情報の伝達に要する『待ち時間』を求めることにする。

一般に、ある一定の確率 p で成功する事象 X があるとき、試行を繰り返し、最初の成功が出現するまでの試行回数を k とすると、 k 回目に初めて成功する確率 $f(k)$ は

$$f(k) = p(1-p)^{k-1}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (4.20)$$

と表され、試行回数 k の期待値 $E(k)$ は、

$$\begin{aligned} E(k) &= \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot p(1-p)^{k-1} \\ &= \frac{1}{p} \end{aligned} \quad (4.21)$$

である。これは幾何分布と呼ばれる [バーグ 89] [巖佐 90]。

この幾何分布を用いて、情報伝達の際の待ち時間を求めることができる。待ち時間は、周囲のロボットが発信した情報を獲得するまでに平均して何単位時間要するかを示す。これは、一回の情報伝達に必要な時間に相当する。この時間を計算する際に、情報を受信したロボットは受け取りの信号 (Acknowledgment, Ack と略す) を出力し、Ack 信号が送られて

くれば受信が行なわれたと考えることにする。Ack 信号は情報量が通常の通信に比べ小さいため、その通信時間は無視する。他のロボットの発信した情報との衝突などにより、情報を伝えることができなかったときには、Ack 信号を受け取るまで繰り返しその情報を発信し続ける。

ただし、以下で行なう待ち時間の計算に基づき、作業に要求される通信の信頼性に合わせて1つの情報出力回数を決めることにより、Ack 信号を用いないで一定の信頼性で情報伝達を行なうことは可能である。Ack 信号は計算の便宜上に考えるものであり、本研究で想定する局所的通信で本質的な部分ではない。

情報伝達に要する待ち時間の平均を W とすると、1 単位時間で情報を獲得できる確率が P であるから、幾何分布を用いて、

$$W = \frac{1}{P} \quad (4.22)$$

である。

情報伝達に要する待ち時間 W が小さければ小さいほど、通信時間が短くなり、情報伝達が効率化されることになる。

Fig. 4.1 に示した通り、本章で行なう多数移動ロボットの局所的な通信の空間的設計では、設計パラメータとして通信範囲 x を用いる。1 章でも述べたように、空間的設計では、通信に要求される仕様のうち、「速く」伝達するための通信時間の短縮の実現を目的としている。これは、

情報伝達の待ち時間 W を最小とする通信範囲 x

を求めることであり、この x を最適通信範囲 x_{opt} とする。 W は式 (4.22) のように情報伝達の確率 P を用いて表されるから、上記の x_{opt} を求めることはすなわち

情報獲得の確率 P を最大とする通信範囲 x

を求めることと等価である。

Fig. 4.17 の例で見れば、作業により情報出力の確率 p_e が与えられたとき、 P を最大化する x が最適の通信範囲 x_{opt} となる。

4.4.1.2 最適な通信範囲の導出

1 台に対する情報伝達における最適な通信範囲 x_{opt} を導出する。これは、情報伝達時間に関する解析から、

情報獲得の確率 $P(c, p_e, x)$ を最大とする通信範囲 x

として求まる。 P の変数となる c, p_e, x は Table 4.3 に示した通りである。これを、再び示しておく。

Table P の変数となるパラメータの定義 (Table 4.3 再掲)

パラメータの種類	記号	パラメータ名
設計パラメータ	x	通信範囲 [通信範囲に存在する平均ロボット数 ($=\rho A$)]
入力パラメータ	c	ロボットの最大情報獲得台数
	p_e	ロボットの情報出力確率

$P(c, p_e, x)$ を最大化する x の導出は、Fig. 4.20 に示す (1)~(3) の手順で行なう。

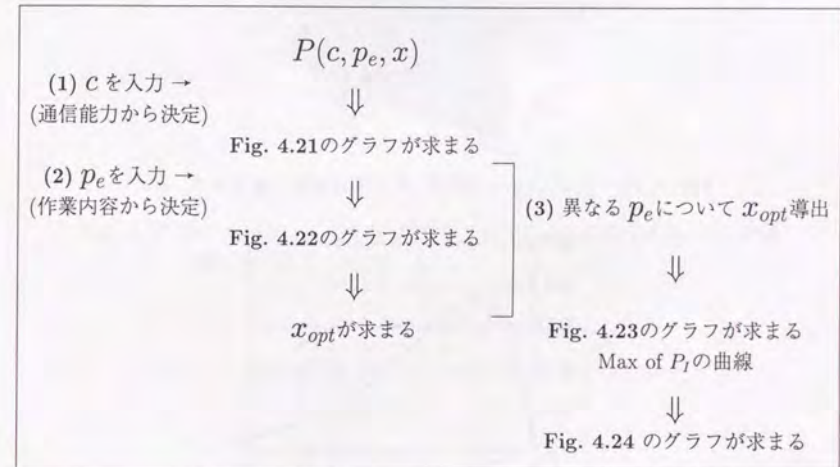


Fig. 4.20 $P(c, p_e, x)$ を最大化する通信範囲 x の導出手順

Fig. 4.20 に示した x_{opt} 導出の手順を以下に説明する。ただし、説明に用いられている Fig. 4.21~4.24 のグラフは、ランダム探索作業、衝突ありの場合を想定したものである。

- (1) 各ロボットの通信能力は一定であると考えられるので、まず最大情報獲得台数 c (ここでは $c=1$) を与える。これにより、Fig. 4.21 の P と (p_e, x) を表す 3 次元グラフを求めることができる。
- (2) 情報出力確率 p_e の値は、作業によって異なる。ここでは、 $p_e=0.5$ を与えることにより、Fig. 4.22 の P_i と x の関係を表すグラフが得られる。このグラフから、 $x_{opt}=2$ が導出できる。

- (3) (2)において、 p_e がいろいろな値をとるとき、 P を最大化する x_{opt} を求めると、Fig. 4.23の3次元グラフにおける“Max of P_I ”で示した曲線となる。 p_e と x_{opt} の関係が導出されれば、Fig. 4.24に示すように、与えられた p_e に対する x_{opt} は容易に計算できる。

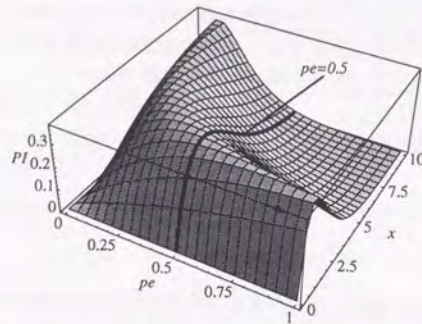


Fig. 4.21 P_I と (x, p_e) の関係 (ランダム探索, 衝突あり, $c=1$)

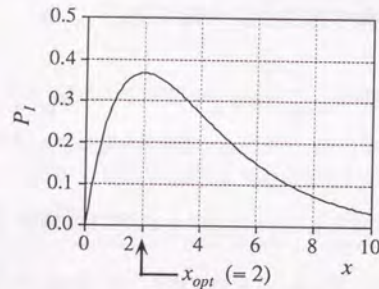


Fig. 4.22 P_I と x の関係 (ランダム探索, 衝突あり, $c=1, p_e=0.5$)

x_{opt} は、上記の手順で最急降下法などの手法を用いて数値計算を用いて求めることができる。しかし、 c や p_e などのパラメータが変わるたびに、 x_{opt} を求める数値計算をやり直さなければならない。特に、通信範囲の調節を作業に応じてオンラインで行ないたい場合には、これらの数値計算の繰り返しはその応答性を低下させてしまう。

そこで、まず最適な通信範囲 x_{opt} を解析的に導出することを試みる。すなわち、 x_{opt} を最大情報獲得台数 c と情報出力確率 p_e により解析的に表すことを目標とする。Fig. 4.23は、 $c=1$ で衝突あり・ランダム探索の場合の情報獲得の確率 P_I を示している。ここで、“Max

of P_I ”が指している太線部分の曲線の x 座標が、与えられた p_e に対して P_I を最大とする x_{opt} を表している。

以降の解析では、ロボットの通信能力により c が決まったとき、Fig. 4.23に示す曲線を解析的に求めることを目的とするが、多くの場合解析的な形では解くことができない。その場合には、あらかじめ x_{opt} と c, p_e の関係を調べておくことにより数値計算を軽減できる。

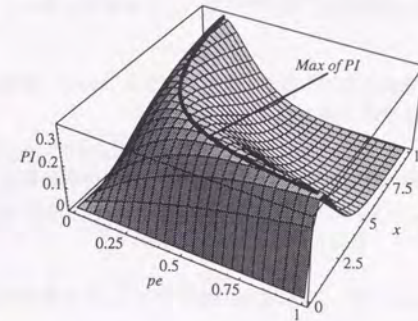


Fig. 4.23 与えられた p_e に対して P_I を最大化する x_{opt} を表す曲線 (ランダム探索, 衝突あり, $c=1$)

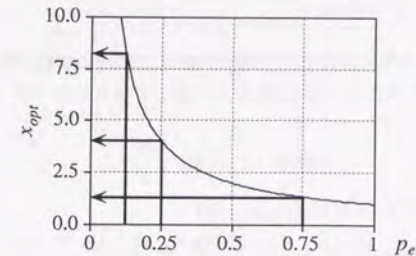


Fig. 4.24 x_{opt} と p_e の関係 (ランダム探索, 衝突あり, $c=1, p_e=0.5$)

4.2節で示した協調作業のうち、ランダム探索・掃引と協調搬送に関しては、式(4.10)、(4.14)を解析して整理することにより、衝突ありの場合には解析的に、衝突なしの場合にも数値計算なしに x_{opt} が導出できることが示される。ランダム探索・掃引は、作業情報周知の通信(1)における情報の獲得・拡散や、大きな領域の探索・掃引に広く用いることができる単純で一般的な方法であり、このときに数値計算なしに x_{opt} が求められることは重

要な意義を持つ。

また、分割された領域の探索の場合には、解析的に x_{opt} を導出することは困難であるため、前述の通りあらかじめ x_{opt} と c, p_e の関係を調べておいて数値計算の軽減を図る。

よって以下では、

- (1) ランダム探索・掃引、協調搬送作業について、 x_{opt} の解析的な導出手法を解説し (4.4.1.2.1, 4.4.1.2.2),
- (2) 次にその他の分割された領域の探索・掃引の作業について、数値計算をしなくても近似的に x_{opt} を求める手法を示す (4.4.1.2.3).

4.4.1.2.1 ランダム探索・掃引作業 ランダム探索・掃引作業の場合には、ロボットの空間分布を表す $\text{Prob}[i | i \in S(x)]$ はポアソン分布として解析的に与えられる。よって、以下に示す解析的な手法により、最適な通信範囲 x_{opt} を求める。

- (1) 入力パラメータ (c, p_e) に対し、情報獲得の確率 $P(c, p_e, x)$ を解析的に導出する (4.4.1.2.1.1).
- (2) $P(c, p_e, x)$ を x で微分することにより、 x_{opt} を求める (4.4.1.2.1.2).

衝突あり 解析的に x_{opt} が求まる。

衝突なし x_{opt} は解析的には求まらないが、与えられた (c, p_e) に対して、 x_{opt} を求める近似の良い式が求まる。

ランダム探索・掃引作業において、ロボットがランダムに移動する場合、一定面積 x に存在するロボット数 i の分布は、式 (4.2) のようなポアソン分布で表される。これをもう一度ここに示す。

$$\text{Prob}[i | i \in S(x)] = \frac{x^i}{i!} e^{-x} \quad (4.23)$$

よって、これを用いて式 (4.6) の $Q_{ij}(p_e, x)$ は

$$\begin{aligned} Q_{ij}(p_e, x) &= \text{Prob}[i | i \in S(x)] \cdot {}_iC_j p_e^j (1-p_e)^{i-j} \\ &= \frac{x^i}{i!} e^{-x} \cdot {}_iC_j p_e^j (1-p_e)^{i-j} \end{aligned} \quad (4.24)$$

と表される。

さて、以下では式 (4.10), (4.14) で表される情報獲得の確率 $P_I(c, p_e, x)$, $P_N(c, p_e, x)$ を解析的に整理して無限級数から単純な形に直し、最適通信範囲 x_{opt} の導出を行なうことにする。

4.4.1.2.1.1 情報獲得の確率の計算

衝突ありの場合 まず、 $P_I(c, p_e, x) = P_I(E_3)$ を求める。式 (4.7)~(4.10) で、 $P_I(E_3)$ を $P_I(E_3) = 1 - \{P_I(E_0) + P_I(E_1) + P_I(E_2)\}$ として計算する。

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} \text{であることをなど利用し、式 (4.8) で}$$

$$\begin{aligned} P_I(E_1) &= \sum_{i=1}^{\infty} Q_{i0}(p_e, x) \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} (1-p_e)^i \frac{x^i}{i!} e^{-x} \\ &= e^{-p_e x} - e^{-x} \end{aligned} \quad (4.25)$$

式 (4.9) では、二項定理を用いて、

$$\begin{aligned} P_I(E_2) &= \sum_{i=c+1}^{\infty} \sum_{j=c+1}^i Q_{ij}(p_e, x) \\ &= \sum_{i=c+1}^{\infty} \frac{x^i}{i!} e^{-x} \sum_{j=c+1}^i {}_iC_j p_e^j (1-p_e)^{i-j} \\ &= \sum_{i=c+1}^{\infty} \frac{x^i}{i!} e^{-x} \left\{ \sum_{j=0}^i {}_iC_j p_e^j (1-p_e)^{i-j} - \sum_{j=0}^c {}_iC_j p_e^j (1-p_e)^{i-j} \right\} \\ &= \sum_{i=c+1}^{\infty} \frac{x^i}{i!} e^{-x} \left[1 - \{(1-p_e)^i + np_e(1-p_e)^{n-1} + \dots + \frac{i!}{c!(n-c)!} p_e^c (1-p_e)^{n-c}\} \right] \\ &= \underbrace{\sum_{i=c+1}^{\infty} \frac{x^i}{i!} e^{-x}}_A - \underbrace{\sum_{i=c+1}^{\infty} \frac{x^i}{i!} e^{-x} \{(1-p_e)^i + np_e(1-p_e)^{n-1} + \dots + \frac{i!}{c!(n-c)!} p_e^c (1-p_e)^{n-c}\}}_B \\ &\quad + \underbrace{\frac{i!}{c!(n-c)!} p_e^c (1-p_e)^{n-c}}_B \end{aligned} \quad (4.26)$$

となる。式 (4.26) の第1項 (Aの部分) は、

$$1 - e^{-x} \left(1 + x + \frac{x^2}{2!} + \dots + \frac{x^c}{c!} \right) \quad (4.27)$$

となる。式 (4.26) の第2項 (Bの部分) は、

$$\begin{aligned} &e^{-x} \sum_{i=0}^c \sum_{j=c+1}^{\infty} p_e^j \frac{x^i}{i!} \frac{i!(1-p_e)^{n-i}}{i!(n-i)!} \\ &= \sum_{i=0}^c \frac{p_e^i x^i}{i!} e^{-x} \left\{ e^{(1-p_e)x} - (1 + (1-p_e)x + \dots + \frac{\{(1-p_e)x\}^{c-i}}{(c-i)!}) \right\} \end{aligned}$$

$$= \underbrace{\sum_{i=0}^c \frac{p_e^i x^i}{i!} e^{-x} e^{(1-p_e)x}}_C - \underbrace{\sum_{i=0}^c \frac{p_e^i x^i}{i!} e^{-x} (1 + (1-p_e)x + \dots + \frac{\{(1-p_e)x\}^{c-i}}{(c-i)!})}_D \quad (4.28)$$

となる。

さらに D の部分は、各級数の最後の項どうし、最後から2番目の項どうし、というように加えていき、最後から $k-1$ 番目の項どうしを加えた $c-k$ 個の項の和は、二項分布を用いると、

$$(p_e x)^{c-k} + {}_{c-k}C_1 (p_e x)^{c-k-1} ((1-p_e)x) + {}_{c-k}C_2 (p_e x)^{c-k-2} ((1-p_e)x)^2 + \dots + ((1-p_e)x)^{c-k} \\ = \frac{e^{-x}}{(c-k)!} ((1-p_e)x + p_e x)^{c-k} = \frac{e^{-x} x^{c-k}}{(c-k)!} \quad (4.29)$$

となる。よって、式(4.26)の第2項は、この式(4.29)を全ての k に関して和をとると、

$$e^{-x} (1 + x + \frac{x^2}{2!} + \dots + \frac{x^c}{c!}) \quad (4.30)$$

となる。式(4.30)は、式(4.27)の2項目以降と打ち消される。よって、式(4.27)の1項目と式(4.28)で表される c 個の級数の第1項だけが残る。これにより $P_I(E_2)$ は

$$P_I(E_2) = 1 - e^{-p_e x} \{1 + p_x + \dots + \frac{(p_e x)^c}{c!}\} \\ = 1 - e^{-p_e x} \sum_{k=0}^c \frac{(p_e x)^k}{k!} \quad (4.31)$$

となる。これと $P_I(E_0), P_I(E_1)$ の和を1から引き、情報伝達率 $P_I(E_3)$ は

$$P_I(E_3) = 1 - \{P_I(E_0) + P_I(E_1) + P_I(E_2)\} = e^{-p_e x} (\sum_{k=0}^c \frac{(p_e x)^k}{k!} - 1) \quad (4.32)$$

となる。

衝突なしの場合 次に、情報の衝突がない場合の情報伝達率 $P_N(E_3)$ について計算する。情報の衝突のある場合と同じように $P_N(E_3)$ も $1 - \{P_N(E_0) + P_N(E_1) + P_N(E_2)\}$ として計算する。

$P_N(E_0)$ と $P_N(E_1)$ については、情報の衝突の有無に関わらず、同じ式で表されるので、式(4.25)と式(4.7)より、

$$P_N(E_0) + P_N(E_1) = e^{-p_e x} \quad (4.33)$$

となる。次に $P_N(E_2)$ について計算すると以下のようになる。

$$P_N(E_2) = \sum_{i=c+1}^{\infty} \sum_{j=c+1}^i \frac{j-c}{j} Q_{ij}(p_e, x)$$

$$= \sum_{i=c+1}^{\infty} \sum_{j=c+1}^i \frac{j-c}{j} {}_n C_m p_e^m (1-p_e)^{i-j} \frac{x^n}{i!} e^{-x} \\ = \frac{e^{-x} p_e^{c+1}}{c+1} \left\{ \frac{x^{c+1}}{(c+1)!} + (c+2)(1-p_e) \frac{x^{c+2}}{(c+2)!} + \frac{(c+3)(c+2)}{2} (1-p_e)^2 \frac{x^{c+3}}{(c+3)!} + \dots \right\} \\ + \frac{2e^{-x} p_e^{c+2}}{c+2} \left\{ \frac{x^{c+2}}{(c+2)!} + (c+3)(1-p_e) \frac{x^{c+3}}{(c+3)!} + \frac{(c+4)(c+3)}{2} (1-p_e)^2 \frac{x^{c+4}}{(c+4)!} + \dots \right\} \\ + \dots \\ = \frac{e^{-x} x^{c+1} p_e^{c+1}}{(c+1)(c+1)!} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(1-p_e)^k x^k}{k!} + \frac{2e^{-x} x^{c+2} p_e^{c+1}}{(c+2)(c+2)!} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(1-p_e)^k x^k}{k!} + \dots \\ = \frac{e^{-x} x^{c+1} p_e^{c+1}}{(c+1)(c+1)!} e^{-p_e x} + \frac{2e^{-x} x^{c+2} p_e^{c+1}}{(c+2)(c+2)!} e^{-p_e x} + \dots \\ = e^{-p_e x} \sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{k-c}{k} \frac{p_e^k x^k}{k!} \\ = e^{-p_e x} \left(\sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{p_e^k x^k}{k!} - \sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{c}{k} \frac{p_e^k x^k}{k!} \right) \\ = 1 - e^{-p_e x} \left(\sum_{k=0}^c \frac{p_e^k x^k}{k!} + \sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{c}{k} \frac{p_e^k x^k}{k!} \right) \quad (4.34)$$

式(4.33)と式(4.34)の和を1から引くことで、 $P_N(E_3)$ が計算され、以下のようになる。

$$P_N(E_3) = 1 - \{P_N(E_0) + P_N(E_1) + P_N(E_2)\} \\ = e^{-p_e x} \left(\sum_{k=0}^c \frac{p_e^k x^k}{k!} + c \sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{p_e^k x^k}{k!} - 1 \right) \\ = P_I(E_3) + c e^{-p_e x} \sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{p_e^k x^k}{k!} \quad (4.35)$$

よって、情報の衝突のない場合の $P_N(E_3)$ は、式(4.32)の情報の衝突のある場合 $P_I(E_3)$ に第2項が加わった形となる。

Fig. 4.25 に、衝突ありとなしの場合について、式(4.32)、(4.35)から求められる情報獲得の確率 P_I (With Collision), P_N (Without Collision) を、対応する情報伝達時間 W (式(4.22)から求まる) とともに示す。最大情報伝達数 $c=1$ 、情報出力確率 $p_e=0.5$ とする。

Fig. 4.25の2つのグラフから、

- (1) 情報獲得の確率 P_I , P_N が最大となる最適な通信範囲 x_{opt} が存在する。
- (2) それぞれ、同じ x_{opt} の値で情報伝達時間 W が最小となっている。

ことが確認できる。

また、 x_{opt} の値を Fig. 4.25 の P_I , P_N について比較してみる。同じ入力パラメータ ($p_e=1$, $c=1$) を用いたとき、衝突なしの場合には $x_{opt}=3.1$ であり、衝突ありの $x_{opt}=2.0$ に比較し

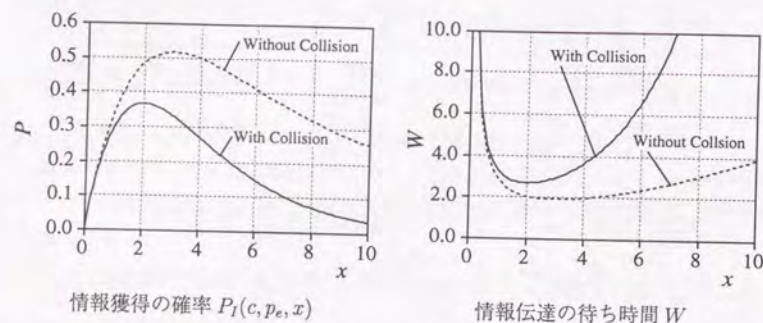


Fig. 4.25 ランダム探索における 情報獲得の確率 P_I と伝達時間 W
($c=1, p_e=0.5$)

で最適な通信範囲が大きな値を取っている。通信範囲 x_{opt} における情報獲得の確率 P の値も、衝突なしの $P_N=0.52$ は衝突ありの $P_I=0.37$ よりも大きい。これは、次のような理由による。衝突ありの場合には、最大情報獲得台数 c よりも多くの台数から情報の出力を受けたときには、1 台からも情報が受信できない。しかし、衝突なしのときには、同じ状況でも c 台から情報をの受信が可能である。このように、衝突ありの場合には、衝突なしと比較して通信の損失が大きいので、同じ入力パラメータに対して、 x_{opt} や P の値に上記に示した差が生じる。

4.4.1.2.1.2 最適な通信範囲の導出 ランダム探索・掃引作業における最適な通信範囲 x_{opt} を導出する。

これまでの計算をまとめると、式 (4.32), (4.35) から、 $P_I(c, p_e, x)$, $P_N(c, p_e, x)$ は

$$P_I(c, p_e, x) = e^{-p_e x} \left(\sum_{k=0}^c \frac{(p_e x)^k}{k!} - 1 \right) \quad (4.36)$$

$$\begin{aligned} P_N(c, p_e, x) &= e^{-p_e x} \left(\sum_{k=0}^c \frac{(p_e x)^k}{k!} + \sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{p_e^k x^k}{k!} - 1 \right) \\ &= P_I(c, p_e, x) + c e^{-p_e x} \sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{p_e^k x^k}{k!} \end{aligned} \quad (4.37)$$

となる。

これらの式に対して、Fig. 4.20 の手法を適用して、

- (1) 最大情報獲得台数 c を与え、Fig. 4.22 に示される P と (p_e, x) の関係を求める。

- (2) 情報出力確率 p_e が作業から与えられると、それに対応する x_{opt} が求まる (Fig. 4.22 のグラフ)。

- (3) 与えられた p_e に対して、 x_{opt} を求める曲線を導出する (Fig. 4.23 のグラフの “Max of P_I ” → Fig. 4.24 のグラフ)

x_{opt} は、

衝突あり のとき、 c, p_e から解析的に求められる。

衝突なし のとき、解析的には導出できない。しかし、 c が与えられたとき、上の手法の

- (3) における x_{opt} と p_e との関係を示す近似のよい式を求めることができる。よって、数値計算により最適値を求める必要はなくなる。

衝突ありの場合 式 (4.36) の $P_I(c, p_e, x)$ を x で微分すると、

$$\begin{aligned} \frac{dP_I(c, p_e, x)}{dx} &= \frac{d}{dx} e^{-p_e x} \sum_{n=1}^c \frac{(p_e x)^n}{n!} \\ &= -p_e e^{-p_e x} \left\{ - \sum_{n=1}^c \frac{(p_e x)^n}{n!} + \sum_{n=0}^{c-1} \frac{(p_e x)^n}{n!} \right\} \\ &= p_e e^{-p_e x} \left\{ 1 - \frac{(p_e x)^c}{c!} \right\} \end{aligned} \quad (4.38)$$

となる。これを最大とする x_{opt} は、式 (4.38)=0 を解き、

$$x_{opt} = \sqrt[c]{\frac{c!}{p_e^c}} = \frac{\sqrt[c]{c!}}{p_e} = \frac{F_I(c)}{p_e} \quad (4.39)$$

と、簡単な形で求まる。

Fig. 4.26 の 3 次元グラフ上で、“Max of P_I ” で指した曲線は、 c が与えられたとき (この場合 $c=1, 3$) の式 (4.39) によって求められる (p_e, x_{opt}) の関係を示している。

c を変化させたとき、この曲線を (p_e, x) 平面に投影したものが Fig. 4.27 に示されている。式 (4.39) に示す通り、最適な通信範囲 x_{opt} は情報出力の確率 p_e に反比例する。

また、Fig. 4.26 から分かるが、Fig. 4.27 では c が増加するにつれて情報出力確率 p_e に対する最適通信範囲 x_{opt} の値が増加している。 c は最大情報獲得台数であり、ロボットの通信能力を表すから、通信能力が大きくなるにつれて最適通信範囲も増加するという妥当な結果が得られている。

このことを詳しく見るため、 c が変化するに従って式 (4.39) の $F_I(c)$ ($=p_e x_{opt}$) がどのような値をとるかを Fig. 4.28 に示す。 c が増加するにしたがって $p_e x_{opt}$ も c に対してほぼ線形な形で増加することが分かる。ここで、1 単位時間に情報を獲得できるロボット数が c で、1 台のロボットの情報出力確率が p_e であるからといって、単純に最適通信範囲を $x_{opt}=c/p_e$ としてはならないことに注意を要する。

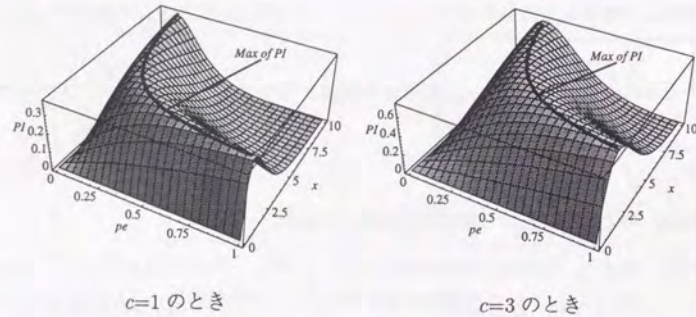


Fig. 4.26 c が変化したとき, p_e と x_{opt} の関係を表す曲線 (ランダム探索, 衝突あり)

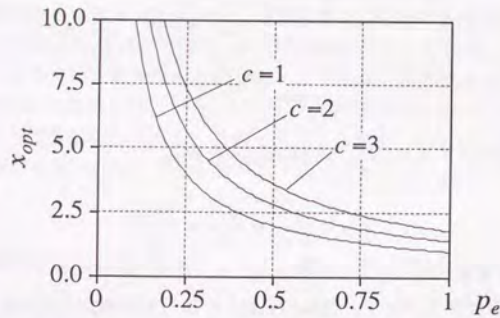


Fig. 4.27 c を変化したときの x_{opt} と p_e の関係

式 (4.39) において $x=x_{opt}$ を代入して, $P_I(c, p_e, x)$ の最大値は,

$$\text{Max}\{P_I(c, p_e, x)\} = e^{-\sqrt[c]{c!}} \left(\sum_{n=0}^c \frac{(\sqrt[c]{c!})^n}{n!} - 1 \right) \quad (4.40)$$

となる.

よって $P_I(c, p_e, x)$ の最大値は受信可能台数 c のみで決まり, p_e にはよらないことがわかる.

この解析結果を用いてロボットは受信可能台数 c , 観測されたロボット密度 ρ や情報発信確率 p_e により, 最適な通信範囲 x_{opt} を簡単に求めることができる. 通信範囲 x が式 (4.39) の x_{opt} のとき, 待ち時間 W は最小となる.

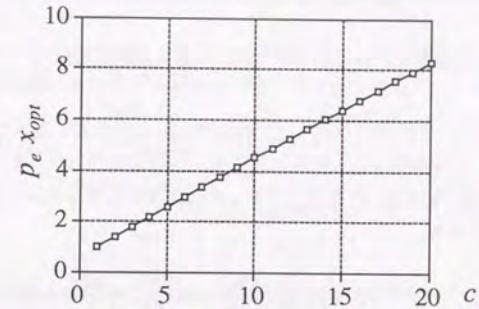


Fig. 4.28 反比例の定数 $p_e x_{opt} = F_I(c)$ と c の関係

衝突なしの場合 式 (4.35) の $P_N(c, p_e, x)$ は, 積分指数²と呼ばれる無限級数 $E_i(p_e x)$ の一部を含んだ式となるため, これを最大化する最適な通信範囲 x_{opt} は, 解析的には求めることができない.

しかし, 衝突がある場合から類推し, $P_N(c, p_e, x)$ を最大とする x_{opt} も, p_e に反比例することが予想される. この推測が正しければ, 比例定数をあらかじめ数値的に求めておけば, 各々のロボットは簡単な計算を行なうだけで, 自分の周囲の状況に応じて最適な通信範囲を求めることができる.

まず, $P_N(c, p_e, x)$ を x で微分し, $\frac{d}{dx} P_I(c, p_e, x)$ の計算には式 (4.38) の結果を用いて計算すると, 以下のようになる.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} P_N(c, p_e, x) &= \frac{d}{dx} P_I(c, p_e, x) + \frac{d}{dx} \sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{p_e^k x^k}{k!} \\ &= p_e e^{-p_e x} \left(1 - \frac{p_e^c x^c}{c!} \right) + e^{-p_e x} \left(-p_e c \sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{p_e^k x^k}{k!} + c \sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{p_e^k x^{k-1}}{k!} \right) \\ &= p_e e^{-p_e x} \left(1 - \frac{p_e^c x^c}{c!} \right) + p_e e^{-p_e x} \left(-c \sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{p_e^k x^k}{k!} + c \sum_{k=c}^{\infty} \frac{1}{k+1} \frac{p_e^{k+1} x^k}{k!} \right) \\ &= e^{-p_e x} \left\{ p_e - \frac{p_e^{c+1} x^c}{(c+1)!} + c \sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{p_e^{k+1} x^k}{k!} + c \sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{p_e^{k+1} x^k}{(k+1)!} \right\} \quad (4.41) \end{aligned}$$

² $E_i(p_e x) = \int_{-\infty}^{p_e x} \frac{e^t}{t} dt = C + \log p_e x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{(p_e x)^k}{k!}$

$P_N(c, p_e, x)$ を最大とする x_{opt} が p_e に反比例すると仮定し、上式に、 $x = \frac{y}{p_e}$ を代入すると

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} P_N(c, p_e, x) &= e^{-y} \left\{ p_e - \frac{p_e y^c}{(c+1)!} + c \sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{p_e y^k}{k!} + c \sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{p_e y^k}{(k+1)!} \right\} \\ &= p_e e^{-y} \left\{ 1 - \frac{y^c}{(c+1)!} + c \sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{y^k}{k!} + c \sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{y^k}{(k+1)!} \right\} \quad (4.42) \end{aligned}$$

となる。よって、 $\frac{d}{dx} P_N(c, p_e, x)$ を 0 とする y は p_e にはよらず c のみにより決まる。

この y を y_{opt} とすると、

$$1 - \frac{y_{opt}^c}{(c+1)!} + c \sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{y_{opt}^k}{k!} + c \sum_{k=c+1}^{\infty} \frac{y_{opt}^k}{(k+1)!} = 0 \quad (4.43)$$

となる。

よって、 $P_N(c, p_e, x)$ を最大とする x_{opt} が p_e に反比例することが確かめられた。

これにより、衝突なしの場合にも、最大情報獲得台数 c と $p_e x$ の関係をあらかじめ数値的に

$$p_e x_{opt} = F_N(c) \quad (4.44)$$

の形で計算しておく。ロボットの通信能力と作業から、 c と p_e がそれぞれ与えられれば、 x_{opt} を容易に求めることができる。

$$x_{opt} = \frac{F_N(c)}{p_e} \quad (4.45)$$

Fig. 4.29 に、このようにして求められた衝突なしの場合の c と $F_N(c) = p_e x_{opt}$ との関係を示す。比較のため、式 (4.39) における衝突ありの場合の $F_I(c)$ も合わせて示す。

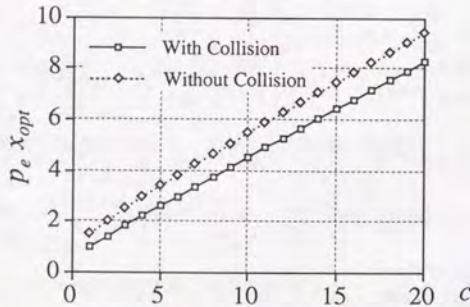


Fig. 4.29 反比例の定数 $F_N(c) (= p_e x_{opt})$ と c との関係

Fig. 4.25 の例でも見たように、すべての c に対して衝突なしの方が衝突ありに比べて $p_e x_{opt}$ の値が大きくなっている。

最大情報獲得台数 c は整数であるから、このグラフのデータを表引き形式 (Lookup Table) で、メモリを取らずに各ロボットに与えておくことができる。

Fig. 4.25 の例に用いられたパラメータ $c=1$, $p_e=0.5$ に対して、式 (4.39) と (4.45) から衝突あり・なしの場合それぞれについて最適通信範囲 x_{opt} を求めると

$$x_{opt} = \begin{cases} 2.0 & (\text{衝突あり}) \\ 3.1 & (\text{衝突なし}) \end{cases}$$

となり、それぞれの場合でこの x_{opt} において情報伝達の確率が最大、情報伝達の待ち時間が最小となっていることが確認できる。

4.4.1.2.2 協調搬送作業 協調搬送作業の場合にも、ロボットの空間分布を表す $\text{Prob}[i|i \in S(R_c)]$ は、二項分布として、式 (4.4) のように解析的に与えられる。よって、ランダム探索作業の場合と同様の手順で最適な通信半径 R_{copt} を求めることができる。ただしこの作業においては、入力パラメータのうち、ロボット密度 ρ に代わって搬送作業を行なうロボット数 m を用いる。すなわち、

- (1) 入力パラメータ (c, p_e, m) に対し、情報獲得の確率 $P(c, p_e, R_c, m)$ を解析的に導出する。
- (2) $P(c, p_e, R_c, m)$ を最大化する R_{copt} を求める。

R_{copt} の導出手法はランダム探索と同様であるので、ここでは衝突ありの場合のみを主に示すことにする。

協調搬送作業における、ロボットの空間分布 $\text{Prob}[i|i \in S(R_c)]$ を表す式 (4.4) を再び示す。

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{2(m-1)}{\pi} \sin^{-1} \frac{R_c}{2} \\ \text{Prob}[i|i \in S(R_c)] &= {}_{m-1}C_i \left(\frac{\mu}{m-1} \right)^i \left(1 - \frac{\mu}{m-1} \right)^{m-1-i} \quad (4.46) \end{aligned}$$

これを用いると、式 (4.6) の $Q_{ij}(p_e, R_c)$ を、ロボット総数も入力パラメータとなるので、 $Q_{ij}(p_e, R_c, m)$ と表す。これは

$$\begin{aligned} Q_{ij}(p_e, R_c, m) &= \text{Prob}[i|i \in S(R_c)] {}_iC_j p_e^j (1-p_e)^{i-j} \\ &= {}_{m-1}C_i \left(\frac{\mu}{m-1} \right)^i \left(1 - \frac{\mu}{m-1} \right)^{m-1-i} {}_iC_j p_e^j (1-p_e)^{i-j} \\ &= {}_{m-1}C_i \nu^i (1-\nu)^{m-1-i} {}_iC_j p_e^j (1-p_e)^{i-j} \quad (4.47) \\ \text{ただし } \nu &= \frac{\mu}{m-1} \end{aligned}$$

となる。

次に、式(4.10)、(4.14)での情報獲得の確率を解析的に整理して単純な形に直し、 R_{copt} の導出を行なう。情報獲得の確率もロボット総数 m の関数となるので、ここでは $P_I(c, p_e, R_c, m)$ 、 $P_N(c, p_e, R_c, m)$ と書く。

4.4.1.2.2.1 情報獲得の確率の計算

衝突ありの場合 式(4.10)に式(4.48)の $Q_{ij}(p_e, R_c, m)$ を代入すると、情報獲得の確率 $P_I(c, p_e, R_c, m)$ は

$$P_I(c, p_e, R_c, m) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^i m_{-1} C_i \nu^i (1-\nu)^{m-1-i} {}_i C_j p_e^j (1-p_e)^{i-j} + \sum_{i=c+1}^{m-1} \sum_{j=1}^c m_{-1} C_i \nu^i (1-\nu)^{m-1-i} {}_i C_j p_e^j (1-p_e)^{i-j} \quad (4.48)$$

となる。ただし、式(4.10)の第二項の総和は、無限大まででなく、情報を出力するロボットを除く $m-1$ までの和となる。

以下では、式(4.48)を整理し、簡単化する。式(4.48)の総和において、周囲に存在するロボットのうち、 j 台が情報を出力している確率だけ足し合わせる。これは、次のようになる。

$$\sum_{i=j}^{m-1} m_{-1} C_i \nu^i (1-\nu)^{m-1-i} {}_i C_j p_e^j (1-p_e)^{i-j} \quad (4.49)$$

まず、式(4.49)で、二項係数の積は、次のように変形できる。

$$m_{-1} C_i {}_i C_j = m_{-j-1} C_{i-j} m_{-1} C_j \quad (4.50)$$

これを用いて、式(4.49)を変形すると、

$$\begin{aligned} & \sum_{i=j}^{m-1} m_{-1} C_i \nu^i (1-\nu)^{m-1-i} {}_i C_j p_e^j (1-p_e)^{i-j} \\ &= \sum_{i=j}^{m-1} m_{-j-1} C_{i-j} m_{-1} C_j \nu^i (1-\nu)^{m-1-i} p_e^j (1-p_e)^{i-j} \\ &= m_{-1} C_j \nu^j p_e^j \sum_{i=j}^{m-1} m_{-j-1} C_{i-j} \nu^{i-j} (1-\nu)^{m-1-i} (1-p_e)^{i-j} \\ &= m_{-1} C_j (\nu p_e)^j \sum_{i=j}^{m-1} m_{-j-1} C_{i-j} \{\nu(1-p_e)\}^{i-j} (1-\nu)^{m-1-i} \end{aligned} \quad (4.51)$$

となる。ここで、式(4.51)の総和部分は二項分布に等しく、

$$\sum_{i=j}^{m-1} m_{-j-1} C_{i-j} \{\nu(1-p_e)\}^{i-j} (1-\nu)^{m-1-i} = \sum_{i=0}^{m-j-1} m_{-j-1} C_i \{\nu(1-p_e)\}^i (1-\nu)^{m-j-1-i}$$

$$\begin{aligned} &= \{\nu(1-p_e) + (1-\nu)\}^{m-j-1} \\ &= (1-\nu p_e)^{m-j-1} \end{aligned} \quad (4.52)$$

と簡単化できる。式(4.52)を式(4.51)に代入して、式(4.49)は

$$\sum_{i=j}^{m-1} m_{-1} C_i \nu^i (1-\nu)^{m-1-i} {}_i C_j p_e^j (1-p_e)^{i-j} = m_{-1} C_j (\nu p_e)^j (1-\nu p_e)^{m-j-1} \quad (4.53)$$

と計算される。この項の総和を、 $1 \leq j \leq c$ についてとれば、結局式(4.48)の $P_I(c, p_e, R_c, m)$ は

$$P_I(c, p_e, R_c, m) = \sum_{j=1}^c m_{-1} C_j (\nu p_e)^j (1-\nu p_e)^{m-j-1} \quad (4.54)$$

となる。

このようにして求められた情報獲得確率 $P_I(c, p_e, R_c, m)$ と情報出力確率と通信半径 (p_e, R_c) との関係、ロボット総数 $m=10$ 、最大情報獲得台数 $c=1$ の場合について Fig. 4.30に示す。Fig. 4.30において、“Max of P_I ”で示された曲線が、与えられた p_e に対して $P_I(c, p_e, R_c, m)$

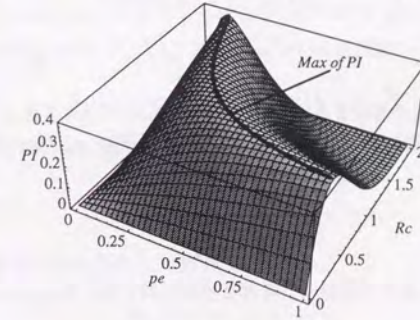


Fig. 4.30 与えられた p_e に対して P_I を最大化する R_{copt} を表す曲線 (協調搬送, ロボット総数 $m=10$, 衝突あり, $c=1$)

を最大とする R_{copt} を求める曲線である。4.4.1.2.2.2において、最適な通信範囲 R_{copt} を導出する。

衝突なしの場合 ランダム探索・掃引作業に対する計算と同様に、衝突がないことによる情報獲得の確率の増加分を式(4.14)にしたがって式(4.54)に加えると、次のようになる。

$$P_N(c, p_e, R_c, m) = \sum_{j=1}^c m_{-1} C_j (\nu p_e)^j (1-\nu p_e)^{m-j-1} + \sum_{j=c+1}^{m-1} \frac{c}{j} m_{-1} C_j (\nu p_e)^j (1-\nu p_e)^{m-j-1}$$

4.4.1.2.2.2 最適な通信範囲の導出 協調搬送作業においては、ランダム探索作業の場合と異なり、衝突ありの場合でも、最大情報獲得台数 c が増加すると R_{copt} は解析的には求められない。したがって、4.4.1.2.1.2においてランダム探索作業の衝突なしの場合に用いた次の手法を適用する。

- (1) いくつかの c に対して、式 (4.54) の $P_I(c, p_e, R_c, m)$ を最大化する R_{copt} と p_e の関係をあらかじめ求めておく。
- (2) この関係を用いることにより、 p_e が与えられたときに計算式にしたがって R_{copt} を求める。

式 (4.55) の衝突なしの場合も同様であるので、以降では衝突ありの場合だけについて解析を示す。

ここで、協調搬送作業に対する情報獲得の確率を再掲する。

$$P_I(c, p_e, R_c, m) = \sum_{j=1}^c {}^{m-1}C_j (\nu p_e)^j (1 - \nu p_e)^{m-j-1}$$

$$\text{ただし } \mu = \frac{2(m-1)}{\pi} \sin^{-1} \frac{R_c}{2}, \quad \nu = \frac{\mu}{m-1} = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \frac{R_c}{2} \quad (4.55)$$

式 (4.55) で、通信半径 R_c から決まるパラメータは $\nu = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \frac{R_c}{2}$ である。また、式 (4.55) では ν, p_e は νp_e の形でしか現れない。よって、式 (4.55) の $P_I(c, p_e, R_c, m)$ を最大化する $\nu_{opt} p_e$ の値を求めることになる。この値を $F_I(m, c)$ とすれば、

$$\nu_{opt} = \frac{F_I(m, c)}{p_e} \quad (4.56)$$

となり、ランダム探索の場合と同様に、最適な通信半径を与える ν_{opt} は p_e に反比例することが分かる。

$F_I(m, c)$ を用いて、最適な通信半径 R_{copt} は

$$R_{copt} = 2 \sin \frac{\pi \nu_{opt}}{2} = 2 \sin \frac{\pi F_I(m, c)}{2 p_e} \quad (4.57)$$

として容易に求まる。

Fig. 4.31に、最大情報伝達台数 c を変化させたときの、ロボット台数 $m=10$ の場合の $F_I(m, c) = \nu_{opt} p_e$ の値を示す。Fig. 4.31から、 c の値が増加するに従い、 ν_{opt} の値も増加することが分かる。式 (4.57) から、通信半径 R_{copt} は $0 \leq \nu_{opt} \leq 1$ の範囲で ν_{opt} の単調増加関数である。

よって、ランダム移動の場合と同様に、ロボットの通信能力を表す c の値の増加にしたがって、最適な通信範囲 R_c も増加することが示された。

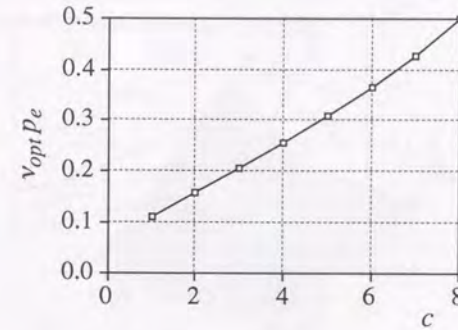


Fig. 4.31 反比例の定数 $F_I(m, c) = \nu_{opt} p_e$ と c の関係 (ロボット総 $m=10$)

1 単位時間に 1 台のロボットからしか情報が獲得できない最も単純な $c=1$ の場合には、 $F_I(m, c)$ は容易に求められる。式 (4.55) から、 $c=1$ のとき情報獲得の確率は

$$P_I(1, p_e, R_c, m) = {}^{m-1}C_1 \nu p_e (1 - \nu p_e)^{m-2} \quad (4.58)$$

となる。これを νp_e で微分し、 $\frac{dP_I}{d\nu p_e} = 0$ を解くと、

$$\nu_{opt} p_e = F_I(m, 1) = \frac{1}{m-1} \quad (4.59)$$

となる。よって、最適な通信半径 R_c は式 (4.57) から

$$R_{copt} = 2 \sin \frac{\pi}{2 p_e (m-1)} \quad (4.60)$$

となる。ロボット総数 $m=10$ のとき、最適な通信範囲 c が 1~3 の値をとる場合の p_e と R_{copt} との関係を Fig. 4.32 に示す。これは、Fig. 4.30において、“Max of P_I ” で示された曲線 (p_e, R_{copt}) 平面に射影することにより得られるものである。

Fig. 4.32でも、情報出力確率 p_e が増加するにしたがい、対応する R_{copt} の値が減少している。これはランダム探索でも見られた傾向であり、最適な通信半径は、情報をより頻繁に出力する密な通信では小さく、通信が疎なときには大きくなっている。

また、先ほども述べたように、ロボットの通信能力を表す c の値が増加するにつれて、同じ p_e の値に対する最適な通信範囲 R_{copt} がより大きくとれることも Fig. 4.32 から分かる。

衝突なしの場合においても、同様の手法で式 (4.55) に示す情報獲得の確率 $P_N(c, p_e, R_c, m)$ を最大化する R_c を同様に求めることができる。その手法は衝突ありの場合と同様であるので、詳細は省略する。

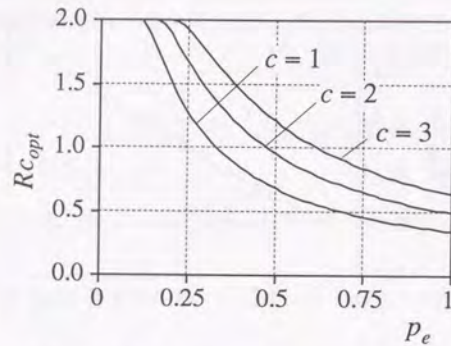


Fig. 4.32 c を変化させたときの $R_{c\text{opt}}$ と p_e の関係 (衝突あり, ロボット総数 $m=10$)

4.4.1.2.3 分割された領域の探索・掃引作業 この作業に対しては, ロボットの空間分布を表す $\text{Prob}[i|i \in S(x)]$ を, 4.3.1節で近似的にモデル化した。よって, 最適な通信範囲 x_{opt} を解析的に求めることはできない。

x_{opt} を導出する手法は, Fig. 4.20に示した通り, 次の(1)~(3)の手順を取る。

- (1) 最大情報獲得台数 c を与え, Fig. 4.22に示される P と (p_e, x) の関係を求める。
- (2) 情報出力確率 p_e が作業から与えられると, 対応する x_{opt} が求まる (Fig. 4.22)。
- (3) p_e に対して, x_{opt} を求める曲線を導出する (Fig. 4.23の “Max of P_I ” → Fig. 4.24)

最終的には, c が決まったとき, 上の手順で(3)に示した (p_e, x_{opt}) の関係を求めたい。

そこで, 衝突なしのときのランダム探索作業や協調搬送作業で行なったように, c が与えられたときの (p_e, x_{opt}) の関係を近似的に求める式を導出することを目的とする。

まず, 分割された領域探索作業において, ロボットの空間分布を示す $\text{Prob}[i|i \in S(x)]$ は, 式(4.5)によりモデル化される。

情報獲得の確率は, この式と, 式(4.6), (4.10), (4.14)を用いて, 衝突あり・なしそれぞれの場合について P_I , P_N として計算することができる。ただし, 衝突の有無に関わらず, 基本的には解析手法は同じなので, 以降では衝突ありの場合のみについて議論を進める。

分割された領域探索作業に対する情報獲得の確率 P と情報出力確率 p_e , 通信範囲 x または通信半径 R_c との関係は, $c=1$, 衝突ありのとき, Fig. 4.33に示すようになる。これらの作業に対しても, P のグラフの形状はランダム探索の場合である Fig. 4.17と類似している。

これらのグラフにおいて, “Max of P_I ” で指した曲線が, 作業などから与えられた p_e に対して, P を最大化する最適な通信範囲 x_{opt} の関係を表す。

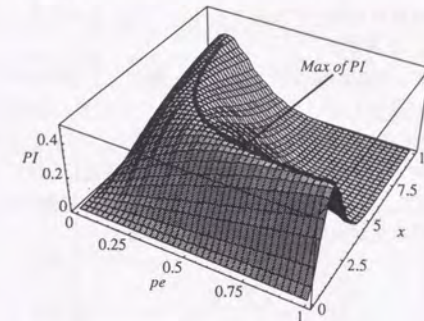


Fig. 4.33 情報獲得の確率 P (分割された領域の探索, $c=1$, 衝突あり)

さて, ここでの目的は, このように c が与えられたとき, p_e と x_{opt} の関係を表す近似式を求めることであった。これは, Fig. 4.33において, “Max of P_I ” で示された曲線を (p_e, x_{opt}) 平面に射影することにより得られる。異なる c の値に対して, この曲線を (p_e, x_{opt}) 平面に射影したものを Fig. 4.34 に示す。これは, ランダム探索・掃引の場合の Fig. 4.27, 協調搬送の Fig. 4.32に相当するものである。

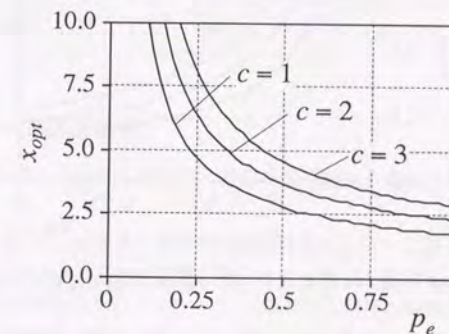


Fig. 4.34 c を変えたときの x_{opt} と p_e との関係 (分割された領域の探索)

Fig. 4.34 では, c が増加すると, グラフは上方に移動し, p_e に対する x_{opt} の値も増加し

ている。これは、ランダム移動 Fig. 4.27 や協調搬送 Fig. 4.32 の場合と同様、ロボットの通信能力を表す c の値が増加すれば最適な通信範囲は大きくとれることを示している。

このように、最大情報獲得台数 c が決められると、Fig. 4.34 のように与えられた p_e に対して最適な通信範囲 x_{opt} が求まる。

Fig. 4.34 では、ランダム探索の場合の Fig. 4.27 と類似した傾向が見られ、情報出力確率 p_e が大きくなると x_{opt} が減少していることが分かる。ランダム探索では、式 (4.39) や式 (4.41)~(4.43) に示したように、衝突の有無に関わらず x_{opt} は p_e に反比例することが導出されている。協調搬送でも、最適な通信範囲により決まる x_{opt} の値が p_e に反比例することが、式 (4.56) で示された。よって、これらの分割された領域の探索についても、 x_{opt} が p_e に反比例するというモデル化が有効であると予想される。

そこで、 x_{opt} を

$$x_{opt} = \frac{f(c)}{p_e} + g(c) \quad (4.61)$$

とモデル化することにする。そして、この式 (4.61) を、Fig. 4.34 に示す p_e と x_{opt} との関係に当てはめる。最小二乗法により、異なる c に対して、係数 $f(c)$ 、 $g(c)$ が計算できる。

Fig. 4.34 の (p_e, x_{opt}) の関係について、この当てはめを行なったものを Fig. 4.35 に示す。 x_{opt} あるいは $R_{c_{opt}}$ (Calculated) と、それぞれ式 (4.61) による当てはめ値 (Fitted) をグラフに示す。

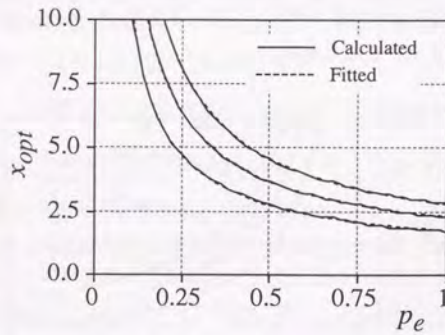


Fig. 4.35 式 (4.61) のモデルの x_{opt} への当てはめ ($c=1\sim3$)

Fig. 4.35 では、式 (4.61) が、 p_e に対する x_{opt} の関係がよくモデル化していることが分かる。実際、この分割された領域の探索では、誤差はほぼ 0、当てはまりの良さを示す相関係数は 0.99 以上であり、モデルが正確であることを示している。

以上により、式 (4.61) による最適通信範囲 x_{opt} のモデルの妥当性が示された。得られた係数 $f(c)$ 、 $g(c)$ を用いて、作業から与えられた p_e に対して、容易に x_{opt} を求めることができる。

それぞれの作業において、最大情報獲得台数 c と $f(c)$ 、 $g(c)$ の関係を Fig. 4.36 に示す。これらのグラフは、ランダム探索において、式 (4.39) の $F_I(c)$ と c との関係を示した Fig. 4.28 に相当する。

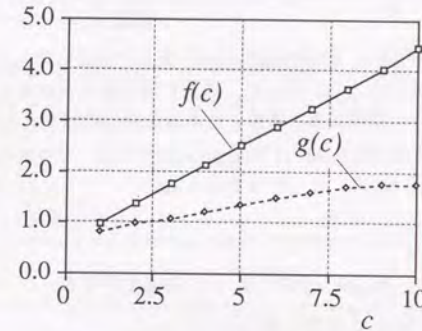


Fig. 4.36 式 (4.61) における係数 $f(c)$ 、 $g(c)$ (分割された領域の探索)

最大情報獲得台数 c は整数値をとるので、干渉なしのランダム探索の場合と同様、Fig. 4.36 に示した係数 $f(c)$ 、 $g(c)$ のデータは、メモリをとらずにロボットに与えておくことができる。ロボットは、作業における情報出力確率 p_e から、式 (4.61) を用いて最適通信範囲 x_{opt} を求めればよい。

4.4.2 複数台への情報伝達

複数台への情報伝達を考慮した場合に、最適な通信範囲の導出法がどのようなになるかをここで述べておく。

最適な通信範囲 x_{opt} は、複数台への情報伝達時間を最小化する通信範囲となる。これを求めるためには、ロボットの移動が情報伝達に与える影響を考慮し、また情報伝達の時間的性質を解析しなければならない。これらは、5章の情報伝達の時間的解析と設計で行なう内容であるので、具体的な解析は5章 5.3.2 に譲ることとする。ここでは、導出過程について述べておくにとどめる。

さて、3.3節では、時間 Δt あたりの $p(t)$ の増分を

$$\Delta p(t) = \beta(v, x) \Delta t P \{1 - p(t)\} \quad (4.62)$$

とモデル化した。

式 (4.15), (4.16) の $P_I(c, p_e, x, t)$, $P_N(c, p_e, x, t)$ を一般に $P(c, p_e, x, t)$ と書いて式 (3.1) に代入すると,

$$\Delta p(t) = \beta(v, \mathcal{M}, x) \Delta t P(c, p_e, x, t) \{1 - p(t)\} \quad (4.63)$$

となる。これを微分方程式にすると

$$\frac{dp(t)}{dt} = \beta(v, \mathcal{M}, x) P(c, p_e, x, t) \{1 - p(t)\} \quad (4.64)$$

となる。この式の左辺 $\frac{dp(t)}{dt}$ は、情報伝播の速度を表しているので、この値が大きいかほど情報がロボット間に伝播が速くなる。よって、右辺の値が最大となるように通信範囲 x を設計すれば、それが複数への情報伝播を考慮した最適な通信範囲であるということが出来る。

式 (4.64) で、 x を含む項は $\beta(v, \mathcal{M}, x) P(c, p_e, x, t)$ である。すなわち、複数台への伝達を考慮した最適な通信範囲 x_{opt} は、として求められる。

$$\beta(v, \mathcal{M}, x) P(c, p_e, x, t) \text{ を最大化する } x$$

$\beta(v, \mathcal{M}, x)$ は3章3.3節で定義した速度の影響を表す値である。

さらに、情報獲得の確率 $P(c, p_e, x, t)$ は、式 (4.18), (4.19) に示したように、時間 t における情報の伝播率 $p(t)$ にも依存する。したがって、どれだけの比率に情報を伝達するか、ということも x_{opt} の設計に影響を与える。

先にも述べた通り、 $\beta(v, \mathcal{M}, x)$ の導出は5章に譲り、具体的な解析はここでは行わない。

4.5 シミュレーションによる解析の検証と計算例

これまで、4.2章で示した協調作業モデルに対して最適な通信範囲の解析を行ってきた。

本節では、これらの解析を検証するため、局所的な通信を行なう多数のロボットを計算機上に実現し、情報伝達のシミュレーションを行ない、解析で求められた最適な通信範囲の有効性の検証を行なう。

4.5.1 シミュレーション環境

シミュレーション環境は、ロボットの空間分布の解析と同様に、Fig. 4.5(1)~(3) の作業モデルに基づいて多数ロボットをインプリメントした。シミュレーションのパラメータを、Table 4.4にまとめておく。

Table 4.4 シミュレーションのパラメータ

	(1) ランダム探索	(2) 協調搬送	(3) 分割された領域の探索
作業環境	5 × 5	半径1の円盤の搬送 各ロボットは円周上にランダムに配置	5 × 5, 各ロボットは一辺が単位長さの正方形内をランダム探索
ロボット数	25 台	10 台	25 台
最適化する対象	通信範囲 x	通信半径 R_c	通信範囲 x

衝突あり・なしの違いを検証するのは、ランダム探索の場合についてだけとする。その他の作業では、衝突ありのみについて情報獲得の確率を表す式 (4.10) の有効性を検証する。衝突なしの式 (4.14) は、同じ空間分布において足し合わせる項が異なるだけの差異であるから、衝突ありのときの有効性が示されれば、衝突なし場合も検証できると考えてもよい。よって、「協調搬送」と「分割された領域探索」の場合は、衝突ありの通信だけについてシミュレーションによる検証を行なう。

以降では、ロボットを移動させて500ステップの情報伝達のシミュレーションを行ない、情報が獲得される確率、あるいは情報獲得までの待ち時間の平均を解析結果と比較する。

4.5.2 情報獲得の確率と最適通信範囲の検証

4.5.2.1 ランダム掃引・探索

ランダム掃引・探索作業では、まず Fig. 4.25 の計算で用いたパラメータ $c=1$, $p_e=0.5$ について検証する。

Fig. 4.37 に、情報獲得の確率 P のシミュレーション結果 (Simulation) と理論値 (Theory) を、衝突あり・なしの場合について示す。また、衝突ありの場合には式 (4.39) から、衝突なしの場合には式 (4.45) から求められる最適な通信範囲 x_{opt} を合わせて示す。

パラメータを変化させても解析が有効であることを示すため、Fig. 4.38 には最大情報伝達台数 $c=2$ とした場合について、同様にシミュレーションを解析結果と比較する。

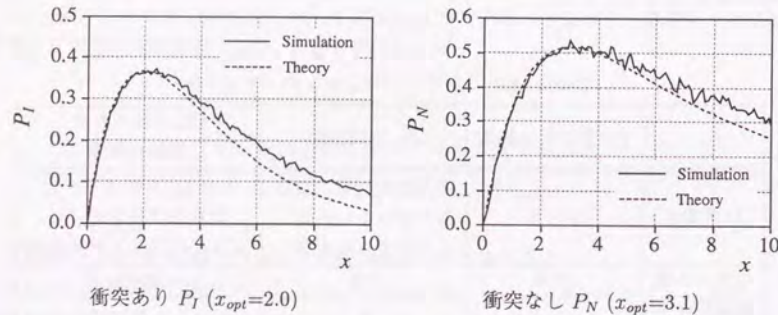
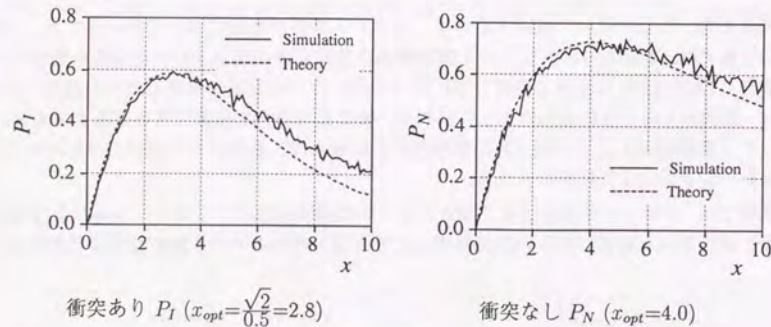
Fig. 4.37 情報獲得の確率 P のシミュレーション結果 ($c=1, p_e=0.5$)Fig. 4.38 情報獲得の確率 P のシミュレーション結果 ($c=2, p_e=0.5$)

Fig. 4.37, 4.38 で、解析から求められた x_{opt} において、情報獲得の確率 P_I , P_N がそれぞれ最大値となっている。この x_{opt} の付近では、解析値はシミュレーション結果によく一致していることが分かる。

大きい通信範囲 x に対しては、やや誤差が大きくなっている。これは、ロボットの数 c が有限であるため、 x が大きいとき境界の外からは干渉を受けないことによると考えられる。しかし、 x_{opt} の付近ではモデルは 5% 以内の誤差でよく一致しており、通信範囲の設計には影響しない。

このように、異なるパラメータに対し、解析結果はシミュレーションを正確にモデル化している。以上から、情報獲得の確率に関する解析の有効性が示された。

また、ここで情報伝達の待ち時間 W についても検証する。任意のロボットが、他から発信された情報を獲得するまでに必要なステップ数を数え上げ、その平均をシミュレーション結果として用いる。理論値は、幾何分布を用いて、式 (4.22) 情報獲得の確率 P の逆数として求める。

ここでは、結果を見やすくするため、情報は常時出力されるとして、情報出力の確率 $p_e=1$ に固定し、最大情報獲得台数 c を 1, 2 と変えてシミュレーションを行ないその結果 (Simulation) を、理論値 (Theory) と比較した。これを、Fig. 4.39, 4.40 に示す。

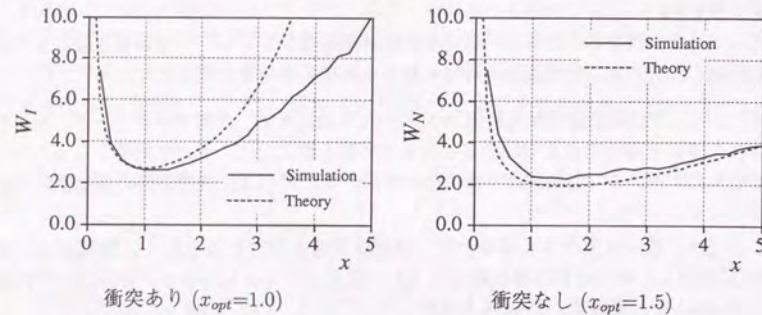
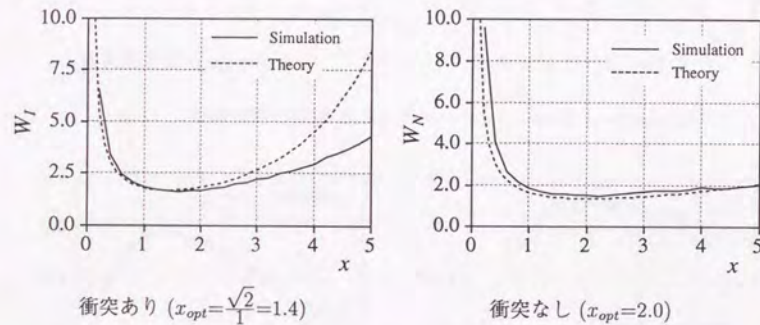
Fig. 4.39 情報獲得の待ち時間 W のシミュレーション結果 ($c=1, p_e=1.0$)Fig. 4.40 情報獲得の待ち時間 W のシミュレーション結果 ($c=2, p_e=1.0$)

Fig. 4.39, 4.40とも、解析から求められた最適な通信範囲 x_{opt} の付近でモデルは正確であり、 x_{opt} で情報伝達の待ち時間 W は最小値をとっていることが分かる。

やはり通信範囲 x が大きいときにはシミュレーションに対する理論値の誤差も拡大する。これは、シミュレーション時間が有限であることに起因すると考えられる。 x が大きいとき、理論的には情報伝達時間 W は非常に大きい値をとる。しかし、シミュレーションを有限の時間で打ち切るため、その時点で伝達されておらず待ち状態にある情報はカウントされない。このようにシミュレーション結果は理論値よりも小さくなり、誤差が拡大すると推測される。

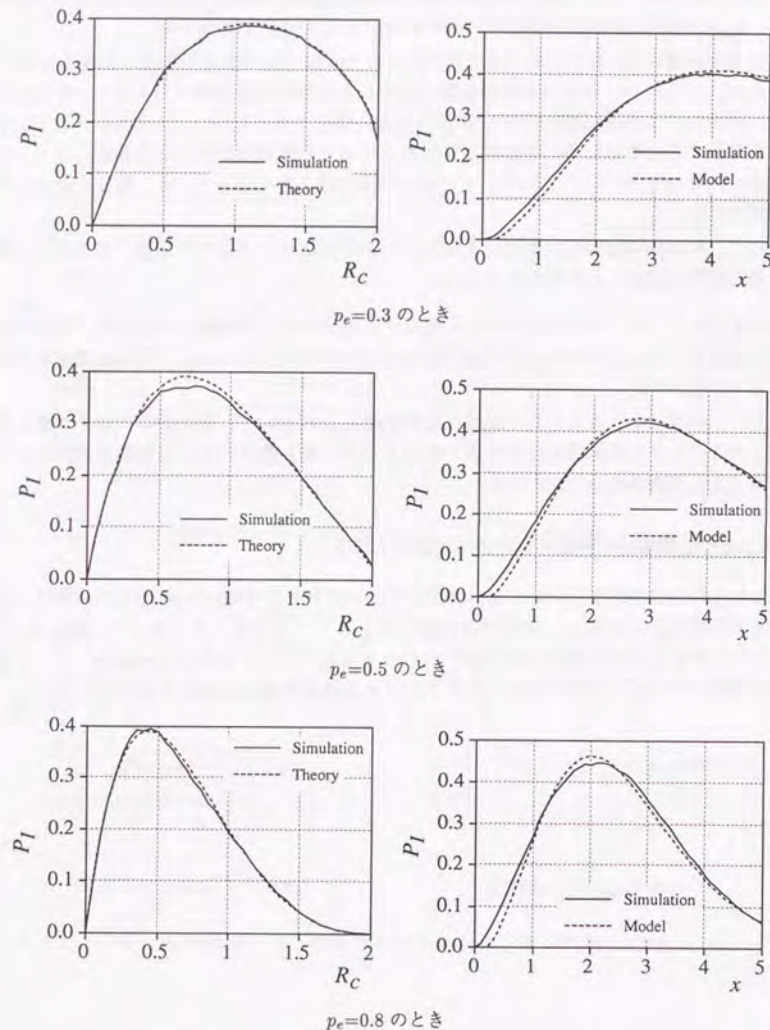
ただ、解析から導出した最適な通信範囲の付近ではモデルは十分正確であるので、最適な通信範囲の設計には影響しない。

以上のシミュレーションにおいて、解析から導出された情報獲得の確率 P 、情報伝達の待ち時間 W は、多数ロボットの通信の挙動をよくモデル化しており、解析結果が有効であることが示された。

また、解析により導出された最適な通信範囲 x_{opt} において、情報獲得の確率が最大化される。このとき情報獲得の待ち時間が最小となり、最も効率の良い通信範囲が設計されていることも確認された。

4.5.2.2 協調搬送と分割された領域の掃引・探索

これらの二つの作業についても、同様に多数ロボットを Table 4.4 に示したパラメータに従って計算機上を実現し、情報獲得の確率のシミュレーションを行なった。Fig. 4.41 に、 $c=1$ として衝突ありの情報出力の確率 P_I のシミュレーション結果 (Simulation) を、それぞれの作業について、本章で行なったモデルによる計算結果 (Model) と比較して示す。

協調搬送 (ロボット数 $m=10$)

分割された領域探索

Fig. 4.41 情報獲得の確率 P のシミュレーション結果 ($c=1$)

Fig. 4.41では、協調搬送・分割された領域探索のそれぞれの作業について、理論値がシミュレーション結果と通信範囲 x 全域にわたってよく一致している。理論的に情報獲得の確率 P が最大となる R_{opt} と x_{opt} においてシミュレーションでも同様に P が最大値となっており、4.4節で求められた最適な通信範囲 x_{opt} が有効であることが示された。

本節では、多数のロボットを計算機上に実現して情報伝達のシミュレーションを行なった。多数ロボットの基本的作業と考えられるランダム探索・分割された領域の探索、協調搬送について、それぞれ情報伝達の効率の理論値とシミュレーションを比較した。その結果、それぞれの作業において理論のモデルが良く一致し、解析によって得られた最適な通信範囲 x_{opt} においてシミュレーションでも情報獲得の確率が最大化されることが確認された。

これにより、本章で行なってきた最適な通信範囲に関する解析の有効性が示された。

4.5.3 具体例の計算

ここまでのシミュレーションにより解析の有効性が示されたので、具体的な数値を用いて、最適な通信範囲や待ち時間がどの程度になるかを計算しておく。計算例の対象とする協調作業としては、ランダム探索による地図生成と協調搬送を取り上げる。

4.5.3.1 ランダム探索による地図生成

多数のロボットが協調して環境を探索する作業に関しては、1章で示したように、多くの研究が行なわれている [Singh93] [Lucarini93] [Beckers94] [Kura95] [市川 95]。

ここでは、その中でも、[Singh93] に示される多数ロボットが協調して未知環境を探索し、地図を生成する作業を取りあげる。[Singh93] では、例えば Fig. 4.42 に示すような 60×60 のグリッドにより表される環境を、2 台のロボットが探索し、お互いに情報を交換しあうことにより環境を構築していくアルゴリズムを示している。また、2 台のロボットとしては通信半径が大きいもの (9 グリッド) と小さいもの (3 グリッド) のを考え、通信は常時大域的に可能であると仮定している。

ここでは、センシング範囲が小さいロボットのみを考え、より多くのロボットが大域的でなく局所的な通信を用いて同様の地図生成作業を行なうことを想定する。通信するデータ量を評価し、これまでの解析により設計された最適な通信範囲がどのようになるかを調べる。

ロボットは合計 20 台存在するとし、1 単位時間 (t_u と表す) に 1 グリッド分の距離をランダムに動くとする。また各ロボットは、Fig. 4.42 に示す環境のうち、半径 3 グリッドでそれまでにセンシングした周囲 10 グリッド四方の情報を、自身の位置とともに出力するとする。情報パケットには、これらの局所情報が入るスロットを複数用意する。

これらを考慮し、通信に用いる情報パケットを Fig. 4.43 のように定義する。

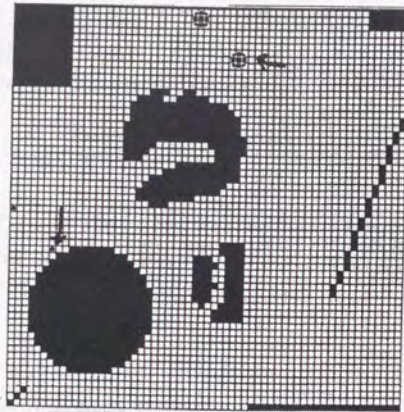


Fig. 4.42 複数ロボットによる探索・地図生成作業環境 [Singh93]

内容	データ形式	データ量
ヘッダ部	文字列	15 [byte] = 120[bit]
	ロボットの位置 (x,y) [Char 型]	2[byte] = 16[bit]
地図情報 1	各グリッドに (Filled, Empty, Unknown) の情報を 2[bit] で割り付ける.	$100 \times 2 = 200$ [bit]
		計 216[bit]
地図情報 2	別のロボットからの位置, 地図情報	
.....	〃	
地図情報 10	〃	
	合計	2192[bit] = 274[byte]

Fig. 4.43 協調探索・地図生成作業における情報パッケージ

ここでヘッダ部は、4.6節であと述べるように、ハード的な情報の先頭の検出や、設定した通信範囲外には情報を伝達しないようにするソフト的なヘッダなどとして用いられる

部分を想定する。ロボットは、自分のセンシングと、他のロボットから伝播してきた局所情報を用いて、それぞれが内部情報として持つ地図を更新していく。このようにすれば、地図全体に関する情報を毎回伝達しなくてもよく、作業の効率をそれほど落とさずに済む。全グリッドが Filled または Empty で表されれば、地図生成作業は終了する。

さてここで、最適な通信範囲を計算してみる。この作業におけるロボット系のパラメータは Table 4.5 に示す通りである。最大情報獲得台数 $c=1$ 、通信は衝突ありとする。ロボットの情報処理の時間も考え、情報出力確率 $p_e=0.5$ とした。

ここでは、転送速度 2400[bps] を基準と考え、サンプリング時間の長さ t_u でロボットは 1 グリッド進むとする。

Table 4.5 地図生成作業におけるパラメータ

記号	パラメータ名	パラメータ値
ρ	ロボット密度	$\frac{20}{60 \times 60} = 5.56 \times 10^{-3}$
p_e	情報出力確率	0.5
c	最大情報獲得台数	1
R_s	地図のセンシング範囲	3
t_u	1 単位時間の長さ	$2 \times \frac{2192}{2400} = 1.82$ [sec]
		$2 \times \frac{2192}{19200} = 0.23$ [sec]
v	ロボットの移動速度	1.0 [グリッド/ t_u] (転送速度 2400bps の場合を基準)

さて、この作業におけるロボットの移動はランダム移動である。よって、1 台あるいは複数台への伝達における最適な情報出力半径 R_{copt} は、式 (4.40) あるいは次章 5.3.2 を用いて、Table 4.5 のパラメータから

$$R_{copt} = \begin{cases} 7.57 & (1 \text{ 台への伝達}) \\ 11.92 \text{ [グリッド]} & (\text{複数台への伝達}) \end{cases} \quad (4.65)$$

と求まる。1 グリッドを 50[cm] と仮定すると、環境は 30[m] \times 30[m] となり、最適な通信範囲はそれぞれ 3.78[m], 5.96[m] となる。

また、1 台への情報伝達の最適化を行なった場合、情報伝達に必要な平均の待ち時間 W は、1 単位時間を t_u [sec] として、

$$W = 2.71t_u$$

である。実際の待ち時間は、転送速度が2400[bps]のときは5.05[sec]、19200[bps]のときは0.62[sec]と計算される。

複数台への伝達については、次章5.4節で計算する。

4.5.3.2 持ち替えを含む協調搬送

もう一つの例として、協調搬送作業について、最適な情報出力範囲を計算する。4.2.2項で述べたように、この作業も近年盛んに取り上げられている [Drogoul93] [Hashimoto93] [Stilwell94] [Sasaki95] [Ota95]。

ここでは、円形の対象物を、多数のロボットで持ち替えながら搬送する作業 [Ota95] について計算を行なう。

搬送対象物は、Fig. 4.5(2)に示すように円形である。各ロボットは、障害物の回避などのため、必要に応じて円周上を動いて持ち替えを行なう。

[Ota95]では、3台のロボットによる搬送において、次のような通信を行なっている。

(1) 各ロボットの円周上の位置を伝達する。

(2) 各ロボットが認識した障害物などの環境情報を伝達する

サンプリングタイムごとに、これらの情報を伝達し、これをもとに各ロボットは次の移動位置を計算して移動する。また、[Ota95]には、物体を落としたりしないように、持ち替えの際には対象物を固く把持するロボットと、円周上で位置を替えるロボットとを決定するアルゴリズムが示されている。

この研究ではロボットが3台であるが、ロボットが多数となると、大域的に全てのロボットが通信するのは困難になってくる。そこで、局所的な通信を導入し、解析に基づいて設計した通信範囲を適用する。

まず、先に示した情報伝達を実現するため、作業に用いる共通の情報 packets を Fig. 4.44 のように設定する。これまでの例と同様、搬送対象物の半径は1、ロボット総数 $m=10$ 台とする。

各ロボットは、Fig. 4.44の情報 packets を作業における共通の情報形式として用い、自身の位置や環境情報など、必要な部分を更新して半径 R_c に出力する。

搬送作業におけるロボット系のパラメータは Table 4.6に示す通りである。ランダム探索作業の場合と同様、最大情報獲得台数 $c=1$ 、情報出力確率 $p_e=0.5$ とする。最大情報獲得台数 $c=1$ 、通信は衝突ありとする。

空間分布のモデルの項4.3.1で述べたように、持ち替え動作は障害物など環境により動的に変化するので、ロボットの位置は円周上にランダムに存在するとモデル化する。

Table 4.6のパラメータに対し、1台への情報伝達における解析から求めた最適な通信半径 R_c は、式(4.60)より次のように求められる。

内容	データ形式	データ量
ヘッダ部	文字列	15 [byte] = 120[bit]
ロボット識別番号	Char 型	1 [byte] = 8[bit]
環境情報 (障害物の頂点)	極座標表示 (r, θ) : Float 型, 10 点分	$8[\text{byte}] \times 10$ $= 80[\text{byte}]$ $= 640[\text{bit}]$
各ロボットの 位置情報 (10 台分)	円周上の θ 座標: Float 型, 10 台分	ロボット 1 ... $4[\text{byte}] \times 10$ $= 40 [\text{byte}]$ = 320[bit] ロボット j ... ロボット 10
合計		136[byte] = 1088[bit]

Fig. 4.44 協調搬送作業における情報 packets

Table 4.6 協調搬送作業におけるパラメータ

記号	パラメータ名	パラメータ値
m	ロボット総数	10
p_e	情報出力確率	0.5
c	最大情報獲得台数	1
t_u	1 単位時間の長さ	$2400[\text{bps}]$ $2 \times \frac{1088}{2400} = 0.91 [\text{sec}]$ $19200[\text{bps}]$ $2 \times \frac{1088}{19200} = 0.11 [\text{sec}]$

$$\begin{aligned}
 R_{\text{copt}} &= 2 \sin \frac{\pi}{2p_e(m-1)} \\
 &= 2 \sin \frac{\pi}{9} \\
 &= 0.684
 \end{aligned} \tag{4.66}$$

例えば、搬送対象物の半径が2[m]であるとする、式(4.66)から $R_{\text{copt}}=1.37[\text{m}]$ と求められる。協調搬送作業においては、ロボットの移動が情報伝播に与える影響はランダム探

索に比べて小さい。よって複数への伝達を考慮した場合も、この最適な通信半径を適用することが可能である。

また、平均の情報伝達時間 W は、

$$W = 2.57t_u$$

と計算される。転送速度が 2400[bps] のときは 2.33[sec]、19200[bps] のときは 0.28[sec] とする。

以上までそれぞれの協調作業に対して計算された、1 台への情報伝達における最適な通信範囲と平均情報伝達時間をまとめると、Table 4.7 のようになる。

Table 4.7 協調地図生成・協調搬送作業における最適な通信範囲と伝達時間

作業	パケット データ長	パケット送信 転送速度 時間 ($=1/t_u$) [bps]	最適な 通信範囲	伝達時間 [t_u] [sec]
協調地図生成 [Singh93] (60 × 60 グリッド)	2192[bit]	1.82[sec] 0.23[sec]	2400 19200	7.57 [グリッド] 2.71 0.62
協調搬送 [Ota95] (円形対象物、半径 2[m])	1088[bit]	0.91[sec] 0.11[sec]	2400 19200	2.33 2.57 0.28

Table 4.7 から、探索・搬送作業において、最適な通信範囲が環境や対象物に対してどのくらいのスケールかが分かる。また、それを用いたときどのくらいの伝達時間が必要かについても、具体的に知ることができる。搬送作業では、地図生成作業に比較して伝達する情報量が少ないため、伝達時間は短くなっている。

このように、実際の作業における最適な通信範囲、伝達時間が具体的に評価できた。この結果は、複数ロボットの作業計画に利用が可能である。

4.6 赤外線を用いた通信実験

本節では、局所通信における通信範囲と情報の伝達の間を調べるために行なった実験 [小山 95] について述べる。赤外線を用いて情報出力範囲の調節が可能な通信装置を製作し、その基本機能の確認と本章で行なった通信範囲の設計の検証を行なう。

局所的通信を実現する装置には、通信範囲が調節できること、そして不要な情報による衝突を避けるため、設定した通信範囲の外にはなるべく情報が届かないように通信範囲を限定できることが要求される。しかし、多数移動ロボットのための局所的な通信装置で、通信範囲が調節できるものはこれまで研究が見られなかった。そこで本論文では、赤外線を用いて、このような通信範囲の調節と限定が可能な通信装置を設計・開発し、実験に用いた。

4.6.1 赤外線を用いた局所的な通信の実現

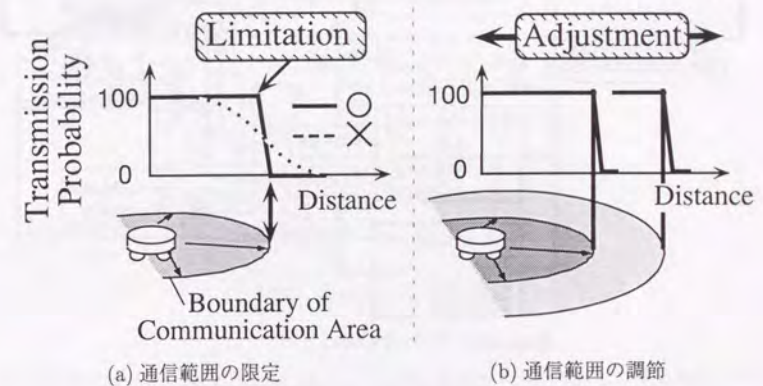


Fig. 4.45 通信範囲の限定と調節

先に述べた通り、多数ロボットの局所的な通信に必要とされる仕様として、

通信範囲の限定：目標とする通信範囲以内のロボットには情報が伝達されるが、それより遠方のロボットには情報が獲得されないようにする (Fig. 4.45(a))。

通信範囲の調節：信号の出力範囲の調節を行なうことができる (Fig. 4.45(b))。

非同期通信：あるロボットが移動して、別のロボットの通信範囲に入ったとき、そのロボットが情報を発信している途中でも、情報を受信することができる。

などがあげられる。

これらの仕様を実現するため、以下で説明するような赤外線による通信装置を設計・製作した。

実験装置の概要について説明する。

実験装置の全体図を Fig.4.46 に示す。この実験では移動ロボットは動かさずに行なうこととし、図の点線で囲った部分を使用する。

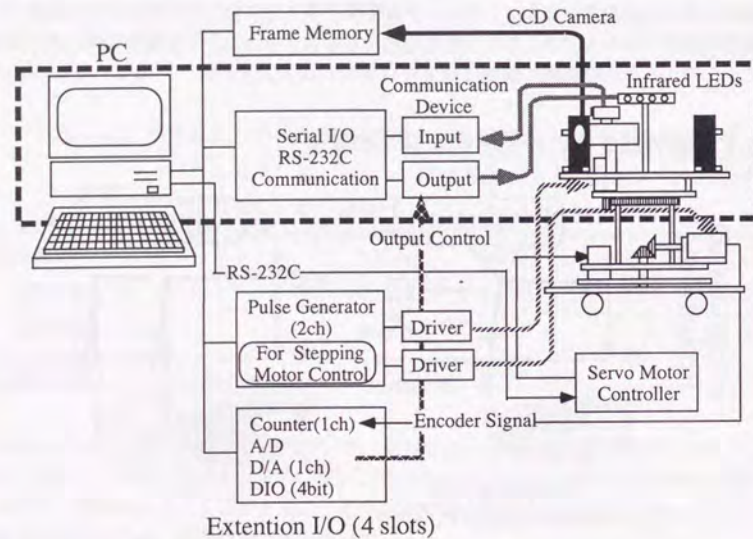


Fig. 4.46 赤外線を用いた通信実験装置の全体図

通信は赤外線 LED を用いて行っており、先ほど示した通信装置に要求される仕様は、次のように実現されている。

通信範囲の限定：特定の文字列からなるヘッダ部を含むデータを送り、そのヘッダ部分が正しく受けとられたときだけデータを読み込む。

通信範囲の調節：赤外線 LED に印加する電圧を変化させることにより信号の出力範囲を調節する。

非同期通信：あるロボットが移動して、別のロボットの通信範囲に入ったとき、そのロボットが情報を発信している途中でも、特定の先頭キャラクターを検出することにより、

データの先頭を検出し、情報を受信する。これは、8bit シフトレジスタを用いて、ハードウェア的に行なう。

通信装置の構成は、Fig. 4.47 に示す通りである。通信のインターフェイスとして RS232C を使用した。Fig. 4.48 の写真に示すように、送信部は無指向性の赤外線通信を実現するために赤外線 LED を円周上 360 度並べてある。一つの赤外線 LED で 20 度の角度内に対し信号を発信することが出来るので、これを円周上に 18 個取り付けた。

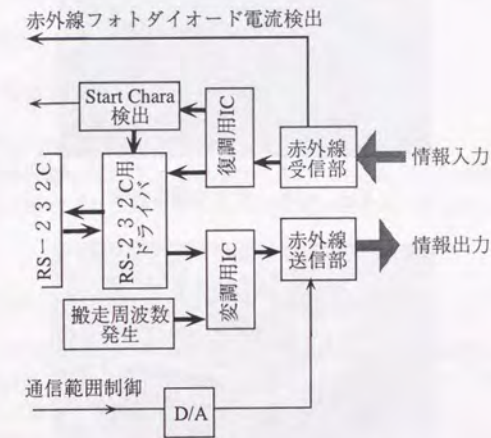


Fig. 4.47 通信部の構成

通信装置の部分の写真を Fig. 4.48 に、また移動ロボットに搭載した通信装置の写真を Fig. 4.49 に示す。Fig. 4.48 で、通信装置の下の部分にあるのは、CCD カメラと LED のサインボードを用いたロボット間相対位置・姿勢計測システム [新井 94a] である。

この通信装置の仕様を以下に示す。

通信媒体：赤外線

送信角度：360°

受信角度：±45°

変調方式：周波数変調 [中心周波数 38kHz]

通信速度：2400 bps

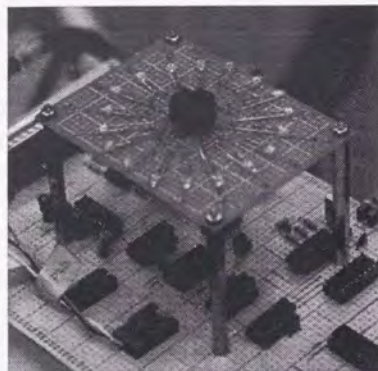


Fig. 4.48 赤外線通信装置

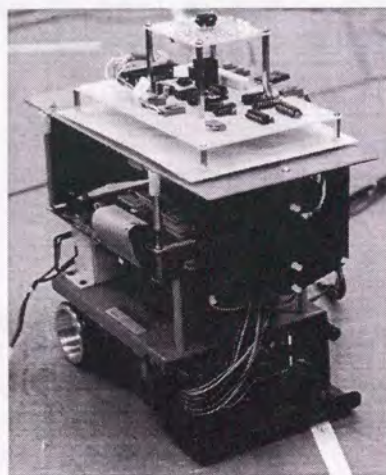


Fig. 4.49 移動ロボットに搭載した通信装置

通信装置の受信部にはシャープ社製赤外線リモコンセンサ IS1U60 を用いた。このセンサには、信号処理を行なう回路が内蔵されており、38kHz を中心に周波数変調された信号を受信し、デジタル化して出力する。

センサは、正面±45°の範囲で赤外線 LED から出力された信号を受信することができる。

これらを、Fig. 4.48に示すように4個並列に90°の角度をなすように設置し、これらの信号の論理和をとることにより、全周方向からの受信が可能となる。ただし、信号の到達距離は一樣ではなく、入射する角度により、同じ出力の信号でも伝達距離が異なってくる。

またここでは、一つの周波数帯のみを用いているので、最大情報獲得台数 $c=1$ である。

4.6.2 通信の基礎実験

通信装置の通信特性を調べるために、以下の二つの基礎実験を行なった。

- 通信範囲の限定の実験
- 通信範囲の調節の実験

なお、仕様の中に示した「非同期な通信」を実現するためのハードウェアによる先頭キャラクタ検出は、有効に働いていることが確認できた。これにより、情報を送信しているロボットの通信範囲に送信途中から入っても、この機能により、送られたデータを獲得することができる。

4.6.2.1 通信範囲の限定の実験

Fig. 4.46に示した装置を用いて赤外線 LED に電圧を加えて通信距離を調節するとき、通常は伝達率が100%から0%に変化するのにかなりの距離を要する。このように伝達率が0%と100%の間の中間的な値をとる範囲では、通信範囲が正確に設定されていることにはならない。この範囲では、パケットの内容が正確に伝わらず、誤った情報が拡散してしまう可能性が増大する。これでは、本章で行なってきた局所的な通信範囲の設計の実現は困難となる。

この設計を実現するためには、通信装置に対する要求仕様のところで述べたように、「設定した通信範囲よりも外側にあるロボットにはなるべく情報が伝達されないようにする」という仕様を実現する必要がある。

これを、

- データの先頭に10文字からなる文字列の「ヘッダ部」を設ける
- ヘッダ部の文字が全て受信されないと、データを読み込まないようにする

というソフトウェアからの制御により実現することを試みた。冗長なデータを送るため、送信速度は多少遅くなる。

実験では、赤外線 LED にかかる電圧を一定にして、200 バイトの情報を送信した。受信された情報を、1 バイトごとに送信した情報と比較することにより、伝送された確率と通信距離の関係を調べた。実験結果として、印加電圧を2.8[V]としたときの実験の結果を

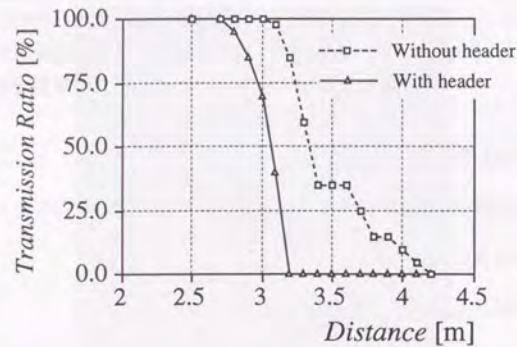


Fig. 4.50 通信の限定の実験: 通信距離 (Distance) と情報伝達率 (Transmission Ratio) の関係

Fig. 4.50 に示す。上記に示した通信範囲の限定を行なったものを “With header” で、行なわなかったものを “Without header” で示す。

Fig. 4.50 では、通信範囲の限定を行なわない場合には、情報の伝達率が 100% から 0% となるのに 1[m] 以上の距離を要する。これは、通信範囲の設計において、それだけ不確実性があることになり、好ましくないといえる。

これに対し、通信範囲の限定を行なった場合には、同じく伝達率が 100% から 0% となるのに必要な距離が約 50% に減少し、0.5[m] となっている。ただし、通信範囲もやや狭まっていることが認められる。

この結果から、ここに示した通信範囲の限定手法が有効であることがわかる。

4.6.2.2 通信範囲の調節の実験

通信範囲の調節は、赤外線 LED に印加する電圧で調節するため、その電圧と通信範囲の関係を調べた。通信距離としては、搬送や探索などの協調において頻繁に用いられると考えられる 1~4[m] 程度を想定した。

先にも述べた通り、信号が入射してくる角度により、情報の伝達距離が多少異なってくる。ここでは、Fig. 4.51 に示すように、信号が入ってくる角度を 0° 、 15° 、 30° 、 45° と変え、赤外線 LED への印加電圧 2.0~3.6[V] に対して、その情報の到達距離を調べた。これらについて調べれば、受信ユニット配置の対称性から、前週方向における情報の伝達距離が分かる。

この結果を Fig. 4.52 に示す。これは、Fig. 4.50 で示した通信の限定を行なった場合の、

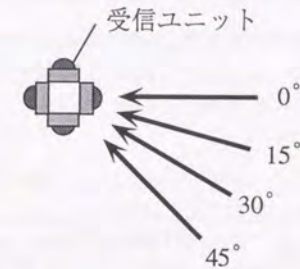


Fig. 4.51 赤外線受信ユニットに対する入射角

100% 情報が伝達される通信範囲と出力電圧との関係である。送るデータは、通信範囲限定の実験と同様に 200 文字とした。入射角 15° の場合は、 0° とほぼ同じであったので省略した。

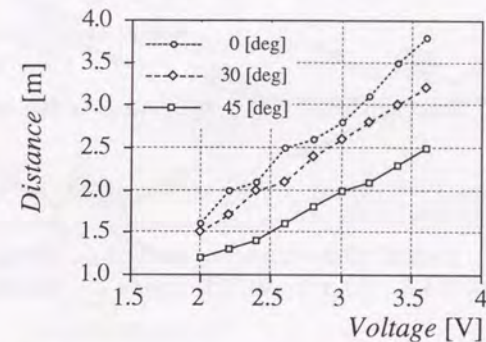


Fig. 4.52 通信距離 (Distance) と出力電圧 (Voltage) の関係

Fig. 4.52 では、それぞれの入射角において、印加する電圧が増加するにつれて、通信距離も増加することが確認できる。

Fig. 4.52 から、線形近似によって印加電圧 V と通信距離 D の関係を表すことができると考えられる。より長い通信距離に対しては、LED からの放射光の強度が通常距離の二乗に反比例して減少すると考えられるが、上記に示した範囲ではまだこの傾向は認められなかった。

通信距離 D を、電圧 V を用いて最小二乗法により線形近似すると

$$\begin{aligned} D &= 1.30V + 0.97 \quad (0[\text{deg}]) \\ D &= 1.07V + 0.62 \quad (30[\text{deg}]) \\ D &= 0.83V + 0.53 \quad (45[\text{deg}]) \end{aligned} \quad (4.67)$$

となる。

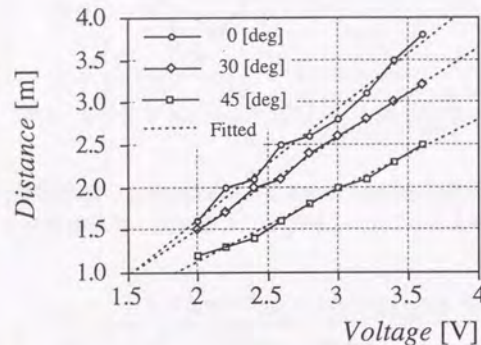


Fig. 4.53 通信距離 (Distance) と出力電圧 (Voltage) の関係の線形近似

これは、Fig. 4.53において“Fitted”で示された点線である。これにより、実験値がよくモデル化されていることがわかる。

この関係を用いて、ある範囲に情報の出力を行いたいときに、赤外線 LED に加えるべき電圧を求めることができる。以上から、電圧を変化させることで通信範囲を調節出来ることが示された。

以上に示したのは、赤外線を用いた局所的な通信装置の基礎的な性能の確認である。本節の冒頭で、装置に要求される仕様として示した

- 通信範囲の限定
- 通信範囲の調節
- 非同期な通信

がそれぞれ、実現されていることが確認された。

4.6.3 最適な通信範囲の検証

以上まで、赤外線を用いた局所的通信装置の基本的機能が確認されたので、本章では、これを用いて最適な通信範囲の検証を行なう。

4.6.3.1 実験環境とパラメータ

ここでは、Fig. 4.54に示すように、あるロボット (Receiver) の周囲に、ロボット (Transmitter) をランダムに配置し、それらのロボットに半径 R_c を変えてに情報を出力させる。これにより、ロボットのランダム移動を擬似的に実現した。 R_c の値は、全ての Transmitter ロボットについて同じとする。このとき、これまでと同様に 200 文字のデータを送信し、それが受けとられたかどうかを示す情報獲得の確率を測定する。

これは、協調作業において、(1) 作業情報周知の通信では、各ロボットがランダムに移動している場合、(2) 作業実行時の通信では、作業として、ランダム探索を協調して行なっている場合に相当する。

実験に用いるパラメータを Table 4.8 に示す。

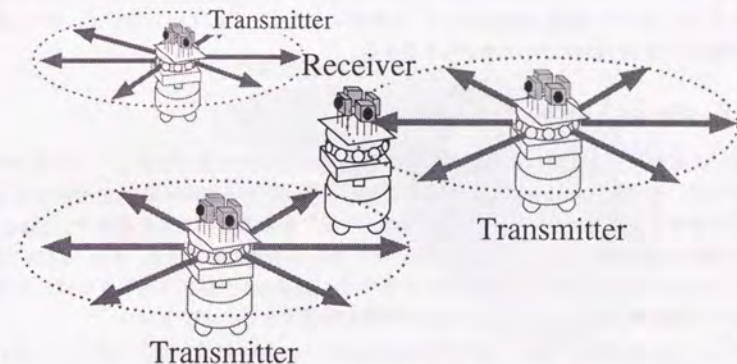


Fig. 4.54 最適な通信範囲検証の実験 (ランダム探索)

前項で述べたように、Receiver ロボットへの情報の到達距離は赤外線の入射角に依存し、通信範囲の境界の形は円形とはならない。情報獲得の確率は通信範囲の面積のみから決まるので、最適な通信範囲に関する解析は適用可能である。

ただし、Fig. 4.54に示す本実験では、結果を見やすくするため、 45° からの入射の場合を基準として、情報の到達範囲の境界を円形に補正して結果を示す。まず、乱数により Receiver ロボットから 2.5[m] の範囲にロボットをランダムに配置する。ここで、Transmitter ロボッ

Table 4.8 実験におけるパラメータ

パラメータ名	パラメータ値
ρ (ロボット密度)	0.092 [台/m ²] [半径 2.5[m] の円に 1.8 台に相当]
R_c (通信距離)	1~2.5[m] (45° からの到達距離に換算して)
p_e (情報出力確率)	1.0
c (最大情報獲得台数)	1
α (情報が衝突しなくなる距離の R_c に対する比率 [後述])	0.5 R_c
伝達する情報	200 byte

トの情報の出力距離を R_c に設定したとする。Receiver から角度 α° にある Transmitter については、Fig. 4.53において、同じ R_c に対する印加電圧 V' を式 (4.67) から求める。例えば、 R_c を 45° からの入射を基準にして 2[m] に設定すると、印加電圧 V は 3[V] と求められる。ある Transmitter が Receiver から 0° の角度にあれば、Fig. 4.53において、0° に対する印加電圧 V' が式 (4.67) から 2.28[V] と求まる。

4.6.3.2 実験における衝突に関する考察

実験に入る前に、本実験装置の特性を考慮した補正について述べておく。これまでの理論解析では、衝突ありの場合には、同時に 2 台のロボットから情報の出力を受けたときには、どの情報も受けとれないとした。これは、一般に無線を用いた局所通信や、Ethernet などの有線 LAN の場合には成り立つ。赤外線を用いた本通信装置でも、Fig. 4.55 に示すように、Receiver から同じような距離に 2 台の Transmitter が存在するときには、これらの場合と同様に衝突が生じ、どちらからの情報も獲得することができない。

しかし、Fig. 4.56 のように 1 台の Transmitter が Receiver に近い位置に存在し、遠く離れた位置にもう 1 台 Transmitter が存在すると、衝突は生じずに近いロボットからの情報が獲得される。

最適な通信範囲は、これまで述べてきたように情報獲得の確率を最大化する通信範囲として求められるが、その計算において、以上に示した衝突に関する効果を考慮しなければならない。以下では、その解析を示す。

赤外線による通信装置における情報の衝突に関しては、

- 2 台のロボット間の距離がある一定の間隔以上あれば、衝突が生じない
- その間隔は情報の出力範囲 R_c にほぼ比例して増加する

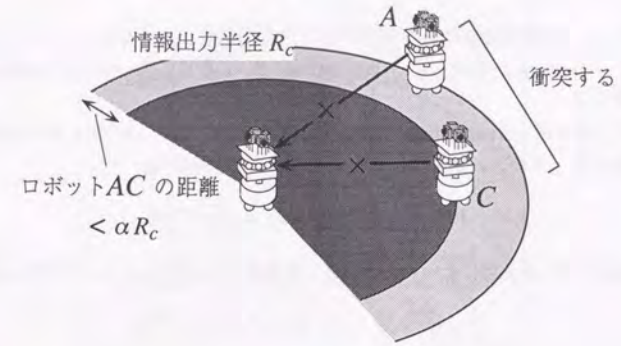


Fig. 4.55 赤外線を用いた局所通信装置で衝突が生じる場合

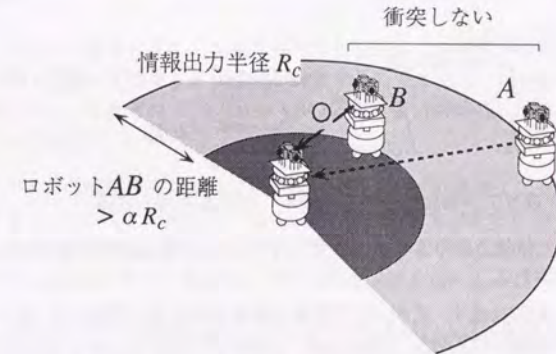


Fig. 4.56 赤外線を用いた局所通信装置で衝突が生じない場合

という性質が見られた。Fig. 4.55, Fig. 4.56 に示すように、この間隔の R_c に対する比を α とすると、この値はほぼ 0.5 であった。ただし、この間隔の値は最低でも 1[m] である。

そこで、この効果による情報獲得の確率の増加分を考慮する。まず、この効果を考慮しない場合のランダム探索における情報獲得の確率 P_I は、最大情報獲得台数 $c=1$ のとき、式 (4.36) から

$$P_I = p_e x e^{-p_e x} = p_e \rho \pi R_c^2 e^{-p_e \pi R_c^2} \quad (4.68)$$

となる。

2台のロボットの間隔が αR_c より大きいとき、衝突が生じなくなる。ここで、ランダム分布において、Receiverから最も近いTransmitterと、2番目に近いものの距離 r の確率分布関数を求める。

Receiverと最も近いTransmitterとの距離の2乗 R_1^2 が ξ と $\xi+d\xi$ の間にある確率 $\text{Prob}[\xi \leq R_1^2 < \xi+d\xi]$ は、ポアソン分布から次のように求まる [巖佐 90]。

$$\text{Prob}[\xi \leq R_1^2 < \xi+d\xi] = \rho\pi e^{-\rho\pi\xi} d\xi \quad (4.69)$$

また同様に、2番目に近いロボットとの距離の2乗 R_2^2 が ζ と $\zeta+d\zeta$ の間にある確率は、

$$\text{Prob}[\zeta \leq R_2^2 < \zeta+d\zeta] = (\rho\pi)^2 \zeta e^{-\rho\pi\zeta} d\zeta \quad (4.70)$$

となる。

よって、 R_c がさまざまな値をとるとき、これらの差 $R_2 - R_1$ が αR_c よりも大きくなる確率 $\text{Prob}[R_2 - R_1 > \alpha R_c]$ を計算すれば、衝突が起こらないことによる情報獲得の確率の増分が求められる。これは、次の重積分

$$\begin{aligned} \text{Prob}[R_2 - R_1 > \alpha R_c] &= \int_0^{R_c(1-\alpha)} \int_{(\sqrt{\xi+\alpha R_c})^2}^{R_c^2} \text{Prob}[\xi \leq R_1^2 < \xi+d\xi] \text{Prob}[\zeta \leq R_2^2 < \zeta+d\zeta] \\ &= \int_0^{R_c(1-\alpha)} \int_{(\sqrt{\xi+\alpha R_c})^2}^{R_c^2} (\rho\pi)^2 \zeta e^{-\rho\pi(\xi+\zeta)} d\xi d\zeta \end{aligned} \quad (4.71)$$

を $\alpha R_c > 1[\text{m}]$ が成り立つ場合について求めることにより得られる。

結局、補正した情報獲得の確率 P_I' は、式(4.70)の P_I と式(4.71)の $\text{Prob}[R_2 - R_1 > \alpha R_c]$ の和として計算される。

これを、Fig. 4.57に示す。式(4.71)の確率を数値積分により計算した。図中では、補正をした情報獲得の確率の計算結果“Corrected”を実線で、補正をしなかった“Not corrected”の点線とともに示してある。

Fig. 4.57からわかるように、補正を加えた場合には、情報獲得の確率 P_I' が補正なしの場合の P_I に比べて大きくなっている。特に、補正を行なった効果による増分が大きいのは、 R_c がある程度大きく、補正なしの場合の P_I の衝突による減少が顕著な範囲($R_c > \text{約} 1.5[\text{m}]$)である。これは、これまでの P_I の計算では衝突により情報が獲得できなかった場合にも、獲得が可能となったことによるものである。

また、補正なしの場合には最適な通信範囲 $R_{\text{copt}}=1.88$ と計算されるが、補正を行なったときにはこの値も変化して、 $R_{\text{copt}}=2.03$ となる。これも、衝突の効果が小さくなったため、より通信範囲を大きくとれるようになったことを示している。

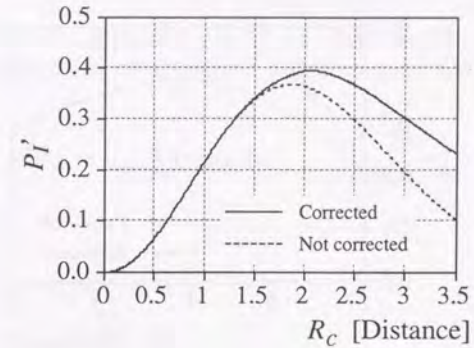


Fig. 4.57 赤外線による通信装置の衝突を考慮した情報獲得の確率

4.6.3.3 実験

実験では、ロボット配置のランダム性を保証するために、ロボットは動かさず、配置を変えて実験を繰り返すことでランダム移動を擬似することとした。100通りのランダムなロボット配置に対し、それぞれ R_c をTable 4.8の範囲で変化させて、出力した情報が受信されるかどうかを求めた。

送信側ロボットの位置座標の算出について説明する。まず計算機上に一辺40[m]の正方形の平面を実現し、そこにランダムに、Table 4.8に示す密度0.092でロボットを配置する。そして、あるロボットをReceiverとして、それを中心とする半径2.5[m]、円の中に存在するロボットをTransmitterとし、Receiverからの相対座標を求める。

求められたReceiverからの相対位置にロボットをFig. 4.54のように配置する。各配置において、出力範囲を R_c をTable 4.8に示す1[m]~2.5[m]の範囲で変化させる。各Transmitterの情報出力における赤外線LEDへの印加電圧は、先に述べた方法で、信号の入射角 45° の場合を基準にして決定する。

それぞれの情報出力範囲 R_c に対して、情報獲得の確率を測定し、100回の平均を実験結果 $P_{I\text{exp}}$ として用いる。

Fig. 4.58に、測定された情報獲得の確率 $P_{I\text{exp}}$ (Experiment)を点線で、先ほど補正を用いて計算した P_I' (Calculation)とともに示す。

Fig. 4.58においては、まず実験結果においては、 $P_{I\text{exp}}$ は $R_c=2.1$ のときに最大値をとっている。計算から求められた最適な通信範囲 $R_{\text{copt}}=2.03$ であり、十分近い値となっている。

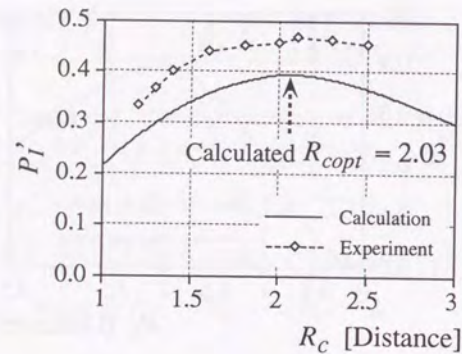


Fig. 4.58 情報獲得の確率の実験結果

これにより、最適な通信範囲に関する解析が実験の上からも確認された。

ただし、実験では全体的に情報獲得の確率の値が5%程度大きくなっている。これは、次のような理由によると考えられる。

- (1) まず、Fig. 4.53に示す印加電圧と伝達距離の関係は、情報が100%伝達される範囲をとったものである。4.6.2.1に示したヘッダ部がマッチングされたときだけ情報を読み込む手法により、通信範囲は限定により正確に限定されるようになったが、それでも情報の伝達が0%と100%の中間の値をとる数10[cm]の範囲で存在する。

Table 4.8のパラメータで衝突の効果を示す α の値は、2台のロボットを用いて測定した。このため、このように0%と100%の中間の値をとることの影響は、ここではすでに含まれている。よって、衝突に関する計算にはこのことはすでに考慮されていると考えられる。

しかし例えば、ランダム配置において1台のロボットしか通信範囲に存在しない場合には、本来なら情報が入ってこないはずの距離にあるロボットからも多少情報を獲得できることになる。このことは、出力範囲 R_c 全般にわたって、計算値よりも情報獲得の確率を増加させる。

- (2) 情報が完全に衝突する範囲においても、2台のTransmitterが同じ方向にあって片方の情報を遮ったり、計算機の出力の同期のしかたなどにより、実際には情報が受けとられる場合もある。このことも、情報出力範囲 R_c 全域にわたって、全般的に情報獲得の確率の値を増加させる効果を持つが、本論文ではモデル化していない。

以上述べたように、これら二つの要因は、 R_c の値が変化してもその寄与はほぼ同じであると推測される。このように、 R_c に依存しない効果が加わっても、情報獲得の確率を最大化する最適な通信範囲 R_{opt} の値を大きく変化させることはないと考えられる。よって、本章で行なった通信範囲の設計に関する解析は、実際のシステムでも有効であるといえる。

4.7 おわりに

本章では、局所的な通信による情報伝達の解析の第1ステップとして、多数移動ロボットの局所的な通信に関して、空間的な情報伝達の効率の解析を行なった。その結果、情報伝達時間を最小とする最適な通信範囲を、最適な通信範囲を解析に基づいて導出することが可能となった。

まず、多数移動ロボットが協調して行なう基本的な作業として、ランダム掃引・探索、協調搬送作業、そして分割された領域の掃引・探索を取り上げ、それぞれに対して情報獲得の確率 P を導出した。 P の導出過程では、それぞれの作業時のロボットの空間的な分布をモデル化する必要がある。ランダム掃引・探索ではポアソン分布、協調搬送では二項分布を用いることにより解析的に空間分布がモデル化された。また分割された領域の掃引・探索作業では正規分布を用いることにより、近似的にこのモデル化を行なった。以上の解析により、3つの作業に対して情報獲得の確率 P が導出された。この空間分布モデル化の一般的な手法は、他の作業にも拡張可能である。

通信効率の評価関数としては情報獲得に必要な時間を用いた。最も基本的な通信である1台への情報伝達の場合には、これを最小とする最適な通信範囲 x_{opt} は、 P を最大化することにより得られる。ランダム探索作業と協調搬送作業の場合は解析的に、また分割領域探索においては近似的に x_{opt} を求める関係式が導出された。複数台への伝達の場合には別の手法が必要となるが、これについては、5章で述べる。

求められた最適な通信範囲には、ロボットの通信能力とはほぼ比例関係にあり、また、作業から決まる情報出力確率には反比例する性質があることが分かった。このように、本論文の設計手法では最適な通信範囲が通信能力や作業の特性を表すパラメータと明示的に関係づけられた。これにより、システムの変更にも時間を消費する多数ロボットの情報伝達シミュレーションを行なわなくても、容易に対応できる。

1台への情報伝達における最適な通信範囲を検証するため、多数ロボットの情報伝達シミュレーションを行なった。シミュレーション結果は、解析によって求められた理論値とよく一致し、モデルの妥当性と、導出された最適な通信範囲の有効性が確認された。

本章で行なった通信範囲の設計を実現するには、通信範囲を調節でき、また設定した通信範囲の外には情報が伝達されないようにする通信範囲の限定を行なえる通信装置が必要である。これを実現するため、通信媒体として赤外線を用いることにし、情報伝達システムを実装して基礎的な実験を行った。その結果、通信範囲の限定と調節が実現されることが確かめられた。

本章で行なった空間的な設計により、1章で示した通信システムに対する要求仕様のうち「速く」通信する部分の設計が達成される。

第5章 時間的な解析と情報提示時間の設計

5.1 はじめに	152
5.2 情報伝播の解析のための局所的通信のモデル	154
5.3 情報伝播の方程式の導出と解析	158
5.3.1 移動が伝播に与える影響の考察	159
5.3.2 複数台への情報伝達を考慮した最適な通信範囲	162
5.3.3 情報伝播の方程式と伝播時間	168
5.3.4 ロジスティック関数による伝播時間の導出	169
5.4 シミュレーションによる定式化の検証と計算例	173
5.4.1 シミュレーション環境	173
5.4.2 ロジスティック関数による情報伝播のモデル化の検証	173
5.4.3 複数台への伝達を考慮した最適な通信範囲の検証	175
5.4.4 具体例の計算	177
5.5 協調作業における情報提示時間の設計	180
5.5.1 協調作業のシミュレーション	180
5.5.2 シミュレーション結果の考察	183
5.5.3 具体的な計算例	185
5.6 おわりに	188

5.1 はじめに

4章では、多数ロボットの局所的な通信の空間的設計を行ない、空間を通した情報伝達の効率を最大化する通信範囲 x の設計手法を示した。

通信が局所的であるときには、情報は「また聞き」の形でロボット間に伝えられていくため、目標伝達台数に情報が伝えられるまでには一定の伝播遅延が存在することを考慮しなければならない。また、1章で述べたように、情報が目標伝達台数以上に不必要に伝播すると、系の通信効率が低下したり、作業実行に支障をきたしたりする場合がある。よって、不要な情報の氾濫も防ぐ必要がある。このように、局所的通信のみが用いられる系での効率的な協同作業実行には、

- (1) 作業に必要なロボットへの情報伝達に要する時間を知る
- (2) 作業に応じて情報の伝播する範囲を特定する

ことが重要になる。このためには、局所的通信による情報の伝播過程の解析が必要である。さらにこのとき、大域的な通信では問題とならなかった、ロボットの移動による環境の動的な変化も考慮しなければならない。

移動ロボットの局所的な通信を扱った研究では、原らによる通信範囲を限定した“Hello-Call Communication”の研究がある[Hara92]。これはロボットが移動しない静的な系における全体への情報伝達を扱い、時間的な伝播過程には触れていない。ロボットが移動を行なって動的に変化する環境における、局所的通信による情報伝播過程を扱った研究は、他にはほとんどみられない。

そこで本章では、1章で示した通信に要求される仕様である

- 情報伝達時間の短縮
- 限定されたロボット数へ情報を伝達し、情報伝達範囲の局所性を実現

の後者に焦点を当て、多数移動ロボット系における情報伝達過程の時間的な解析を行なう。これの結果を用いて、必要なロボット数へ情報の伝達し、また過剰な情報伝達をなるべく小さくするような情報提示時間 T_{ann} の設計手法を示す[Arai93][吉田93][新井94b]。

Fig. 5.1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。本章で行なう時間的設計の設計パラメータは情報の提示時間 T_{ann} である。入力パラメータは、移動速度 v 、目標伝達台数 n_e 、そして4章で設計した通信範囲 x である。3.4節の分類における最大情報伝達数 N_{max} が小さい(A)の場合には、最大通信範囲 x_{max} を入力パラメータ x の値として用いればよい。 N_{max} が大きい(B),(C)の場合には、4章で設計を行なった最適な通信範囲 x_{opt} を用いる。ただし、4章では複数台への情報伝達を考慮した場合については、 x_{opt} の導出法を示すだけにとどめたので、本章で具体的に述べる。

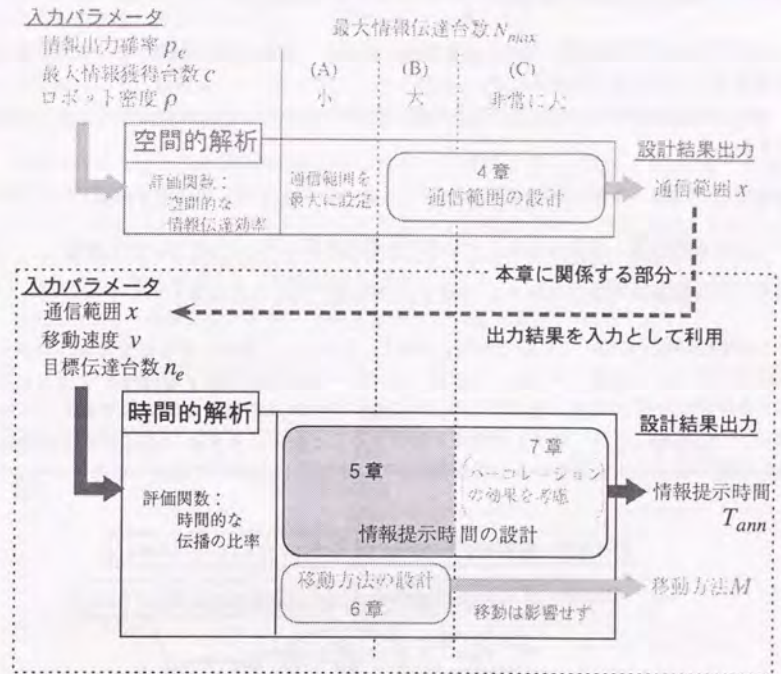


Fig. 5.1 局所的通信の解析・設計における本章の位置付け

まず、5.2節でモデルについて説明する。次に5.3節で、3章で導出した情報伝播の一般式に基づいて情報伝播の解析を行ない、作業に必要なロボットへの情報の伝播時間を算出する。ここで、複数台への情報伝播を考慮した通信範囲の設計についても触れておく。解析の有効性を、5.4節の多数ロボットの通信シミュレーションにより検証する。作業に必要なロボット数に応じて情報の伝播範囲を調節する情報提示時間を設計する方法を5.5節で示す。

5.2 情報伝播の解析のための局所的通信のモデル

本節では、3.2節で定義した一般的な環境に基づき、情報伝播の解析において重要な局所的通信モデルのパラメータを示す。

情報伝播の解析において重要となるのは、3.2節で示した一般的环境のうち、以下の部分である。

通信形態：情報パケットを通信の単位とし、局所的な通信により伝達される

系における情報源：作業告知板または情報を発信するロボット [イベントに相当]

ロボットの移動：作業に依存する (4章 4.3.1で定義した3つの作業)

「作業告知板」についてここで説明しておく。ロボットに協調を行なわせる際、ロボットに作業発見のセンサ能力がないときには、オペレータが作業に関する情報をロボットに通知する手段が必要となる。そこでこのときには、ロボットの通信が局所的であることを考慮し、一定距離にあるロボットが情報を獲得することができる Fig. 5.2に示す「作業告知板」方式を用いる。告知板からの情報発生が3.2節で示した系の情報源となる「イベント」

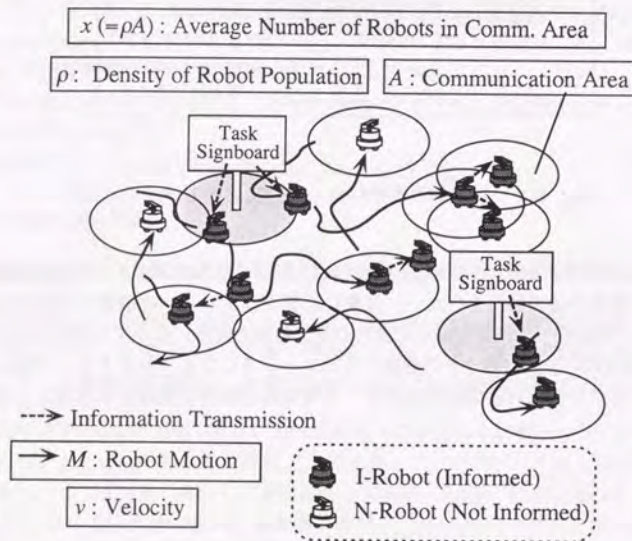


Fig. 5.2 局所的通信のパラメータ

に相当する。また、作業時の情報伝達では、伝達すべき情報を持っているロボットが情報を出力したとき、それが情報発生の「イベント」にあたる。

イベントとして発生した情報は、時間が経過するに従い、と局所的な情報伝達とロボットの移動により、複数台のロボット間に「また聞き」の形で伝播する。その伝播過程を解析し、設計を行なう、必要な台数への情報伝達を達成することが本章の課題である。

本章で行なう局所的通信の時間的设计において、評価指標は、Fig. 5.1にも示した通り、時間的な情報の伝播比率である。「イベント」に関する情報があるロボット台数に伝達したいとき、この比率が適正となるように以下で説明する設計パラメータを調節しなければならない。情報伝播が過剰だったり、不十分だったりすると、情報伝達の効率が低下する、あるいは作業に必要なロボットへ情報伝達が達成されない、などの影響が生じるからである。

Table 5.1に、本章において重要となるパラメータを示す。

Table 5.1 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
	M	移動方法	
	n_e	目標伝達台数	作業内容
	x	通信範囲	$\left\{ \begin{array}{l} \text{最大値 } x_{max} \quad (3.4\text{節の分類 (A)}) \\ x_{opt}(4\text{章で設計}) \quad (3.4\text{節の分類 (B)(C)}) \end{array} \right.$
	ρ_{sign}	告知板の密度	環境から決まる定数

本章の設計パラメータは、情報の提示時間 T_{ann} であり、情報をどれだけの時間有効とするかを示すパラメータである。主な入力パラメータとして、移動の速度と方法 v, M 、目標伝達台数 n_e 、通信範囲 x がある。告知板を想定する場合には、その密度 ρ_{sign} もこれに加わる。

v, M は、ロボットの移動機構の特性と、作業内容から決定される。もし、移動方法が自由に決められる場合には、移動方法 M も設計パラメータとなる。これには、ロボットが独立に動いて情報を収集する作業情報周知の通信 (1)、あるいは作業時の通信 (2) でもランダム探索の場合が当てはまる。しかし、 M の設計については6章で扱うことにし、本章では移動方法 M は入力パラメータとする。 n_e は、情報を伝達すべきロボット台数を示し、作業内容から決まるパラメータである。

Table 5.1で、3章 3.4節の分類 (A) において通信範囲 x を最大値 x_{max} とできるのは、情

報伝達数 N_{max} が十分小さく情報の衝突の可能性が小さいためである。また、 N_{max} が大きい (B)(C) の場合には、4章で設計を行なった最適な通信範囲 x_{opt} を用いる。ただし4章では、複数台への伝達を考慮した x_{opt} の設計については、導出法を示すにとどめたので、本章5.3で具体的に述べる。

Fig. 5.2に示す複数ロボットへの情報伝播のモデルに、これらのパラメータ v , M , x も示してある。

また、目標伝達台数 n_e と、情報提示時間の設計 T_{ann} の設計について、Fig. 5.3に示す。3.2節で示した通り、ある情報に注目したとき、「I-ロボット」はその情報を獲得したロボット、「N-ロボット」は獲得していないロボットを表す。 $p(t)$ は情報発生からの時間 t における I-ロボットの比率である。

Fig. 5.3に示すように、 n_e 台に情報を伝達したいとき、相当する比率に情報が伝達されるように情報の提示時間 T_{ann} を設計する必要がある。

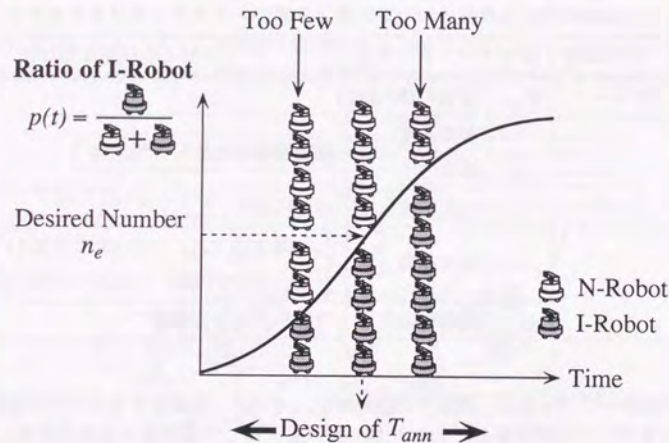


Fig. 5.3 目標伝達台数 n_e と T_{ann} の設計

3.2節では、情報はバケット単位で伝えられ、作業情報周知の通信 (1) では、1つの情報バケットにより複数作業の情報が伝えられるとした。よって、告知板から異なる作業情報が同時に伝播する場合にも、それぞれの情報の伝播は独立であるとして解析できる。また、作業時の情報伝達の通信 (2) でも、各ロボットは実行している作業に対して1種類の共通の情報の形式を用い、必要な部分を更新して出力する。よってこの場合にも、各ロボットが更新した部分の情報伝播は、それぞれ独立に解析可能である。

本章では情報伝播過程の解析を主な目的とするので、情報の質は問わず、情報が伝達されたかどうかだけを問題とする。

次節では、情報の時間的な伝播過程を示す $p(t)$ について解析を行ない、Fig. 5.2に示したロボット系のパラメータとの関係を調べる。

5.3 情報伝播の方程式の導出と解析

3.3節における情報伝達の一般的定式化では、時間 Δt あたりの $p(t)$ の増分を

$$\Delta p(t) = \beta(v, x) \Delta t P \{1 - p(t)\} \quad (5.1)$$

とモデル化し、情報伝播の一般式

$$\frac{dp(t)}{dt} = \beta(v, M, x) P \{1 - p(t)\} \quad (5.2)$$

を導出した。

複数台のロボットに対する情報伝達を考えたとき、情報獲得の確率 P は、4章4.3.3で導出したように、時間 t にも依存して $P(c, p_e, x, t)$ となる。 P は、情報の衝突あり、なしの場合それぞれについて式(4.15)、(4.16)で表される。これを用いて、式(5.2)は

$$\frac{dp(t)}{dt} = \beta(v, M, x) P(c, p_e, x, t) \{1 - p(t)\} \quad (5.3)$$

となる。これを、「情報伝播の方程式」と呼ぶことにする。

本節では、この式をもとにして局所的通信による情報伝播過程の定式化を行い、目標伝達台数への情報の伝播時間を求める。

解析の手順をFig. 5.4に示す。

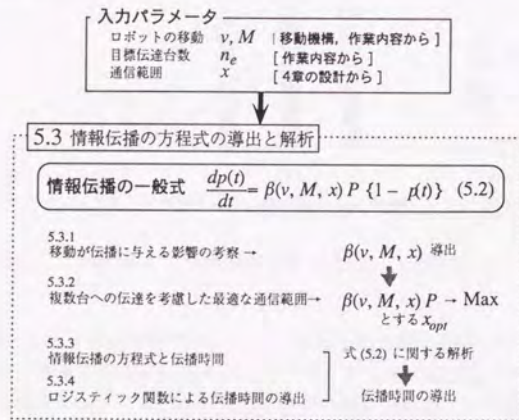


Fig. 5.4 情報伝播に関する解析の手順

まず、5.3.1でロボットの移動が、情報伝播にどのような影響を与えるかを調べる。これは、式(5.3)における $\beta(v, M, x)$ を導出することに相当する。

次に、この結果を用い、5.3.2で、複数台への情報伝達を考慮した最適な通信範囲について考察する。4章4.4.2で示した手法に基づき、式(5.3)において x を含む部分である $\beta(v, M, x)P$ を最大化する x_{opt} を求める。

5.3.3, 5.3.4では、それまでの解析結果を用いて、情報伝播の一般式(5.3)を解析する。特に、5.3.4では、式(5.3)が単純なロジスティック関数で表される場合があり、そのときには目標伝達台数 n_e への伝播時間が単純な形で求められることを示す。

5.3.1 移動が伝播に与える影響の考察

式(5.1)で、 Δt あたりの移動が情報伝播に与える影響を示すのが $\beta(v, M, x)\Delta t$ である。

ここでは、ロボットの移動がどのように情報伝播に影響を及ぼすかを考察する。ロボットの移動速度 v が増加すると、それに比例して、Fig. 5.5のようにロボットの通信範囲によって掃引される面積が増加する。また、 β は移動の仕方 M にも依存する。

β を導出するため、ここで移動と情報伝達との関係について考えてみる。 N -ロボットは、移動により掃引する面積内で I -ロボットに出会ったときに、情報を獲得する。そこで、単位時間・単位速度あたりの掃引面積を S とすると、 S は通信半径 R_c や視野角 ϕ 、そして移動の仕方 M などから求められるので、

$$S = S(R_c, \phi, M)$$

と書ける。

これを用いると、単位時間あたりの掃引面積は Sv である。この面積内に少なくとも1台以上ロボットが存在すれば、情報を獲得できる可能性があることになる。

Fig. 5.5 速度 v が情報伝播に与える影響

そこで、通信範囲 x に他のロボットが1台以上存在する確率を求めておく。これは、周囲に1台もロボットが存在しない確率を1から引いた

$$P_{i \geq 1}(x) = 1 - \text{Prob}[i = 0 | i \in S(x)] \quad (5.4)$$

と書ける。

先ほど示したように、ロボットが単位時間あたりに掃引する面積は Sv であり、この中には平均して ρSv 台のロボットが存在する。よって、この面積に少なくとも1台以上他のロボットが存在する確率は、式(5.4)の x を ρSv で置き換えた

$$P_{i \geq 1}(\rho Sv)$$

となる。

$P(c, p_e, x, t)$ は、通信範囲が x のときの情報獲得の確率である。ここで、単位時間あたりの掃引面積 Sv に対する情報獲得の確率を求めると、 x を ρSv で置き換えた $P(c, p_e, \rho Sv, t)$ となる。

これを用いて時間 Δt あたりのI-ロボットの比率 $p(t)$ の増分 $\Delta p(t)$ を考える。 $P(c, p_e, \rho Sv, t)$ には速度と移動方法の影響が含まれているので、

$$\Delta p(t) = \{1 - p(t)\} P(c, p_e, \rho Sv, t) \Delta t \quad (5.5)$$

と表される。

式(5.1)、(5.5)を比較すると、

$$\beta(v, M, x) P(c, p_e, x, t) = P(c, p_e, \rho Sv, t) \quad (5.6)$$

となる。よって、 β は、通信範囲 x を ρSv と置き換えたとき、情報獲得の確率のスケールを変換する係数に相当する。この係数は、式(5.4)の通信範囲内に1台以上ロボットが存在する確率 $P_{i \geq 1}(x)$ により近似的に表されたと考えられる。これは、通信範囲にロボットが存在する確率が変化すれば、情報を獲得できる確率もそれに比例して変化すると予想されるからである。

この考察から、 β は

$$\beta(v, M, x) = \frac{P_{i \geq 1}(x)}{P_{i \geq 1}(\rho Sv)} \quad (5.7)$$

と導出される。

このモデル化の有効性については、多数ロボットを想定した5.4節の情報伝達シミュレーションにおいて検証する。

ここで、ランダム移動の場合の係数 β を導出しておく。ランダム移動は、情報の探索・拡散を行なって作業情報を周知する通信(1)、そして作業時の情報伝達(2)においても、環境

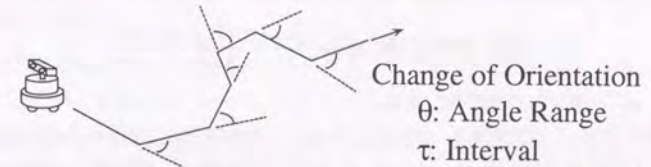


Fig. 5.6 ランダム移動(再掲)

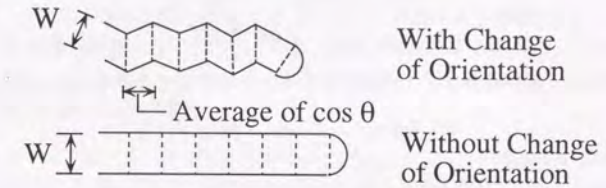


Fig. 5.7 ランダム移動による掃引面積に関する考察

の掃引・探索(ランダム探索・分割された領域の探索)においても用いられる基本的な移動法である。このように適用頻度が多いランダム移動に対して β を求めておくことは、今後の解析・応用においても重要である。

ランダム移動は、4章4.3.1.1に示したFig. 5.6のようなモデルを用いる。ロボットは、 τ 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させる。このランダム移動を $\mathcal{R}(\theta, \tau)$ と表記する。

単位時間・単位速度あたりの掃引面積 S は通信半径 R_c 、視野角 ϕ によって決まるので、以下では、ランダム移動に対する $\beta(v, M, x)$ を $\beta(v, \mathcal{R}(\theta, \tau), x, R_c, \phi)$ と書き、これについて考察していく。

まず単位時間・単位速度あたりのロボットの掃引面積 $S(\theta, \tau)$ を求める。

Fig. 5.7に示すように、 θ が増加すると、掃引の重なりが大きくなるので、掃引面積が直進移動に比較して $a(\theta)$ 倍に減少する。 $a(\theta)$ は $[0, \theta]$ の余弦の平均である。また、この姿勢変化の影響は τ 単位時間ごとに1回なので、結局掃引の幅を W として、単位時間・単位速度あたりの掃引面積 $S(R_c, \phi, \theta, \tau)$ は

$$S(R_c, \phi, \theta, \tau) = W(R_c, \phi) \frac{(\tau - 1) + a(\theta)}{\tau} \quad (5.8)$$

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

となる。

よって、式(5.7)において \mathcal{M} に $\mathcal{R}(\theta, \tau)$ を代入し、式(5.8)の $S(R_c, \phi, \theta, \tau)$ を用いて

$$\beta(v, \mathcal{R}(\theta, \tau), R_c, \phi) = \frac{P_{i \geq 1}(\rho S(R_c, \phi, \theta, \tau)v)}{P_{i \geq 1}(x)} \quad (5.9)$$

となる。 ϕ はロボットの視野角である。

具体的に式(5.9)を計算するためには、ロボットの空間分布、すなわち通信範囲 x に i 台ロボットが存在する確率 $\text{Prob}[i | i \in S(x)]$ を知る必要がある。4章4.3.1.1において、ロボットがランダムに移動する場合には、これが式(4.2)のポアソン分布によって表されることを示した。これを、再び示す。

$$\begin{aligned} \text{Prob}[i | i \in S(x)] &= \frac{\{\rho A\}^i}{i!} e^{-\rho A} \\ &= \frac{x^i}{i!} e^{-x} \end{aligned} \quad (5.10)$$

これを用いて、通信範囲 x に1台以上のロボットが存在する確率 $P_{i \geq 1}(x)$ は、

$$\begin{aligned} P_{i \geq 1}(x) &= 1 - \text{Prob}[i = 0 | i \in S(x)] \\ &= 1 - e^{-x} \end{aligned} \quad (5.11)$$

と計算できる。よって、式(5.9)の β は、式(5.11)を用いて、結局

$$\beta(v, \mathcal{R}(\theta, \tau), x, R_c, \phi) = \frac{1 - e^{-\rho S(R_c, \phi, \theta, \tau)v}}{1 - e^{-x}} \quad (5.12)$$

と書き換えられる。

5.3.2 複数台への情報伝達を考慮した最適な通信範囲

本節の冒頭で示したように、情報伝播の方程式(5.3)は、

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

である。

複数台への情報伝達を考慮した場合の最適な通信範囲 x_{opt} は、情報の伝播速度が最大とする x である。伝播速度は $\frac{dp(t)}{dt}$ で表されるから、これを最大とする x が x_{opt} となる。上式の右辺で、 x の関数となる部分は、

$$\beta(v, \mathcal{M}, x) P(c, p_e, x, t) \quad (5.13)$$

である。4章4.4.2でも述べたように、よって、最適な通信範囲 x_{opt} は、式(5.13)の最大値を与える x として求められる。

x_{opt} の導出手順は、基本的には4章で用いた Fig. 4.20 に示すものと同様である。具体的には、次のようになる。

- (1) ロボットの通信能力から決まるパラメータを与え、最適化の評価指標である式(5.13)の βP を求める。
- (2) 作業内容から、移動に関するパラメータ v, \mathcal{M} 、情報出力確率 p_e 、情報の伝播比率 $p(t)$ を与え、 x_{opt} が求まる。
- (3) 作業によって (v, θ, τ) 、あるいは $(p_e, p(t))$ の値がさまざまに変化するとき、これと x_{opt} との関係を求める。

4章における x_{opt} の導出法との違いは、 x_{opt} を決定するパラメータとして、 c, p_e に情報伝達比率 $p(t)$ と、移動に関するパラメータ v, \mathcal{M} が加わることである。

以下では、ランダム移動を例にとり、5.3.1節で求めた移動を表す係数 β を用いて、式(5.13)を最大化する最適な範囲 x_{opt} を求める。また、情報の衝突ありの場合のみを扱う。

5.3.2.1 式(5.13)の βP の導出

ロボットがランダム探索・掃引作業を行なっているときには、情報獲得の確率 P は、衝突ありの場合には式(4.18)のように表されることを4章4.3.3項で示した。これを、再び示す。

$$P_I(c, p_e, x, t) = e^{-p_e x} \sum_{i=0}^c \frac{(p_e x)^i \{1 - (1 - p(t))^i\}}{i!} \quad (5.14)$$

また、 β については、ランダム探索作業のとき、式(5.12)で表されることを示したから、最大化する評価指標 βP は

$$\beta P = \frac{1 - e^{-\rho S(R_c, \phi, \theta, \tau)v}}{1 - e^{-x}} \cdot e^{-p_e x} \sum_{i=0}^c \frac{(p_e x)^i \{1 - (1 - p(t))^i\}}{i!} \quad (5.15)$$

となる。

式(5.15)で、通信範囲 x と通信半径 R_c には、ロボットの視野角 ϕ 、密度 ρ を用いて

$$x = \rho \frac{1}{2} \phi R_c^2$$

という関係がある。よって、 R_c は、

$$R_c = \sqrt{\frac{2x}{\phi \rho}}$$

となり、 x の関数として表される。

5.3.2.2 最適な通信範囲 x_{opt} の導出手順

ここで、設計パラメータである通信範囲 x の最適化に関する入力パラメータを、もう一度 Table 5.2 に整理しておく。ここに整理したパラメータを用いて、最適な通信範囲 x_{opt} の設計手順を再び述べると、次のようになる。

Table 5.2 通信範囲の最適化に関する入力パラメータ

パラメータを決定する要因		記号	パラメータ名
環境から決まる定数		ρ	ロボット密度
通信能力から決まる定数		c	最大情報獲得台数
		ϕ	視野角
作業から決まる定数	移動機構にも関係	v	移動速度
		θ, τ	移動方法 (ランダム移動)
		p_e	情報出力確率
		$p(t)$	情報の伝播比率

- (1) システムの定数 (ρ), ロボットの通信能力から決まるパラメータ (c, ϕ) を入力する.
- (2) 作業から決まるパラメータ $p(t)$, p_e を, 移動にも関するもの v, θ, τ も含めて入力し, x_{opt} を求める.
- (3) 作業から決まるパラメータが変化したとき, x_{opt} がどう変化するかを求める.

5.3.2.3 最適な通信範囲の計算例

ランダム探索・掃引作業において, 以上に示した最適な通信範囲の設計手法に基づき, 具体的に最適な通信範囲 x_{opt} を計算する.

この作業においては, ロボットの移動に関するパラメータ v, θ, τ は機構的な性能から決定されるので,

- どのくらいの確率で情報が出力されるか → 情報出力確率 p_e
- どれだけの比率ロボットに情報を伝達するか → 伝達比率 $p(t)$

が変化したとき, x_{opt} がどのように影響を受けるかを知ることが重要となると考えられる. そこで, 具体的な数値例を示し, x_{opt} とこれらのパラメータ $p_e, p(t)$ の関係について考察する.

最大情報獲得台数 $c=1$ のときには, 最適化する評価指標は

$$\beta P = \frac{1 - e^{-S(R_e, \phi, \theta, \tau)v}}{1 - e^{-x}} \cdot e^{-p_e x} p_e x p(t) \quad (5.16)$$

となる. この場合には, 情報伝達の比率 $p(t)$ は式全体にかかる定数であり, 最適な通信範囲 x_{opt} に影響を与えないことが分かる.

Table 5.3 最適な通信範囲の計算に用いるパラメータ

ρ	ロボット密度	0.125 ロボット 50 台, 環境 20×20 を想定
ϕ	視野角	360°
c	最大情報獲得台数	1, 2
v	移動速度	0.2
θ, τ	ランダム移動 方向変換範囲, 間隔	$60^\circ, 3$

また, $c=2$ のときには,

$$\beta P = \frac{1 - e^{-S(R_e, \phi, \theta, \tau)v}}{1 - e^{-x}} \cdot e^{-p_e x} \{p_e x p(t) + \frac{(p_e x)^2 \{1 - (1 - p(t))^2\}}{2}\} \quad (5.17)$$

となる. このように, $c > 2$ では Table 5.3 のパラメータが与えられたとき, $p_e, p(t)$ が変化すると x_{opt} も変化する.

最大情報獲得台数 $c=1$ のとき, 求めた評価指標 βP を式 (5.16) から求め, (p_e, x) に対してプロットすると, Fig. 5.8 のようになる. このグラフで, “Max” で示した曲線が, p_e に対する x_{opt} の関係を示したものである. 4章 4.4.1.2 で示した 1 台への情報伝達の場合と同様に, (p_e, x) 平面に射影すると, 与えられた p_e に対する最適な通信範囲 x_{opt} との関係が求められる. この曲線は, Fig. 5.9 の “To Multiple Robots” で示した曲線となる.

また, 比較のため, Fig. 5.9 には, 1 台への情報伝達の場合を “To One Robot” として点線で示した. 両者とも, p_e の増加に伴い, x_{opt} がそれに反比例する形で減少する傾向が見られる. よって, 複数台への情報伝達を考慮した場合も, x_{opt} と c, p_e の関係は 4章 4.4.1.2 で用いた手法, すなわち式 (4.61) の

$$x_{opt} = \frac{f(c)}{p_e} + g(c)$$

というモデルによる近似が適用できる. このモデル化は, 4章と同様であるのでここでは省略する.

Fig. 5.8 と Fig. 5.9 では, 最大情報獲得台数 $c=1$ であるため, 式 (5.16) に示すように x_{opt} は情報を伝達すべきロボットの比率 $p(t)$ には影響されない.

そこで, $p(t)$ の影響を調べるため, $c=2$ のとき Fig. 5.9 と同様の p_e と x_{opt} との関係を示すグラフを式 (5.17) から求めた. $p(t)=0.1, 0.5, 1.0$ の場合について Fig. 5.10 に示す.

Fig. 5.10 では, $p(t)$ が 0.1 から 1 へ増加するに従い, 最適な通信範囲 x_{opt} が減少している. これは, 周囲で情報が伝達している率である $p(t)$ が小さいときには, 通信範囲をより大き

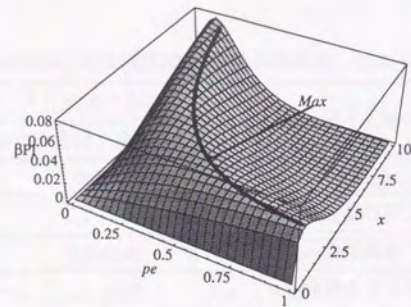


Fig. 5.8 βP と (x, p_e) の関係 (ランダム探索, 衝突あり, $c=1$)

くして, 伝達を速める必要があるからであると考えられる。ただし, Fig. 5.10のグラフから分かるように, $p(t)$ が x_{opt} に与える影響は小さく, 10%以下である。よって, $p(t)=0.5$ といった一定値を用いて x_{opt} を設計してもよいと考えられる。この後は, 4章で示した設計手法がそのまま適用できる。

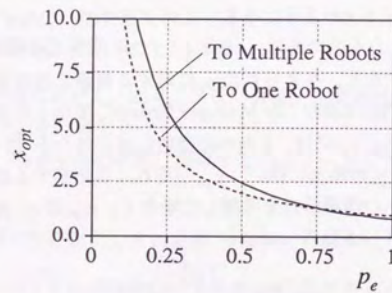


Fig. 5.9 p_e と x_{opt} の関係 (ランダム探索, 衝突あり, $c=1$)

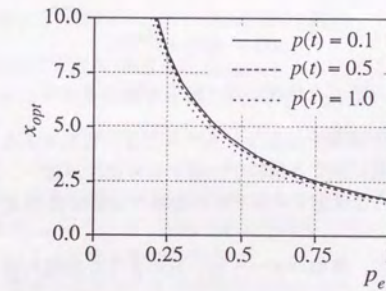


Fig. 5.10 p_e と x_{opt} の関係 [$p(t)$ 変化時] (ランダム探索, 衝突あり, $c=2$)

以上で導出した最適な通信範囲については、5.4節において検証する。

5.3.3 情報伝播の方程式と伝播時間

式(5.3)に示した情報伝播の方程式

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

に対して、本節でこれまでに求めた $\beta(v, \mathcal{M}, x)$ や最適な通信範囲 x_{opt} を適用し、微分方程式を解くことにより、情報の伝播過程を知ることができる。

告知板がある場合には、 j 台中少なくとも1台I-ロボットが存在するか、あるいは告知板が存在すれば情報が獲得できる。告知板は密度 ρ_{sign} で配置され、常時情報を出力しているとする。I-ロボットの比率 $p(t)$ に告知板から直接情報を獲得する効果を加えると、ロボットは密度 ρ であるから、

$$p(t) \rightarrow p(t) + \frac{\rho_{sign}}{\rho_e \rho}$$

と置き換えれば告知板を考慮した情報獲得の確率が算出される。

また、多数のロボットが協調を行なうシステムでは、告知板あるいはロボットが情報源となり、複数の異なる作業に関する情報が伝播する可能性が高い。この場合でも、5.2節にも述べた通り、以下のような理由でそれぞれの情報の伝播は式(5.3)を用いて独立に扱うことができる。

3章3.2.2で示したように、情報パケットは、次のような情報内容となっている。

- 作業情報周知の通信(1)では、複数作業の情報を含む。
- 作業時の通信(2)では、共通の情報の形式を用い、各ロボットが随時必要な部分を更新する。

よって、「また聞き」によって情報パケットがロボット間に伝えられていくことにより、(1)の通信ではある作業情報の伝播、(2)の通信ではあるロボットが更新した部分の伝播の効果が生じる。先ほども述べた通り、1つの情報パケットの受け渡しにより、複数の作業情報や複数のロボットの更新内容が伝達されるので、各作業、各ロボットの更新内容の伝播は独立に解析できる。

よって、それぞれの通信において、その伝播過程を考え、特定の目標伝達台数 n_e に情報が伝えられるための情報提示時間を求めることになる。

以上に示した情報伝播の方程式の妥当性は、5.4節のロボット通信のシミュレーションによって示される。

情報がある一定の比率まで伝播するまでの時間を、伝播時間と呼ぶことにする。伝播時間は「ある一定の比率のロボットに情報が伝わるまでのどのくらいの時間がかかるか」を示す指標になる。

目標伝達台数 n_e に対応するI-Robotの比率を p_{n_e} とする(ロボット総数が m のとき、 $p_{n_e} = \frac{n_e}{m}$)。式(5.3)をRunge-Kutta法などを用いて数値的に解くことにより、 n_e 台に伝達するまでの伝播時間 $T(p_{n_e})$ を求めることができる。これをもとに、情報の提示時間 T_{ann} としては例えば、伝播時間の確率分布が正規分布に従うならば99.7%が(平均値)+(3×標準偏差)の範囲に含まれることを利用して、 $T(p_{n_e})$ に標準偏差 σ_T の3倍の許容範囲を加えた

$$T_{ann} = T(p_{n_e}) + 3\sigma_T \quad (5.18)$$

を用いればよい。

このようにして求めた情報提示時間 T_{ann} の妥当性は、5.5節で示される。

5.3.4 ロジスティック関数による伝播時間の導出

伝播時間は、情報伝播の方程式(5.3)からRunge-Kutta法などの数値計算によって求められる。しかし、この式を一般的に解くことはできず、伝播時間とロボットの通信範囲、密度、速度といったパラメータの関係がわかりにくい。そこで、近似によって解析を行いやすい形にすることを考える。

以下では、近似は特に通信範囲が小さい場合に対して行なう。これは、3.4節の分類において、最大情報伝達数 N_{max} が小さく、情報の衝突が無視できる分類(A)の場合である。3章でも述べた通り、このように最大情報伝達数 N_{max} が小さい場合は、ロボットが情報を探索・拡散させながら環境全体移動する作業情報周知の通信(1)に相当し、また作業時の通信(2)でも、広い環境の探索にも該当する。このことから、 N_{max} が小さい場合に近似を行なって伝播時間の導出を簡単化することには重要な意義を持つ。

ここでは、5.3.3節で導出した情報伝播の方程式をロジスティック方程式で近似し、局所的通信による情報伝播の遅延の評価を行うための伝播時間を計算する。

以降で扱う最大情報伝達数 N_{max} が小さい(A)の場合では、通信範囲内に2台以上ロボットが存在する確率が定められた上限 $b\%$ よりも小さく($b=5\%$ などにとる)、衝突の可能性が小さい。よって通信範囲内に全くロボットが存在しない場合を除けば、情報を獲得できると考えることができる。この場合には、衝突が起こる確率が小さいので、衝突あり・なしを分類する必要はなく、情報獲得の確率 P は

$$\begin{aligned} P &= \text{1台のロボットが情報を獲得できる状態にある確率} \\ &= \text{1台のロボットが情報を出力しているI-ロボットまたは告知板を} \\ &\quad \text{1台以上通信範囲内に見る確率} \end{aligned} \quad (5.19)$$

とすることができる。

そこで、5.3.1でも用いた、式(5.4)に示すロボットが通信範囲に1台以上存在する確率

$$P_{i \geq 1}(x) = 1 - \text{Prob}[i = 0 | i \in S(x)]$$

をここでも用いる。

ロボットが2台以上存在する確率は小さいので、これに情報出力確率 p_e ・I-Robot の比率 $p(t)$ を乗じて、情報獲得の確率 P は

$$P = \begin{cases} P_{i \geq 1}(x) p_e p(t) & (\text{告知板が存在しないとき}) \\ P_{i \geq 1}(x) p_e \{p(t) + \frac{\rho_{\text{sign}}}{p_e \rho}\} & (\text{告知板が存在するとき}) \end{cases} \quad (5.20)$$

となる。

通信範囲に1台以上のロボットが存在する確率 $P_{i \geq 1}(x)$ は、3章で設定した作業の空間分布に対してそれぞれ算出することができる。例えば、ロボットがランダムに分布する場合は、式(5.11)に示したように、

$$P_{i \geq 1}(x) = 1 - e^{-x} \simeq x$$

である。この場合には、5.3.1項で計算した速度の影響を表す係数 β は、式(5.12)、(5.11)を用いて

$$\beta(v, R(\theta, \tau), x, R_c, \phi) = \frac{1 - e^{-\rho S(R_c, \phi, \theta, \tau)v}}{1 - e^{-x}} \quad (5.21)$$

$$\simeq \frac{S(R_c, \phi, \theta, \tau)v}{A} \quad (5.22)$$

となり、 β は v に比例する。これは、通信範囲が小さい範囲では、情報の獲得が速度 v に比例して大きくなることを示している。

式(5.20)を用いると、一般に式(5.3)は

$$\begin{aligned} \frac{dp(t)}{dt} &= \{ap(t) + b\}\{1 - p(t)\} \\ (a &= \beta p_e x, \quad b = \beta \frac{\rho_{\text{sign}} x}{\rho}) \end{aligned} \quad (5.23)$$

と近似される。告知板の密度 ρ_{sign} はロボット密度 ρ より小さいとする。

式(5.23)は、成長曲線や伝染病の広がりなどのモデルに用いられるロジスティック方程式を拡張した形であり、

$$p(t) = \frac{1 - C \frac{b}{a} e^{-(a+b)t}}{1 + C e^{-(a+b)t}} \quad \left(C = \frac{1 - p(0)}{p(0) + \frac{b}{a}} \right) \quad (5.24)$$

が解となる。式(5.24)のロジスティック関数はFig. 5.11のようなS字型の曲線になる。このようにグラフがS字型となるのは、情報が次のような過程をたどって伝播していくからである。

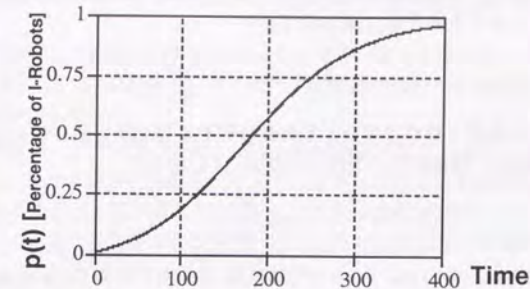


Fig. 5.11 ロジスティック関数. ($\beta=1.0$, $v=0.1$, $\rho=0.1$, $\rho_{\text{sign}}=0.005$, $R_c=1.0$, $\phi=\pi$ [rad])

- (1) $p(t)$ が小さいところでは、情報が局所的にある地点から広がり始めたところなので、伝播の速度は遅い。
- (2) さらに時間が経過すると、「また聞き」による情報伝播の伝播の効果が大きくなり、伝播速度が上昇する。
 $p(t) = 0.5$ の付近が最も伝播速度が大きいところである。
- (3) $p(t)$ が1に近付くと、情報を獲得したロボットが多くなり、また伝播速度が低くなる。

ここでは、最大情報伝達数 N_{max} が小さい場合を想定しているが、式(5.20)を微分方程式(5.3)に適用した場合には、比較的大きな情報伝達数 N に対しても良い近似が得られる。実際、 $N = 0.7$ と非常に大きくとつても、式(5.3)の正確な数値解とロジスティック方程式(5.23)との間の最大相対誤差は10%程度にしかない。

通常のロボット環境を考えると、 $N_{\text{max}} < 0.5$ と考えれば十分である。この場合、誤差はほぼ5%に収まる。この範囲では、情報伝播の方程式のロジスティック関数による近似は有効であるといえる。

ロボット系のパラメータ ρ, v, A が既知であるとき、式(5.24)を用いて、ある一定の割合のロボットに情報が伝播する時間を計算することができる。目標伝達台数 n_e に対応するI-ロボットの比率 $p(t) = p_{n_e}$ に情報が伝播するまでの伝播時間 $T(n_e)$ は、以下のように求められる。

$$T(n_e) = -\frac{1}{a+b} \log \frac{(1 - p_{n_e})(p(0) + \frac{b}{a})}{(p_{n_e} + \frac{b}{a})(1 - p(0))} \quad (5.25)$$

式(5.25)において、伝播時間 $T(n_e)$ は $a+b$ に反比例している。情報伝播がロジスティック関数で表すことができるとき、式(5.23)より

$$a+b = \beta x \left(p_e + \frac{\rho_{sign}}{\rho} \right) \quad (5.26)$$

となる。ランダム探索・掃引作業のときの例を示す式(5.22)に見られるように、一般に β については、速度 v 、情報出力の半径と面積 R_c, A を用いて

$$\beta \sim \frac{R_c}{A} v \quad (5.27)$$

となると考えられる。式(5.26)で $a+b$ の値は βx に比例するので、 $x = \rho A$ であるから

$$a+b \sim \rho R_c v \quad (5.28)$$

となる。

前述の通り、式(5.26)の値が増加すれば、式(5.25)の伝播時間 $T(n_e)$ が短縮される。よって、情報伝播がロジスティック関数で表すことができる場合には、式(5.28)から、伝播時間は

- ロボット密度 ρ
- 情報出力半径 R_c
- 速度 v

に主に反比例することがわかる。逆にこれらの値が小さくなれば、それにしたがって伝播時間も多く必要となる。

以上のように、ロジスティック関数を利用することにより、情報の伝播に必要な時間が、ロボット密度、通信範囲、速度といったパラメータに反比例する形で表された。このように伝播時間がロボット系のパラメータと明示的に関係づけられたことは、局所的な通信を用いた協調作業計画において重要な意味を持つ。これについては、5.5節の協調タスクのシミュレーションにおいても触れる。

5.4 シミュレーションによる定式化の検証と計算例

本節では、ロボットの移動・情報伝達のシミュレーションを計算機上で行って、情報伝播を表す式(5.23)、(5.24)の検証を行う。また、検証は複数台への情報伝播を考慮した最適通信範囲についても行なう。

情報伝播の特性は、ロボットの移動と通信を現実世界に即して実現したシミュレーションにより求めることができる。しかし、これではコストがかかるのみならず、設定が変わることにやり直す必要がある。本章で定式化した情報伝播の特性がシミュレーション結果と一致すれば、このような手間なしに作業計画に必要な情報伝播の特性が求められるようになる。

5.4.1 シミュレーション環境

Fig. 5.12のように、通信を行うロボットを計算機上に実現し、情報の伝播過程を調べた。

ここでは、移動方法として適用範囲の広いランダム移動を用いた。5.3節で述べたように、ランダム移動は、 τ 単位時間ごとに進行方向を角度範囲 $\pm\theta$ で変化させることで実現する。

本節では、まず5.3.4項で示したロジスティック関数による情報伝播のモデルを検証する。次に5.3.2で行なった複数台への情報伝達を考慮した最適な通信範囲の検証を行なう。

5.4.2 ロジスティック関数による情報伝播のモデル化の検証

5.3.4項において導出した、ロジスティック関数を用いた情報伝播モデルを検証する。シミュレーションのパラメータはTable 5.4の通りである。

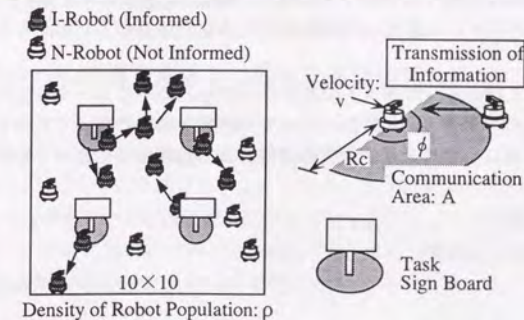


Fig. 5.12 シミュレーション環境

Table 5.4における β は、式(5.22)から求められたものである。

Table 5.4 シミュレーションのパラメータ

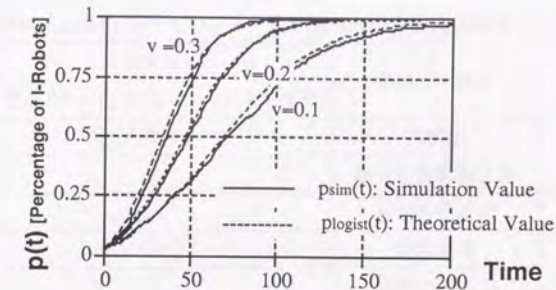
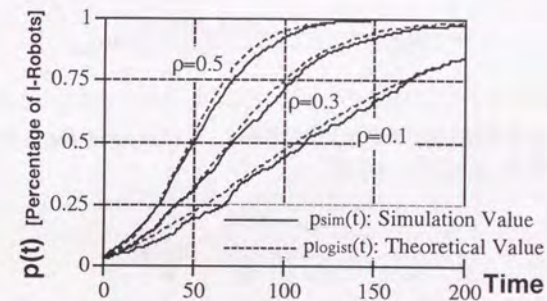
ρ (Density of Robot Population)	0.1 ~ 0.5
v (Velocity of Random Walking)	0.1 ~ 0.3
ρ_{sign} (Density of task signboards)	0.01
R_c (Radius of Communication Area)	1.0
ϕ (Visual Angle of Communication Area)	180[deg]
θ (Range of Orientation Change)	60[deg]
τ (Interval of Orientation Change)	2
β (Constant in Equation (5.3))	1.0 v

Table 5.4のパラメータにおいては、情報伝播の方程式(5.3)とロジスティック方程式(5.23)の誤差はほぼ5%以内に収まり、式(5.3)の解はロジスティック関数によって表されるという。

それぞれのパラメータを用い、ロボットの初期位置を変えてシミュレーションを30回行い、各ステップごとに“I-ロボット”の比率の平均 $p_{sim}(t)$ を求めた。

シミュレーション結果 $p_{sim}(t)$ を、前章で求めたロジスティック方程式(5.23)による理論値 $p_{logist}(t)$ と比較する。 $p_{logist}(t)$ の計算に必要な初期値 $p_{logist}(0)$ は、時間0において告知板から直接情報を獲得するロボットの比率、即ち $P|_{t=0}$ として求められる。Fig. 5.13とFig. 5.14に、ロボットの速度 v と密度 ρ を変化させた場合のI-ロボットの比率 $p(t)$ の時間変化を示す。

Fig. 5.13, Fig. 5.14から、ロボットの速度や密度などのパラメータを変化させた場合にも、情報の伝播がロジスティック関数によって、時間全域にわたって正確にモデル化されていることがわかる。これにより、局所的通信による情報伝播の遅延を評価することができる。

Fig. 5.13 情報伝播過程 $p(t)$ (速度を変えた場合, $\rho = 0.3, R_c = 0.1$)Fig. 5.14 情報伝播過程 $p(t)$ (密度を変えた場合, $v = 0.1, R_c = 0.1$)

5.4.3 複数台への伝達を考慮した最適な通信範囲の検証

情報伝播過程に関する定式化の有効性が示されたので、ここでは、5.3.2で求めた、複数台への伝達を考慮した最適な通信範囲の有効性を検証する。シミュレーションのパラメータは、Table 5.3に示したものと同一とする。これを、以下に再び示す。

5.3.2では、 $c \geq 2$ の場合でも情報伝達の比率 $p(t)$ は x_{opt} にほとんど影響を与えないことが分かった。よって、 $c=1$ の場合についてのみ検証する。また、情報出力確率 $p_e=1.0$ とする。

式(5.3)の情報伝播の方程式に式(5.16)を代入すると、

$$\begin{aligned} \frac{dp(t)}{dt} &= \frac{1 - e^{-S(R_c, \phi, \theta, \tau)v}}{1 - e^{-x}} \cdot e^{-p_e x} p_e x p(t) \{1 - p(t)\} \\ &= ap(t) \{1 - p(t)\} \end{aligned} \quad (5.29)$$

Table 最適な通信範囲の計算に用いるパラメータ (Table 5.3再掲)

ρ	ロボット密度	0.125 ロボット 50 台, 環境 20×20 を想定
ϕ	視野角	360°
c	最大情報獲得台数	1
p_e	情報出力確率	1.0
v	移動速度	0.2
θ, τ	ランダム移動 方向変換範囲, 間隔	$60^\circ, 3$

$$\text{ただし } a = \frac{1 - e^{-S(R_c, \phi, \theta, \tau)v}}{1 - e^{-x}} \cdot e^{-p_e x} p_e x$$

となる。これはロジスティック方程式であり、式 (5.24) を用いて解くことができる。

情報出力確率 p_e と最適な通信範囲 x_{opt} との関係は、式 (5.16) から Fig. 5.9 のように求まった。これを用いると、 $p_e=1$ のときには、

$$x_{opt} = 0.85$$

と計算される。

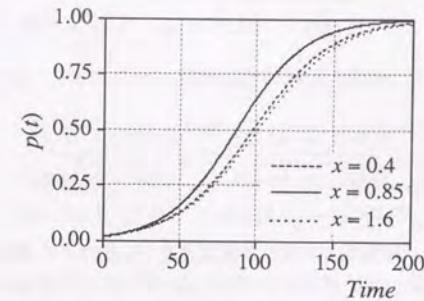
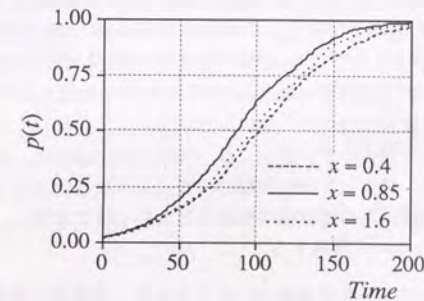
そこで、まず、式 (5.29) を解き、通信範囲 $x=0.4, 0.85, 1.6$ に対して情報伝播を計算した結果を Fig. 5.15 に示す。ロボット間の最適な通信範囲を検証するため、告知板は想定せず、各ロボットが出力した情報を情報源とする。

情報の伝播は、実線で示された最適な通信範囲 $x=0.85$ の場合が最も速く、それより x が大きくても小さくても情報伝播は遅くなることがわかる。

情報伝播のシミュレーションは、前項と同様に、ロボットの初期位置を変えて行い、各ステップごとに I-ロボットの比率 $p(t)$ の平均を求めた。その結果を Fig. 5.16 に示す。

Fig. 5.16 シミュレーションにおいても、情報伝播は計算値とほぼ同じ傾向を示し、やはり最適な通信範囲 $x_{opt}=0.85$ の場合に伝播が最も速くなっている。

以上で、複数台に対する情報伝播を考慮した最適な通信範囲の有効性が検証された。

Fig. 5.15 情報伝播過程 $p(t)$ の計算結果 ($c=1, p_e=1.0$)Fig. 5.16 情報伝播過程 $p(t)$ のシミュレーション結果 ($c=1, p_e=1.0$)

5.4.4 具体例の計算

ここでは、4.5節 4.5.3で計算したランダム探索の例を用いて、最適な通信範囲を用いた場合の複数台への情報伝達時間を計算する。

送信する情報パケットの形式は Fig. 4.43 に、またロボット系のパラメータは Table 4.5 に示したもの (最大情報獲得台数 $c=1$, 情報出力確率 $p_e=0.5$) を用いる。このとき、式 (4.65) に示したように、複数台への伝達において最適な通信半径 $R_{copt}=11.92$ であった。これは、通信範囲内に存在する平均ロボット数 x に換算すると、 $x_{opt}=2.48$ である。

式 (5.12), (4.18) から求められる βP を用い、Table 4.5 のパラメータ、 $x_{opt}=2.48$ として式 (5.29) を解くと、ロボット総数 m 台中目標伝達台数 n_e 台に情報が伝播するまでの時間

$T(n_e)$ は,

$$T(n_e) = -14.22 \times \log \frac{m - n_e}{(m - 1)n_e} \quad (5.30)$$

と求められる。例えば, $m=20$ 台中 10 台 (50%), 16 台 (80%), 19.8 台 (99%) に伝達されるまでの時間は

$$\begin{aligned} T(10) &= 41.81t_u & (\text{ロボット 10 台}) \\ T(16) &= 61.58t_u & (\text{ロボット 16 台}) \\ T(19.2) &= 139.94t_u & (\text{ロボット 19.8 台}) \end{aligned} \quad (5.31)$$

と求められる。 t_u は, Table 4.5 に示した転送速度 2400[bps] の場合を基準とした単位時間 1.82[sec] である。よって, 式 (5.31) の $T(10)$, $T(16)$, $T(19.8)$ はそれぞれ 76.10[sec], 112.07[sec], 254.60[sec] に相当する。

データ伝送速度 19200[bps] とすると, 単位時間 t_u あたりの速度は 0.125[グリッド] となる。これを用いると $T(10)$, $T(16)$, $T(19.8)$ は 315.1[t_u], 464.2[t_u], 1054.9[t_u] となる。ただし, 1 単位時間 $t_u=0.23$ [sec] なので, これらは 72.47[sec], 106.8[sec], 242.63[sec] と換算される。2400[bps] の場合と比較して, それぞれ伝播時間は 5%程度短縮されている。

このように, データ転送速度が 2400[bps] から 8 倍の 19200[bps] となっても, 伝播時間がそれに比例する形では短縮されていないことが分かる。これは, この地図生成作業のようにロボット密度がある程度小さい場合には, 情報伝播の速度は, 主に移動速度に依存するからである。よって, ロボット間の空間的情報伝達が高速化されても, ロボットの移動速度が一定ならば, 伝達時間の短縮幅はそれほど大きくはならない。以下では, 転送速度 2400[bps] の場合のみについて考察する。

さて, 各ロボットのセンシング範囲 $R_s=3$ とすると, 近似的に初期状態において 30 グリッドであり, 単位時間 t_u ごとに 6 グリッド (センシング範囲の直径は 6) ずつ増加すると考える。各ロボットが $T[t_u]$ の間にセンシングする地図の面積は,

$$30 + 6T$$

で, 20 台では

$$600 + 120T$$

となる。

そこで作業時間として, 80 [t_u] をとれば, 合計で 10200 グリッド分が探索される。60 × 60 の領域は 3600 グリッドであるから, 同じ場所が平均して 3 回程度ロボットが掃引されることになる。これは, 平均して 80% に情報が伝達する式 (5.31) の 61.58 よりも大きく, 地図情報が全ロボットに伝達されるのに十分な時間であると考えられる。

[Singh93] では, センシング半径 3 グリッド (面積 30 グリッド) で速度 1 グリッド/ t_u と 9 グリッド面積 250[グリッド], 速度 3 グリッド/ t_u の 2 台のロボットを用いてシミュレーションを行なっている。センシング範囲の大きなロボットは, 直径 18 で速度 3 グリッド/ t_u で

あるので, 単位時間に 54 グリッド増加することになる。よって 2 台のロボットで $T[t_u]$ の間にセンシングされる地図の面積は,

$$250 + 54T + 30 + 6T = 280 + 60T$$

であり, 先に計算した 20 台のロボットを用いる場合のほぼ半分である。[Singh93] のシミュレーションでは, 全ての地図情報を $1t_u$ で大域的に通信できるとして, 地図生成に 146, 246[t_u] 必要であるという結果が示されている。全ての地図情報 (60 × 60 グリッド) を伝達するには, 局所通信の場合 (10 × 10 グリッドの局所地図 × 10) よりも 3 倍以上情報量が多くなるので, この結果よりも通信に多くの時間がかかると推測される。

局所的通信を用いたとき, 作業時間は $80t_u$ とできるので, [Singh93] のシミュレーションに比較しても作業時間は 30%~50% となっている。20 台のロボットを用いたとき, ロボットのセンシング面積の総計は 2 倍であり, その効果が現われていると考えられる。

しかし, ここでは [Singh93] で仮定した地図情報を $1t_u$ で伝達する大域的な通信ではなく, 衝突ありの局所的通信, しかも最も能力の低い $c=1$ を用いている。それでも作業時間が減少していることは, 通信範囲と情報提示時間を適当に設計することにより, 多数によるセンシング面積増加の効果を, 低い通信能力によって相殺せずに活用できていることが分かる。

この例から, 単純な局所的な通信を用いることにより, 協調作業においてロボットを多数用いることの有効性が十分に発揮される可能性が示された。

5.5 協調作業における情報提示時間の設計

大域的な通信を仮定しないとき、ロボットは移動しながら局所的に情報を収集することになる。このような系で複数のロボットに情報を伝達したいときには、情報の伝播を利用するのが基本的な制御法であると考えられる。本節では、局所通信のみを行なう系での情報伝達の制御に、情報伝播の解析結果を利用する基本的な例として、協調作業のシミュレーションを行なう。シミュレーションにおいては、これまでの解析結果を用いて作業情報の提示時間 T_{ann} を設計し、その妥当性を検証する。

本シミュレーションで得られる情報伝播の制御の知見は、研究例 [Steels90], [堀内 93] で局所情報の伝播の制御に対しても用いることができると考えられる。

5.5.1 協調作業のシミュレーション

シミュレーションは、以下のように行なう。

- (1) 作業は、環境内に設置された複数の告知板から次々に提示される。
- (2) 作業は、ある地点に付近のロボットが集合させて実行するとする。告知板には、作業の識別子 (ID)、情報の有効期間を示す提示時間 T_{ann} 、作業地点を作業情報として示す。
- (3) 各ロボットは、提示時間が終了するまでランダム移動を続けた後、獲得した情報をもとに、作業地点が近い作業を選択し、集合する。
- (4) 作業に必要な数のロボットが集合しだい作業が開始される。

この手法は、提示、入札、落札、契約といった契約行動をモデルとした協調手法である契約ネットプロトコル [Smith80] において、入札した順に落札・契約する場合に相当する。

作業の情報の伝播範囲を特定し、不必要な伝播を抑えるための告知板への作業の提示時間 T_{ann} を決定するため、これまでの解析結果を利用する。

シミュレーションでは、Fig. 5.17 のように、一定の密度 ρ_{sign} で告知板を環境に配置した環境で、告知板に情報を提示する時間を変化させる。作業情報は、告知板に示されている間だけ有効であるとする。シミュレーションのパラメータは Table 5.5 の通りである。ここに示していないものは、Table 5.4 と同様である。

Fig. 5.17 の 4 個の作業を、作業地点の近傍の 4 つの「告知板」に一定の間隔で提示する。5.2 節で述べた通り、複数の情報の伝播はそれぞれ独立していると考えられる。このことから、作業情報を 4 つの告知板が提示している本章のシミュレーション環境で、提示時間 T_{ann} の決定に、 $\rho_{sign} = 4.44 \times 10^{-3}$ として 5.3 節の解析結果を応用することができる。Fig. 5.18(a)~5.18(d) に $T_{ann} = 150$ の場合の作業実行の様子を示す。

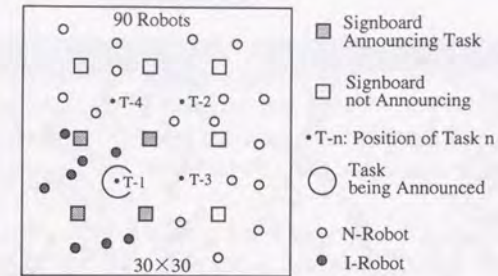
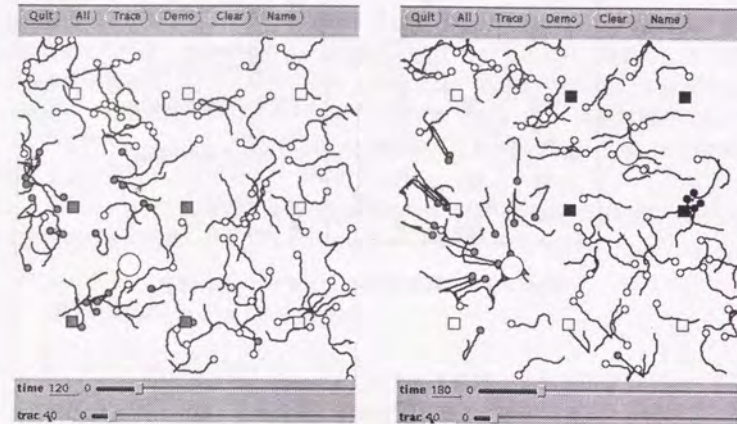


Fig. 5.17 協調作業シミュレーション環境

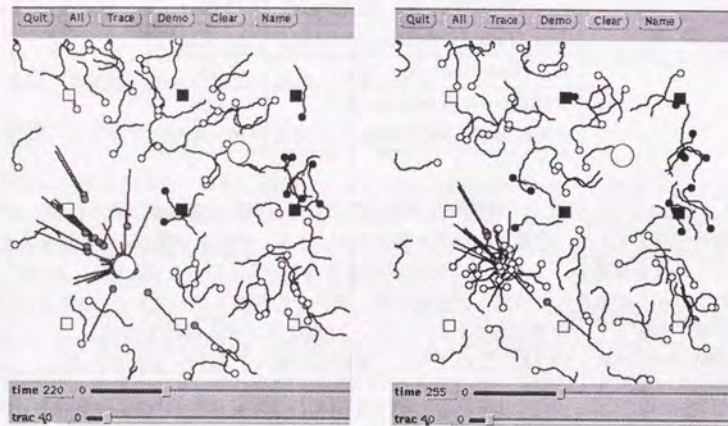
Table 5.5 協調タスクシミュレーションのパラメータ

ρ (Density of Robot Population)	0.1
v (Velocity of Random Walking)	0.1
ρ_{sign} (Density of task signboards)	0.0044
T_{ann} (Task Announcement Period)	50 ~ 300
T_{exe} (Task Execution Time)	20
w (Required Percentage of Robots for Each Task)	11% (10 robots)

Fig. 5.18(a) では、作業 1 の情報が作業地点の近傍の 4 個の「告知板」から伝播している。作業提示が終了すると、作業 1 の情報を得たロボットは、Fig. 5.18(b) に示されるように作業地点に集合を開始し、また作業 2 の提示が始まっている。Fig. 5.18(c) は、すでに 10 台以上のロボットが集合して作業 1 が開始され、実行中の状態を示している。Fig. 5.18(d) では、作業 1 が完了し、作業に参加したロボットは再びランダム移動を開始し、一方で作業 2 の情報は伝播を続けている。このように、各作業が次々に提示・実行される。



(a) $t = 120$ (作業 1 に関する情報の伝播) (b) $t = 180$ (作業 1 の実行地点に集合)



(c) $t = 220$ (作業 1 の実行) (d) $t = 255$ (作業 1 の終了)

Fig. 5.18 (a)~(d) 協調作業のシミュレーション

5.5.2 シミュレーション結果の考察

初期条件 (各ロボットの初期位置) を変化させて 10 回のシミュレーションを行い、作業の実行状況と、環境内の情報の伝達回数を調べた。提示された作業のうち、必要な数のロボットが集合して、実行されたものの割合を作業達成率、それぞれの作業について、情報の受けわたしが行われた回数を情報伝達回数とする。提示時間 T_{ann} と作業あたりの作業達成率 (Task Execution Rate), 情報伝達回数 (Total Information Transmission) との関係を図 5.19, Fig. 5.20 に示す。

作業に必要なロボット数の全体に対する比率 $p(t)$ を w とすると、 $w = 11\%$ (10 台) のロボット数に情報が伝播するまでの式 (5.25) による理論値 T_{logist} は、74.5 である。しかし、 T_{logist} は平均の値なので、実際にはこの値に対して伝播時間のばらつきが生じる。よって、

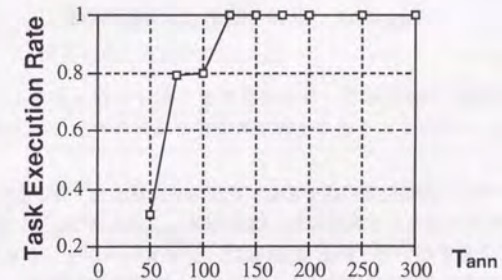


Fig. 5.19 作業達成率

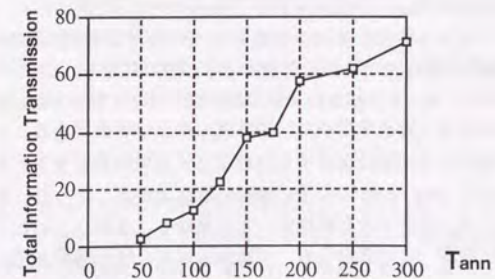
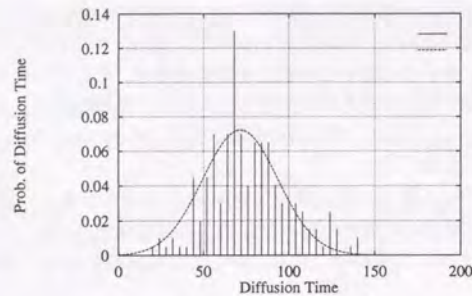


Fig. 5.20 情報伝達回数

Fig. 5.21 伝播時間 T_{logist} の確率分布

T_{logist} を提示時間に用いた場合には、作業達成率が1以下になると考えられる。このことは、Fig. 5.19をみてもわかる。そこで、作業の確実な実行のため、以下のような提示時間の決定法を考える。

5.3節で述べたように、伝播時間の確率分布が正規分布に従えば、99.7%が(平均値)+(3×標準偏差)の範囲に含まれることを利用して、提示間隔 T_{ann} として T_{logist} に標準偏差 σ_T の3倍の許容範囲を加えた値を用いる。Fig. 5.21には、シミュレーションから平均値 T_{logist} 、標準偏差 σ_T を求め(図中の度数分布グラフ)、同じ平均・標準偏差を持つ正規分布に当てはめた理論値(図中の点線)と比較して示す。

一定の比率への伝播時間の分布は正規分布曲線とはほぼ同様の傾向を示していることがわかる。他の条件で行ったシミュレーションにおいても、このような結果が得られたので、本節で示した情報提示時間 T_{ann} の決定法は妥当であるといえる。

本章のシミュレーション条件において $p(t) = 11\%$ に達する時間の標準偏差 σ_T は22.7であり、 $3\sigma_T$ の許容範囲を見込んで時間を計算すると142.6になる。シミュレーションでは、Fig. 5.19に示すように、 T_{ann} が142.6以上ならば作業達成率(Task Execution Rate)が1となっている。これにより、解析を用いた伝播時間の決定が有効であることが示された。

このように、作業をより確実に実行するためには、提示時間を長くすればよいことになるが、長くしすぎると、Fig. 5.20のように情報伝達回数が多くなってしまふ。このことは、不必要に情報が広がり、通信コストが増すことを意味し、必要以上のロボットを作業地点に集合させることになる。この面からも、解析から求めた提示時間を用いることが有効であることがわかる。

5.5.3 具体的な計算例

ここでは、本節における協調タスクに対して、具体的な値を用いて、作業情報を必要なロボットに周知するのにどのくらいの時間が必要か、具体的に計算してみることにする。3.2.2節で示したように、この周知の通信では、複数の作業情報を1つの情報パケットに含められるようにする必要がある。また、通信の効率化のため、各作業に関して最低限の情報のみを伝達することも述べた。そこで、作業情報周知の通信における情報パケットの内容をFig. 5.22のように定義する。

内容	データ形式	データ量
ヘッダ部	文字列	15 [byte] = 120 [bit]
作業情報 1	作業識別子	2 [byte] = 16 [bit]
	作業地点の座標 (x, y) [Float 型]	8 [byte] = 64 [bit]
	情報の残り有効時間 [Int 型]	2 [byte] = 16 [bit]
	計	12 [byte] 96 [bit]
作業情報 2	別の作業情報に関する情報	
.....	◇	
作業情報 i	◇	
合計		$15 + 12i$ [byte] = $120 + 96i$ [bit]

Fig. 5.22 作業情報周知に用いられる情報パケット

ここで i は、1パケットあたりに含める作業情報の数である。Fig. 5.22に示すように、作業情報としては、作業の識別子、作業地点、そして設計した情報の有効時間を伝達する。作業識別子はあらかじめ定義しておき、必要な数のロボットがそろいしだい作業を開始する。情報の有効時間は、その作業情報があとどのくらいの時間有効かを示し、各作業について単位時間ごとに値を減らす。この有効時間が0となったらその作業情報は有効でなくなるので、パケットから消去する。このようにして、これまでに設計してきた情報提示時間 T_{ann} を実現することができ、不必要な情報の広がりも防ぐことができる。

以下の計算では、Table 5.5に示した協調タスクのシミュレーションに用いたパラメータを用いる。また、パケットに含める作業情報の数 $i=5$ 、データ転送速度は2400 [bps] とする。1パケットのデータ長は600 [bit] となるから、これを基準としたパケット伝送の単位時間 t_u は、

$$t_u = 2 \times \frac{600}{2400} = 0.5 [\text{sec}] \quad (5.32)$$

となる。前項5.5.2で設計した90台中10台のロボットへの情報提示時間 T_{ann} は、 $T_{ann}=142.6t_u$ であり、これは71.3[sec]に相当する。また、平均の伝播時間は $74.5t_u$ で、37.3[sec]に相当する。

次に、作業時間を計算するため、作業情報が必要なロボットに伝達された後、集合するまでの時間を評価する。ロボットはランダムに移動するから、その空間分布はポアソン分布に従う。作業情報は、タスク地点に最も近い4つの作業告知板から、伝播時間に $3\sigma_T$ の許容範囲を見込んだ情報提示時間 T_{ann} の間伝播させるので、タスク地点の周囲では、少なくとも作業に必要な10台には情報が伝達していると考えることができる。よって、作業地点に周囲から10台のロボットが集まった時点で作業が開始される。10台目のロボットが集合するまでの時間を T_{ann} に加えれば、これが作業開始までの時間となる。

4章の実験において、ロボットが密度 ρ でランダム分布するときにあるロボットから最も近いロボットとの距離、2番目に近いものとの距離を求めた。これを拡張し、 k 番目に近いロボットとの距離の2乗 R_k^2 が x と $x+dx$ の間にある確率 $\text{Prob}[x \leq R_k^2 < x+dx]$ は、

$$\text{Prob}[x \leq R_k^2 < x+dx] = \rho\pi \frac{(\rho\pi x)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\rho\pi x} dx \quad (5.33)$$

となる。 R_k^2 の2乗の平均 $|R_k|^2$ は、

$$\begin{aligned} |R_k|^2 &= \int_0^\infty x \times \text{Prob}[x \leq R_k^2 < x+dx] \\ &= \int_0^\infty \frac{(\rho\pi x)^k}{(k-1)!} e^{-\rho\pi x} dx \\ &= \frac{k}{\rho\pi} \end{aligned} \quad (5.34)$$

となる。よって、

$$|R_k| = \sqrt{\frac{k}{\rho\pi}} \quad (5.35)$$

である。

また、 $|R_k|^2$ の分散 $\text{Var}(|R_k|^2)$ は、

$$\begin{aligned} \text{Var}(|R_k|^2) &= \int_0^\infty x^2 \times \text{Prob}[x \leq R_k^2 < x+dx] - (|R_k|^2)^2 \\ &= \int_0^\infty \frac{(\rho\pi x)^k}{(k-1)!} x e^{-\rho\pi x} dx - (|R_k|^2)^2 \\ &= \frac{k}{(\rho\pi)^2} \end{aligned} \quad (5.36)$$

となる。

10台のロボット集合させることを考え、作業地点からの距離が10番目に短いロボットへの距離の平均値 $|R_{10}|$ を計算すると5.64と求められ、平均の集合時間は $56.4t_u$ となる。

ここでも、許容範囲を標準偏差 $\sigma(|R_k|^2) = \frac{\sqrt{k}}{\rho\pi}$ の3倍にとり、 $|R_{10}|$ の2乗の最大値 $\text{Max}(|R_{10}|^2)$ を計算する。

式(5.34)、(5.36)から

$$\begin{aligned} \text{Max}(|R_{10}|^2) &= |R_{10}|^2 + 3\sigma(|R_{10}|^2) \\ &= \frac{10}{\rho\pi} + 3\frac{\sqrt{10}}{\rho\pi} \end{aligned} \quad (5.37)$$

これに、Table 5.5のパラメータ $\rho=0.1$ を代入すると、 R_{10} の最大値 $\text{Max}(|R_{10}|)$ は

$$\text{Max}(|R_{10}|) = 7.83[t_u]$$

と求まる。

よって、速度 $v=0.1$ であるから、 T_{ann} の間情報を提示したあと、集合までに要する時間の最大値は $78.3t_u$ となる。

結局、情報を発してから、ロボットが集合し作業が開始できるまでの時間の平均値 T_{total} と、その最大値 $\text{Max}(T_{total})$ は、

$$\begin{aligned} T_{total} &= T(n_e=10) + \frac{|R_{10}|}{v} = 74.5 + 56.4 = 130.9[t_u] = 65.5[\text{sec}] \\ \text{Max}(T_{total}) &= T_{ann} + \frac{\text{Max}(|R_{10}|)}{v} = 142.6 + 78.3 = 220.9[t_u] = 110.5[\text{sec}] \end{aligned} \quad (5.38)$$

となる。よって、作業情報を発してから、平均で65.5秒後、最悪でも110.5秒後には作業が開始される。作業環境は 30×30 に90台のロボットが存在し、作業に必要な10台が存在する範囲は面積100の領域である。面積100の直径は11.28を移動速度0.1グリッド/ $[t_u]$ で移動する時間は112.8 $[t_u]$ 、すなわち56.4[sec]である。以上の計算結果は、局所的な通信のみによる「また聞き」の形のロボットへの作業情報周知を用いたとき、通信半径 $R_c=1$ と通信範囲を非常に小さくしても、領域の直径を移動する程度の時間で必要なロボットを集合させられることを示している。

本節で計算した例のように、ロボット密度が小さい環境では、通信を局所的であると見なさなければならない場合が多い。大域的・集中的な通信が物理的に困難な環境で、局所的な通信によってロボットを集合させるのに必要な時間が評価できることは、分散的な環境での協調作業計画において有用であると考えられる。

5.6 おわりに

本章では、局所的な通信による時間的な情報伝播の解析を行ない、目的とする台数に情報を伝達するための情報提示時間 T_{ann} を設計した。特に、「何台のロボットに情報を伝えるのにどのくらいの時間が必要か」を表す伝播時間が、その台数とロボットの速度、密度、通信半径などのパラメータから容易に計算できることが示された。これは、多数のロボットが協調を行なうとき、情報の効率的な伝達に必要となるものである。

3章で示した移動を考慮した情報伝播の一般式に、4章で求めた空間的な情報獲得の確率を適用して、情報伝播を表す微分方程式の具体的な形をまず示した。また、複数台への情報伝播を考慮した最適な通信範囲は、4章ではその導出法を示しただけであったが、本章では具体的にこれを導出した。

次に、情報伝播の方程式を解くことにより、特定の比率に情報が伝播するまでの時間を評価でき、目標伝達台数 n_e に対する情報提示時間 T_{ann} の設計が可能となる。

特に、3.4節で行なった最大情報伝達数 N_{max} による分類において、これが小さい分類 (A) の場合には、情報伝播の過程が単純なロジスティック関数に帰着されることを示した。これを用い、伝播時間はロボットの密度、速度、通信半径に反比例する単純な形で求まることが分かった。この分類 (A) は、作業情報周知の通信 (1) に主に相当し、どの作業の実行にも必要な過程である。よって、時間のかかる多数ロボットのシミュレーションを行わずに、情報伝播過程が単純に求められることは、協調作業計画において大きな意義を持つ。

多数ロボットの移動・通信を実現した計算機シミュレーションにより、このロジスティック関数によるモデルが正確に伝播過程を記述していることが示された。本章で導出した最適な通信範囲についても、その有効性が示された。

本論文で示した伝播時間の算出法の利用例として、作業に応じて情報の伝播範囲を特定する手法を示した。「告知板」に提示する作業情報の有効時間を設定することにより、必要な情報の広がりを防ぎ、作業が実行できるよう伝播範囲が調節されることが示された。

さらに、具体的な数値例を示し、「何台のロボットを集めるのにどれくらいの時間が必要か」を評価した。これは、伝播時間とロボットが集まる時間の和として求めることができる。

本章では、局所的通信に対する要求仕様のうち「必要な台数に、無駄なく」伝達するための時間的な設計を行なった。この設計により、多数のロボットの協調を必要とする作業において、限定されたロボットに対する「情報伝達の局所性」が実現され、系全体としての作業の効率化が期待される。

第6章 時間的効率化のための移動方法の設計

6.1	はじめに	190
6.2	群移動モデルと情報伝播の解析	193
6.2.1	群移動モデル	193
6.2.2	ロボット群間の情報伝播の解析	194
6.2.3	ロボット群内の情報伝播の解析	197
6.3	伝播時間と最適群規模の導出	199
6.3.1	伝播時間の算出	199
6.3.2	最適群規模の導出 (目標伝達台数一定の場合)	200
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)	202
6.4	シミュレーションによる解析の検証	204
6.4.1	情報伝播の方程式の検証	204
6.4.2	伝播時間と最適群規模の検証	205
6.5	群形成アルゴリズム	208
6.5.1	群形成のアルゴリズム	208
6.5.2	群形成のシミュレーション	209
6.6	おわりに	212