

博士論文

移動ロボットの局所的通信による 情報伝播モデルの解析

指導教官 新井 民夫 教授

東京大学大学院 工学系研究科 精密機械工学専攻
学生証番号 37067

吉田 英一

論文の概要

本論文では、多数の移動ロボットが存在する系に対して局所的な通信システムを導入し、情報伝達の解析とそれに基づいた設計を行なう。

近年、複数のロボットの協調の研究が盛んに行なわれている。特に、移動能力を有する移動ロボットは、広い範囲での探索や搬送などの作業に適すると考えられる。協調においては通信が必要となるが、これまで用いられてきた大域的な通信をそのまま適用すると、ボトルネックなどの問題により通信効率が低下してしまう。そこで、多数のロボットに対して、限られた範囲のロボットにのみ情報伝達が行なわれる「局所的な通信」を導入する。局所的な通信は、通信負荷を分散し、単純で容易に実現できるという利点を持つ。

協調における通信は、(1) 作業の情報を協調に必要なロボットに周知する通信、(2) 作業時に情報を伝達する通信に分けられ、それぞれ情報を「速く、無駄なく、必要なロボットに」伝達することが要求される。これを実現するため、局所的な通信の設計が重要となるが、数学的な解析に基づいてこれを設計した研究はほとんど行なわれていない。そこで本論文では、基礎的な情報伝達の解析を行なって、この要求を満たす多数の移動ロボットのための局所的な通信システムの設計論を構築することを目的とする。

ロボットから発信された情報は、空間的な伝達の繰り返しにより、時間の経過に従って複数へ伝播していく。このことから、空間的な伝達効率と、複数台への時間的な伝播特性を考慮し、局所的通信の設計を空間・時間の両面から行なうことを提案する。空間的な設計により、一回あたりの情報伝達を効率化し、情報を「速く」伝達する部分に寄与する。また時間的な設計では、情報の伝播を調節して「必要な台数への無駄のない」伝達を実現する。通信が用いられる作業や環境によって、どの設計を適用すべきかが異なる。そこで、通信量とロボット密度を考慮した「情報伝達数」というパラメータを導入し、ロボットシステムの環境を分類する。

具体的な解析においては、まず、多数移動ロボット間の情報伝達を示す「情報伝播の一般式」という基本式を導出する。この式を解析していくにあたり、見通しを良くするため、まず空間的な解析・設計を行ってから、次に時間的な解析・設計に移ることとする。

空間的な設計においては、空間的な情報伝達に必要な時間を評価指標にとり、これを最小化する通信範囲が設計結果として出力される。これにより、「局所的な情報出力の範囲がどれだけのとき伝達時間もっとも短いか」という設計が可能となる。入力パラメータとしては、ロボット密度、作業における情報伝達の間隔、ロボットの通信能力などを与える。

時間的な設計では、情報がどれだけロボット間に伝播したかを示す比率を評価量とし、必要な台数に情報を伝達するための情報伝達時間を設計する。これにより、「どれだけの時間情報を流せば、必要な台数に無駄なく伝達されるか」が求められる。ここでの入力値は、空間的な設計で出力された通信範囲に加え、ロボットの移動に関するパラメータ、そして情報を伝達したいロボット数である。ロボットの移動法に関しては、これも設計対象となる場合があるので、その設計についても言及する。

それぞれの解析と設計の有効性は、シミュレーションと実験を用いて検証する。さらに、本論文で設計した局所的通信がどのような場合に有効であるかを評価するため、従来研究で用いられてきた大域的な通信との比較を行なう。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	2
1.2 従来研究の概観とその問題点	12
1.3 研究の目的	15
1.4 論文の構成	16
第2章 本論文と関連する研究	19
2.1 はじめに	20
2.2 複数移動ロボット系の協調の研究における通信	21
2.2.1 大域的な通信手法	22
2.2.2 局所的な通信手法	27
2.3 通信理論における解析	38
2.3.1 情報通信理論における空間的解析	38
2.3.2 移動通信に関する理論	39
2.4 数理生物学・社会心理学における情報伝播の解析	41
2.4.1 ロジスティック関数を用いたモデル	41
2.4.2 社会心理学における情報伝播のモデル化	42
2.4.3 パーコレーション理論による伝播過程の解析	42
2.5 本論文で扱う問題点	45
2.6 おわりに	48
第3章 情報伝達の一般的定式化	49
3.1 はじめに	50
3.2 多数移動ロボットの通信環境の一般的設定	51
3.2.1 協調作業における通信	51
3.2.2 多数ロボット系における局所的通信の一般的設定	54
3.2.3 通信システムにおける設計パラメータについて	58
3.3 情報伝達の一般的定式化	62
3.4 システムの環境パラメータによる局所的通信の分類	64
3.4.1 環境パラメータ「情報伝達数」の導入	64
3.4.2 最大情報伝達数による局所的通信の分類	65

3.5	おわりに	70
第4章	空間的な解析と通信範囲の設計	71
4.1	はじめに	72
4.2	局所的通信を用いた協調作業のモデル化	75
4.2.1	通信モデルとパラメータ	75
4.2.2	協調作業モデル	77
4.3	情報伝達の定式化	79
4.3.1	ロボットの空間分布のモデル化	80
4.3.2	情報獲得の確率の導出 (1 台に対する情報伝達)	91
4.3.3	情報獲得の確率の導出 (複数台に対する伝達)	95
4.4	最適な通信範囲の導出	98
4.4.1	1 台に対する情報伝達	99
4.4.2	複数台への情報伝達	121
4.5	シミュレーションによる解析の検証と計算例	123
4.5.1	シミュレーション環境	123
4.5.2	情報獲得の確率と最適通信範囲の検証	124
4.5.3	具体例の計算	129
4.6	赤外線を用いた通信実験	135
4.6.1	赤外線を用いた局所的な通信の実現	135
4.6.2	通信の基礎実験	139
4.6.3	最適な通信範囲の検証	143
4.7	おわりに	150
第5章	時間的な解析と情報提示時間の設計	151
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	174
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
第 6 章	時間的効率化のための移動方法の設計	189
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	206
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
第 7 章	パーコレーションを用いた情報伝播モデルの検討	223
7.1	はじめに	224
7.2	ロボット移動の伝播への影響に関する解析	226
7.2.1	シミュレーション環境	226
7.2.2	回帰分析を用いた速度の影響の解析	227
7.2.3	パーコレーション理論における浸透閾値との関係	230
7.3	情報伝達数が大きい場合の伝播モデル	233
7.4	おわりに	235
第 8 章	評価	237
8.1	はじめに	238

8.2	大域的通信のモデルと解析	239
8.3	局所的通信のモデルと解析	243
8.4	伝達時間による比較	247
8.5	おわりに	253
第 9 章	結論	255
9.1	結論	256
9.2	今後の展望	258
謝辞		261
参考文献		265
研究業績書		277

第1章 序論

1.1	研究の背景	2
1.2	従来研究の概観とその問題点	12
1.3	研究の目的	15
1.4	論文の構成	16

1.1 研究の背景

近年、ロボット関連の技術は進歩・普及しつつあり、頭脳となる計算機の小型化・低コスト化も進んでいる。これにより、ロボットが工場やオフィスにおいて、重量物のハンドリングや搬送などの危険な作業、あるいは組立などの高度な作業を実行することが期待されている。

このとき、1台のロボットに多くの機能を持たせて全ての作業を行なわせようとする、ロボットの構造が複雑になるため耐故障性に欠け、環境の変化や人間からのさまざまな要求に対する柔軟性の面でも問題が生じる。そこで、これらの少数の「全能」ロボットの代わりに、同様のコストで実現可能な多数の「単能」あるいは「少能」ロボットを用い、その協調によって、作業実行の柔軟性・耐故障性を向上させようというアプローチが盛んに研究されている [浅間 92] [SICE92]。これらのシステムでは、多数のロボットを集中的に管理したのでは十分な柔軟性や耐故障性が発揮されないため、通常は集中管理者を想定しない「自律分散システム」として扱われる [SICE90] [SICE93]。

この「協調」の概念は、早くから提案されている。特に制御の分野では、マニピュレータの協調、あるいは指の協調として協調制御理論が確立されつつある [小菅 92]。さらに、最近ではロボットに移動能力と自律性を付加し、分散管理された自律移動ロボットの協調の研究が進められている。この場合には、ロボットシステムの複雑性・ダイナミクス性や非決定性が飛躍的に増大するため、一般的な理論は確立されていない。そこで、現在のところは、**Fig. 1.1**「宝探し型」「御輿かつぎ型」「バケツリレー型」「実行役と目付け役」などに分類される複数ロボットの協調作業 [長谷川 91] について、それぞれ個別に協調手法が研究されている状態である。そのなかでも、基本技術となる複数移動ロボットの動作計画にはさまざまな手法が提案され [Latombe91] [新井 92]、典型的な作業として複数移動ロボットによる協調搬送や [太田 94] [Stilwell94]、協調領域探索 [石岡 92] [石綿 92] [倉林 94] [Beckers94]、またはこれに関連して、惑星探査作業 [Steels90] [Drogoul93] などの研究が行なわれている。

本論文では、多数の移動ロボットが以上に示したさまざまな作業を分担し、協調して実行していくシステムを想定する。これを、一般に「**多数移動ロボット系**」と呼ぶことにする。

これらの協調を進める際に重要となるのが、ロボットどうしの情報伝達、すなわち**ロボット間通信**である。特に、力学的拘束を伴う搬送などの作業では、互いに通信せずに協調を行なうことは困難である。また、これまでの研究では、明示的に通信を行なっていないくても、相手のロボットの存在を確認したり [Arkin92] [Mataric92b]、行動を観察したりする [國吉 91] などの暗示的な通信 [油田 92] でこれに代えているものもある。本研究では、「通信」の意味を広くとらえ、明示的・暗示的どちらの形にしても、何らかの形で情報伝達が行なわれた場合に、これを「通信」と呼ぶことにする。

いずれにせよ、このように通信を行なうことにより、作業中の相手のロボットの状態を知って作業実行をより円滑にしたり、あるいは自分が持っていない情報を他ロボットから獲得して学習を行なったりすることが可能となる。

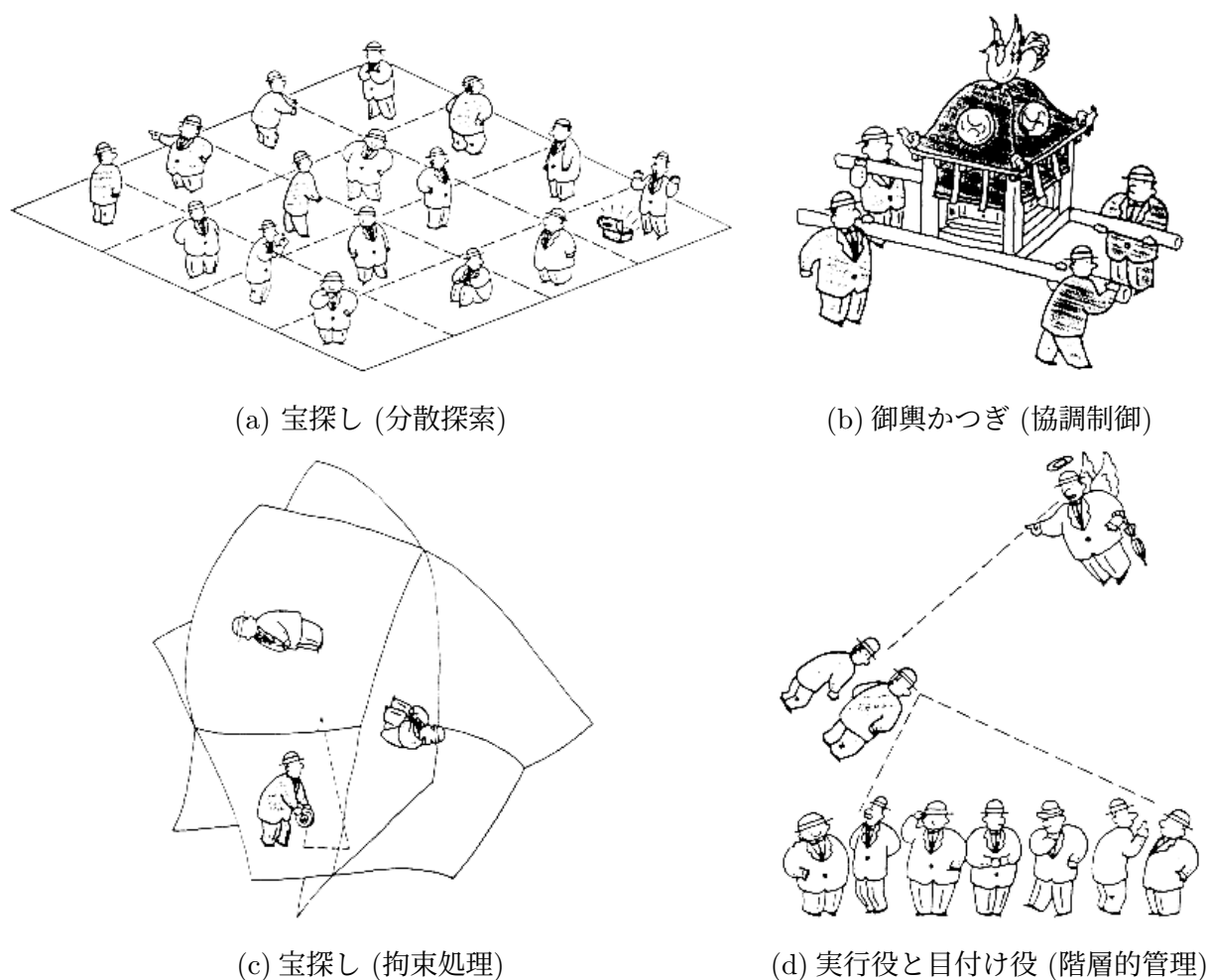


Fig. 1.1 多数ロボットによる協調形態の分類 ([長谷川 91] より)

先に述べた通り，多数移動ロボット系では，多数の移動ロボットがさまざまな作業を分担し，協調して実行していくことになる．本論文では特に，**Fig. 1.2**に示すような二つの段階からなる移動ロボットの協調作業を考え，そこで用いられる通信を解析・設計の対象とする．

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> (1) 作業情報を作業に必要なロボットに周知させるための通信 (2) 作業時の情報伝達のための通信 |
|--|

Fig. 1.2 は，この (1)(2) の通信を用いた多数のロボットによる協調作業システムを示している．

まずオペレータ (人間) がシステムに作業を要求すると，システムは協調に必要なロボットに作業情報を伝達する [通信 (1)]．続いて，ロボットは作業グループを形成して，グループ内で情報を伝達しながら [通信 (2)] 作業を達成していく．

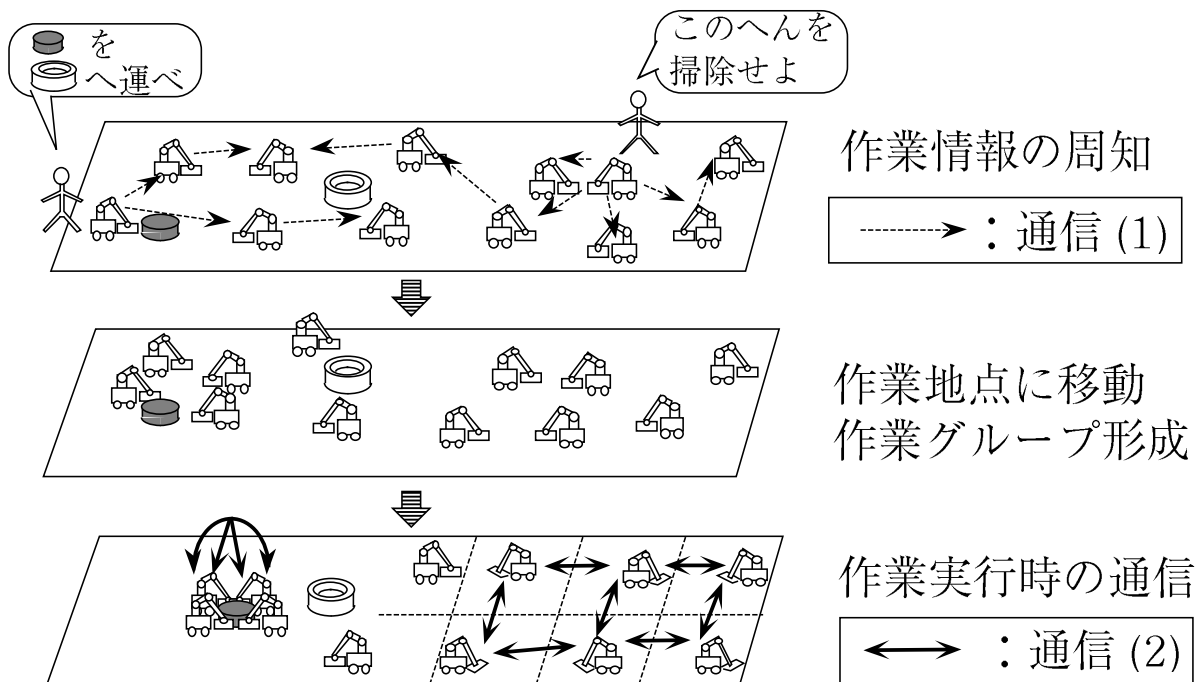


Fig. 1.2 本論文で対象とする多数ロボットによる協調作業システムの概念図

手先に種々のツールを付け替えられるようなマニピュレータをロボットに装備すれば、さまざまな作業の実現が協調により可能となると考えられる。

(1)(2) の通信からなる協調形態は、近くのロボットへの「呼びかけ」方式である。これは、

- 「呼びかけ」によりロボットを集める (1) の段階では、各ロボットの作業能力・通信能力を同等として扱う。つまり、必要な数だけ付近からロボットを集めれば作業実行のグループが形成できる。
- ロボットの位置関係が移動によって動的に変化し、その都度通信相手が異なる。
- 作業は、呼びかけを受けて集まったロボットにより、局所的に処理される。

ことを前提としている。したがって、次のような場合は**本論文では扱う対象とはならない**。

- ロボットの作業・通信能力に依存関係や階層関係が存在する場合。ロボットの位置関係に関わらず、特定のロボットとの通信が必要となる。
- ロボット間の接続関係として、あらかじめ何らかのネットワークが形成されており、それを用いて通信する場合。

これがあてはまるのは、各ロボットの能力を差別化し、複数ロボットにより階層的に作業実行システムを形成する場合である。作業実行における柔軟性・耐故障性の向上とコスト

ト低減を図る立場から、本論文では、このような場合は扱わないこととする。各ロボットにいくつかの基本的な作業や通信の機能を持たせておいて、それらの協調により達成される作業を主に考えることにする。

このように作業機能を持つロボットが多数存在するとき、本論文で想定する(1)(2)の「呼びかけ」方式の通信を用いることによって、協調のグループを組みかえて柔軟に作業に対応することが可能となる。本章冒頭で示したように、多数の同等の能力を持つロボットが協調して、搬送や領域探索などを行なう研究は数多く行なわれており、この通信手法を広く適用することができる。したがって、この「呼びかけ」方式の通信の特性について解析し、その効率化を行なうことは重要な意義を持つと言える。

さて、(1)(2)の通信のいずれの場合においても、通信に要求される仕様は

必要な数のロボットに情報を速く、無駄なく伝達する

ことである。

まず、「速く」伝達することは、**通信時間をなるべく短縮**して情報伝達を効率化することであり、通信一般に必要な事項である。

次に、「必要とするロボットに」「無駄なく」伝達することの意味を考える。ロボットが多数存在する場合には、必ずしも全てのロボットに情報を伝達する必要はない。上記の通信(1)(2)のいずれにおいても、作業に関係する数のロボットに情報を伝えればよい。このように、多数ロボット系における特徴的な課題は、ある限られた台数への情報の伝達を実現する必要があるということである。これは不必要な情報伝達ができるだけ少なくなるように、**限定された数のロボットへ情報を伝達**するという意味を含む。すなわち、多数ロボット系では**情報伝達範囲の局所性**を実現する必要がある。

ただし、(2)の作業時の通信では、特定の相手への通信であるいわゆる「メッセージ送信」が必要となる場合もある。これについても、「必要な数のロボットに情報を伝達する」という意味では要求される仕様は同じである。あとで述べるように、出力した情報にその行き先を指定することにより、相手を他のセンサで認識しなくてもこの通信を実現できる。

移動ロボット技術の進展・普及により、将来的に協調作業システムに属するロボットは増加していくであろう。多数移動ロボット系において協調作業を円滑に進めるためには、先に要求仕様として示した通信時間の短縮、情報伝達範囲の局所性を実現する「必要なロボットに情報を速く無駄なく伝える」通信システムの設計が重要な問題となる。

この設計を行なうため、多数移動ロボット系において、通信によりロボット間にどのように情報が伝達されていくか、その特性を解析する必要がある。

本研究で行なうべき解析について具体的に考察する前に、通信モデルとしてどのようなものを用いるべきかについて述べておく。解析の対象は、多数のロボットが存在する系の通信であるので、出力された情報が届く範囲と届かない範囲が存在すると考えなければならない。またこれに加え、ロボットが移動することから、通信相手が動的に変化する。多

数ロボットの通信の接続・切断の集中的な管理は、1.2 節で述べるように耐故障性に欠ける。また多くのロボットが自分の作業と関係ない通信処理を待たなければならないため、効率も低下する。よって、分散管理された多数移動ロボット系では、通信も分散的・並列的に行なわれることが望ましい。

すなわち、多数ロボットの通信システムは、先に示した

必要な数のロボットに情報を速く、無駄なく伝達する

という要求仕様を満たす必要があることに加え、通信のモデルにおいて

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">● 通信の局所性を考慮する● 通信を分散化する● なるべく単純なシステムとする |
|---|

ことが重要となる。

そこで本論文では、解析・設計を進めるにあたり、その一般的適用を考慮し、多数移動ロボット系における通信を次のようなモデルとする。

- (1) 情報はパケットを単位として伝達される。
- (2) ロボットから発信された情報は、有限な情報伝達範囲を持つ。
- (3) あるロボットから情報が発信されたとき、別のロボットがその情報伝達範囲内に存在し、情報獲得可能な状態にあるとき、情報は受信される。
- (4) ロボットの通信性能によって決まる、パケット伝達に十分なサンプリング時間を 1 単位時間とする。

(3) で情報獲得可能な状態とは、受け取る情報量が通信容量を超えておらず、情報の獲得が可能である状態を示す。逆に、他のロボットの出力などが重なったりして通信容量をオーバーした場合にはその情報は受信されない。

(4) は、情報伝達に関する解析に一般性を与えるため、時間の単位を合わせることを表している。どのような通信手段を用いるかにより、情報の伝達時間や信頼性などの性能は異なる。そこで、情報は一定データ長のパケットとし、それを伝達するのに必要な時間を単位時間にとる。

この通信形態には、

- 単純な局所ブロードキャスト方式であり、実現がしやすい。各ロボットが有限範囲に情報を発信し、その範囲内にあるロボットが情報を受信する通信形態であるので、例えば赤外線 [小山 95] [鈴木 95] や画像 [新井 94a] などを用いて容易に実現可能である。

- 多くの通信が、局所的に、並列に行なわれるため、不必要な通信処理のため待つ時間も減少する。
- ロボットの新規追加や削除などのシステムの変更に対しての対応が容易である。
- 情報出力範囲を大きくとれば、大域的な通信のモデル化も可能となり、一般性を有するモデルである。

という利点があり、分散管理された多数ロボット系の通信として適当であるといえる。

ただし、この通信手法は「たれ流し」的な通信であり、

- 情報が確率的にしか伝達できない
- 特定のロボットに対する「メッセージ送信」の形の情報伝達が困難である

という欠点がある。

しかし、確率的にしか情報を伝達できなくても、同じ情報を繰り返して出力することにより、一定の信頼性で情報を伝達することは可能である。これは計算機ネットワークの通信でも用いられている手法であり、この局所ブロードキャスト方式でも、作業に要求される信頼性に応じて情報伝達を行なうことができる。

また、本論文では同等の能力を持つ多数のロボットを想定するので、特定のロボットに対する「メッセージ送信」が必要となることがあるのは、(2)の作業時の通信だけである。この場合には、作業グループに属するロボットを識別さえすれば、情報パケットに識別番号を載せるプロトコルを採用することにより、相手を特定した「メッセージ送信」が可能となる。もちろん、電話網のように、位置が離れたロボットが、相手を特定した通信を頻繁にする場合には適用は困難である。しかし、[矢向 94]にも述べられている通り、多数の同等の移動ロボットからなる系では、Fig. 1.2のように作業を局所的に処理することが多く、このような場合は少ないと考えられる。

これらの欠点が存在しても、先に述べたシステムの単純さと実現の容易さ、通信の分散性といった利点は大きいと考え、本論文では、この局所的な通信手法を用いることにする。

通信モデルが規定されたので、多数移動ロボット系において、どのような情報伝達の解析が必要となるか考えてみる。あるロボットが出力した情報は、空間的に距離をおいた別のロボットに受け渡される。しかしロボット数が多い場合を想定しているため、一回の伝達で情報を全てのロボットに大域的に伝えることは困難である。よって、この空間的な情報伝達の繰り返しにより、Fig. 1.3に示すように、時間が経過するにつれて情報は「クチコミ」的に「また聞き」の形でロボット間に伝えられていくと考えられる。これを、**情報の伝播**と呼ぶことにする。

また、各移動ロボットは、作業情報を探索しながら、あるいは作業を実行しながら移動するので、この移動も情報の広がりにも寄与する (Fig. 1.3)。

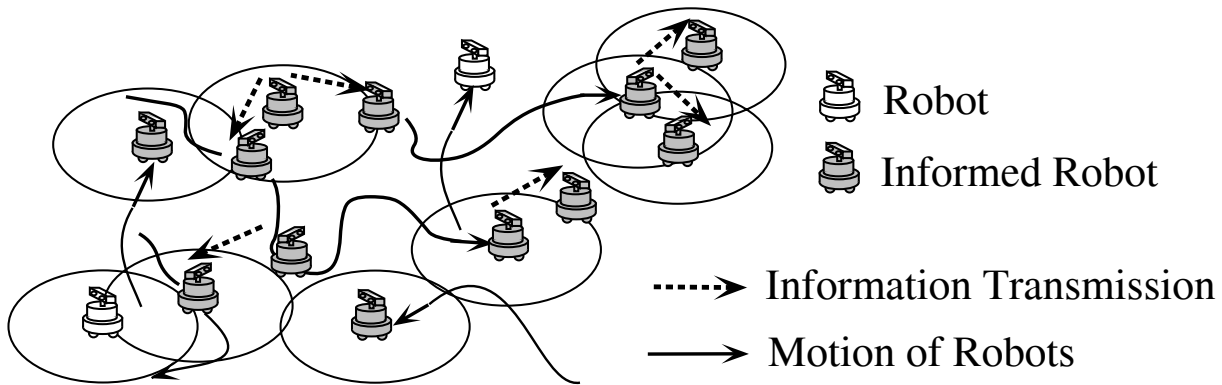


Fig. 1.3 複数ロボット間の情報伝播

「必要なロボットに、速く無駄なく情報を伝達する」ためには、この**空間的な情報の受け渡し**が繰り返されることにより、**時間が経過するに従って**どのように複数ロボット間に情報が伝達されていくかを知ることが必要となる。よって、通信システム設計においては、**空間的・時間的**側面の両方からの解析を行なわなければならない。

空間的・時間的解析が、通信システム設計のどの部分に用いられるかを考える。

情報伝達の空間的な解析は、あるロボットから他への一回あたりの情報の伝達の効率に関するものである。効率が低いとすると、情報が獲得されるまでには複数回の情報出力を要するので、より多くの通信時間が必要である。これを人間が話をする例で考えると、別の人の話し声が入ったり相手の声が小さかったりしたときに、相手に聞き直すために話を伝えるのに時間がかかることに相当する。複数台へ情報を伝達する場合も、基本的にはこのロボット間の情報伝達の繰り返しであるから、空間的な情報伝達の効率化により、伝達時間が短縮される。よって、通信システムの設計において、**空間的な解析は、情報を「速く」伝達する部分に用いられる。**

また、時間的な解析は、時間を経るにつれ情報がロボット間に伝達されていくその特性を調べるものである。情報を長い時間流せば必要以上に多くのロボットに伝えられてしまうであろうし、短い時間であれば少ないロボットにしか伝わらない。情報が時間的にどう広がるかに関する解析は、情報伝達範囲の局所性の実現に利用できる。よって、**時間的な解析は「必要とする数に」「無駄なく」伝達する部分に寄与する。**

以上をまとめると、次の Table 1.1 のようになる。

次に、多数ロボット系の通信システムの空間的・時間的な設計にどのパラメータを用いるかという問題を考える必要がある。これらのパラメータについては、3章で詳述するが、Table 1.2 にその概要を示す。

まず、空間的設計に関して見てみる。空間的な情報伝達の効率に関するパラメータとしては、ロボットの通信範囲、通信容量、通信の信頼性（誤り率など）、情報出力確率（出

Table 1.1 時間的・空間的解析と通信システム設計との関係

	解析で明らかにされる事柄	解析を利用する設計
空間的解析	空間的な情報伝達の効率	「速く」伝達する 情報伝達時間の短縮
時間的解析	時間的な情報伝達の特徴	「必要な数に」「無駄なく」伝達する 情報伝達範囲の局所性の実現

Table 1.2 多数ロボット系で設計対象となるパラメータ

	パラメータ	パラメータの種類	その理由
空間的設計に関係するパラメータ	通信範囲 通信容量 通信の信頼性 情報出力の確率(間隔) ロボット密度	設計 入力 入力 入力 入力	情報出力範囲調節が可能 ロボットの通信能力に依存 ロボットの通信能力に依存 一般に作業に依存 系における定数
時間的設計に関係するパラメータ	情報を伝える台数 情報の提示時間 移動速度 移動方法	入力 設計 入力 設計	作業に依存 情報の有効期間設定が可能 通常機構的に許される最大値 移動が作業に制限されない とき設計可 [主に(1)の通信]

力間隔から決まる), ロボット密度がある. Fig. 1.4 に示すように, 0 から最大値の間で情報出力範囲が容易に調節できるため, 通信範囲は設計可能なパラメータである. その他のパラメータの設計は, Table 1.2 に示す理由により一般に困難である. よってこれらは, 多数ロボット系におけるロボットの性能や作業などから与えられる入力パラメータとして取り扱われなければならない.

通信範囲の設計を行なうとき, Fig. 1.5 に示すように, これが小さすぎると情報が届かないし, 大きすぎても, 干渉などにより通信効率は低下する. よって, 空間的な設計は, これらの入力パラメータに対して, 情報伝達時間を最短とし, 通信を効率化する通信範囲を求めることであると言える.

時間的な設計に関する主なパラメータとしては, ロボット間の時間的な情報の広がり

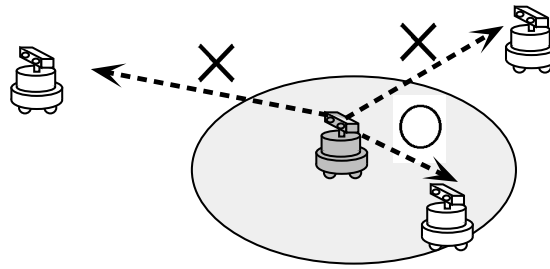


Fig. 1.4 通信の空間的設計

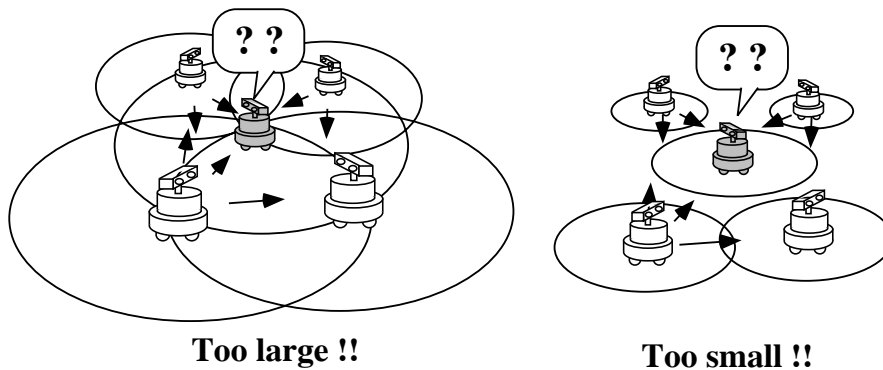


Fig. 1.5 通信範囲の最適化

関係する情報の提示時間と，ロボットの移動の仕方がある．伝達すべき台数が入力として与えられたとき，情報をどれだけの時間提示するか，すなわちどれだけの時間流すかは，Fig. 1.6 のように情報の有効期間を用いて設計することが可能である．

ロボットの移動に関しては，まず速度は通常ロボットの機構的に許される最大値を用いることから，入力パラメータであると考えなくてはならない．移動方法は，作業により制限されないときのみ，ランダム移動や隊列移動として設計が可能である．この決定にはいくつかのパラメータが必要だが，ここではまとめて一つの設計パラメータとして扱う．この設計は，主に，移動方法の設計に自由度がある作業情報を周知するための (1) の通信の場合にあてはまる．

よって，時間的な設計は，目標とするロボット数に情報を伝達し，過剰な情報伝播も防ぐ情報提示時間を求めることとなる．また，移動方法が設計可能であるときには，まず必要なロボット数へ情報を伝達する時間を最小とする移動方法を求め，それから情報提示時間を算出する．これにより，さらに通信は効率化される．

以上，多数ロボット系において局所的な通信を用いたときには，いわゆる「クチコミ」的な「また聞き」の形で複数ロボットへの情報伝達が行なわれるモデルとなることを述べ

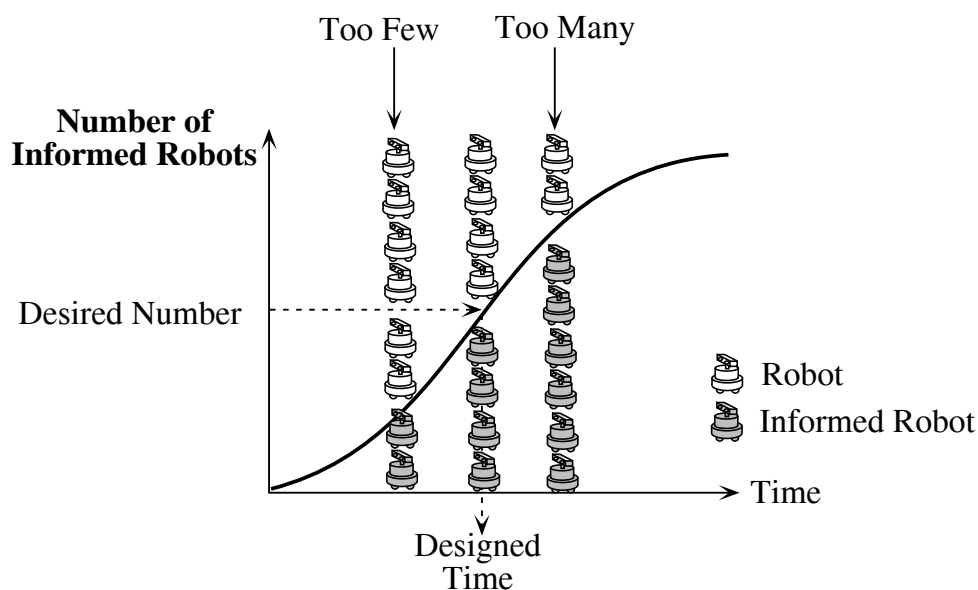


Fig. 1.6 通信の時間的设计

た. さらに, この局所的な通信の効率化には, 空間的・時間的な側面を考慮した一般的な解析とそれに基づく設計が必要であることを指摘し, その設計パラメータとして, 主に通信範囲と情報提示時間を用いることを示した.

しかしながら, 多数ロボット系の一般的な通信システム設計に関しては, 従来研究ではほとんど議論されていない. そこで, 次節では, 多数移動ロボットの通信システムに関して, 従来の研究を概観し, その問題点を示す.

1.2 従来研究の概観とその問題点

従来研究とその問題点については、2 章でより詳しく紹介するが、本節ではそれを概観しておく。

まず、移動ロボットの分野で現在行なわれている研究では、無線など広域性のある通信媒体を用いて多数のロボットに情報を伝達する大域的な通信を仮定しているものが多い [Matsumoto90] [Noreils92] [金森 92] [プレム 91a] [Wang94b]。これらにおいては、空いている無線チャネルを通信を行うロボットに割り当てたり [Matsumoto90]、中継局が通信を管理したり [金森 92]、あるいはリングを組んでトークンをまわして通信したりしている [プレム 91a]。これらの大域的な通信手法は、数台のロボットからなる系では有効に機能する。しかし、多数の自律移動ロボットによる協調システムを想定すると、以下のような問題が生じる (Fig. 1.7)。

- 多数ロボット系では通信トラフィックが高くなる。このため、有限な周波数資源による通信能力の制限や情報の干渉などの影響で通信効率が著しく低下する。
- 自律ロボットの行動決定には、局所的な情報を中心に用いれば十分なことが多いと考えられる。よって、系全体の情報を得る必要性は小さくなる。逆に、局所的な情報が無制限に広がるとロボットの情報処理能力を超えてしまう危険性がある。
- 通信システムを集中的に管理する中継局を用いた場合には、中継局が故障するとシステム全体の通信に支障をきたし、耐故障性の点で問題がある。

多数のロボットが存在する場合には、このように大域的な手法だけでは通信効率低下を招くため、これまで見てきたように、局所性を考慮した空間的な設計が必要となる。

人間の場合でも、大人数の話し合いなどでは、全員が一度に話すと収拾がつかなくなってしまう。そこで、数人のグループで話して、それをあとで代表者が持ち寄るなどといった方法をとるであろう。

また、広い環境を想定したときには、通信範囲が限定されているために大域的な通信自体が不可能となり、通信を局所的であると見なさなければならない。この場合にも、大域的な通信の研究は適用できない。

このようにロボットが多数となった場合、大域的な通信だけでは対応できなくなっているため、多数移動ロボットの協調において局所的な通信を用いる研究は最近いくつか見られる。

通信範囲を限定した “Hello-Call Communication” の研究 [Hara92] [市川 92] や、局所的な範囲とのみ交差などの操作を行なう分散 GA [植山 93] [堀内 93]、フェロモンの通信手段を用いた多数ロボットによるサンプル採取作業 [Steels90] [Drogoul93]、多数ロボットによる探索作業に関する考察 [Gage92] などがある。さらに、交通網の交差点などにおけるデッ

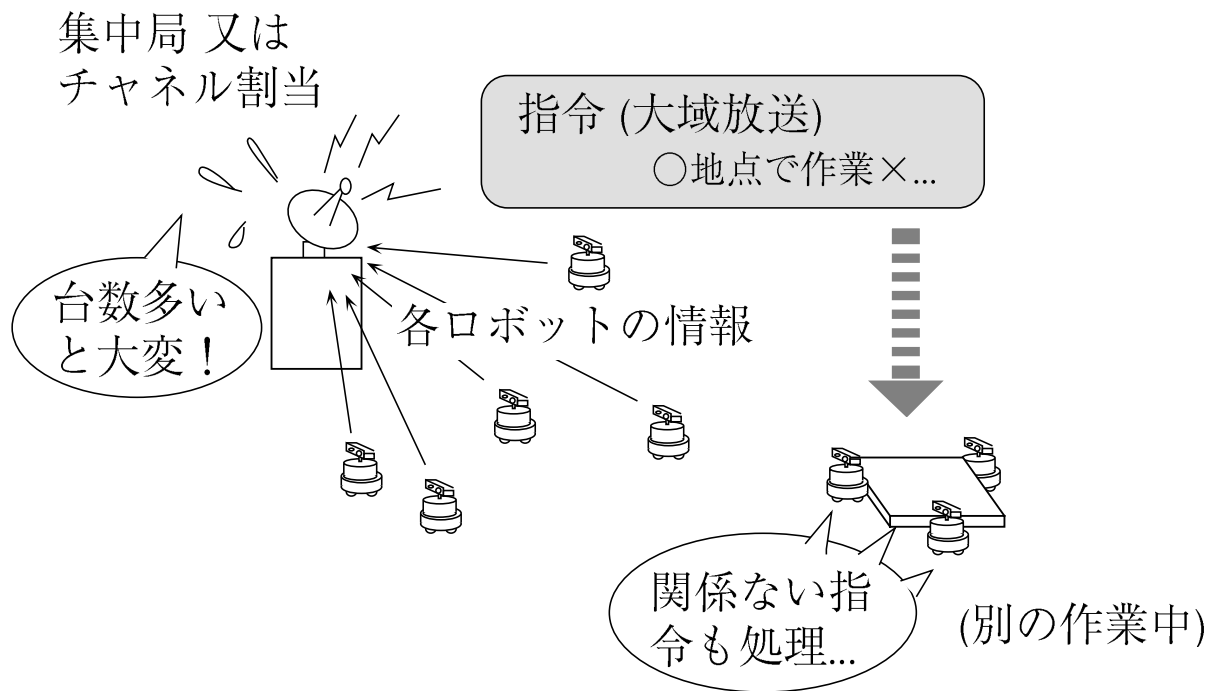


Fig. 1.7 大域的な通信の問題点

ドロック回避において、サインボードを用いた局所的な通信手法を用いること [Wang94a] も提案されている。

これらの研究では、主に局所的な通信に基づいた多数ロボットの行動のシミュレーションを行なっている。局所的な通信のみでも目的とする作業が達成されるという、興味深い結果が報告されており、多数ロボットシステムにおいて局所的な通信を用いることの有効性を示している。

しかし、これらがとっている立場は、「ロボットが多数存在する場合、大域的な通信では効率が低下するであろうから、ロボット間の相互作用を局所的にした」というものである。得られた結果に数学的な解析を加え、局所的な通信の設計論にまで発展させた研究は見られない。また、ある程度の解析を行なっている、特殊な場合についてのみの議論にとどまっており、多数ロボットの通信を分類し、その局所性によって生じる効果を考慮して体系的な解析は行なわれていない。

さらに、通信範囲などのパラメータを設計した研究はあっても、これらはシミュレーションから試行錯誤的に決められており、情報の伝達特性とロボットシステムのパラメータとの関係は明らかにされていない。

以上のように、ロボット工学の分野では多数の移動ロボットの協調においては局所的な通信を想定したものが多くにもかかわらず、数学的な解析に基づいて通信システムの設計

指針を示した研究は行なわれていない。

このため、通信システムの設計には、その都度多数のロボットを計算機上に実現して時間のかかるシミュレーションを行なわなければならないのが現状である。そのうえ、ロボットを新たに追加するなどシステムに何らかの変更があった場合には、さらにシミュレーションをやり直さなければならず、非常に手間がかかってしまう。

そこで、ロボット工学以外の分野における研究から得られた知見で、多数ロボット通信システムの設計論に参考となるものを見てみる。これらは、局所的な相互作用を行なう多数の個体からなるシステムに関する問題を扱っている研究であり、本論文の解析上の道具立てとして利用できることが期待される。

ただし、これらを応用するには、多数ロボット系の通信に特徴的な次のような点について考慮しなければならない。

- (R1) 通信システムを設計する目的のため、通信範囲や作業における情報伝達の確率などのパラメータと伝達特性との関係を一般的に明らかにすることが望ましい。
- (R2) ロボットは移動するので、通信相手が常に変化するような動的なシステムとしてのモデル化が必要である。
- (R3) 探索や搬送など異なる協調作業を行なうときには、ロボットの空間分布や通信量も異なる。

まず、通信の空間的設計については、通信理論の分野で無線計算機ネットワークなどに関する研究が報告されている [Takagi84]。しかし、この通信範囲の設計の研究は、無線局がランダムに分布するとき、ある方向へ最も効率的に情報を伝えるための最適な通信を与えるものである。ロボットが協調作業を行なう場合に対しては (R3) の要因を考慮した別の解析が必要である。

また、多数への情報伝達の時間的な解析は、主に社会心理学や数理生物学などの分野 [吉田 71] [巖佐 90] で扱われている。これらでは、情報の伝播や疫病の広がりなどの現象をモデルに当てはめてパラメータをトップダウン的に求めることが目的である。上記の (R1) の点で示すように、多数ロボットシステムでは、システムのパラメータと情報伝達の特性との関係を求めて設計に適用することが重要である。また、(R2) に示すように個体の移動を考慮した動的なシステムも扱っていない。そのため、これらの研究を利用するには、システムの情報の伝達をボトムアップ的に解析する立場を加える必要がある。

このように、通信システムの空間的・時間的解析の問題は、解析の質が異なるため、それぞれかなり違った分野で扱われており、これらを同時に包含する研究はない。

以上見てきたように、多数ロボットのための局所的な通信システムの設計は重要な課題であるにもかかわらず、この設計を行なうための数学的な解析に基づいた理論体系の整備は遅れているのが現状である。

1.3 研究の目的

これまで述べてきたように，多数の移動ロボットの協調においては，局所的な通信が有効であると考えられる．実際，多くの研究でこの通信手法が用いられている．

多数の移動ロボットの協調において，局所的な通信に求められる要求仕様は，

必要な数のロボットに情報を速く，無駄なく伝達する

ことであることを述べた．

特に多数のロボットが存在する系では，さらに通信システムは

- 通信の局所性を考慮する
- 通信を分散化する
- なるべく単純なシステムとする

ことも満たさなければならない．

そこで本論文では，多数移動ロボット系に**局所的な通信モデル**を導入する．これを用いて協調作業を円滑に実行するためには，効率的な通信システムの設計が重要な課題となる．まず通信が局所的であることから，**空間的な局所性の設計**を行なう必要がある．また，複数ロボットによる協調を想定するので，必要な数のロボットへ情報を伝達するため，**時間的に伝播をどう調節するか**も設計対象となる．しかしながら，これらについて解析的に論じ，設計指針を示している研究は見られない．よって，

- (1) **局所的な通信による，移動ロボット間の情報伝播の時間的・空間的な解析を行なう**
- (2) **解析に基づき，上記の要求仕様を満たす局所的な通信設計論を構築する**

ことを研究の目的とする．

1.4 論文の構成

本論文は、以下の構成をとる。

第 1 章では、研究の背景と目的について述べた。

第 2 章では、本論文に関連する研究を紹介し、それらについての問題点を示す。

第 3 章では、まず多数移動ロボット間の一般的な通信環境を設定し、環境のパラメータを用いて通信を定性的に分類する。そして、どの分類にどのような解析と設計が必要となるかを考察する。また、4 章以降で行なう解析・設計の準備として、情報伝播の一般的な定式化を行なう。

1.2 節までで述べてきたように、これまでの研究では、局所的な通信を用いているものは多く見られても、その解析と設計を体系的に扱ったものはない。そこで、局所的な通信を、ロボットの密度と通信量を考慮した「情報伝達数」というパラメータにより、それが小さい、大きい、非常に大きいの 3 つの場合に分類する。

次に、解析を体系的に見通しよくするため、本論文では、まず空間的な解析・設計、次に時間的な解析・設計を行なうという立場で議論を進めていく。この理由は、空間的な情報伝達の繰り返しにより複数ロボットへの時間的な伝播が行なわれるからである。

4 章以降では、この 3 章の分類のそれぞれに対して、導出した情報伝達の一般的定式化をもとにして、Fig. 1.8 に示す形で解析・設計を進めていく。

第 4 章では、多数移動ロボットの局所的通信の空間的な情報伝達の解析を行ない、伝達時間が最小となる最適な通信範囲を設計する。この通信範囲の設計では、最も基本的な場合を考え、1 台のロボットへの情報伝達を効率化するものとする。

具体的には、ロボット密度、通信能力、情報出力の確率を入力として与えることにより、通信範囲が設計結果として出力される。

第 5 章では、多数移動ロボットの局所的通信により「また聞き」の形で生じる情報伝播について、ロボットの移動を考慮した時間的な解析を行なう。これをもとに、作業に必要なロボット数へ、なるべく過不足なく情報を伝達するための情報提示時間を設計する。

ここでは、4 章で設計された通信範囲と、情報を伝達すべき台数、そして移動速度を入力として与えることにより、情報の提示時間が設計結果として与えられる。

また、4 章では 1 台への伝達において最適な通信範囲を導出したが、ここで複数ロボットへの伝達を考慮した場合に対して拡張する。

第 6 章でも、情報伝播の時間的な解析を行なうが、ここではロボットの移動方法の設計を行なう。ここで、通信効率化のための移動方法として、群による移動を導入し、その最適設計を行なう。入力は一章と同様であるが、設計の出力はロボットの最適な移動方法である。

第7章では、通信経路に無限の繋がりができる場合には、パーコレーションの効果が現れることを示す。よって、ここでは移動が伝播に大きく寄与することを考慮した5章、6の場合とは異なる解析手法が必要となる。

第8章では、本論文で行なった解析・設計の評価を行なう。大域的な通信と局所的な通信についての比較を示し、どのような場合に局所的通信が大域的通信よりも効率的になるかについて考察する。

第9章では、結論を述べる。

本論文の構成は、Fig. 1.8 に示す通りである。

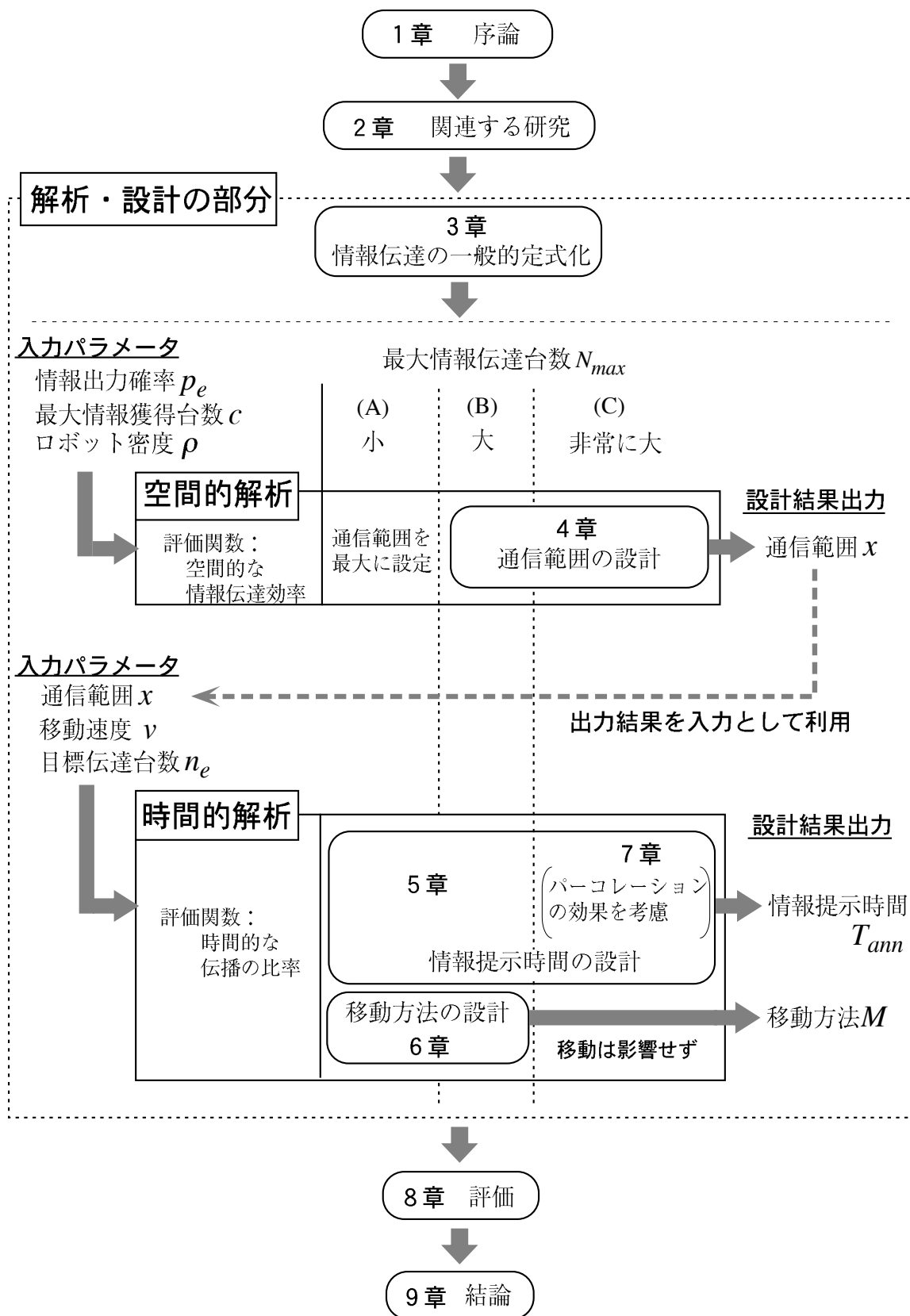


Fig. 1.8 論文の構成

第2章 本論文と関連する研究

2.1	はじめに	20
2.2	複数移動ロボット系の協調の研究における通信	21
2.2.1	大域的な通信手法	22
2.2.2	局所的な通信手法	27
2.3	通信理論における解析	38
2.3.1	情報通信理論における空間的解析	38
2.3.2	移動通信に関する理論	39
2.4	数理生物学・社会心理学における情報伝播の解析	41
2.4.1	ロジスティック関数を用いたモデル	41
2.4.2	社会心理学における情報伝播のモデル化	42
2.4.3	パーコレーション理論による伝播過程の解析	42
2.5	本論文で扱う問題点	45
2.6	おわりに	48

2.1 はじめに

本章では、本論文と関連する研究について概観する。

まず、2.2 節で、複数移動ロボット系の協調の研究における通信を大域的通信、局所的な通信に大別し、それぞれについて、2.2.1, 2.2.2 で紹介する。局所的な通信については、さらに局所的な通信を明示的 (Explicit) に用いる研究、また他のロボットの行動や存在を自己の行動決定に反映させる間接的な「暗黙の (Implicit)」通信の研究に分け、それぞれを紹介する。また、局所的な通信の実現を試みている研究も最近いくつか見られるので、それらの研究についてもその現状を示す。最後に、本論文で行なう局所的通信の設計論が適用可能であると考えられる応用例についてもいくつか示す。

また、多数ロボットの研究ではないが、その解析の考え方を本論文に利用できるものもある。2.3 節では主に計算機のネットワークなどを対象とした通信理論、2.4 節では生物学や社会心理学における情報の伝播現象のモデル化について、それぞれ簡単にその概念をまとめておく。

最後に、2.5 節で、本章で紹介した従来研究の問題点を述べ、本論文ではそれらにどう対処していくかを示す。

2.2 複数移動ロボット系の協調の研究における通信

本節では、複数移動ロボットの協調のための通信について、これまで行なわれてきた研究を紹介する。

多数ロボット協調に関する研究をまとめた [Dudek93] [RSJ94] [Cao95] などにおいて、**ロボット間の通信** は重要な部分としてとりあげられている。[RSJ94] では、生物学、分散人工知能など多くの観点からロボット間の通信が論じられている [福田 94a] [石田 94] [下原 94]。

一例として、[Dudek93] の分類では、多数ロボット間の通信を通信範囲、通信トポロジー、通信バンド幅などの観点から、

- 通信範囲

COM_NONE ロボット間の直接の通信が不可能な場合。しかし、他の存在を認識し、それを自分の行動に反映させる場合はここに分類する。

COM_NEAR 近い距離に存在するロボットとのみ通信が可能な場合。ここでの「距離」はトポロジー的な距離、空間距離の両方に解釈できる。

COM_INF 他のすべてのロボットと通信が可能な場合。

- 通信トポロジー

TOP_BROAD 放送。ロボットは、他のすべてのロボットと通信が可能であるが、特定の1台へのメッセージ送信は不可能。

TOP_ADD アドレス。ロボットは、名前またはアドレスを用いて他のすべてのロボットと通信が可能である。

TOP_TREE ツリー構造。ロボットの通信はツリー状であり、階層構造を通してのみ通信可能。

TOP_GRAPH ロボットは、一般グラフの形にリンクされている。ツリーより一般的な構造である。

- 通信バンド幅

BAND_HIGH 通信はコスト0である。バンド幅が十分高いので、通信コストやオーバーヘッドは無視できる。

BAND_MOTION 通信はロボットの移動に比例。ミツバチのダンスなどがこれにあたる。

BAND_LOW 通信のコストが高い。通信コストは、ロボットが情報獲得のために一つの場所から次の場所へ移動するよりも高い。

BAND_ZERO 通信は不可能

のように分類している。

本論文では、この分類の「通信範囲」では COM_NEAR の場合を対象とするが、「通信トポロジー」はロボットの移動により変化するので最も一般的な TOP_GRAPH, 「通信バンド幅」もさまざまな通信範囲とロボットの通信能力を考慮し、移動との関係も論じるので BAND_HIGH~BAND_LOW まで広い範囲を考察していることになる。

本節では、多数移動ロボットにおける通信に関する研究を、大きく大域的な通信 ([Dudek93] の分類では COM_INF) と、局所的な通信 (同 COM_NEAR と COM_NONE) に分け、それぞれを概観する。

1.2 節で示したように、系に存在するロボット数が 2~3 台程度と少ないときには、大域的な通信が有効である。このような場合を想定した協調に用いられる大域的な通信に関する研究を、2.2.1 項で概説する。

多数台のロボットを想定すると、1.2 節で示した理由から大域的な通信が困難となり、通信を局所的であるとみなしてシステムを構成しなければならなくなってくる。局所的な通信に関する研究を、2.2.2 項に示す。また、[Dudek93] の分類で COM_NONE に分類されるものでも、近傍にある他のロボットの存在を認識し、それを自己の行動に反映させるような場合も局所的な通信と考えてここでいくつかを示す。

2.2.1 大域的な通信手法

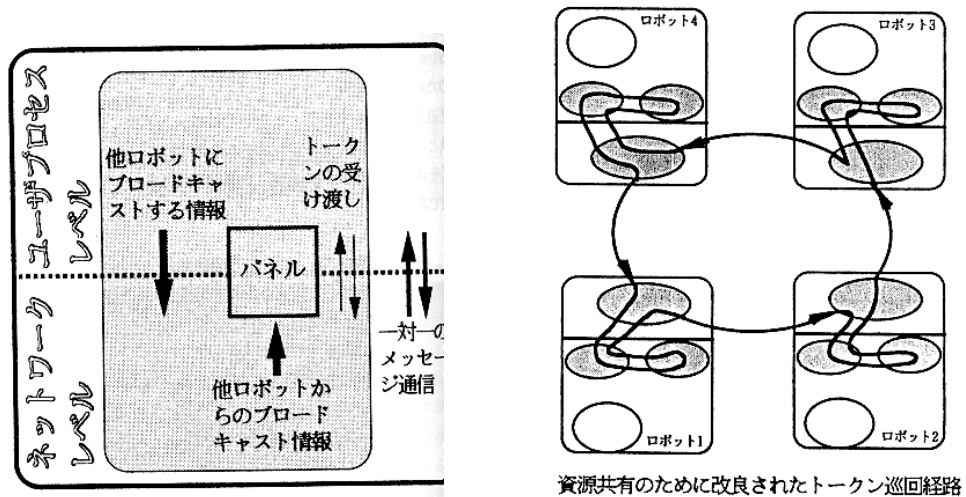
大域的な通信では、無線を用いたものがほとんどである。それぞれ手法は異なり、トークンリングを用いたもの [プレム 91b], 無線 LAN を利用するもの [石田 93], 中継局を用いるもの [金森 92], 独自の無線通信割り当て機構を開発したもの [Wang94b] [矢向 94] がある。

2.2.1.1 CAR-Net 2 [プレム 91a]

プレムウッチェら [プレム 91a] [プレム 91b] は、遠慮的協調の概念を導入し、協調として空間資源の共有を取りあげ、三叉路で独立の目的をもつロボットのモデルをインプリメントした。トークンパッシング方式による通信システム CAR-Net2(The Communication Network for Cooperation of Autonomous Robots)を開発し、この協調のための一対一のロボット間で行うメッセージ交換と、自分の状況を他のロボットに通知する放送を行う機能の双方を実現した。

また、明示的 (Explicit) に行なわれる通信の他に、特に言葉で会話を行わなくてもなされる情報交換を、暗黙通信 (Implicit Communication) と名付けた。しかし今のロボットセンサではこの機能の実現は難しく、ロボットによる暗黙通信は常時自分の状態を放送することによって実現されている。放送の場合、状態を共有メモリに相当する働きをする情報パネルに書込む。他のロボットは、これを見ることで随時放送情報を知ることができる。

CAR-Net2は、通信媒体として単一周波数の電波を用いている．そのため、ロボット間でトークンを回し、それを受け取った時に情報の読み取りや書込みを行なえるよう通信を制御している．CAR-Net2 の概念を Fig. 2.1 に示す．



情報パネルを用いた通信インタフェース トークンパッシングネットワーク

Fig. 2.1 CAR-Net2 [プレム 91b]

2.2.1.2 自律分散型ロボットシステム ACTRESS

浅間らは Fig. 2.2 に示す「機能分散」と「協調」を設計の基本概念とする、自律分散型ロボットシステム ACTRESS (ACTor-based Robots and Equipments Synthetic System) の開発研究を行なっている [松元 89] [浅間 91]. このシステムは、複数の自律的なロボット要素群（様々な機能を持つロボット、計算機、機器類を含む）から構成され、これらの要素間で通信が可能であることを前提としている．

ACTRESSでは、問題解決のために、ロボット間の通信を介したネゴシエーションを用いている．通信システムでは、通信方式を定める通信プロトコルと通信内容を定めるメッセージ・プロトコルに分ける．通信の形態には、任意のロボットから全体に対しての同報通信 (Broadcast) と、任意のロボット間の1対1通信 (Point-to-Point) がある [浅間 91]. 無線モデムを介して通信を行なうプロトタイプを構築し、メッセージ交換を実現した．契約ネットプロトコル [Smith80] に基づきネゴシエーションを用いたチーム編成の研究も行なわれている [尾崎 94].

[石田 92a] では、負荷が限られている移動ロボットに高度な計算能力を与えるため、移動ロボットとワークステーションを無線で接続し、ロボット間の通信を LAN 上でプロセス間通信によって行なう、Fig. 2.3 のようなシステムを構築した．さらに、通信に関してシ

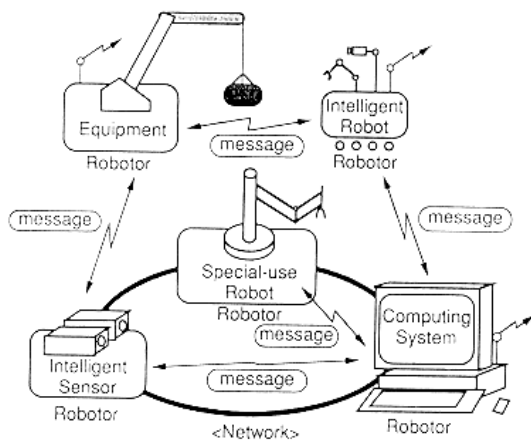


Fig. 2.2 ACTRESS の概念 [松元 89]

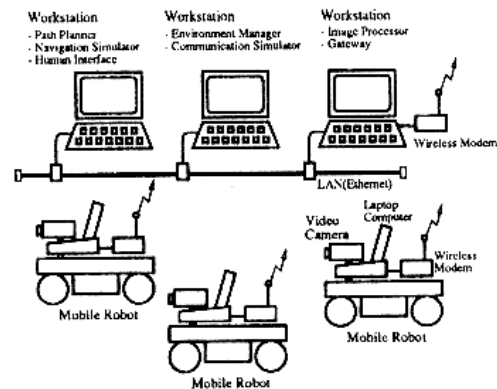


Fig. 2.3 ACTRESS の通信システム
[石田 92a]

ミュレータを開発して通信の評価を行ない、荷片付け作業を例にとってどのような環境情報の管理形態が良いかを調べている [石田 92b].

2.2.1.3 Mamoro Net [金森 92]

金森ら [金森 92] は、移動ロボットによる協調搬送作業を実現するため、Fig. 2.4 のような、無線中継局を介した通信システム Mamoro Net(Communication Network for Multiple Autonomous Mobile Robots)を開発した。協調作業として資材の運搬作業を想定し、対象とするロボットの台数は 10 台以下としている。

Mamoro Net の特徴としては、

- (1) 無線パケット通信方式を用い、エラーフリー通信が可能で、同報性がある
- (2) 加入・離脱が容易なランダムアクセス方式である
- (3) メディア・アクセス方式は、同期型送話権獲得方式であり、混信が少ない
- (4) モニタ、人間の直接指揮が可能のように、中継局がインテリジェント化されている
- (5) RS-232C、市販ワイヤレスモデムを用い、コストパフォーマンスがよい

ということがある。

無線通信機能は、RS-232C(9600bps) 端子に、送信・受信に異なる周波数を用いた FM ワイヤレスモデムをつないでいる。ロボットは送信に H 波、受信に L 波を、中継局はその逆である。通信内容は、インテリジェント化された中継局から送られ、ロボットはそこから自分宛のものを拾いだす。

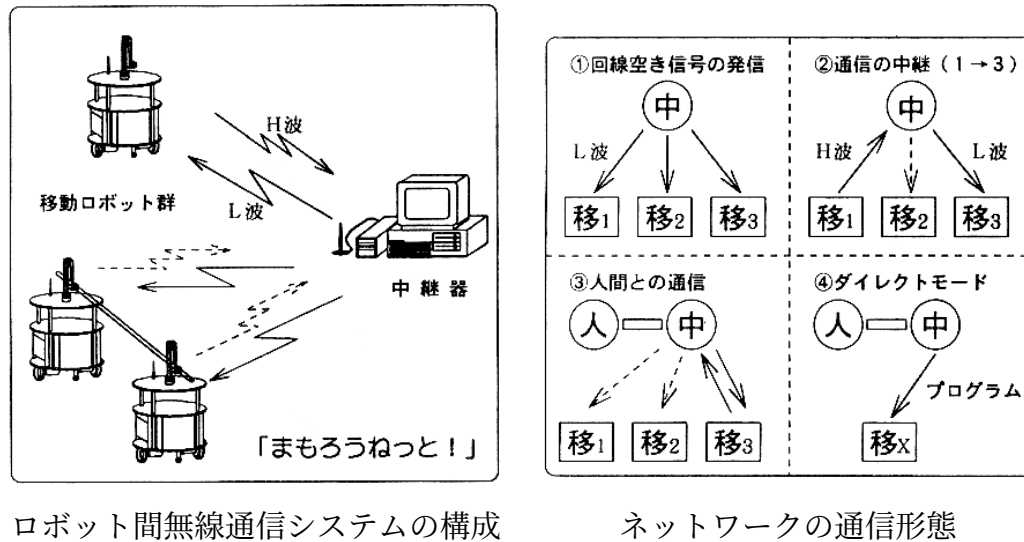


Fig. 2.4 Mamoro Net [金森 92]

送受信の制御には、同期型送話権獲得方式を用いている．これにより、ロボットは中継局を介して他のロボットと通信を行なうことができる．また、緊急割り込み機能も備えている．

2.2.1.4 多数ロボットのための無線通信システム [Wang94b], [矢向 94]

[Wang94b] [Wang95] では、多数ロボットにより資源共有を行なうことを目的とし、1チャネルの無線メディアを時分割で共有する多数のロボットのための通信プロトコル CSMA-CD/W (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection for Wireless) を提案している．CSMA 方式 (2.3 節参照) では、衝突を管理するための集中的管理機構が必要なことや、自分が出力した信号の干渉により衝突が検出できないなどの問題点があるため、分散制御できる通信プロトコル CSMA-CD/W を開発した．

CSMA-CD/W の通信手順は、Fig. 2.5(a) に示すとおりである．この研究では、衝突が生じた場合、それを分散的に全てのロボットが検知するようなアルゴリズムが示されている．以下はそれを示す．各ロボットは異なる長さのメッセージを出力する．

まず、送信後まだチャネルが busy の状態だったら、状態 RF(Radio Frequency detected)=1 にセットする．これにより、一番長いメッセージを送ったノード (Fig. 2.5 で Robot 1) 以外は衝突を検出できる．

Robot 1 が衝突を検出するため、二番めに長いメッセージを送ったノード (Robot 2) は、キャリアの有効性を調べる．変調された信号が復調されたときだけキャリア有効とし、状態 DCD(Data Carrier Detected)=1 とする．

そしてチャネルが使用可能となった後, Robot 2はDCD=1ならば, CR(Collision Report)を出力することにより, Robot 1も衝突を認識する. 全ロボットが衝突を検出したので, 各ロボットはランダムな期間後信号を再送する.

[Wang94b]では, Fig. 2.5(b)に示したハードウェア構成でこれを実現している.

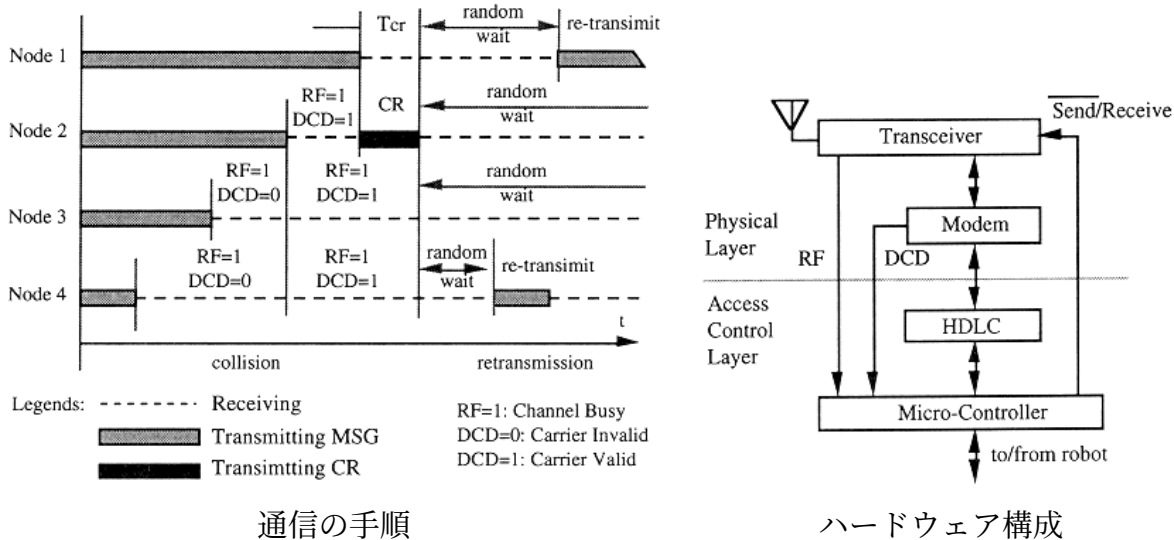


Fig. 2.5 分散制御ロボット通信プロトコル CSMA-CD/W [Wang94b]

[Wang95]では, ロボット5台の場合の市販チップの性能を想定したシミュレーションを行なっている. その結果, 通信レート100kbps程度で, 1kbitの情報を送信する場合, チャネル利用率は70%程度になることを示している. また, 送信と受信の間のモード切替え時間が小さくなれば, さらに性能が向上することが示されている.

これと類似した研究として, [矢向94]のMACS (Mechanism of ACknowledgegment using multicaSt)がある. この研究では, 実際の複数移動ロボットどうしでは, 「近くのロボットに助けを求める」あるいは「ある情報を知っているロボットに尋ねる」など, ある条件を満たす不特定多者との通信することが多くなることを指摘している. [矢向94]が提案するMACSは, 契約ネットプロトコルのモデル[Smith80]を応用しており, まず交信相手が満たすべき情報をブロードキャストする. 聞き手がその条件の満足度を入札し, その満足度をもとにして条件に合致する通信相手を決定する.

また, CSMAなどの通信プロトコルは, 多数ロボット系では全てのロボットの電波が到達するとは限らないし, また移動局どうしでは同期を保つことが困難であるため, MACSでは通信を行なえるネットワークを分散環境の一部分に限定している. そしてその部分にだけ有効な通信タイムスロットの割り当てを行なっている.

ハードウェアを用いた実験も行なっているが, チャネル割り当てその他の時間が大きくとられ, 結果としては通信速度はそれほど大きくない(15byte/sec).

この研究では、一種の局所性を扱っているが、通信を行なう前の段階でブロードキャストして相手を選んでいる。したがって物理的には実際の通信は大域的であり、ソフトウェア的に局所性を実現している。「また聞き」といった複数への情報伝達も考慮していない。

以上示してきた、無線などを用いた大域的な手法は、想定するロボット数は多くても5台である。一回の空間的情報伝達の評価としては応用することも可能であると考えられるが、それよりロボット数が多いとチャンネル割り当てや衝突が多くなり、効率が低下してしまうことが予想される。

2.2.2 局所的な通信手法

多数のロボットを想定し、局所的な通信を用いて何らかの協調行動を行なわせることを目的とした研究を紹介する。特に、多数のロボットを想定した協調探索などの研究では、大域的な通信では効率が低下するため、局所的な通信が用いられている。

本論文では、局所的な通信手法を用いた研究には、近傍の相手の存在を認識し、それをロボットの行動決定に反映させるものも含めて考えることにする。これらの研究の多くは、各個体を周囲の情報から行動を自律的に決定する「エージェント」として扱っている。そして多数のエージェントによる一種の「チームワーク」の形成により、全体としての協調行動の実現を目指す試みである。これは、分散人工知能の分野で、エージェントが分散して問題を解決する「マルチエージェントシステム」とも関係が深い。また、この研究には、いくつかの基本的な行動の和の形でその行動が決定される「行動ベースロボット (Behavior-Based Robot)」[Brooks86] の集団による何らかの協調行動を扱ったものも多い。これらは、昆虫の行動などをモデルとし、個々の個体間の局所的な相互作用によって、これらの集団により大域的にどのような振舞いが発現するかという、ボトムアップ的な立場に立っている。多数ロボットの局所的な通信の研究の現状を概観するため、このような研究も併せて以下に紹介する。

さらに、多数の移動ロボットを想定し、これに適応した局所的な通信システムのハードウェアに関する研究もいくつか行なわれている。

2.2.2.1 局所的通信を明示的に用いた多数ロボットの協調

通信の局所的に限定し、それを用いた協調作業の研究は多く見られる。ここでは、明示的に通信を行なう研究を紹介する。

これらには、まずロボットが局所的な通信範囲に存在する他のロボットと鎖のような繋がりを作って、領域探索や経路生成を行なう研究がある。これは、局所的な通信の空間的性質を直接に作業に利用したものである。

また、局所的に限定した通信を交差点での競合回避その他の協調に用いた研究について

も示す。

市川らは、限られた通信範囲を持つロボットによる空間探索における数の効果、これらが通信リンクを形成した際の協調移動、ロボット間のメッセージの伝達などについて調べ、ロボットを製作して実験を行なっている [Hara92] [市川 92] [市川 92] [市川 94] [Ichikawa94] [市川 95]。これらの一連の研究は、ロボット群により空間探索を主としたタスクを行なうために、局所的な通信と他のセンサ入力を用いたロボット行動を設計するものである。よって、行動ベースロボット集団の行動を調べる研究とは立場が異なっている。

[Hara92] [市川 92] [市川 92] では、Fig. 2.6 のような制限された通信範囲を持つロボット間でのメッセージ送信を扱い、"Hello-Call Communication" (呼びかけ通信) と名付けている。これらのロボット間で、Fig. 2.7 のような通信の連鎖を形成することにより、通信範囲外のロボットとも通信を行なうことができる。シミュレーションにより、この通信形態においては、メッセージの循環、消失、あるいはメッセージ伝達の障壁といった問題が明らかになった。そこで、メッセージの比較を行なったり、送信能力や送信周期などのパラメータの設定を変化させたりして、メッセージがより良く伝達されることを目指している。但し、ここではロボットは移動を行なわないので、通信の連鎖は静的なものである。

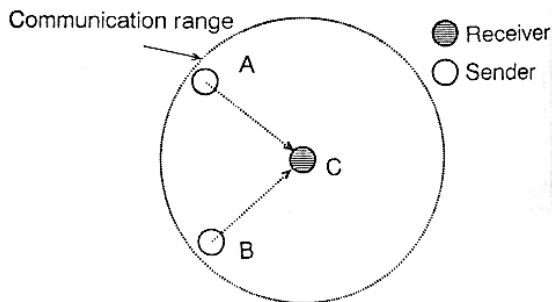


Fig. 2.6 Hello-Call Communication

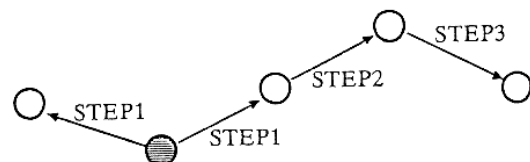


Fig. 2.7 通信の連鎖 [Hara92]

また [市川 92] [市川 95] では、同様の通信モデルを用い、協調移動の研究を行なっている。制限された通信範囲を持つロボット群が、簡単な行動原理により Fig. 2.8 ような集結・集結行動をすることをシミュレーションにより示した。集結行動は、通信範囲内を保ちながら他のロボットに追従することによって、環境のある地点に集合する行動である。逆に、展開行動は、通信可能な状態を維持しながらロボット通信による連鎖を環境に拡大する行動である。ここでは通信の内容には意味を持たせず、通信の送信方向の情報を利用している。

[市川 93] では、Fig. 2.9 のように展開行動により目的地に到着するタスクが達成されることをシミュレーションにより示している。また、展開行動によってタスクを達成するのに必要なロボット数についての考察も行なっている。

[Lucarini93] でも、群ロボットによる2地点間の経路生成を行なっている。完全な未知環境において、大域的な地図生成を行なうことなしに経路を生成するための、ロボットの行

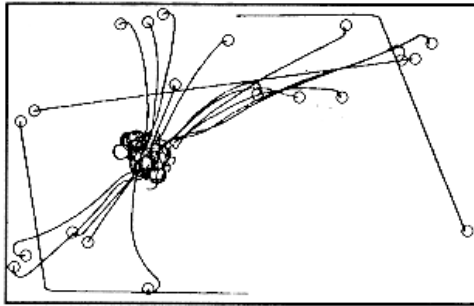


Fig. 2.8 限られた通信範囲をもつロボットによる集結行動 [市川 92]

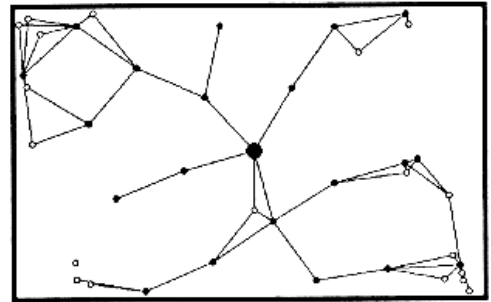


Fig. 2.9 経路探索行動 [市川 93]

動アルゴリズムが提案されている。シミュレーションにより、経路が生成されることが示されており、簡単なロボットのハードウェアも実現している。

いくつか試行したアルゴリズムのうち、次の5つのステップから構成されるものがロボバストであったと報告されている。

- (1) **拡張** ランダムに環境に広がる
- (2) **探索** ビーコン（経路の始点または終点）を探す
- (3) **「雲」の生成** ロボットがビーコンの付近に停止して人工的なビーコンとなる。これを繰り返すと、始点・終点から「雲」が広がる (Figure 2.10)。
- (4) **結合** 始点と終点から広がった「雲」が融合する。「雲」状態のロボットが「結合」状態のロボットを見つけると、状態を「結合」に変化する情報伝播を用いた戦略である。
- (5) **鎖生成** 始点・終点から数をカウントアップしながら渡していき、最も短い経路を作る (Figure 2.11)。経路を形成しない残りのロボットは「探索」に戻る。

以上を示した空間探索・経路生成の研究では、局所的な通信が有効に用いられているが、通信の局所性の設計や、ロボット間の情報の伝わり方の解析などは行なわれていない。

[Wang94a] は、分散ロボットシステム (Distributed Robotic System, DRS) での「サインボード」という概念について述べている。「サインボード」とは、ロボット間通信のメカニズムで、それを持つロボットがメッセージを表示し、一方、近くのロボットがメッセージを読むという「垂れ流し」的な通信のしくみである。これは明示的に相手を指定してメッセージを送る「メッセージ送信」とは対照をなす概念である。サインボードを用いた通信は、多数のロボットがある移動対象物をトラッキングしたりする場合に適している。また、通信遅延がある場合についても多少論じられている。交差点などの相互排除進入を例とする分散相互排除問題に関して、遅延がある場合に対処するアルゴリズムも紹介している。

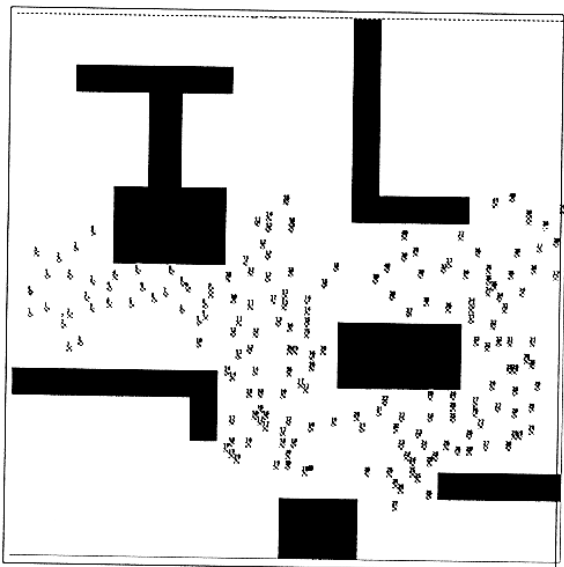


Fig. 2.10 ステップ「雲」の形成

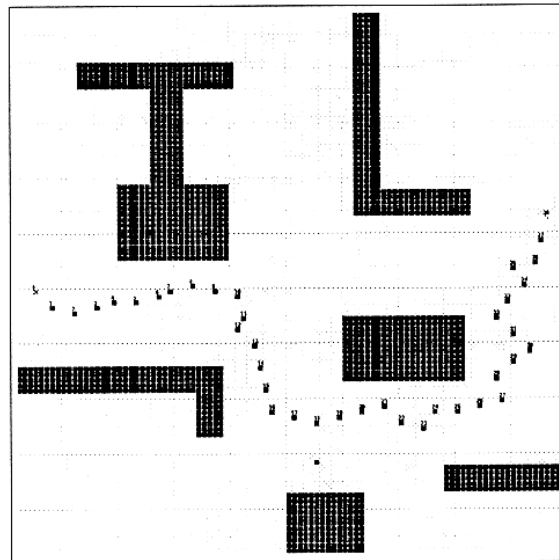


Fig. 2.11 形成された経路
[Lucarini93]

この研究は概念とアルゴリズムの紹介が主であり、通信の局所性の設計や、情報の伝播についての解析などは行なわれていない。サインボードモデルの実現については、簡単にしか触れられていない。ロボットが少ない場合は、大域的な無線などを利用することも可能である。

福田らは、動的再構成可能ロボット CEBOT[福田 89] に関する一連の研究において、多数のセルが、基本構成要素として作業に応じて形態を自己組織的にさまざまな再構成するシステムを提案している。

それらの中で、[福田 91] [植山 92] では、セルから構成されるネットワークにおいて、意志決定を行なうマスタ・セルが必要であることを述べている。マスタ・セルとは、各セルを同レベルとみなした完全な協調意志では作業環境や目的の変化に対応しきれないため、システム全体の環境を把握するセルである。そして、セル間の通信量の観点からマスタ・セルを決定する方法を示している。

与えられたタスクに各セルの活動分布から通信確率や通信量を求め、ネットワークのエネルギーというものを定義し、それが最小となるように通信のまとめ役を行なうマスタ・セルを決定している。この研究では、通信量に基づいてネットワーク上のトポロジ的な局所的通信範囲に相当するものを決定しているが、ネットワークは閉ループのない2進木構造に限定されており、ネットワーク構造それ自体が変化する場合には適用は難しい。

2.2.2.2 局所的通信を暗黙的に用いた多数ロボットの協調

局所的な情報から行動を決定する「エージェント」が、多数集まって「チームワーク」を発現し、全体として協調行動が実現させようという研究も多く見られる。これらの研究では、明示的 (Explicit) な通信は行なっていないくても、付近の相手の存在の認識などを行動決定に利用しており「暗黙の (Implicit)」通信を用いていると考えられる [油田 92]。さらに、ロボットにはいくつかの行動だけをインプリメントしておき、それらの行動が環境や他のロボットに影響されて反射的に発現される「行動ベースト」ロボットの集団に関する研究も行なわれている。これらも局所的な通信を用いた協調の一例であり、今後解析や設計を進める上での問題点を考えるため、これらの研究の現状も概観する。

まず、マルチエージェントロボットの「チーム」に関する研究を見てみる。[沼岡 92a] [沼岡 92b] では、多数の自律ロボットのチームワークが扱われている。チームの「ゴール」に関する共通表現を与え、ロボット集団がチームとしてそのゴールを達成するような、各ロボットの行動の表現について論じている。いくつかのシミュレーションを行ない、多数のロボットによる資源共有などの「ゴール」を目指すように各ロボットの行動を決定できる可能性を示唆している。ただし、ロボット間の通信の局所性は考慮されておらず、局所性などによる情報の伝播遅延がある場合には、収束が困難になることが指摘されている。

[Parker93] でも、ロボットを行動する主体であるエージェントと見なし、複数エージェントの協調に関する研究を行っており、局所情報と大域情報をどのように協調のための制御に用いるかについて述べている。局所情報を用いる制御は、このあと紹介する「行動ベースト」エージェントが多数集まって、全体の目標を知らなくても全体として何らかの作業を達成するものである。しかし、個々に付与するローカルな制御則の与え方は明確でない。また、大域情報に基づいた場合は、各エージェントは全体の目標を知っているが、通信負荷が増大してしまう。そこで、局所的制御と大域的制御の融合のしかた、バランスのとり方が重要となる。

そこで、[Parker93] では「隊列を組む」という協調作業を例にとり、知ることのできる大域的情報の量と作業性との関係を論じている。その結果、この例では「局所情報を、現在の大域的状态を知るための手がかりとする」ことが最適であると結論づけている。

これらの研究では、通信の局所性が重要であることはシミュレーションにより示されているが、その理論的な根拠や解析に基づく検証はなされていない。

次に、昆虫などの生物をモデルとして、簡単な行動原理を持つロボット群による複雑な行動の実現を目指す研究をいくつか示す。これらの研究では、以上の研究とは少し異なる立場をとり、危険環境などで用いることを想定して意図的に通信を制限したものが多く、なるべく単純なモデルにより、「発現的な (emergent)」複雑な協調行動をつくり出そうとしている。「発現的」の意味するところは、単純なモデルの局所的相互作用から、興味深いグローバルな振舞いがボトムアップ的に「発現する」ことである。これらの研究においても、ロボットは局所的な相互作用に基づいた行動を行なっているので、局所的な通信を利用し

た協調の研究例であると言える。局所的な通信がどのように用いられ、どのような協調が行なわれているかを見ておく。

[Mataric92b] は、実際にロボットを多数台制作して協調作業の研究を行なっている。この研究でも、動的な群を利用した協調を扱っており、これは反射的行動を行なうロボットの集団において形成される。ロボットは明示的な通信は行なわず、近傍のロボットの位置が判る程度の限定された能力を持つとしている。但し、通信のインプリメントは一括的管理によっている。

一般に、時間、空間、エネルギーの最適化が必要なタスクは、大域的視点を要求する。複数ロボットの分野では、共同物体搬送やフォーメーションを組んでの移動は、明示的協調が必要となる。[Mataric92b] では、局所制御の際たるものに分類されるタスクを扱っている。これらは、明示的な協力がいらず、1 台のロボットでも出来るタスクである。このようなタスクの例として、ある場所に集合する（ホーミング）、均等に広範囲に散らばる、パックを集めて並べる、構造を作って移動させる、などがある。タスクを均質なロボットの集団に分配する戦略を設計することを目的としている。

通信は、各ロボットの位置を検出するため、電波と超音波パルスを出す中央ステーションを含む。電波は、ロボット位置の追跡、ロボットが他のロボットを検出したということを検出する仮想センサの役割を果たす。電波情報は、メッセージのロボット間での送信、局所的・大域的ブロードキャストに利用でき、通信のパラメータをいろいろ試せる。この研究では、三角測量で求められた位置をもとにして、近接するロボットを決めるためだけに通信を用いている。[Mataric92a] では、タスクの例として、追従、ホーミング、集団移動などの実験が行なわれている。

[Brooks90] では同様のタスクに対して、通信を行なわないロボットの集団をシミュレーションした。

[Arkin92] では、各ロボットは明示的な通信は行なわず、反射的な行動のみによって危険環境・構造化されていない環境を移動することを想定した。即ち、能動的な情報を交換などはせず、単に相手の存在のみを知覚することとした。ロボットには、Fig. 2.12 のような簡単な行動原理が与えられている。この行動原理と、知覚機能を組み合わせることによって、餌を集めるという共通の目的が与えられたとき、Fig. 2.13 のように、通信なしでも結果的に協調作業が達成されることを示した。

また、[Arkin93] では、自分の行動を周囲に知らせるなど、通信を用いればさらにタスク実行の効率が向上することを示している。[Arkin92] では明示的な通信は想定していなかったが、通信なしでも餌集め協調タスク達成が保証されるため、ここでは通信を用いることができれば補助としてタスクの効率的実行に利用すればよいという立場を取っている。

その他、相手の行動を観察することにより、自分の行動を決定する「観察に基づく協調」も提案されている [國吉 91] [國吉 92]。

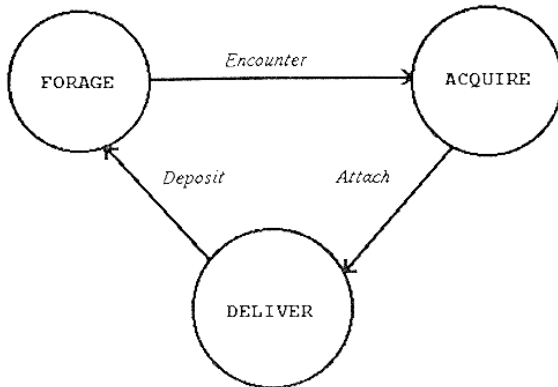
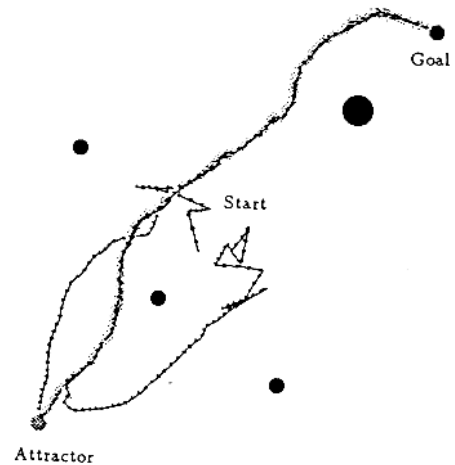


Fig. 2.12 餌集めロボットの行動原理

Fig. 2.13 達成された協調作業の例
[Arkin92]

Steels は, Brooks で提案された包摂アーキテクチャ [Brooks86] において, ランダム移動に付加する通信行動として, 昆虫のフェロモンに似たものを用いている [Steels90]. ここでも餌集めに似た, サンプル集めを協調作業として取り上げている. ロボットは, サンプルを運んでいる時にその場所にフェロモンを置く. 他のロボットは, このフェロモンをたどることにより, サンプルのある場所をより早く知ることができる. このような行動原理を与えることにより, ランダムウォークだけの場合より作業の達成速度がかなり改善されることを示した. これは, 場を利用した局所的な通信であるということができる.

またさらに, [Drogoul93] では, このようなフェロモンを用いた協調サンプル採取において, ロボット数が増加すると, ロボット同士が干渉して作業効率が低下することを指摘した. そこで, ロボットの行動に「サンプル受渡し」行動を加えるという小さな変更を加えるだけで, ロボットによって「バケツリレー」のような鎖が形成され, 全体としての作業効率が大きく改善されることが示されている.

以上の研究では, ロボットが多数存在するため, 暗黙の了解として通信は局所的であるとしている. しかしながら, 情報伝達を解析的に扱って, 通信の設計論に言及しているものは見られない.

2.2.2.3 局所的通信のハードウェアによる実現に関する研究

以上の多数移動ロボットの協調に関する研究はシミュレーションと解析が中心であった. しかし近年では, 局所的な通信にも対応した通信システムの試作が行なわれるようになってきた. これらには, 局所的な通信を比較的容易に実現できる赤外線を用いているものが

多い。その他、レーザとコーナキューブの組み合わせや、画像、無線などを用いて実現を図っているものもある。

[Ichikawa94]では、本章2.2.2.1に示した局所的な通信に基づく簡単な行動を行なう Fig. 2.14 のようなロボットを 10 台程度製作し、数の効果や展開行動の可能性を実験的に検証している。通信は、ON/OFF 信号を出力する赤外線 LED と、フォトダイオードを用いて実現している。通信は単純化されており、定期的に出力される信号の受信の有無だけをロボットの行動決定に利用している。ロボットの停止や直進、転回などの行動は、通信のほか、障害物の有無などの情報の組合せと対応づけられており、そのプログラムがマイコン上にインプリメントされている。

しかし、この研究では信号は ON/OFF の 1 ビット信号に限られており、通信範囲の調節なども行なわれていない。

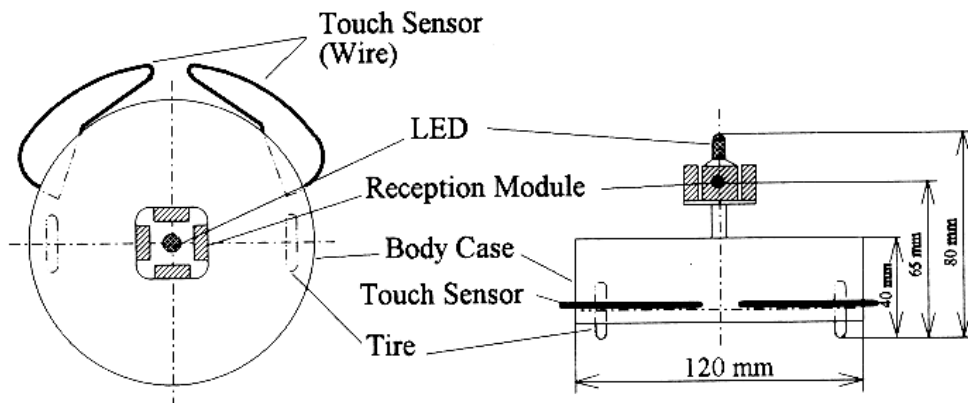


Fig. 2.14 局所的な通信に基づいて行動するロボット [市川 94]

[鈴木 95], [Suzuki95]では、障害物回避のためにロボットが用いる赤外線センサの信号に情報を乗せ、通信にも利用するという立場をとっており、装置を試作している (Fig. 2.15). ロボットの全周に対して送受信を行なえるように、8 組の送受信センサを 4 枚の Z80 ボードにより制御し、これらは PIO を通じてホスト (486) と接続されている。

この装置を用いて行なった実験では、20cm 以内に存在する障害物検出と、80cm 以下の距離に存在するロボットとの簡単な通信が、上記の通信装置により実現されることを示した。この研究でも、通信範囲の設計は行なわれていない。

LED の放射光とフォトダイオードを用いて、誘導のための移動ロボット間の通信を実現した例もあるが [Kamimura86], これは AGV (Automated Guided Vehicle) の制御が目的であり、ロボット間の通信は考慮されていない。

レーザは高い指向性を持つので、光を入射方向に反射するコーナキューブなどと組み合わせて、移動ロボットの位置同定や誘導に用いられる。このようなレーザ光に、信号を乗せて通信を行なう研究も行なわれている。[津村 93]では、親ロボットと、親ロボットの指令

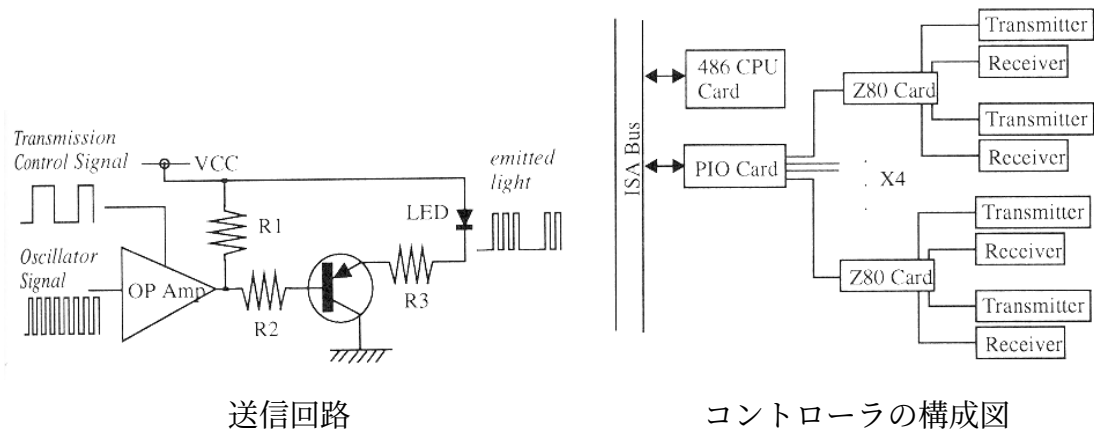


Fig. 2.15 赤外線センサ・通信システム [鈴木 95]

に従って作業をする複数の子ロボットからなるシステムを想定し、レーザを用いてロボット間の高速・大容量通信を行なう装置を試作している。親ロボットはビームを 360° 方向にスキャンさせて信号を送り、各子ロボットはコーナキューブの反射の強度変調により信号を発生し、双方向通信を行なう。ただし、高速の通信には、機械的な強度変調を非常に早く行なう必要がある。またこれは 1 台の高機能ロボットから多数の単機能ロボットへ指令を伝達する集中型システムを対象としており、多数の分散制御されたロボット間の通信への適用は困難であると考えられる。レーザを用いた通信は、[土井 89] にも見られるが、これも中継局から AGV を制御することが目的であり、多数のロボット間の通信は想定していない。これらのレーザを使った通信の欠点としては、装置が複雑で大きくなり、高価になってしまうことが挙げられる。

干渉の少ない通信として、画像を用いることも考えられる。[新井 94a] では、Fig. 2.16 のような CCD カメラの画像と LED を配置した「サインボード」を用いたロボット間の相互位置・姿勢計測システムを開発した。これに、Fig. 2.16 に示す通信用の LED を組み合わせて、通信を行なわせることができる [木村 93]。現在は画像処理の能力に限界があるため多くの情報を送ることはできないが、将来的に処理能力の向上により有効な通信手段として用いることができる可能性がある。

2.2.2.4 多数ロボット系の局所的な通信を用いた応用例

本論文で展開する局所的な通信の設計論は、現在研究が行なわれている以下のような例に対しても応用を考えることができる。

[近藤 93] では、部品搬送 AGV と組立担当ロボットからなるフレキシブル組み立てライン Fig. 2.17(a) を試作した。AGV とロボット間の通信には、FM 変調方式の赤外線通信

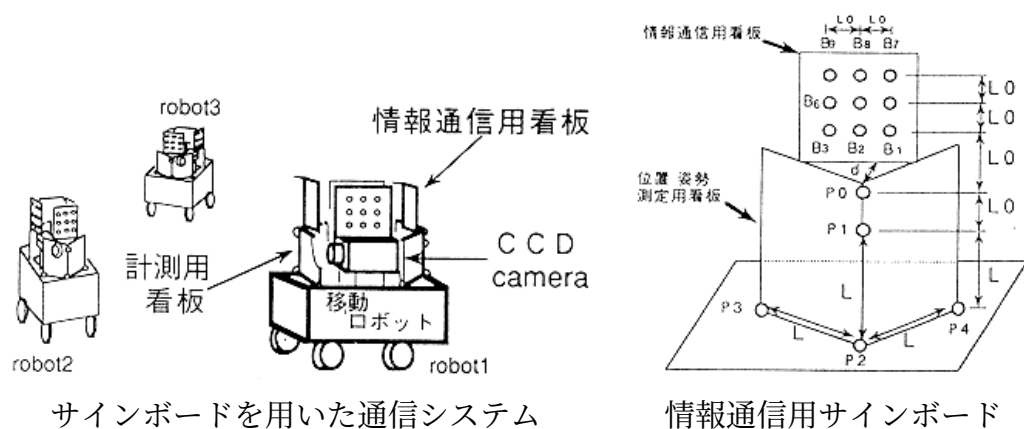


Fig. 2.16 画像を用いたロボット間相互位置・姿勢計測システムと通信装置
[新井 94a]

を用い, Fig. 2.17(b) のような通信ステーションを介してロボットと AGV が通信を行なう.

ここではある程度小さい環境を考えているので, 通信は大域的であるが, 大規模な場合には通信を局所的に設計する必要があると考えられる.

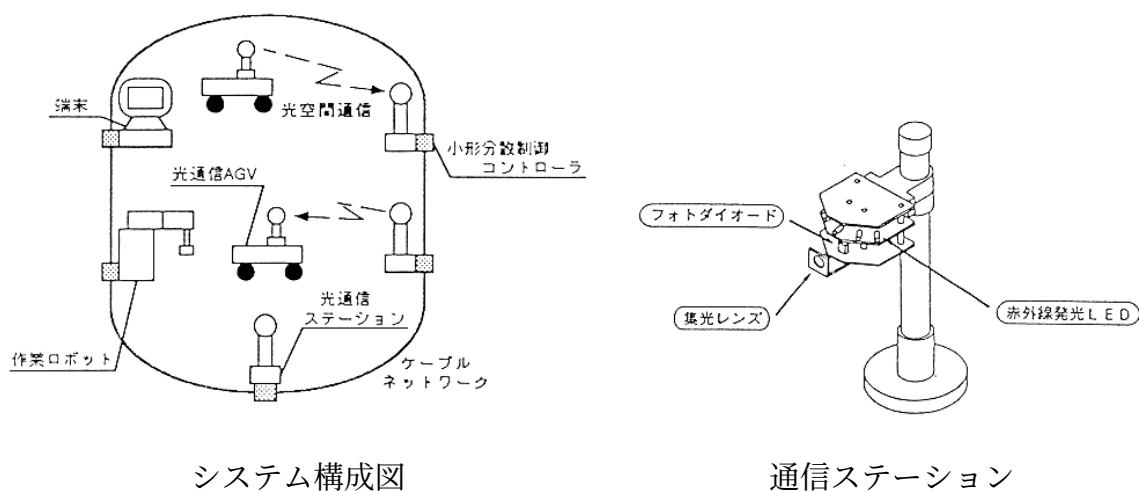


Fig. 2.17 分散制御フレキシブル組立ライン [近藤 93]

[坂尾 94] [坂尾 95] では, 知的判断部を持つ多数の同一部品 (細胞) により構成される細胞型機械の例として, Fig. 2.18 に示す細胞型自動倉庫の研究を行なっている. 自動倉庫の機能は, 複数種類の「荷物」をユーザの要求に応じて入／出庫することである.

ここでは, それぞれの細胞は隣に接続された細胞とのみ RS-232C を通して通信可能で,

荷物をパレットに載せて搬送する。荷物の入口および出口となる細胞の数・位置は、ユーザが任意に設定する。ユーザが要求する荷物の種類を出口細胞に計算機を通じて伝え、それを受信した出口細胞は隣接する細胞に伝える。各細胞は、この情報を逐次伝播させ、自己の出庫要求リストにこれを記憶する。荷物の出庫が完了すると、同様にこのことに関する情報を伝播させ、出庫要求リストを更新させる。

このように、取り出したい荷物に関する情報などが、局所的な情報伝播により細胞間に伝えられていく。これも、局所的な通信を用いた応用例である。

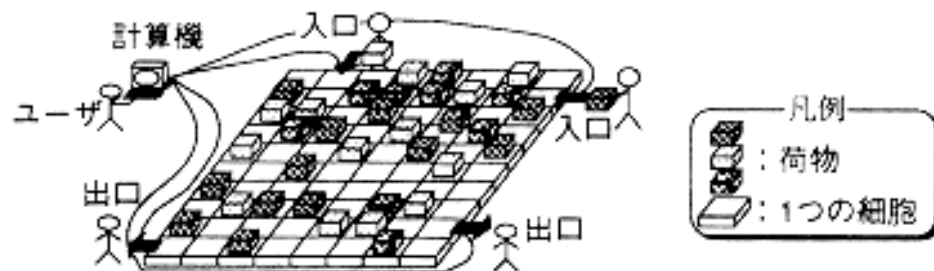


Fig. 2.18 細胞型自動倉庫のシステム構成 [坂尾 95]

[ACVS95] では、走行中の自動車のドライバーが互いの運転意志を含めた走行状態を知ることによって、より安全かつ円滑な走行を実現するために有効な技術として、自動車間の通信技術のフィジビリティスタディを行なっている。

その技術的な特徴は、特定のインフラストラクチャに依存しないで自律分散ネットワークを構成することと、近接した車の間で迅速かつ大量のデータ交換を可能にすることである。よって、自動車間の通信技術は、交通流の改善、安全性の向上に寄与すると考えられる。

こうした認識から、報告書 [ACVS95] は通信機能と距離計測機能を複合化させた「車々間走行データ伝達システム」を提案し、その応用を検討している。

一対の送受信機を車の前後に搭載し、一定距離に存在する車からなる群に含まれる車どうしが同期をとって通信を行なう。このような群を組むことにより、直接通信できない並走する車同士が後続者を解して通信を行なったりすることができる。各走行車は、自分の周囲の車のデータマップを持ち、そのデータをお互いに交換しあう。通信装置を赤外線を用いて実現し、通信距離は 2[m]~50[m]、速度 1.544Mbps の通信を行なっている。

この応用においても、周囲の車の混雑状況などに応じて、効率的に通信が行なえる通信範囲を設定するために、局所的通信の設計理論が応用可能であると考えられる。

また、赤外線を用いた LAN [Betancor92], [Valadas92] も研究されており、局所的通信のハードウェア実現の参考とすることができる。

2.3 通信理論における解析

2.3.1 情報通信理論における空間的解析

情報通信理論の分野でも、計算機ネットワークを想定し、無線端末間の局所的な通信の空間的な解析が行なわれている。

無線端末間の通信では、各ノード（端末）が送信を行ないたいときに送信を開始する結果、複数のノードからの送信が衝突する可能性がある。通常衝突が発生した場合には再送を行なうが、衝突をなるべく減らすためにさまざまな方式が考えられている。これらには、各端末（ノード）がランダムにパケットを送信する ALOHA 方式 [Abramson70]、送信を開始する前に伝送路上のキャリアをセンスし、キャリアがないときだけ送信を開始する CSMA (Carrier Sense Multiple Access) 方式 [Kleinrock75] などがある。CSMA 方式に衝突検出機能を付加し、送信を開始した後衝突を検出した場合には送信を中断し、衝突制御方式に従って決められた時間を経て再送する CSMA/CD (CSMA with Collision Detection) は、Xerox 社で開発された Ethernet [Metcalfe76] に用いられている。

これらの研究は一般に計算機ネットワークを対象としたものであり、また負荷の設定は一般にそれほど高くない。また、バスを解してつながっている多数の計算機端末を考えているため、通信範囲が限定された多数ロボット系の「また聞き」のような通信には適用できない。

しかし、空間的に通信範囲が限定された無線端末間の通信についての研究もいくつか行なわれている。[Takagi84] では、パケット通信を行なうランダムに分布した無線端末の最適な通信範囲について扱っている。この研究では、情報を Fig. 2.19 に示すような目標とする方向に伝えていくとき、無線の衝突を考慮して、通信スループット（単位時間あたり伝えられる情報量）がもっとも大きくなる通信範囲についての解析を行なっている。その結果、例えば ALOHA 方式では、通信範囲に存在する平均の端末数が 7.72、各端末は 0.113 の確率で情報を送信すれば最適となるという結果が得られている。

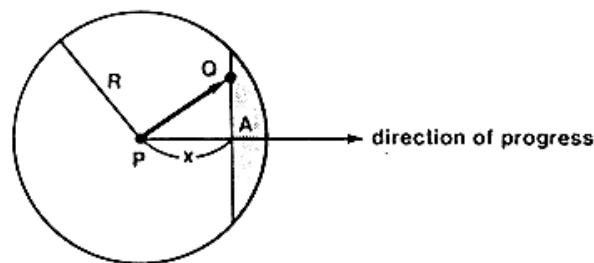


Fig. 2.19 無線端末間の情報伝達と目標とする伝達方向 [Takagi84]

ロボットの分布をモデル化して最適な通信範囲を求めているという点では参考とできる

が、この解析はある一定方向に情報を伝達するための最適な通信範囲を求めたものであり、本論文で考える「目標台数に伝達する」というロボット系の通信とは最適化の対象が異なる。また、時間的にどのように端末間に情報が広がり、それをどのように制御するか、あるいは端末の動きがある場合については触れておらず、端末の分布もランダム分布のみだけを扱っている。

またこれに関連して、[Cheng86]では、多数の無線端末が存在する場合に、どれくらいの密度ならば「パーコレーション(本章2.4.3参照)」が生じるかについて、1次元と2次元の場合のシミュレーションと解析を行なっている。この研究も、時間的な情報伝達過程やロボットの動きなどは考慮されていない。

2.3.2 移動通信に関する理論

本論文で想定する多数の移動ロボット間の通信に類似するものとして、移動する端末どうしを結ぶ移動通信がある[信学85][奥村86][郵政93]。

点と点を結んだ線としての通信を行なう電話線とは異なり、移動通信は「面」での通信を可能とし、「いつでも、どこでも、誰とでも」通信を目的とする情報通信システムである。

2.3.2.1 セルラー通信システム

自動車電話のシステムでは、小規模の基地局を多数設けて、それらの関係によって広範囲をカバーする。それぞれの基地局がカバーする範囲を**セル**と呼ぶ。このため、セルラー通信とも言われる。日本の自動車電話は小ゾーン方式と呼ばれ、各セルは半径2～数km程度で、ほかのセルへ移動した場合には、自動的に追跡接続を行なう。

セルラー通信システムでは、以下のような通信制御が行なわれている。

ハンドオーバー 1つのゾーンから出てしまったユーザを他のゾーンに引き継ぐ処理

ローミング ユーザが各社のサービスエリアに持ち出した場合でも他の移動通信網を通じて通話を可能にする処理

これに関して、次のような研究がなされている。

ゾーン構成法 小ゾーン方式をとった場合、干渉上の条件から、どれだけ離れたゾーン同士で周波数が繰り返せるかを決める必要がある。

ゾーン形状には三角形、四角形、六角形が考えられるが、一定の干渉条件を確保するために必要な繰り返しゾーン数がもっとも少ないのは、六角形の場合である。解析により、これらを求める数式が与えられている[奥村86]。

チャンネル割当て問題 小ゾーン方式のように、一定帯域内の多数のチャンネルを多数のゾーンで使用する場合には、チャンネル割当て(通話の発生に対して個々のゾーンにどの周波

数を割当てるか)を行なう必要がある。割り当てアルゴリズムとしては、種々のものが提案されており、大きく固定チャネル割当て法、ダイナミックチャネル割当て法の二つがある [仙石 86]。

2.3.2.2 PHS

日本で最近実用が開始された PHS (Personal Handyphone System) は、家庭内で用いる親機・子機からなるコードレスフォンを外でも使えるように拡張した形のものである。

NTT の場合は、基地局を基本的に電話ボックスなどに設置する。カバーする範囲は、上記のセルラー通信などよりも狭い範囲であるので、より多くの基地局を設置する必要がある。

PHS は、次のようなサービスを行なって上記の移動通信などとの差別化を図ろうとしている [木本 95]。

- 誰でも手軽に利用できる低廉な料金
- 道路や駅構内に加え、地下街やビル内などいつでもどこでも利用可能
- 小型で使い勝手がよく、低価格な端末。特に、デジタルであるので小型化は容易

ハンドオーバーやローミングなどの制御は、基本的に上記のセルラー通信と同じと考えられる。ただし、高速の乗物内では使用できないとか、1つの公衆電話に設置した基地局が3人の通話までしか対応できないなど、問題点も生ずる。

上記の移動通信の考え方は、複数の移動ロボットが作業を行なうときに、ロボット間の Point to Point 通信として参考とすることはできる。また、ロボットに PHS を載せて通信したりすることも可能であろう。

しかし、このような1対1の形の通信は、複数のロボットが通信しようとする、中継局に多くの負担がかかってしまう。よって、本論文で想定する協調作業におけるロボット通信には、局所的な通信方式のほうがより適していると考えられる。その他、非常に単純に複数のロボット間の通信が実現できる点、また複雑な制御を必要としない点においても、局所的な通信方式が有利である。また、相手を特定した通信も、通信相手を指定して情報を出力することにより可能となる。

2.4 数理生物学・社会心理学における情報伝播の解析

本論文では、通信範囲の空間的設計のほか、複数ロボット間の局所的通信による「クチコミ」的な情報伝播も扱う。これは、何らかの情報が拡散することであり、数理生物学では種などの拡散において、また社会心理学では「噂」や「流行」の伝播として扱われている問題である。

これらは、現象を何らかのモデルに当てはめることが中心である。したがって、ロボット系の密度や通信半径などのパラメータからボトムアップ的な解析で情報の伝播過程を求めるアプローチとは、研究の立場が異なっている。しかしこれらの研究では、情報の拡散をロジスティック関数などを当てはめる試みなどもなされており、その考え方を利用することは可能であると考えられる。以下では、これらの研究を簡単に紹介する。

2.4.1 ロジスティック関数を用いたモデル

[巖佐 90]では、近年ことに目覚ましい進歩をみた動植物の行動や生態、社会構造などの取り扱い、さらに非常に長い時間を経た進化過程の解明などの、マクロ生物学における数理的研究について、多くの例が報告されている。このような数理モデルの解析や計算機シミュレーションによる生命現象の研究は、数理生物学と呼ばれる。

本論文に関連して特に興味を持たれるのは、人口増殖や種の伝播などの時間的变化に関するものである。人口増加や疫病の伝染がロジスティック方程式 (2.1) によってモデル化されるのは良く知られた例である。人口増加のモデルでは、 x を個体数として

$$\frac{dx}{dt} = rx\left(1 - \frac{x}{K}\right) \quad (2.1)$$

となる。 K はその環境中に維持できる個体数という意味から、環境収容力 (Carrying capacity) と呼ばれる。 r は個体数密度が十分小さくて環境に資源が十分あるときの増加率を示すので、内的自然増加率 (Intrinsic rate of natural increase) という。これを解くと

$$x(t) = \frac{K}{1 + C \exp(-rt)} \quad (2.2)$$

となる。 C は初期値に依存する関数で、Fig. 2.20 のような S 字型の曲線になり、時間を経て式 (2.2) の $x(t)$ は環境収容力 K に収束する。

5 章で扱うロボット間の情報伝播過程は、ロボット密度が小さい場合にはこのようなロジスティック関数によるモデルで表されることが示される。また、[巖佐 90] には、生物の空間分布なども述べられており、これらの知見は今後の解析の参考となる。

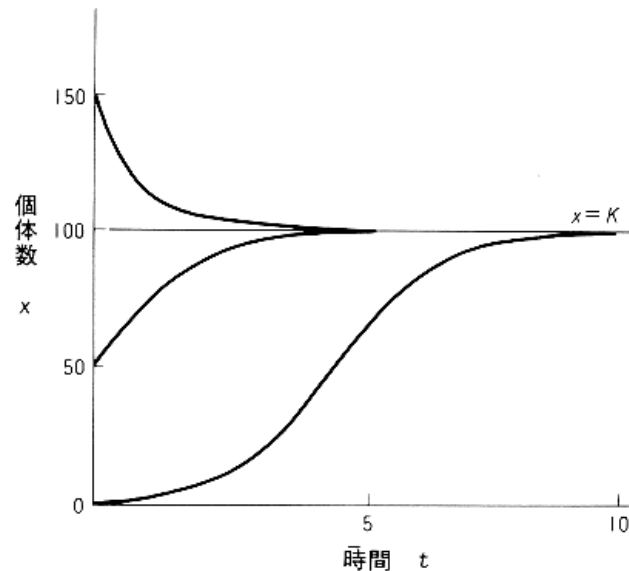


Fig. 2.20 ロジスティック増殖 ($r=1$, $K=100$). [巖佐 90]

2.4.2 社会心理学における情報伝播のモデル化

[吉田 71] には，社会心理学の分野において流行や噂，習慣がどのように多くの人間に広がっていくかに関する考察が見られる．

ここでも，式 (2.1) に示したロジスティック関数のモデルをさまざまに改良して，所得の増加や文化の普及に当てはめることが試みられている．

本論文では，密度や通信範囲などの多数ロボット系のパラメータを用いて解析を進め，伝播過程を導出し，伝播の仕方とこれらのパラメータの関係を明らかにするというボトムアップ的な立場を取っている．これに対してこれらの研究は，モデルを表す式を実際の現象に当てはめて，パラメータを同定するトップダウン的なアプローチである．このように立場が異なるため，導出された式の解析に関しては応用が可能であるが，解析過程としては別の手法を用いる．

2.4.3 パーコレーション理論による伝播過程の解析

一般に，不規則に分布した要素間に何らかのものが伝達されうるときに，それらの要素間に繋がりが生じると考えると，無限の繋がりが存在するかどうかによって（パーコレート，浸透），その分布を特徴づけることができ，繋がりの違いから系の性質の変化を理解することができる．このような現象を扱う理論をパーコレーション理論という [小田垣 93]．パーコレーション理論が応用される例を，Fig. 2.21，Fig. 2.22 に示す．

これらの研究では，パーコレーションが生じる閾値に関する解析が中心で，その時間的

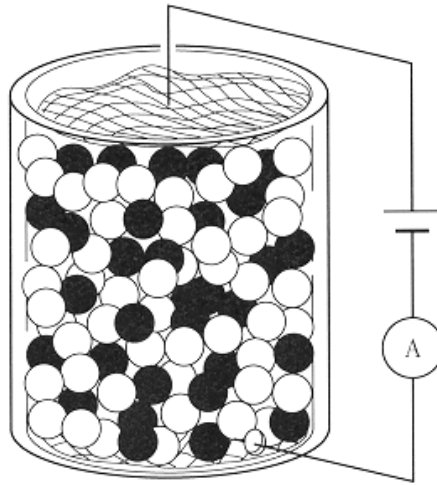


Fig. 2.21 広口ビンの中に金属球●と絶縁体球○をある割合で詰め、上下に敷いた金属シートの上に電流が流れるかどうかを測定する。金属球の割合がいくらあれば電流が通じるか、また系全体の電気伝導度は金属球の割合にどのように依存するかを調べる [小田垣 93].

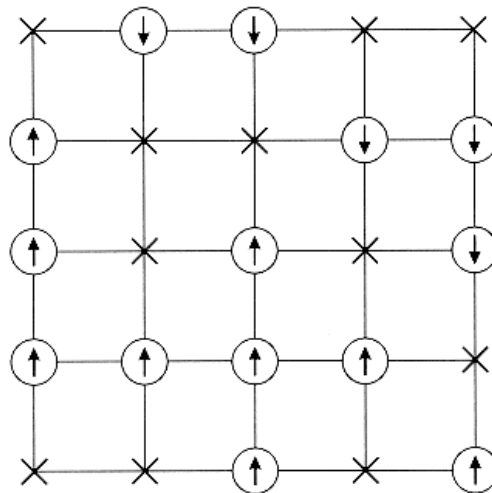


Fig. 2.22 希薄強磁性体のイジングスピン模型。↑，↓が強磁性スピン，×が非磁性元素を表す。最近接相互作用のみが存在する場合，系が絶対0度で強磁性を示すには，隣り合ったスピンの繋がりが無限に広がっている必要がある。そのためには，強磁性スピンの割合がいくら以上必要かを調べる [小田垣 93].

な伝播過程の解析に関するものはほとんど見られない。

2.5 本論文で扱う問題点

本節では、まずこれまでの多数移動ロボット系の通信に関する研究を大域的通信・局所的通信に分け、それぞれを概観した。

大域的通信では、無線を単一媒体として用いるものがほとんどであった。またロボット台数も、本章 2.2.1 で示したように、CAR-Net や ACTRESS, Mamoro Net, MACS では 3 台程度、CSMA-CD/W では 5 台程度を想定しており、それ以上は無線割り当ての時間などから適用が難しくなる。

1 章でも述べたが、より具体的に大域的な通信の問題点を述べると、以下のようにまとめられる。

- 単一媒体を集中管理的に用いることによる問題点として、次のようなものがある。
 - － 通信媒体を時分割して通信をスロットの形で各ロボットに割り当てる必要がある。しかし、ロボット数が増加すると同期をとるのが非常に困難になるうえ、媒体を利用できる率が小さくなり、情報伝達の遅延が大きい。
 - － 中継局が通信を一括管理する場合、ロボット数が増加すると中継局に過大な通信負荷がかかり、その影響で通信効率が著しく低下する。また、中継局が故障した場合にはシステム全体の通信に支障をきたし、耐故障性の点で問題がある。
- また、各ロボットの立場から見ても、
 - － 自律ロボットの行動決定には、局所的な情報が中心に用いれば十分なが多いと考えられる。よって、系全体の情報を得る必要性は小さくなる。
 - － 多チャンネルを用いたとしても、その割り当てに時間がかかり、直接関係ないロボットにもその遅れが影響する。

といった問題が生じる。

1 章では、ロボット間の通信システムに対する要求仕様は、

必要な数のロボットに情報を速く、無駄なく伝達する

であることを示した。

しかし、単一の媒体を用いた大域的な通信では、以上のような理由で、多数ロボットに対してはこの要求仕様を満たさない場合が多いと考えられる。このことは、8 章において検証する。移動通信システムも、1 対 1 通話を基本的としており、多数ロボット間の通信を想定した場合には、中継局の負荷増大や制御の複雑さのため適用は難しいと考えられる。

さらに、これらの研究では、ロボット密度が非常に小さく、届く範囲が限られていると考えなければならないとき、移動などにより、ロボット間にどのように情報が伝播するかも扱われていない。

多数のロボット間の通信においては、1章でも示したように

- 通信の局所性を考慮する
- 通信を分散化する
- なるべく単純なシステムとする

ことが重要となる．そこでこれらを満たす通信手法として、通信範囲を限定した局所的な通信を用いることが考えられる．

しかし、これまで行なわれてきた多数ロボットにおける局所的な通信の研究には以下のような問題点がある．

- ロボットが多数存在するため、自然な成行きとして通信を局所的に設定しているが、シミュレーションによりその有効性を示したのみで、理論的にこれを検証したものはほとんどない．
- また、局所的に限定した通信を用いているが、通信を効率化するための「局所性」の設計に関する指針が確立されていないため、試行錯誤的にそれを設計するしかない．
- 多数ロボット系の局所的な通信では、「また聞き」による情報伝播が生じるが、これを解析的に扱った研究がない．情報をどれだけの割合のロボットに伝播させるかを調節するためには、情報を提示する時間を決定する必要がある．しかし、このための解析が行なわれていないので、情報を伝えたい範囲があっても、情報の提示時間もやはり試行錯誤的に決めなくてはならない．

本章で紹介してきたように、多数のロボットの協調の研究は数多いが、それに必要となる通信に関して、解析的にその設計の手法を論じている研究は見られない．このような理由から、局所性の空間的設計、また情報伝播の時間的設計に関する理論を、解析に基づいて構築する必要がある．1章でも述べたように、本論文では、これらの解析・設計の理論を一般的に体系化することを目指す．

このような解析・設計を進める際に、2.3節や2.4節で示した研究分野で得られている知見が参考となる．それぞれの分野での評価対象が異なるため、これらの理論を、本論文で対象とする多数ロボットの通信に直接適用することはできない．しかし、通信理論における通信効率の解析や数理生物学・社会心理学の情報伝播のモデルなどから示唆を得て、式の持つ意味や特性などへの理解をより深めることができる．

以上述べてきたように、多数ロボットの局所的通信システムの設計論を構築することにより、これを応用して[Steels90]におけるフェロモンの情報消失時間を設定して、必要なロボットだけに情報を伝えることを実現したり、[堀内 93]や[植山 93]に示された遺伝操作を分散的行なう分散遺伝的アルゴリズムにおいて遺伝操作の範囲やその伝わり方に関する解析を行なったりすることができると考えられる．また、本章2.2.2.4に示したような応用分野でも、このような設計論は広く適用できると予想される．

また、2.2.2.3では局所的な通信のハードウェアについても触れたが、本論文で構築する設計を実現できるものは開発されていない。

特に、通信範囲の空間的設計を実現するため、通信範囲を調節することが可能な通信装置が求められる。4章では、これを実現する通信装置を赤外線を用いて試作している。

2.6 おわりに

本章では、多数移動ロボットの協調を扱った研究を、ロボット間の通信に注目して概観し、問題点について考察した。また、関連する分野の研究も示した。

複数の移動ロボットの協調のために通信を用いている研究は、多くが単一媒体を利用して、集中的に通信を管理する大域的な通信であった。しかしこれは、通信媒体の割り当てによる効率の低下、あるいは耐故障性の問題から非常に多数ロボットには適用が困難であることを述べた。このことは、実際に大域的な通信を用いた研究は、ロボット数として最大でも5台程度までのものしか見られないことからわかる。

多数の移動ロボット系においては、大域的な通信の効率が低下することから、局所的な通信を用いて協調をシミュレーションした研究もしばしば見られるようになってきた。これは、その重要性が十分認識されてきていることを示している。また、これを実現するハード面での研究も、いくつか見られた。

しかしながら、局所的な通信による情報の伝播を解析し、それに基づいてその設計論を展開した研究は見られなかった。これは、1章で述べた、時間的・空間的な解析と設計どちらにも言えることである。そのため、現状では局所的な通信はシミュレーションにより試行錯誤的に設計せざるをえず、効率が非常に悪い。その意味で、局所的な通信による情報伝播の特性を解析的に明らかにし、それに基づく設計を行なうことは、複数移動ロボット協調研究において重要であり、かつ研究としての新規性が高いものである。

その他、通信理論や数理生物学の分野とも共通する部分も見られるので、関連する学問的知見について、簡単に紹介した。これらは、現象の分析が主であり本論文に直接適用可能なものではないが、考え方などを参考とできる場合もあるので、今後必要に応じて取り上げることにする。

以上述べたことを踏まえ、次章以降では多数ロボットの一般的な通信環境を設定し、1章で通信に要求される仕様として示した「必要なロボットに、速く無駄なく情報を伝達する」通信システムを実現するため、空間・時間の両面からの解析と設計を行なっていく。

第3章 情報伝達の一般的定式化

3.1	はじめに	50
3.2	多数移動ロボットの通信環境の一般的設定	51
3.2.1	協調作業における通信	51
3.2.2	多数ロボット系における局所的通信の一般的設定	54
3.2.3	通信システムにおける設計パラメータについて	58
3.3	情報伝達の一般的定式化	62
3.4	システムの環境パラメータによる局所的通信の分類	64
3.4.1	環境パラメータ「情報伝達数」の導入	64
3.4.2	最大情報伝達数による局所的通信の分類	65
3.5	おわりに	70

3.1 はじめに

本章では、次章以降での解析・設計の準備として、多数移動ロボットの基本的な通信環境を設定し、局所的通信による情報伝達の一般的定式化を行なう。

3.2 節では、多数移動ロボットの通信環境の一般的設定を行なう。1 章で示した局所的通信のモデルが妥当であることを述べ、環境のパラメータを定義する。

3.3 節では、ロボット間の情報の時間的な伝播を、情報獲得の確率や速度を用いて一般的な微分方程式として導出する。

この一般式の定性的な挙動を分類するため、3.4 節で環境パラメータ「情報伝達数」を導入する。分類されたそれぞれの場合に対して、どのような解析を行ない、どのパラメータを設計するかなどについて議論する [吉田 95c] [吉田 95a]。

3.2 多数移動ロボットの通信環境の一般的設定

多数移動ロボット系の局所的な通信による情報伝播の解析を進めるにあたり、まずその環境の一般的設定を行なう。

1章で述べた通り、本論文では

- (1) 作業情報周知のための通信
- (2) 作業時の情報伝達のための通信

の2つの局面に分けられる多数移動ロボット系による協調作業を扱う。これを実現する通信システムには「必要なロボットに情報を速く、無駄なく伝達する」ために、

- 情報伝達時間の短縮
- 限定されたロボット数への情報伝達、情報伝達範囲の局所性の実現

が要求されることを述べた。

多数の移動ロボットが存在する系の通信を解析対象とするので、通信モデルとして、通信の局所性と分散化を考慮し、なるべく単純化したものを用いることが望ましい。そこで、情報出力が有限な局所ブロードキャスト方式の通信モデルを用いることを示した。

さらに1章では、情報伝達の解析と設計は、時間・空間の両面から行なう必要があることを述べ、対応する設計パラメータとしてどのようなものを用いるかを示した。

1章では通信モデルを概念的に示し、通信におけるいくつかのパラメータを簡単に説明した。本節では、その内容をさらに詳しく解説し、必要なパラメータを定義して今後解析を行なっていくために必要となる通信環境の一般的な設定を行なう。

まず、3.2.1項では、協調作業を行なう際の通信において、どのような情報を誰に伝えるかを具体的に例をあげて説明する。ここでは、目標伝達台数や系の情報源となるイベントなどが定義される。

次に、3.2.2でパラメータを定義して一般的な環境設定を行なう。

3.2.1 協調作業における通信

多くの人間が協調を行なう引越し現場は、本論文で扱う(1)(2)の通信の段階からなる協調作業の一つの例である。これを例にとり、その作業実行を複数ロボットに当てはめた場合を考えてみよう。ロボットは協調して荷物を運んだり、広い場所を手分けして掃除したりする。先ほど示した、(1)作業情報周知のための通信、(2)作業時の情報伝達のための通信がどのように行なわれるかを示す。

環境にランダムに与えられる作業情報など、系における情報源となるものを、「イベント」と呼ぶ。例えば、環境に「作業告知板」が配置された場合を考えると、そこに情報が示されたとき「**イベントが発生した**」ということにする。またロボットが告知板によらずに自ら作業を発見する能力があるときは、ロボットの作業発見が「イベント」に相当し、そのロボットが情報源となる。作業情報周知の (1) の通信では、作業に応じて必要な台数にイベントからの情報を伝達することが必要となる。

荷物運びを例にとると、ロボット 1 台が 10kg の運搬能力を持つとき、荷物が 50kg のときには、この (1) の通信では作業を発見したロボットから 5 台に伝えなければならないし、20kg のときには 2 台に伝えればよい。

しかし、情報が必要以上に伝えられてしまうと、例えば 2 台で済むところに 4 台行ってしまい、残りの作業が実行できなくなってしまうかもしれない。あるいは、情報が不必要に伝播すると、これが原因で他のより重要な局所情報の獲得が妨害されてしまう可能性もある。

このように過剰な情報の伝達は避ける必要があるし、もちろん必要台数以下にしか情報が伝えられなければ台数不足で作業は達成できない。よって、1 章で示したように、情報を伝達する範囲の局所性を考慮することが重要になる。作業に必要なロボット台数など、情報を伝達すべきロボット台数を**目標伝達台数**と呼ぶことにする。

この例で、作業情報周知のための情報伝達 (1) について、情報内容と伝達すべき台数を Table 3.1 にまとめてみる。

Table 3.1 作業周知の通信 (1) における通信内容と目標伝達台数

	荷物運び	掃除
情報内容	● 作業開始・終了座標 ● 荷物の重量	● 作業領域の座標 ● 作業領域の面積
目標伝達台数	$\frac{\text{荷物の重量}}{\text{一台あたりの可搬重量}}$	$\frac{\text{作業領域の面積}}{\text{一台あたり掃除する面積}}$

作業情報が目標伝達台数に伝達されると、これらのロボットは作業のグループを形成して作業を実行する。ここで、(2) の作業時の通信が行なわれる。

グループ形成過程には、分散人工知能の分野で契約行動をモデルにしたもの [Smith80]、黑板モデルを用いたもの [Lesser80] などさまざまな手法が提案されているが、本論文は通信システムの設計を目的とするため、これに関しては扱わない。

(2) の作業の実行時に用いられる通信では、作業が集中管理的に行なわれるか、あるいは分散管理的に行なわれるかによって、目標伝達台数が異なってくる。ここで集中・分散と

というのは各作業の管理であり、系全体としては分散管理を想定している。

さて、集中管理的な場合には、リーダーからの指示が作業グループの残りすべてに対して伝えられるであろう。

また分散管理では、自律分散システムに見られるように、局所的な相互作用により大域的な [SICE90] 秩序を形成する、すなわち協調作業の場合には局所的な情報伝達を用いて全体として作業が達成される、というアプローチが取られる。よってこの場合には、各ロボットの立場は同じであり、特定のリーダーは存在しない。各自が自分の状態などを作業から決まる一定数に知らせ、周囲はそれらの情報をもとに自律的に行動を決定することにより、グループとして作業を実行することになる。

作業時の通信 (2) について情報内容と伝達すべき台数をまとめると、Table 3.2 のようになる。

Table 3.2 作業時の通信 (2) における通信内容と伝達すべき台数

			荷物運び	掃除
集中管理型	リーダーから	情報内容	● 移動位置の指示	● 作業領域の指示
		目標伝達台数	作業グループの残り全て	
	リーダーへ	情報内容	● 各自の位置情報 ● 各自の荷重情報	● 各自の位置情報 ● 各自の作業終了面積
		目標伝達台数	1 台 (リーダー)	
分散管理型	各ロボットの立場同じ	情報内容	● 各自の位置情報 ● 各自の荷重情報	● 各自の位置情報 ● 各自の作業終了面積
		目標伝達台数	作業によって決まる一定数	

Table 3.1 と Table 3.2 に示したいずれの通信 (1)(2) においても、1 章で示したように通信において通信時間の短縮、限定された数への伝達を実現し、「情報を目標伝達台数に、速く無駄なく伝達」することが重要である。

作業時の通信 (2) では、「メッセージ送信」の形で特定のロボットへの情報伝達を行なう必要性が生じることもある。これは、1 章でも述べたように、限定された台数に情報を伝達するという点では同じであり、これは情報内で行き先のロボットを指定するなどのプロトコルを、局所通信の上の層として設けることにより、実現が可能である。

最後に、情報伝達における情報出力の確率と移動について述べる。

まず、ロボットの**情報出力確率**を、ロボットが他に伝えるべき情報を持っているとき、単位時間あたりそれを出力する確率と定義する。ロボットがこの確率に従いランダムに情報を出力するとすると、情報出力の平均間隔の逆数が情報出力確率となる。平均間隔は、何単位時間ごとに情報を出力するかを示す。

協調作業における通信において、この情報出力確率が、どのような要因に支配されるかを考える。作業情報周知の通信 (1) では、情報出力確率は環境に依存すると考えられる。これは、通信範囲に平均して何台のロボットが存在するかにより、情報伝達の間隔も変化するからである。

作業時の通信 (2) においては、情報出力の平均間隔は、主に作業に依存する。例えば、協調搬送では短い間隔で情報伝達をする必要がある。これに対し、広い環境に散って各ロボットが独立に探索を行なう場合には、通信は密である必要はなく、情報出力の間隔は長くてもよい。よって、この場合、情報出力確率は作業内容から決まるパラメータである。

次に、ロボットの移動が、作業情報周知の通信 (1) と作業時の通信 (2) において、どのように異なる役割を果たすかを述べておく。

まず作業情報周知の通信 (1) では、移動の目的は、情報を探索し、また得た情報を拡散させることである。よって、移動方法に自由度があり、情報伝達時間を短くするように移動方法を設計できる。

作業時の通信 (2) では、多くの場合移動は自由ではなく、作業によって決定される。例えばそれぞれのロボットに探索領域が割り当てられている場合や、経路に沿って協調搬送を行なう場合などがそうである。よって、移動方法は自由に設計できない場合が多い。

以上に述べた情報出力確率と移動についてまとめると、Table 3.3 のようになる。

Table 3.3 多数移動ロボット系における情報出力確率と移動の役割

	情報出力確率	移動の役割
(1) 作業情報周知の通信	環境に依存	情報の探索・拡散が主な目的 →移動方法の設計が可能
(2) 作業時の情報伝達の通信	作業内容に依存	作業内容から決定 →移動方法は自由に設計できない

3.2.2 多数ロボット系における局所的通信の一般的設定

前項では、イベント、目標伝達台数、情報出力確率などを定義した。ここでは、これらを含む一般的な通信環境を示し、これに関係するパラメータ類を定義する。

まず、1 章で示した通信モデルを再掲する。

- (1) 情報はパケットを単位として伝達される。
- (2) ロボットから発信された情報は、有限な情報伝達範囲を持つ。

- (3) あるロボットから情報が発信されたとき、別のロボットがその情報伝達範囲内に存在し、情報獲得可能な状態にあるとき、情報は受信される。
- (4) ロボットの通信性能によって決まる、パケット伝達に十分なサンプリング時間を1単位時間とする。

(1) の情報パケットの容量については、次のように考える。作業情報周知の通信 (1) では、作業の存在を知らせるのが目的であり、1つの情報パケットに複数の作業情報が含まれるようにする必要がある。情報量を少なくするため、情報内容を最低限に抑え、作業の種類・作業地点程度に限定しておく。作業時の情報伝達 (2) では、各ロボットは行なっている作業の情報だけを伝達すればよい。情報内容は、地図や各ロボットの荷重情報などの作業に関する情報であり、周知のための通信に比較して1回の通信の情報量が多いと考えられる。よって、作業ごとに異なる情報の形式を定義しておき、各ロボットは、実行時にその作業の情報形式を共通に用いるようにする。そして、書き換える部分があれば、必要な部分だけ更新して出力する。よって、情報パケットは、

- 作業情報周知の通信 (1) では、複数の作業情報を含められる容量
- 作業時の情報伝達 (2) では、作業によって決まる情報形式の容量

を満たす容量とする。このように、パケットは複数の情報を含むとしたので、(1)(2) の通信の両方において、必要な情報伝達はロボット間での1回のパケットの伝達により行なわれる。

これらのパケットの定義の具体的な例は、作業情報周知の通信 (1)、作業時の通信 (2) について、それぞれ5章 5.5.3、4章 4.5.3 に示されている。

環境を設定するため、ロボットの性能に関して、さらにモデルに次のことを付け加える。

- (5) 各ロボットは、一定の確率で情報を出力する。
- (6) 各ロボットは、1単位時間に複数のロボットから情報を獲得できる。ただし、その数には上限があるとする。
- (7) 系に含まれる各ロボットは同等の通信・移動の能力を持つ。

先ほど情報出力確率を定義したが、(5) は、後で述べるように、ロボットが作業に応じてこの一定の確率で情報を出力することを示している。

(7) は、系のロボットは移動・通信能力に関して同質 (Homogeneous) として扱うことを示している。システム設計の容易さや、通信負荷の均等な分担を考え、このようなモデルとした。しかし、作業に関しては各ロボットに異なる能力を持たせることは可能であると考えてよい。各ロボットの通信能力などが異なる非同質 (Heterogeneous) な系に対しては、同質な系の解析結果の重ね合わせにより対応すればよいと考えられる。

以上のモデルに基づき、多数の移動ロボットによる局所的通信の一般的な環境を Fig. 3.1 に示す。

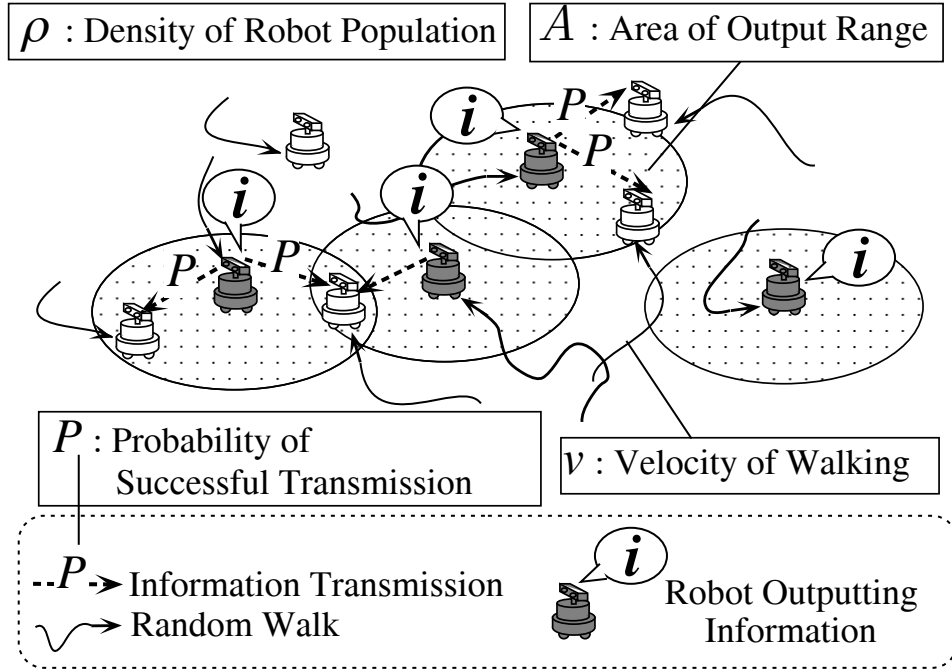


Fig. 3.1 局所的通信の一般的環境

ロボットシステムのパラメータをまとめると、Table 3.4 のようになる。今後の一連の解析に共通する重要なもののみを示し、各章ではそのつど必要なパラメータを導入することにする。

複数ロボット間の情報伝達を Table 3.4 に示したパラメータを用いて説明する。

ロボットは、**密度** ρ で環境に存在する。そして移動しながら、面積 A の範囲に、確率 p_e で情報を出力する。 A は**情報出力範囲の面積**、 p_e は**情報出力確率**である。Fig. 3.1 では、情報を出力しているロボットに i の印を付け網掛けしてある。

ここで、あるロボット r に注目する。ある時間に r は他の j 台のロボットからの情報出力が届く範囲にいるとする。このとき、情報が獲得できるか否かは**最大情報獲得台数** c と j の関係から次のように決まる。これに関しては、次章 4.3 節で詳しく述べる。

- $c \geq j$ ならば、 r は j 台全てから情報を獲得できる。
- $j > c$ ならば、
 - 全く情報を受信できなくなる (**衝突あり**の場合)
 - c 台からは情報を受信できる (**衝突なし**の場合)

Table 3.4 ロボットシステムの一般的環境のパラメータ

ρ	: ロボットの密度
A	: 情報出力範囲の面積
v	: ロボットの移動速度
$\mathcal{M}$	: ロボットの移動方法
c	: ロボットの最大情報獲得台数
x	: 情報出力範囲に存在する平均ロボット数 ($=\rho A$)
A_{max}, x_{max}	: 通信範囲 A, x の最大値
t	: 情報発生からの時間
n_e	: 目標伝達台数
T_{ann}	: 情報の提示時間
p_e	: ロボットの情報出力確率

Fig. 3.1では、情報伝達を点線の矢印で示している。ロボット r が情報が獲得できる確率を P で表し、**情報獲得の確率**と呼ぶ。 P については3.2.3項で詳しく説明する。

ロボットの移動は、 $v, \mathcal{M}$ で表す。 v は**移動速度**、 $\mathcal{M}$ は、ランダム移動や隊列移動などの**移動方法**を示す。特に $\mathcal{M}$ は、方向転換の角度や間隔、あるいは隊列に含まれる台数など、いくつかのパラメータの組み合わせを、便宜的に一つのパラメータで表したものである。

さて、ここで複数ロボットへの情報の伝播について述べておく。前項で、作業の発見など、系の情報源となるものを「イベント」と定義した。イベントに関する情報は、上に説明したロボット間の情報伝達と移動により、時間 t を経るにしたがって複数ロボット間に伝達されていく。1章で述べたように、これを「**情報の伝播**」と呼ぶ。時間 t の単位は、前項3.2.1の通信モデルで定義した情報獲得に必要な単位時間とする。

情報提示時間 T_{ann} は、情報を提示してロボット間に情報を伝播させる時間、すなわち情報の有効時間である。情報を**目標伝達台数** n_e に伝達したいとき、1章で述べたように、 T_{ann} を調節する必要がある。 T_{ann} が長すぎると情報が過剰に伝播してしまい効率が悪くなり、短すぎると n_e 台に情報が伝達されない可能性が大きくなる。

以上が、多数移動ロボットを想定した一般的環境における局所的な通信による情報伝達の様子である。

ここで、Table 3.4に示したパラメータが、この一般的環境においてどのような意味を持つのか、Table 3.5にまとめておく。

まず、パラメータ x について説明しておく。 x は情報出力範囲内に存在する平均ロボット数であり、ロボット密度 ρ と情報出力範囲の面積 A の積である。ロボット密度 ρ は、環境によって決まる定数であるので、 x を決定すれば A も決定される。設計を行なう際、「**情報出力範囲内に何台ロボットが存在するか**」という x を用いたほうが、面積 A よりも直観

Table 3.5 ロボットシステムの環境においてパラメータが持つ意味

パラメータ	パラメータのロボット環境との関係
ρ	システム環境によって決まる定数
x (または A), v , c , $\mathcal{M}$	ロボットに依存するパラメータ
x (または A), $\mathcal{M}$	上のうち、調節を行なえるもの
T_{ann} , p_e , n_e	作業に依存するパラメータ
T_{ann}	上のうち、調節を行なえるもの

的に理解しやすいので、以後はこの x を「**通信範囲**」と呼ぶことにする。

Table 3.5 に示すように、ロボットに依存するパラメータとして、 x (または A), v , c , $\mathcal{M}$ がある。通信範囲 $x(A)$ は $x_{max}(A_{max})$ までの範囲内で調節することが可能であるが、速度 v 、最大情報獲得台数 c は、それぞれロボットの機構的な制限、通信能力から決定される。また、移動方法 $\mathcal{M}$ も、Table 3.3 に示したように、作業情報周知の通信 (1) の場合に調節可能である。

作業に依存するパラメータとしては、情報提示時間 T_{ann} 、情報出力確率 p_e 、目標伝達台数 n_e がある。このうち p_e , n_e は作業から決定されるので、調節できるものは T_{ann} である。

3.2.3 通信システムにおける設計パラメータについて

1 章では、通信システムの設計のため、多数ロボット系における情報伝達の時間的・空間的解析が必要であることを述べた。空間的設計は情報伝達時間の短縮に、そして時間的设计は情報伝達範囲の局所性の実現に寄与する、との考えを示し、設計にどのようなパラメータを用いるかについて考察した。本項では、解析と設計パラメータについて、少し詳しく述べることにする。

1 章でも示したように、情報伝達の空間的な解析は、あるロボットから他への情報の伝達効率に関係する。また、時間的な解析では、時間を経るにつれ情報がロボット間にどのように伝達されていくか、その特性を調べる。ロボット系における情報伝達に関するこれらの解析に基づく設計を進めていくうえで重要な評価量を **Table 3.6** に示す。

ある特定の情報に注目したときに、その情報を獲得したロボットを **I-ロボット** (Informed)、獲得していないロボットを **N-ロボット** (Not Informed) と呼ぶことにする。

ここで、これらの評価量にどのようなパラメータが主に関係するかを考える。

情報獲得の確率 P は、Fig. 3.1 に示したように、任意のロボットが、他のロボットから出力された情報を獲得できる確率である。 P の値は、通信範囲 x や情報伝達確率 p_e 、最大

Table 3.6 解析において重要となる評価量

	評価量	評価する内容
空間的解析	P	: ロボットの 情報獲得の確率 [ロボット間の情報伝達の成功確率]
時間的解析	$p(t)$	: 情報発生からの時間 t での 情報の伝播比率 [情報を獲得したロボット (I-ロボット) の全体に対する比率]

情報獲得数 c といったパラメータの関数となる。1 台への通信だけでなく、特定の情報の伝播を考える場合には、 P は時間 t によっても変化する。また、ロボットが空間にどのように分布するかにも依存する。

通信範囲 x が大き過ぎるなどの理由により、ロボットの情報通信能力 c に対して処理すべき情報量が多すぎると、受信できない情報が増加して情報獲得の確率 P が低下してしまう。逆に、伝達すべき情報があるのに、必要以上に情報出力を抑えすぎても P は小さくなる。このように P は空間的な情報伝達における効率を表し、空間的な設計において最適化すべき量となる。

情報の伝播比率 $p(t)$ は、時間 t における I-ロボットの比率であり、系のロボットのうちどれだけがその情報を獲得したかを示す比率である。これは Fig. 3.1 に示す「また聞き」を通した時間的な情報伝播の過程を示しており、空間的な情報伝達特性をもとに、その繰り返しの結果として求められる。

情報がどれだけのロボットに伝播するかは、情報を提示する時間の長さを示す T_{ann} により決定される。情報を目標伝達台数 n_e に、過剰な伝播をなるべく少なくして伝達するための T_{ann} の決定に、この評価量 $p(t)$ を用いる。また、ロボットは移動しつつ情報を伝えていくから、情報の伝播過程は、ロボットの移動速度 v と移動方法 M にも影響を受ける。

以上の考察をもとにして、空間的・時間的な設計に関する評価量 P , $p(t)$ に関係するパラメータのうちから、設計パラメータとして用いるものを選ぶ。Table 3.5 に示されている調節可能なパラメータである x , M , T_{ann} を設計パラメータとして用いることにする。残りのパラメータは系の入力パラメータとして扱う。このことは、1 章で簡単に触れ、Table 1.2 に示されているが、本章で設定した一般的な環境において定義したパラメータや評価量を用いて Table 3.7 に改めて示す。

次に、空間的・時間的な解析と設計との関係について本論文でとる立場を明らかにする。

情報の時間的な伝播は、Fig. 3.1 のように空間的な情報伝達の繰り返しにより生じる。よって、空間的な解析により一回の情報伝達特性が明らかにされたあとで、時間的な伝播特性の解析を行なう方が、解析の見通しが立てやすい。また、その他の理由として、Table 3.7 に示すように、空間的・時間的な特性に関係するパラメータは主なものそれぞれ 4 個あ

Table 3.7 多数ロボット系で設計対象となるパラメータ

	評価指標	パラメータ	パラメータの種類	その理由
空間的設計 に関する パラメータ	空間的な 情報伝達 効率 $[P]$	通信範囲 x 最大情報伝達数 c 情報出力確率 p_e ロボット密度 ρ	設計 入力 入力 入力	情報出力範囲が調節可 ロボット通信能力に依存 一般に作業に依存 系における定数
時間的設計 に関する パラメータ	系の情報 伝播の 比率 $[p(t)]$	目標伝達台数 n_e 情報の提示時間 T_{ann} 移動速度 v 移動方法 $\mathcal{M}$	入力 設計 入力 設計	作業に依存 情報の有効期間が設定可 機構的に許される最大値 作業に移動が制限されな いとき設計可 [通信 (1)]

り、空間的・時間的解析を同時に進めれば、解析がかなり煩雑となって体系的に見にくくなってしまうことも挙げられる。

そこで本論文では、解析の手順として、Fig. 3.2 に示すような立場を取る。すなわち、まず、空間的な情報伝達特性を解析し、「速く」伝達することに寄与する通信範囲の設計を行なう。そして次に、設計結果として出力された通信範囲の値を用いて時間的な情報伝播を解析し、「必要な台数に無駄なく」伝達するための情報提示時間・移動方法を設計することにする。

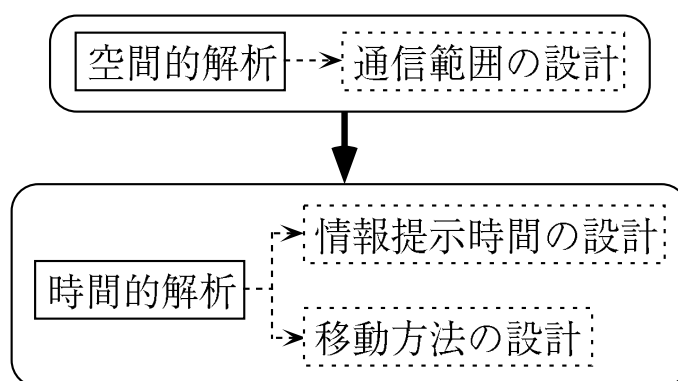


Fig. 3.2 局所的通信システムの解析・設計の手順

また、特に空間的設計では、まず基本的な場合として、任意の 1 台への情報伝達を効率化する通信範囲の設計を行なう。次に、これを拡張して、移動を考慮した複数台への伝達を考慮した通信範囲設計手法を示す。

前述の通り，以上に示した手順は，「必要な台数へ速く無駄なく」伝達する局所的通信システムの設計を見通しよく進めるためのものである．

3.2節でも述べてきたが，時間的な解析において，移動方法が設計の対象となるのは，移動が作業に制限されない場合のみである．しかしながら，作業情報周知の通信 (1) は，協調作業の実行のたびに必要となるものである．この通信では，各ロボットが作業情報の探索・拡散を目的として移動する．よって，設計可能なパラメータである移動方法を最適化して情報伝達時間を効率化することは重要である．

これまでで，解析・設計の手順と，多数移動ロボット系の通信システム設計における評価指標，設計パラメータ，そして入力となるパラメータの関係が明らかになった．これらをまとめて **Fig. 3.3** に示す．

まず，空間的な設計においては，Table 3.7 に示すように情報出力確率 p_e ，最大情報獲得台数 c ，ロボット密度 ρ が主な入力パラメータとなる．設計結果として，通信範囲 x が出力される．

時間的な設計では，主要な入力パラメータとして，空間的設計の出力である通信範囲 x に加え，目標伝達台数 n_e ，移動速度 v を用いる．これらを用いて情報伝播の解析を行ない，情報提示時間 T_{ann} や設計可能な時は移動方法 M を設計する．

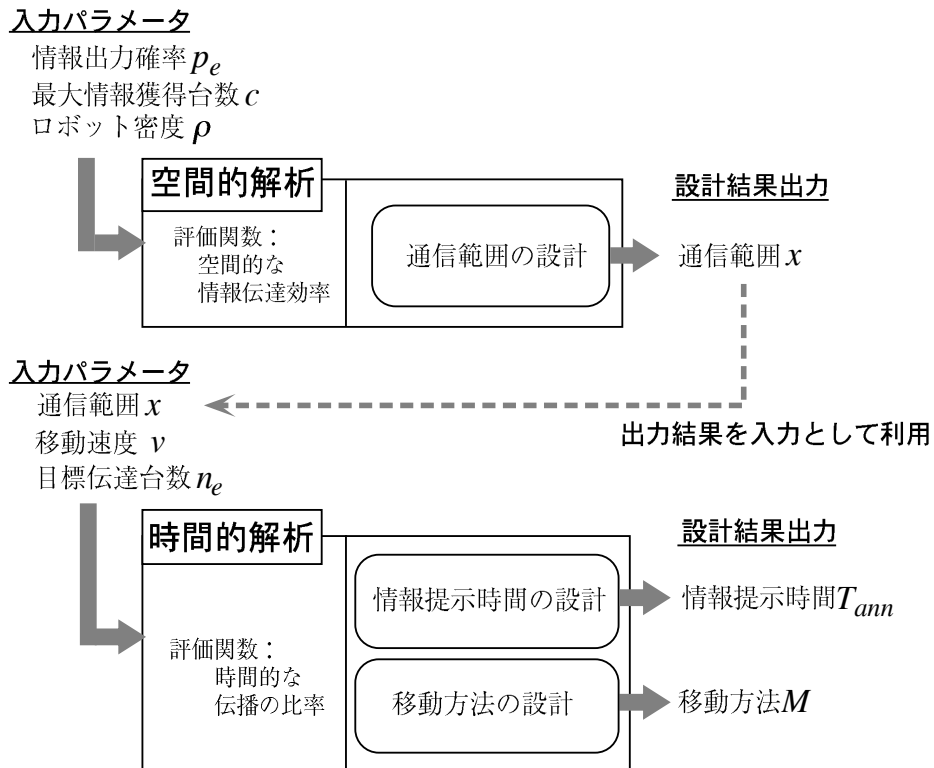


Fig. 3.3 システム設計における評価指標，設計・入力パラメータの関係

3.3 情報伝達の一般的定式化

これまで、空間的・時間的な解析と設計の内容と、それらに関するパラメータについて見てきた。全体像示し終えたので、ここで今後実際に解析を行なううえで、具体的にどのような形の式を扱っていくのかを大まかにつかんでおくことにする。

本節では、これらの解析と設計を進めるための基礎的な準備として、3.2 節で設定した局所的な通信の環境における情報伝播の一般的な定式化を行なう。

Fig. 3.1 に示した環境では、情報はイベントとして、あるいは任意のロボットから発生するとした。この情報は、他のロボットに獲得され、また別のロボットへと「クチコミ」的に「また聞き」の形でロボット間に伝播していく。

以下では、この情報伝達の過程を 3.2 節で示した情報を獲得した I-ロボットの比率 $p(t)$ と情報獲得の確率 P を用いて、微分方程式として定式化することにする。

3.2 節で示したように、情報の伝播比率 $p(t)$ は、ある情報が時間 0 で発生したとして、その情報を時間 t までに獲得した I-ロボットの比率であり、「また聞き」による情報の「クチコミ」的な伝播過程を表す。以下では、 $p(t)$ の時間的変化を考えていく。

時間 Δt 当たりの $p(t)$ の増加率を $\Delta p(t)$ とする。 $\Delta p(t)$ は、Fig. 3.4 に示すように、時間 t において情報を新たに獲得し、N-ロボットから I-ロボットになるものの割合である。

また、情報獲得の確率 P は、3.2 節で示したように、任意のロボットが他のロボットから情報を獲得できる確率であった。よって、 $\Delta p(t)$ は、この P と N-ロボットの比率 $1 - p(t)$ との積に比例することになる。

ここで、速度 v や通信範囲内の平均ロボット数 x 、移動のしかた $\mathcal{M}$ などに依存する比例定数を $\beta(v, \mathcal{M}, x)$ を導入して、移動の掃引による効果を $\beta(v, \mathcal{M}, x)\Delta t$ でモデル化すると、 $\Delta p(t)$ は

$$\Delta p(t) = \beta(v, \mathcal{M}, x) \Delta t P \{1 - p(t)\} \quad (3.1)$$

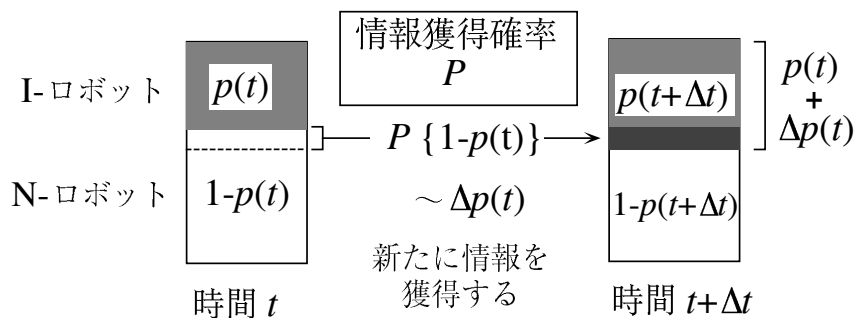


Fig. 3.4 I-ロボットの比率 $p(t)$ の時間的变化

と書ける．これから $p(t)$ に関する微分方程式

$$\frac{dp(t)}{dt} = \beta(v, \mathcal{M}, x) P \{1 - p(t)\} \quad (3.2)$$

が導出される．これが情報伝播過程を表す一般式である．初期条件 $p(0)$ は，時間 0 においてイベントから情報を獲得するロボットの比率，あるいは情報を出力するロボットの比率である．

Table 3.6 で示したように，Fig. 3.2 に示す解析と設計のうち，空間的解析は情報獲得の確率 P の部分を，また空間的解析は伝播比率 $p(t)$ の時間 t に関する微分方程式 (3.2) 全体を対象とするものである．

式 (3.2) の形を見れば分かるように，情報伝播の時間的過程を表す $p(t)$ を具体的に求めるには，まず空間的な情報伝達効率を示す P の特性を把握する必要がある．よって，3.2.3 で示した，まず空間的な解析・設計を行ってから時間的な解析・設計に進めるという立場は，解析式からも見通しの立てやすさの点で妥当であることがわかる．

これについて，Fig. 3.5 に，情報伝播の一般式 (3.2) とこれらの解析の関係，今後の章構成をまとめた．まず，空間的解析とそれを用いた通信範囲の設計を 4 章で行なう．次に時間的解析に移り，5 章で情報提示時間の設計，6 章で移動方法の設計を行なうことにする．

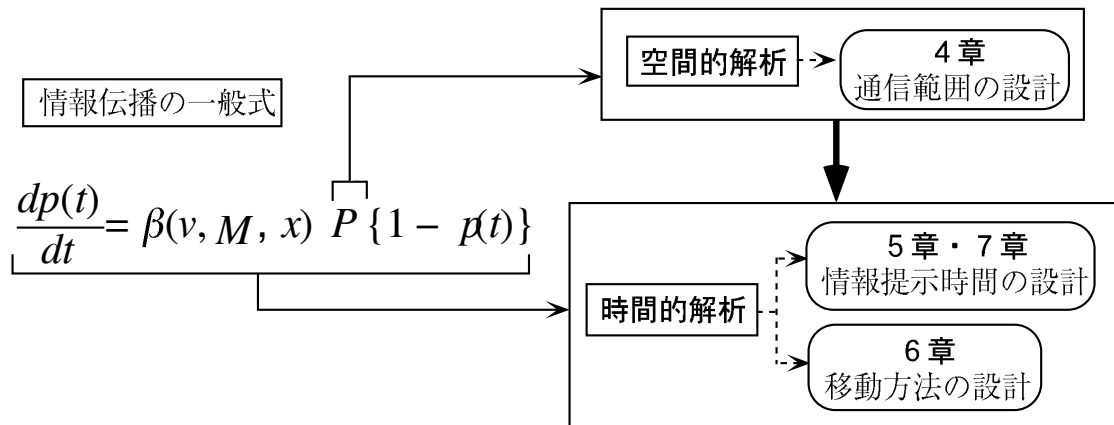


Fig. 3.5 情報伝播の一般式 (3.2) と解析・設計の手順との関係

3.4 システムの環境パラメータによる局所的通信の分類

前節で示したように、今後、情報伝播の一般式 (3.2) をもとにして、多数移動ロボット系の空間的、時間的な解析とそれに基づく設計を行なっていく。

式 (3.2) はあくまで一般式であり、解析・設計の適用の仕方は、3.2 節に示した多数のロボットが存在するシステムの環境によって異なってくる。

そこで本節では、今後の解析を整理するため、3.2 節で示した一般的な環境設定をもとに、局所的な通信による多数のロボットの情報伝達の分類を行なう。分類を行なう際、ロボット環境と作業による通信量を考慮した「情報伝達数」という環境パラメータを導入する [吉田 95c] [吉田 95a]。分類したそれぞれの場合に対して、どのような解析が必要となるかを示す。

3.4.1 環境パラメータ「情報伝達数」の導入

ここで、**情報伝達数** N を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} \text{情報伝達数} &= \text{情報出力確率} \times \text{通信範囲の平均ロボット台数} \\ N &= p_e \times x \\ &= p_e \times \rho A \end{aligned} \quad (3.3)$$

情報伝達数 N は、「あるロボット通信可能範囲で、情報を出力しているロボットは平均台数か」を表している。

ここでは、情報伝達の定性的性質を決定する二つの要素が考慮されている。情報出力確率 p_e はロボット 1 台あたりが出力する「情報量」に相当し、通信範囲に存在する平均ロボット数 x は「ロボット密度を考慮した通信範囲」を表現している。前者は作業に依存し、後者はロボット環境と通信能力によって決定されるから、 N は多数のロボットが作業を行なう環境を総合的に評価した環境パラメータであるといえる。

周囲に多くのロボットが存在するが情報出力の確率が非常に小さい場合や、常に情報を出力していても通信範囲内のロボット数が小さい場合は N は小さくなる。

また、同様に**最大情報伝達数** N_{max} を

$$\begin{aligned} \text{最大情報伝達数} &= \text{情報出力確率} \times \text{通信範囲の平均ロボット数の最大値} \\ N_{max} &= p_e \times x_{max} \\ &= p_e \times \rho A_{max} \end{aligned} \quad (3.4)$$

とする。これは、通信範囲を最大としたときの情報伝達数であり、最大でどれだけのロボットが通信可能範囲で情報を出力するかを示している。

次節では、 N_{max} を用いて局所的な通信による情報伝播の分類を行ない、それぞれについて評価関数や設計パラメータの設定、必要となる解析について述べる。

3.4.2 最大情報伝達数による局所的通信の分類

最大情報伝達数 N_{max} は、通信範囲内において情報を出力しているロボットの最大数であり、最大でどのくらいの通信量となるかを示すものである。

情報伝達数 N が小さいときには、複数のロボットから出力された情報の衝突の可能性が小さくなる。よって、 N を最大の N_{max} としても情報の衝突による情報伝達効率の低下が十分小さいならば、通信範囲 x を常に最大とすることができる。この場合には、通信範囲の調節による空間的な設計は必要でない。

逆に、 N_{max} が大きいときには、通信範囲 x を大きくとると、最大情報獲得台数 c の制限により情報が衝突する確率が高くなる。この場合には、情報伝達効率が最大となるように通信範囲を設計しなければならない。

情報は空間的な情報伝達と移動によりロボット間に伝播する。よって、複数の情報を伝達する場合には、 N_{max} の値にかかわらず常に時間的な設計は必要となる。

通常は微分方程式 (3.2) によって情報伝播のほとんどの場合がカバーされる。ただし、特殊な場合として、 N_{max} が大きく、さらに c も大きい値をとる大容量の通信では、情報が移動をほとんど介さずに伝播することになる。これは、無限長の通信経路の繋がりができる「パーコレーション」の効果 [小田垣 93] が生じるためと考えられ、このことを考慮した情報伝播の解析が必要となる。

このように、最大の通信量を表す環境パラメータ N_{max} により、設計に適用する解析が異なってくる。ここで、どれくらいの N_{max} の値を境界として適用する解析の違いが生じるのかを考えてみる。

あるロボットの最大情報獲得台数 c よりも多くのロボットが存在すると情報の衝突が起こる可能性がある。情報伝達数 N が最大値 N_{max} をとったときにこの値が十分小さければ、通信範囲を常に最大とすることができる。ここでは、通信範囲に 2 台以上ロボットが存在する確率の目安を $b\%$ とする。例えば、 b の値は 5% などと取ればよい。最大情報獲得数が c であるときこの確率が $b\%$ となるような情報伝達数を $N_b(c)$ とおく。この値が、適用する解析が異なる N_{max} の境界値となる。

ロボットがランダムに移動して探索を行なっている例を考えると、最大情報獲得台数 $c=1$ として、 b を 5% に取ったときは $N_5(1)=0.35$ 、10% では $N_{10}(1)=0.5$ となる。前者は約 $1/3$ 、後者は $1/2$ の確率で通信範囲に情報を出力しているロボットが存在する場合であり、かなり大きな値となっている。情報の衝突の確率の上限 b を設定したときに、 N_{max} がこの値よりも小さければ、通信範囲を最大値に設定すればよい。作業情報周知の通信 (1) では、環境全体をロボットが移動して情報の探索・拡散を行なう。したがって、一般にロボット密

度は小さく、これらの $N_b(c)$ の値より最大情報伝達台数 N_{max} が小さくなると考えられる。よって、通常はこの通信 (1) では通信範囲を最大値に設定してよい。また、この場合には、情報衝突の可能性が少ないので、常時情報を出力するとして $p_e=1$ とできる。

N_{max} が $N_b(c)$ より大きくなると、通信範囲 x を常に最大としたのでは、複数ロボットからの情報の衝突により通信効率が低下する。よって、空間的な設計を行なって通信効率が最も良い通信範囲 x を求めなければならない。

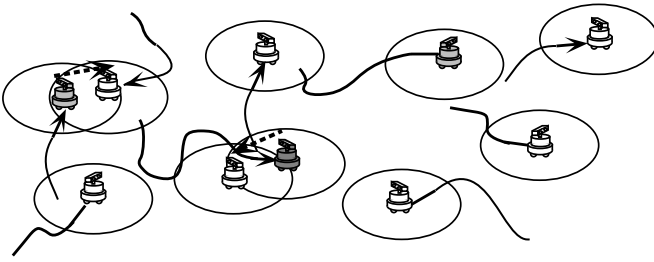


Fig. 3.6 (A) N_{max} が小さい

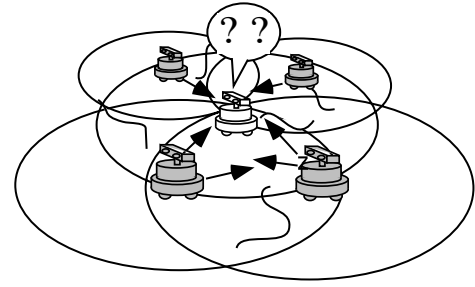


Fig. 3.7 (B) N_{max} が大きい

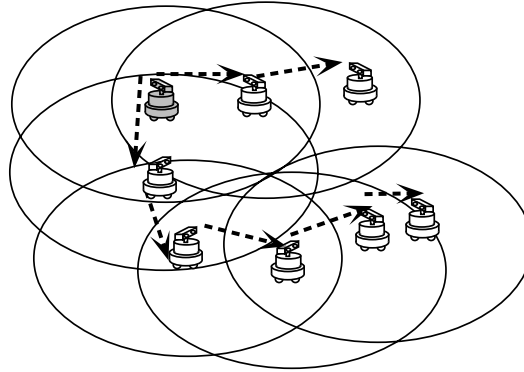


Fig. 3.8 (C) N_{max} が非常に大きく、通信経路の無限の繋がりが生じる (c が十分大きい)

また、 N_{max} がさらに増加したとき、十分大きい c に対して「パーコレーション」の効果を生じさせる臨界値を N_{cr} とする。前述の通り、この場合には、情報の伝播において無限の通信経路の繋がりができ、移動はほとんど影響しなくなる。したがって、速度を考慮した情報伝播の一般式 (3.2) とは異なる手法で解析を行なう必要がある。このため、 N_{cr} もそれにより解析が異なってくる境界値である。これについては、7章で扱うことにするが、参考までに述べておくと、 N_{cr} の値はランダム分布のとき 4.5 程度となる [Pike74]。

以上見てきたように、最大情報伝達数 N_{max} によって、適用する解析や解析手法が変化する。 N_{max} を、 $N_b(c)$ と N_{cr} ($N_b(c) < N_{cr}$) を用いて (A),(B),(C) の三つの場合に分類す

る。(A)は $N_{max} < N_b(c)$ で N_{max} が小さい場合 (Fig. 3.6), (B)は $N_b(c) \leq N_{max} < N_{cr}$ で N_{max} が大きい場合, (Fig. 3.7), また (C)は $N_{cr} \leq N_{max}$ で N_{max} が非常に大きい場合 (Fig. 3.8), ただし (C)では最大情報獲得台数 c が十分大きいとする。

これらの分類について, 適用される解析・設計を Table 3.8 に示す。(A)~(C)それぞれについて, 解析・設計におけるパラメータより明確にするため, Table 3.7 や Fig. 3.3 に示されている評価量, 設計対象, 入力パラメータなども併せて示した。

Table 3.8 N_{max} による局所的な通信の違い

N_{max}		(A): 小 $N_{max} < N_b(c)$	(B): 大 $N_b(c) \leq N_{max} < N_{cr}$	(C): 非常に大 ※ 1 $N_{cr} \leq N_{max}$
解析	空間	× ※ 2	○	○
	時間	○	○	○ ※ 3
情報の伝播の仕方		ロジスティック的 ←————→ パーコレーション的		
評価量	空間		情報獲得の確率 P	
	時間	情報伝播率 $p(t)$		
設計対象	空間		通信範囲 x	
	時間	情報提示時間 T_{ann}		
		移動方法 $\mathcal{M}$ ※ 4		
入力 パラメータ	空間		情報出力確率 p_e 最大情報獲得台数 c	
	時間	最大通信範囲 x_{max}	設計された通信範囲 x	
		移動速度 v , 目標伝達台数 n_e		
主に対応する通信		作業情報周知の 通信 (1)	作業時の情報伝達の通信 (2)	

※1 最大情報獲得台数 c が非常に大きい場合

※2 常に x_{max} とできる

※3 移動の影響小, (A),(B)とは異なる解析が必要

※4 特に (B) の場合, 作業により制限されないとき

Table 3.8 に関して, いくつか説明を付け加えておく。

今後5章で示すが, 情報の伝播の仕方は, N_{max} が小さい場合には, ロジスティック関数で近似することができる。この近似は, 移動を考慮したモデル化に基づいているため, N_{max} が増加して移動が情報伝播に与える影響が小さくなると, しだいに当てはまらなくなる。かわりに, パーコレーションの効果が現れてくる。

また、移動方法 M の設計には、移動が情報の伝播に果たす役割が非常に小さい場合である (C) には適用されない。また、(A)(B) においても、移動が作業に制限される場合にはこの設計は行なわない。ただし、前にも述べたように、作業情報周知の通信 (1) は、ロボットの移動方法が設計できる場合であり、ここで移動方法の設計を用いることができる。この通信 (1) はどの作業の実行前にも繰り返されるので、これを効率化することは重要な意味を持つ。

Table 3.8 にはさらに、本節で行なった分類と対応する解析が、1 章で示した協調に必要な通信のうちどれが主にあてはまるかを示した。まず作業情報周知のための通信 (1) は、これまでも触れたように、ロボットが環境全体を作業情報の探索・拡散を目的として移動する場合である。この場合には、ロボットが環境全体に広がり、密度が小さいと考えられるので、最大情報伝達数 N_{max} が小さい (A) が相当する。また作業時の情報伝達 (2) では、作業箇所にロボットが集まる場合が多いので、最大情報伝達数 N_{max} が大きい (B)(C) の場合が主にあてはまると考えられる。

最後に、情報伝達数 N_{max} を用いた分類と解析、パラメータ等の関係を Fig. 3.9 にまとめた。本論文では、空間的な解析による通信範囲の設計をまず行なう立場をとるので、これを 4 章に示す。次に、空間的な解析を行なって、5 章で情報の提示時間を、6 章で移動方法を設計する。また、最大情報伝達数 N_{max} が非常に大きい (C) の場合については、7 章で扱う。

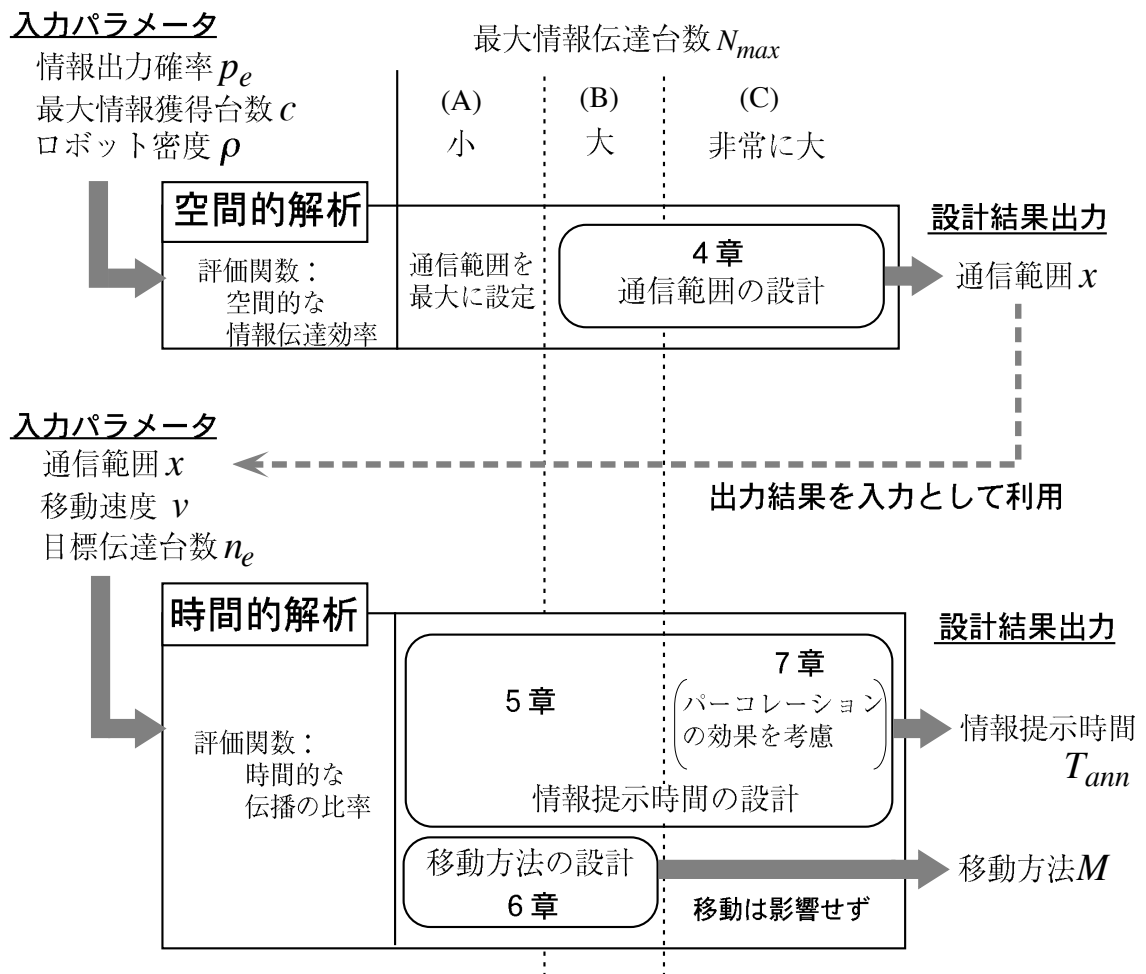


Fig. 3.9 N_{max} による分類に対する解析と、評価指標、設計・入力パラメータの関係

3.5 おわりに

本章では、多数移動ロボット系における局所的通信の一般的な定式化を行ない、それに対して今後行なっていく解析・設計について考察した。

まず、1章でも示した、パケットを用いる局所性を考慮した通信の環境を一般的に設定し、通信範囲 x 、情報出力確率 p_e 、最大情報獲得台数 c 、目標伝達台数 n_e などといった基本的なパラメータを定義した。

これに基づき、ロボット間の情報の伝播を表す一般式を微分方程式の形で導出した。具体的には、ある特定の情報を獲得したロボットをI-ロボットと呼ぶことにすると、時間 t におけるその全体に対する比率 $p(t)$ の時間微分は、空間的な情報伝達の効率を表す情報獲得の確率 P と、まだ情報を獲得していないN-ロボットの比率、それに移動を表す係数の積で表される。

この情報伝播の一般式は、空間的な情報伝達の繰り返しにより、時間的に情報がロボット間に伝播することを示している。今後の解析・設計はこの一般式に基づいて進めていくので、本論文では、解析の見通しを立てやすくするため、まず局所的通信の空間的な解析・設計を行ってから、次に時間的な解析・設計に進むという手順をとることにした。

また、情報伝播の一般式を用いた解析と設計は、環境パラメータ「情報伝達数 N 」によって、その対象が異なってくることも述べた。まず局所的な通信の空間的な解析と設計であるが、これは最大情報伝達数 N_{max} が大きい (B)(C) の場合に必要となる。そこで4章では、空間的な情報伝達を解析し、情報伝達の効率を最適化する通信範囲 x を設計する。この設計は、1章で述した通信の要求仕様のうち、「速く」伝達することに寄与する。入力は、ロボット密度 ρ 、通信能力 c 、情報出力確率 p_e である。 N_{max} が小さい (A) の場合には、情報の衝突が生じる確率が小さく、通信範囲は常に最大とすればよいので、この空間的設計は必要ない。

そして、このように設計された通信範囲 x と、目標伝達数 n_e 、移動速度 v を入力として、導出された情報伝達の一般式をもとに情報伝播を時間的に解析し、「必要な台数」である n_e に効率的に「無駄なく」情報を伝達するための設計を行なう。情報提示時間 T_{ann} を5章で、また移動法 M を6章で設計することを述べた。

さらに N_{max} が非常に大きい通信では、ロボット間の情報の伝播は移動には影響を受けなくなり、通信範囲の無限の繋がりによるパーコレーションの効果が支配的になる。これに関しては、7章で解析する。

以上のように、本章で示した解析・設計の構造にしたがって、次章以降で局所的通信システムの設計論の構築を進めていく。

第4章 空間的な解析と通信範囲の設計

4.1	はじめに	72
4.2	局所的通信を用いた協調作業のモデル化	75
4.2.1	通信モデルとパラメータ	75
4.2.2	協調作業モデル	77
4.3	情報伝達の定式化	79
4.3.1	ロボットの空間分布のモデル化	80
4.3.2	情報獲得の確率の導出 (1 台に対する情報伝達)	91
4.3.3	情報獲得の確率の導出 (複数台に対する伝達)	95
4.4	最適な通信範囲の導出	98
4.4.1	1 台に対する情報伝達	99
4.4.2	複数台への情報伝達	121
4.5	シミュレーションによる解析の検証と計算例	123
4.5.1	シミュレーション環境	123
4.5.2	情報獲得の確率と最適通信範囲の検証	124
4.5.3	具体例の計算	129
4.6	赤外線を用いた通信実験	135
4.6.1	赤外線を用いた局所的な通信の実現	135
4.6.2	通信の基礎実験	139
4.6.3	最適な通信範囲の検証	143
4.7	おわりに	150

4.1 はじめに

本章では、多数移動ロボットの局所的な通信の空間的な解析を行ない、通信効率を最大化する最適な通信範囲を導出する [Yoshida95a] [Yoshida95b] [山本 95] [吉田 95b].

1 章, 2 章でも述べた通り、これまでよく用いられてきた大域的な通信 [プレム 91b] [石田 93] [金森 92] [Wang94b] は、

- 高トラフィック時の通信能力の制限、情報の干渉、あるいは中継局にかかる過大な通信負荷などの影響により通信効率が低下する
- 行動決定には一般に局所的な情報が中心に用いられれば十分であり、局所的な情報が無制限に拡散するとロボットの情報処理能力を超える危険性がある.
- 通信システムを集中的に管理する中継局を用いた場合には、耐故障性の点で問題がある.

などの理由で、ロボットの台数が増加すると実現が困難になる.

よって、3 章で示したように、局所的な通信の空間的設計を行なう必要がある. これにより、多数ロボット系において、情報の衝突の影響をなるべく小さく抑え、通信効率の向上を図る.

1 章では、多数ロボット系における通信に要求される仕様として

- 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

があることを示した. 本章の空間的設計では、前者の情報伝達時間の短縮を実現するため、情報伝達を効率化する通信半径の設計を行なう. この設計が対象とするのは、3.4 節の分類において、 N_{max} が大きい (B), (C) の場合である. N_{max} が小さい (A) の場合には、情報の衝突の影響が少ないため、通信範囲を常に最大に設定でき、解析に基づく設計は必要ない.

Fig. 4.1 に局所的通信の解析・設計における本章の位置付けを示す. 設計パラメータは通信範囲 x である.

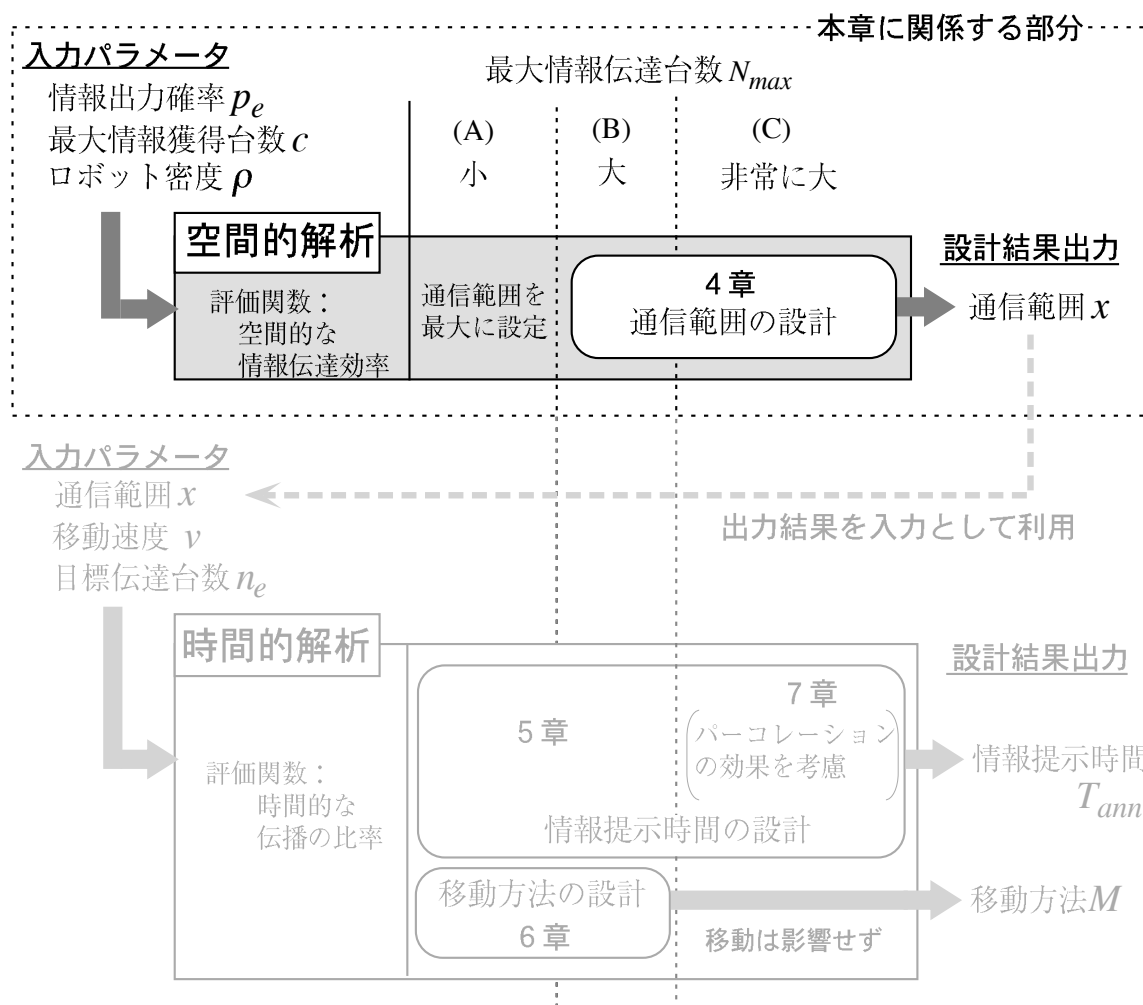


Fig. 4.1 局所的通信の解析・設計における本章の位置付け

本章では、まず局所的通信による作業環境を4.2節でモデル化し、これを用いて、情報獲得の確率 P を4.3節で導出する。4.4節では、この確率 P を用いて最適な通信範囲を導出する。これらの解析過程の詳しい構成を Fig. 4.2 に示す。

4.3節では、まず、設定した作業モデルに対し、周囲の一定の面積にロボットがどのように分布するかを調べる。そして、最も基本的な通信を考慮し、1台への伝達における情報獲得の確率 P を導出する。さらにそれを拡張し、複数台への伝達を考慮して P を求める。この場合には、周囲の伝播状況も考慮するため、 P は時間 t にも依存する。これらに基づき、4.4節で最適な通信範囲 x_{opt} を求める。Fig. 4.2 に示したように、1台への情報伝達の場合、複数への伝達を考慮した場合では最適化する関数が異なる。

通信範囲の設計における入力パラメータは、ロボット密度 ρ 、最大情報獲得台数 c 、情報出力確率 p_e である。 ρ は環境における定数であり、 c と p_e はそれぞれロボットの通信能力、

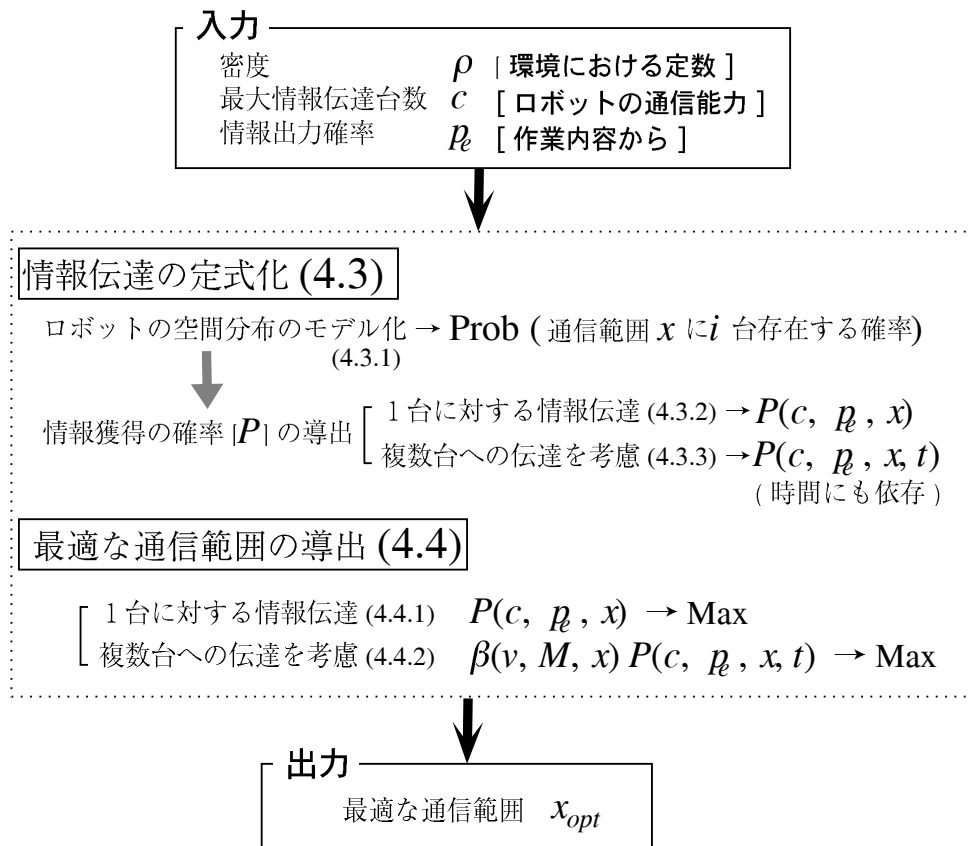


Fig. 4.2 最適な通信範囲の導出過程 (4.3 節, 4.4 節)

作業内容から決まるパラメータである.

さらに 4.5 節, 4.6 節においてその有効性をそれぞれシミュレーション, 赤外線を用いた通信装置による実験により確認する.

4.2 局所的通信を用いた協調作業のモデル化

多数移動ロボットによる，局所的通信を用いた協調作業のモデル化を行なう．まず，3.2節で設定した一般的な環境において，本章で主に用いる部分を示す．次に，多数ロボットによる典型的な協調作業であると考えられる3種類の作業を考え，そのモデルを設定する[吉田 95b]．

4.2.1 通信モデルとパラメータ

多数移動ロボットの通信のモデルは，3章3.2.2で示した次のようなモデルである．

- (1) 情報はパケットを単位として伝達される．
- (2) ロボットから発信された情報は，有限な情報伝達範囲を持つ．
- (3) ロボットから発信された情報は，その出力範囲内に存在し，情報獲得可能な状態のとき受信される．
- (4) パケット伝達に十分なサンプリング時間を1単位時間とする．
- (5) 各ロボットは一定の確率 p_e で情報を出力する．
- (6) ロボットは1単位時間に複数台のロボットから情報を獲得できるとする．その台数の上限を c とする．
- (7) 系の各ロボットは同様の通信・移動の能力を持つ．

以上の通信モデルを用いて，本章では局所的な通信の空間的設計を行なう．空間的設計の評価指標は，Fig. 4.1にも示した通り，**空間的な情報伝達効率**である．本章では，この効率を表現するのに，情報伝達に必要な時間を用いる．

次に，設計において重要なパラメータを，Table 4.1にまとめておく．

Table 4.1に示すように，本章における設計パラメータは x ，また入力パラメータはロボット密度 ρ ，最大情報獲得台数 c ，情報出力確率 p_e である．3.2節で示したように， ρ はロボットのシステムにおける定数であり， c ， p_e はそれぞれロボット能力と作業によって決まる入力パラメータである．

Fig. 4.3 には，これらのパラメータのうち， ρ ， A ， x ， p_e について図解した．

また，最大情報獲得台数 c と **情報の衝突** について，**Fig. 4.4** に示す．

通信モデルの(6)に示したように，各ロボットは単位時間に複数のロボットから情報を獲得することができるとした． c は，その上限のロボット台数である．3章3.2節でも簡単に示したが， c よりも多くのロボットから情報を出力された場合には，次の二つの場合を考える．

Table 4.1 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	x	ロボットの通信範囲 [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	ρ	ロボット密度	環境から決まる定数
	c	最大情報獲得台数 [単位時間あたり最大で何台 から情報を獲得できるか]	ロボットの通信能力
	p_e	情報出力確率	作業内容

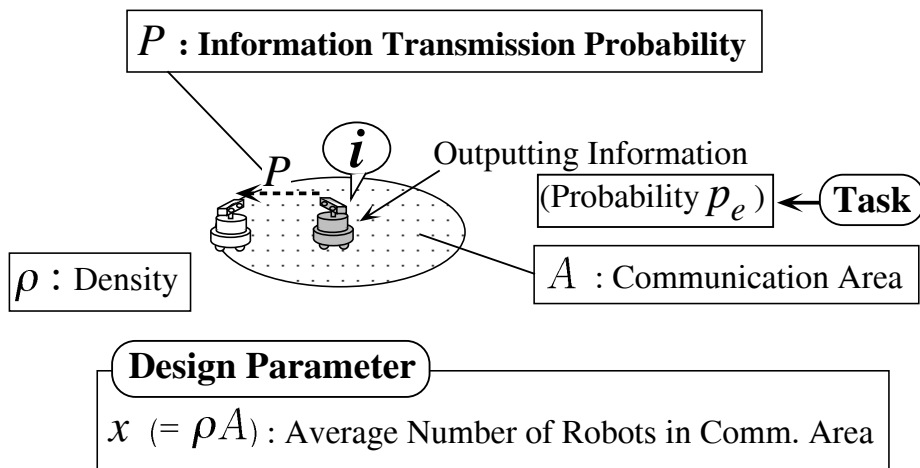


Fig. 4.3 本章の設計に関係する主なパラメータ

- (1) 全く情報の獲得ができなくなる場合 (**情報の衝突あり**)
- (2) c 台分の情報は獲得できる (**情報の衝突なし**)

Fig. 4.4 は最大情報獲得台数 $c=2$ の場合を示しており，中央のロボットは4台のロボットから出力を受けている．衝突ありの場合には，1 台からも情報が獲得できないが，衝突なしの場合には2 台のロボットから情報を獲得できる．

無線や計算機ネットワークなどはここで定義した情報の衝突ありの場合に分類され，空間の画像による通信や，人間が一人を集中して聞くときなどは情報の衝突なしに分類される．多数のロボットによる通信では，この情報の衝突についても考慮しなければならない．

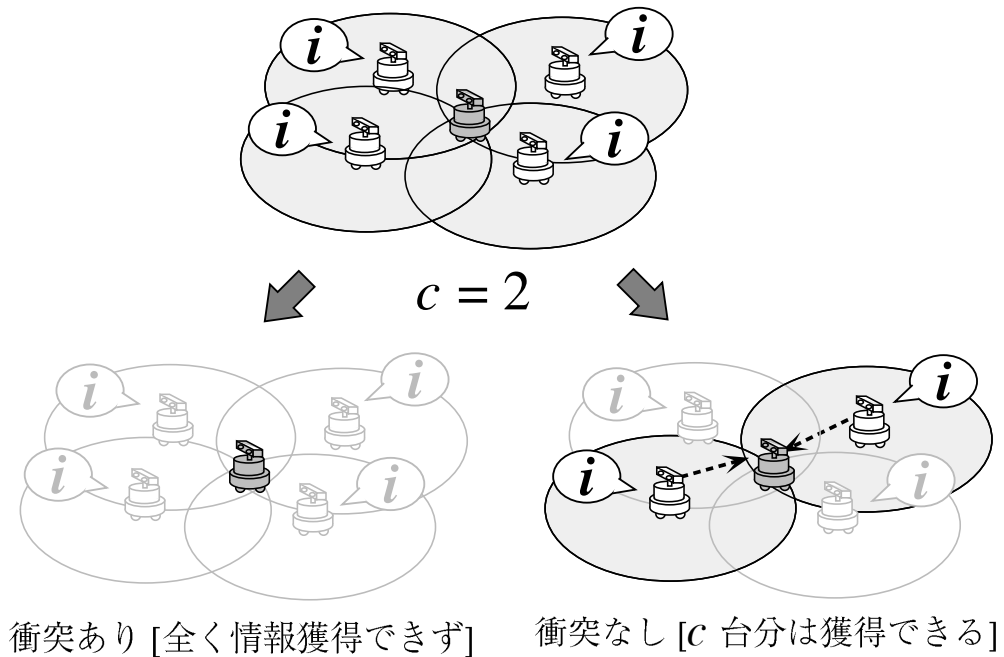


Fig. 4.4 多数のロボットから情報の出力を受けた場合の情報の衝突

4.2.2 協調作業モデル

最適な通信範囲を求めるにあたり、(1) ランダム探索・掃引、(2) 協調搬送、(3) 分割領域の探索・掃引の3つの作業をモデル化することにする。

(1) は地図生成作業や惑星などの探索 [Gage92] [Hara92] [Singh93] [Ichikawa94] [市川 95]、(2) は重量物の協調ハンドリングや搬送 [Hashimoto93] [Stilwell94] [Ota95] [Sasaki95] [太田 94] [佐々木 94]、(3) は広い部屋を分担して掃除・探索する作業 [Beckers94] [倉林 95] [Kura95]などの作業に相当する。これらについては上記のように多くの研究がなされており、多数ロボットによる典型的な、応用範囲の広い協調作業であると考えられる。

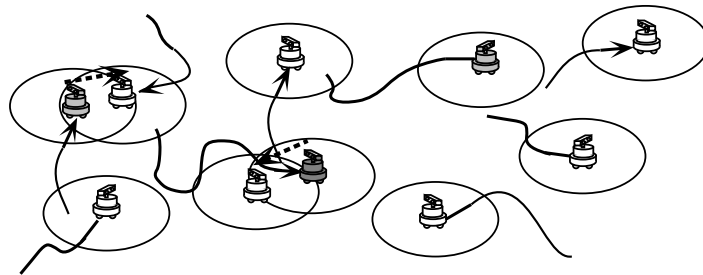
これらの協調作業を、以下のようにモデル化する (Fig. 4.5)。

- (1) **ランダム探索・掃引** ロボットはランダムに移動し、環境を探索する (Fig. 4.5(1)).
- (2) **協調搬送** 半径が単位長さの均一な円盤を複数のロボットにより搬送するモデルとする。持ち替えをすることを考え、ランダムにロボットを円周上に配置する (Fig. 4.5(2)).
ただし、ここでは次のような理由により、通信範囲を調節するパラメータは x でなく、通信半径 R_c とする。

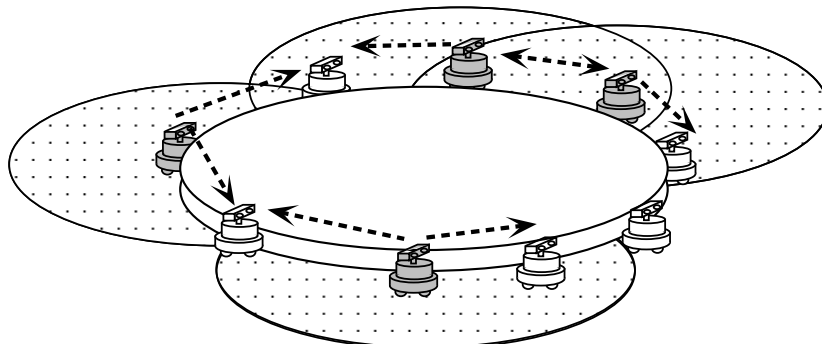
この作業では、ロボットが円周上に存在するため、通信範囲に存在するロボット数 x は、情報出力範囲の面積 A には比例しない。 x をパラメータとすると、空間分布の性質が分かりにくくなる。そこで、単純に通信距離 R_c を用いることとした。

(3) **分割領域の探索・掃引** ロボットは一辺が単位長さの正方形の柵目一台ずつ存在し、
その中でランダムに動き回る (Fig. 4.5(3)).

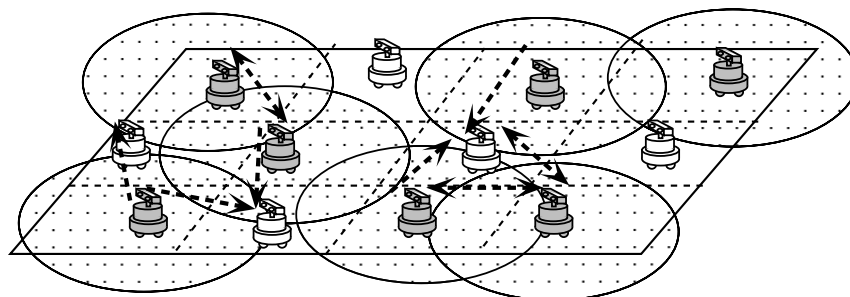
以上の協調では、与えられた領域の大きさ、あるいは運搬する対象物の大きさや重量など、
作業によりロボットの位置関係はさまざまに変化する可能性がある。このような作業による
変動を考慮するため、与えられた領域内や搬送対象物の周上にロボットをランダムに配
置し、以降ではそれに対する最適な通信範囲を求めていくことにする。



(1) ランダム探索・掃引



(2) 協調搬送



(3) 分割領域の探索・掃引

Fig. 4.5 協調作業のモデル化

4.3 情報伝達の定式化

これまでに設定した通信・作業のモデルに基づき、情報伝達の定式化を行なう。空間的な情報伝達の効率を表す評価量は、3.2節で示した

P : ロボットの情報獲得の確率 [ロボット間の情報伝達の成功確率]

である。これは、任意のロボットが、他のロボットから出力された情報を獲得することができる確率である。

情報獲得の確率 P を導出するため、Fig. 4.6 に示す手順をとる。

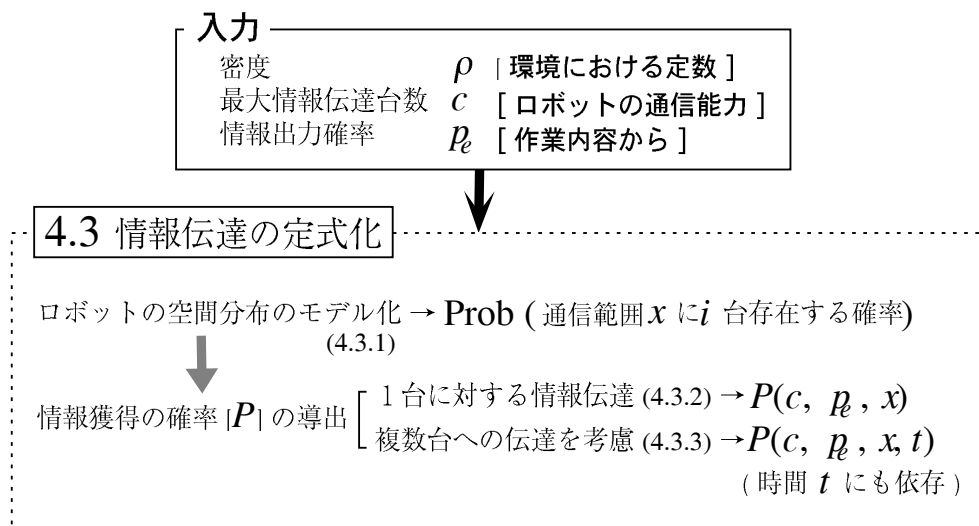


Fig. 4.6 情報獲得の確率 P の導出手順

まず、4.3.1 項で、前節 4.2.2 で示した協調作業モデルに対して、ロボットの空間分布をモデル化する。このモデル化は、Fig. 4.6 に示したように、

$$\text{Prob}[i \mid i \in \mathcal{S}(x)] = \text{Prob}[\text{通信範囲 } x \text{ にロボットが } i \text{ 台存在する}]$$

を求めることにより行なわれる。

これらのモデルを用いて、4.3.2 項でまず最も基本的な通信として、1 台の情報伝達における情報獲得の確率 P を求める。Fig. 4.6 に示すように、 P は、 c 、 p_e 、 x の関数となり $P(c, p_e, x)$ の形で導出される。さらに、 P を最大化することにより、情報伝達時間が最小化されることも示す。

複数台への情報伝播を考慮する場合には、注目する情報がどれだけの比率のロボットに伝播しているかによって、 P の値が左右される．時間 t における情報の伝播率は $p(t)$ 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．4.3.3 項において、1 台の情報伝達の導出法を拡張してこれを求める．

4.3.1 ロボットの空間分布のモデル化

ここでは、4.2 節で設定したそれぞれの協調作業に対して、ロボットの空間分布をモデル化する．

ロボットがある作業を 2 次元平面上で行なっているとする．この作業に対する**空間分布のモデル化**とは、先にも述べたように、通信範囲 x に対応する領域 $\mathcal{S}(x)$ に個体が i 個存在する確率

$$\text{Prob}[i \mid i \in \mathcal{S}(x)] = \text{Prob}[\text{通信範囲 } x \text{ にロボットが } i \text{ 台存在する}]$$

を求めることである．

ロボットの分布は、ランダム移動を用いた掃引・探索の場合にはポアソン分布に、協調搬送の場合には二項分布に、それぞれ従うことを示す．分割された領域の掃引・探索の場合には、分布を数値的に求め、それに近い分布形態を正規分布を用いてロボットの分布を近似する．

4.3.1.1 ランダム掃引・探索するロボットの空間分布のポアソン分布によるモデル化

平面上で、複数の点の位置を独立に配置した場合、それはランダム分布と呼ばれる．その分布を、1 台のロボット周囲に他ロボットが何台存在するかを示す確率分布と読み換えれば、これはポアソン分布に従うことが知られている [巖佐 90]．

ここで、ロボットのランダム移動を定義しておく．各ロボットは独立に移動するとし、ランダム移動を **Fig.4.7** のように、 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する移動とする．ここでは後退は考えないものとする．また、衝突回避行動として、相対距離が D_c 以下になれば反発する、という簡単なものを用いる．ただし、 D_c は通信半径より十分小さいとする．

ポアソン分布は、独立に個体を配置した静的な場合の空間分布をモデル化するものである．しかし、ここでロボットは独立にランダムに移動するとしたので、空間的な分布もこれに従うと予想される．

ポアソン分布は、具体的には次のようなものである．個体の密度を κ とすると、面積 T の領域 $\mathcal{S}(T)$ に個体が i 個存在する確率 $\text{Prob}[i \mid i \in \mathcal{S}(T)]$ は、平均 κT のポアソン分布

$$\text{Prob}[i \mid i \in \mathcal{S}(T)] = \frac{(\kappa T)^i}{i!} e^{-\kappa T} \quad (4.1)$$

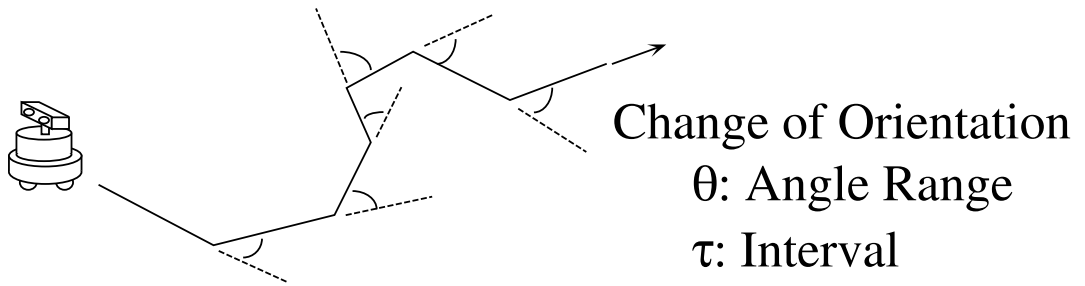


Fig. 4.7 ランダム移動

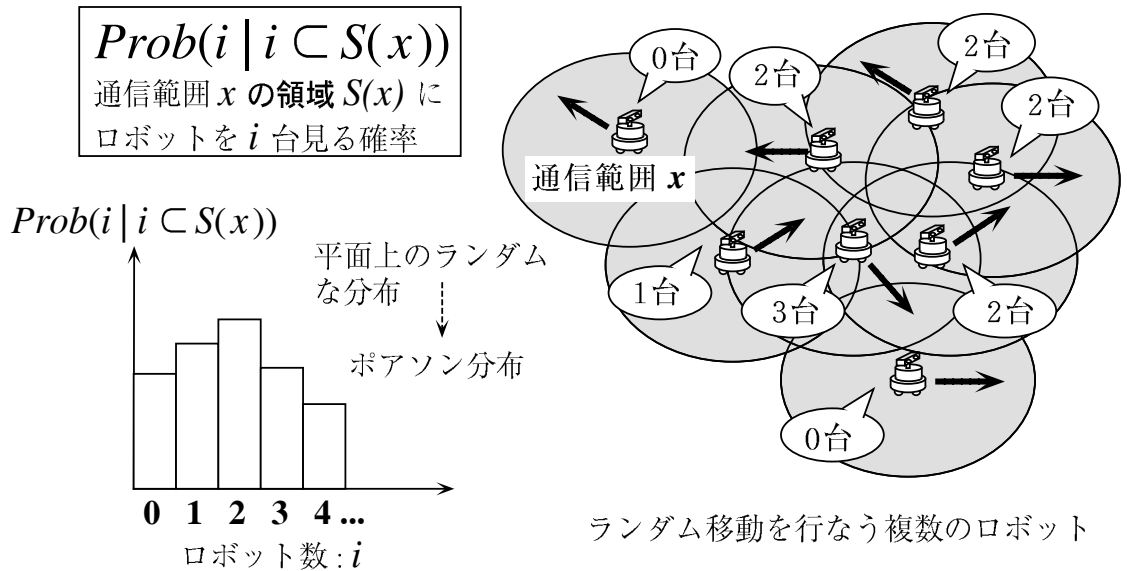


Fig. 4.8 多数ロボット系へのポアソン分布の適用

に従う。

1台のロボットの通信範囲内に存在するロボットの平均台数は、Table 4.1 に示すように $x(=\rho A)$ である。Fig. 4.8 のように1台のロボットの周囲に存在するロボット数にポアソン分布を適用し、通信範囲 x にロボットを i 台見る確率を算出すると $\text{Prob}[i | i \in \mathcal{S}(x)]$ は

$$\begin{aligned} \text{Prob}[i | i \in \mathcal{S}(x)] &= \frac{\{\rho A\}^i}{i!} e^{-\rho A} \\ &= \frac{x^i}{i!} e^{-x} \end{aligned} \quad (4.2)$$

となる。回避行動を開始する相対距離 D_c が式 (4.2) のポアソン分布に与える影響は、例えば通信半径の 10% より小さくとれば、5% 以下となり、無視できる¹。

¹ $D_c=0.1R_c$ のとき、通信範囲は 0.99 倍になる。 $\text{Prob}[i | i \in \mathcal{S}(0.99x)] = \frac{(0.99x)^i}{i!} e^{-0.99x}$ が対応するポアソン分布となり、衝突回避しない場合と比較すると、 x, i が $[0, 5]$ の範囲で、誤差は $\pm 5\%$ 以内となる。

環境 : 10×10

Tab 4.2 シミュレーションのパラメータ

ρ	[ロボット密度]	0.2, 0.4
R_c	[通信半径]	1, 2
ϕ	[視野角 (°)]	360
v	[ロボット速度]	0.1, 0.2, 0.3
θ	[角度変化範囲 (°)]	0, 45, 90, 180
τ	[角度変化周期]	1, 3, 10
D_c	[回避半径]	R_c の 10%

Fig. 4.9 シミュレーション環境

次に、平面上でランダム移動を行なうロボットの分布が、このポアソン分布に従うことをシミュレーションによって示す。Fig. 4.7 のランダム移動を行なう多数のロボット計算機上に実現し、その空間分布を調べた。シミュレーション環境は Fig. 4.9 に示す通りである。環境は 10×10 とし、パラメータは Table 4.2 に示すものを用いる。

シミュレーションでは、それぞれのパラメータについて 5000 ステップのランダム移動を行った。各ロボットは、ステップ毎に自分の通信範囲内にあるロボットの数をカウントする。

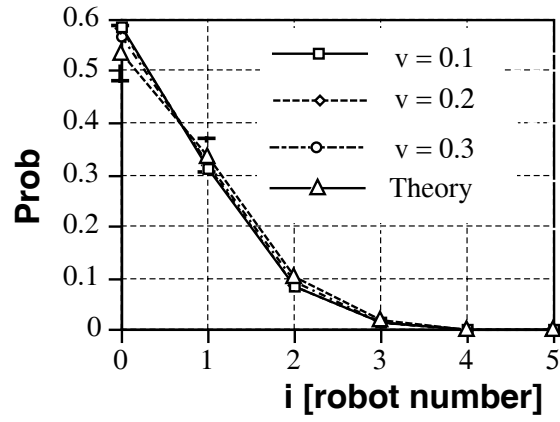
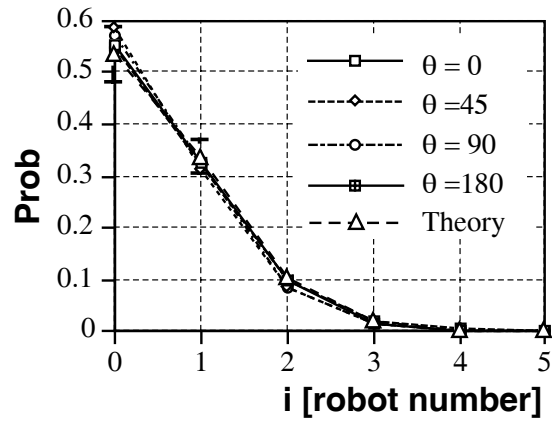
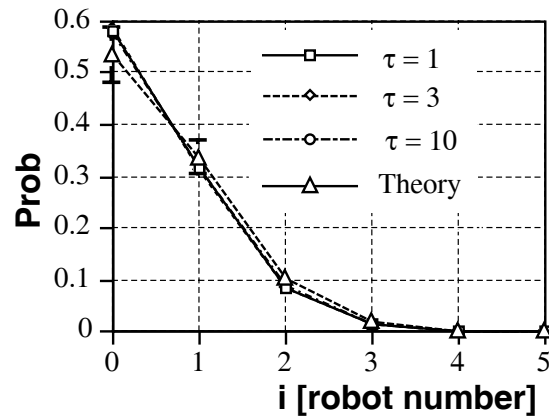
$M_r[i]$	:ロボット r が通信範囲 A にロボットを i 台観測した回数
s	:総ステップ数
m	:ロボット台数

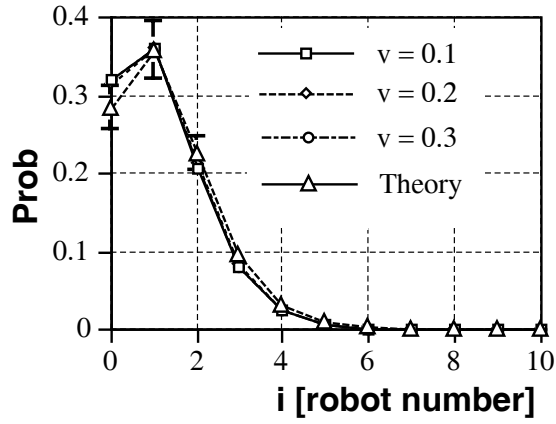
とにおいて、面積 A の通信範囲内に、ロボットを i 台発見する確率の全てのロボットに関する平均 $\text{Prob}_{sim}[i|i \in \mathcal{S}(x)]$

$$\text{Prob}_{sim}[i|i \in \mathcal{S}(x)] = \frac{\sum_{r=1}^m M_r[i]}{ms} \quad (4.3)$$

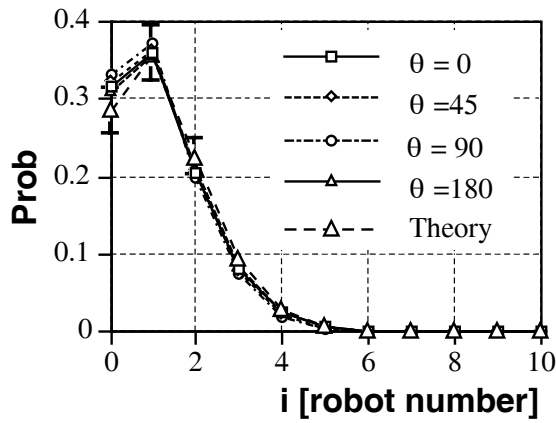
を求め、これをシミュレーション値とする。ポアソン分布は密度 ρ 、通信範囲の面積 A によって変化する。ここではさらに、Table 4.2 に示すようにランダム移動の速度 v 、進行方向の角度変化範囲 θ 、進行方向の変化周期 τ も変化させて $\text{Prob}_{sim}[i|i \in \mathcal{S}(x)]$ を計算し、これらのパラメータのポアソン分布へ与える影響を調べた。 D_c は一定とした。

ポアソン分布の理論値は式 (4.1) によって計算し、シミュレーション値とともに Fig. 4.10, 4.11 に示す。

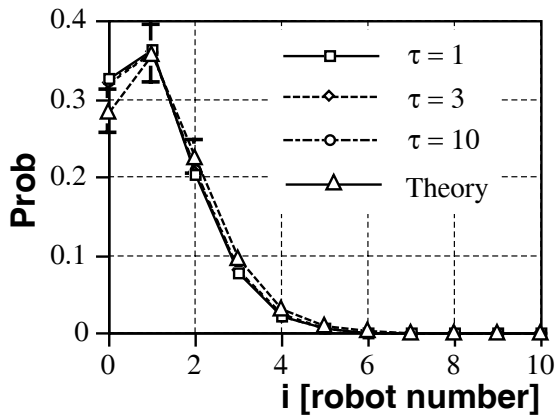
(a) 速度 v を変化させた場合(b) 角度変化範囲 θ を変化させた場合(c) 角度変化周期 τ を変化させた場合Fig. 4.10 シミュレーション結果 $\text{Prob}_{sim}[i|i \in \mathcal{S}(x)]$ ($\rho=0.2, R_c=1$)



(a) 速度 v を変化させた場合



(b) 角度変化範囲 θ を変化させた場合



(c) 角度変化周期 τ を変化させた場合

Fig. 4.11 シミュレーション結果 $\text{Prob}_{sim}[i|i \in \mathcal{S}(x)]$ ($\rho=0.4, R_c=1$)

グラフに示された誤差幅は、理論値から $\pm 10\%$ である。まず、Fig. 4.10 の $\rho=0.2$, $R_c=1$ とした場合のシミュレーションについて考察する。このとき、通信範囲の面積は 3.14 であるので、ポアソン分布の平均 ρA は約 0.6 になる。Fig. 4.10(a)~(c) のグラフを見るとロボットが通信範囲に 1 台もない確率が最も大きくなっている。

シミュレーション値と理論を比較すると、シミュレーション値はほとんどが理論値から 10% 以内の範囲に収まっており、ランダム移動するロボットの空間分布がポアソン分布に従っていることがわかる。また、Fig. 4.10(a) でランダム移動の速度 v , Fig. 4.10(b) で進行方向の角度変化範囲 θ , Fig. 4.10(c) で進行方向の変化周期 τ を変化させているが、ロボットの分布にはほとんど影響を与えていない。

この傾向は、Fig. 4.11 に示したようにロボット密度を $\rho=0.4$ に変えた場合にもみられる。いずれもシミュレーション値は理論値から 10% の範囲に収まっていて、ランダム移動のパラメータの影響はほとんど受けていない。

回避行動を開始する相対距離 D_c は、Table 4.2 に示したように通信半径の 10% 程度にとっている。先ほど述べたように、これがポアソン分布に与える影響は $\pm 5\%$ 程度と見られ、実際ほとんど影響を与えていない。

よって、以上のランダム移動のシミュレーションの結果から、独立にランダム移動を行なうロボットの空間分布を示す $\text{Prob}[i | i \in \mathcal{S}(x)]$ は、移動の仕方にかかわらず、ポアソン分布に従うことが示された。

4.3.1.2 協調搬送を行なうロボットの空間分布のモデル化

本章 4.2.2 項で定義した通り、協調搬送のモデルでは、持ち替えを行なうことを想定する。Fig. 4.5(2) に示すように、単位円上に配置した m 台のロボットの通信範囲 R_c を変化させるものとする。

ここでは、これまで扱ってきた掃引・探索作業の場合とやや異なり、ロボットの密度は、円周上の線密度 $\frac{m}{2\pi}$ によって表される。

通信半径を R_c としたとき、通信範囲内に存在するロボット数 i の平均 μ をまず導出し、次に空間分布を表す $\text{Prob}[i | i \in \mathcal{S}(R_c)]$ を求める。その導出過程を、Fig. 4.12 に示す。

図に示すとおり、搬送対象物の半径を 1 とし、通信半径は R_c である。あるロボットに注目し、その通信範囲が対象物の円周から切り取る弧を太線で示す。その円周角を ψ とすると、太線で示された弧長が 4ψ であることは容易に分かる。自分を除く $m-1$ 台のロボットが線密度 $\sigma = \frac{m-1}{2\pi}$ で存在するから、 $\frac{m-1}{2\pi} \cdot 4\psi$ が通信範囲内に存在するロボット数の平均 μ となる。 μ を R_c を用いて表すと、式 (4.4) に示すようになる。

また、空間分布を表す $\text{Prob}[i | i \in \mathcal{S}(R_c)]$ は次のように求める。Fig. 4.12 に太線で示した弧上にロボットが存在する確率は、 $\frac{\mu}{m-1}$ である。 $\text{Prob}[i | i \in \mathcal{S}(R_c)]$ は、通信範囲に i 台ロボットが存在する確率であるので、この確率 $\frac{\mu}{m-1}$ を用いた二項分布により表される。すなわち、

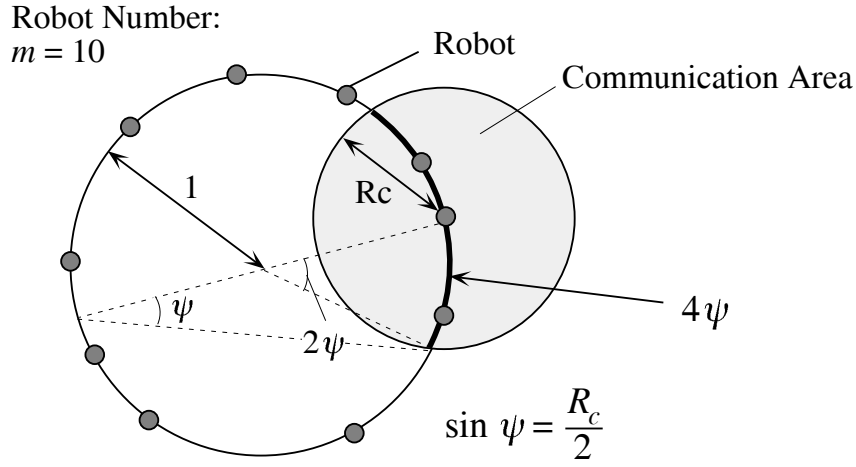


Fig. 4.12 協調搬送作業における 空間分布の導出過程

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{2(m-1)}{\pi} \sin^{-1} \frac{R_c}{2} \\ \text{Prob}[i|i \in \mathcal{S}(R_c)] &= {}_{m-1}C_i \left(\frac{\mu}{m-1}\right)^i \left(1 - \frac{\mu}{m-1}\right)^{m-1-i} \end{aligned} \quad (4.4)$$

となる.

このように協調搬送におけるロボットの空間分布が, ランダム探索・掃引の場合と同様に, 解析的に表現された. そこで, 式 (4.4) の二項分布によるロボットの空間分布 $\text{Prob}[i|i \in \mathcal{S}(R_c)]$ を, ロボット分布のシミュレーション結果 $\text{Prob}_{sim}[i|i \in \mathcal{S}(R_c)]$ と比較した. これを, 通信半径 $R_c=0.5, 1.0, 1.5$ について Fig. 4.13 に示す.

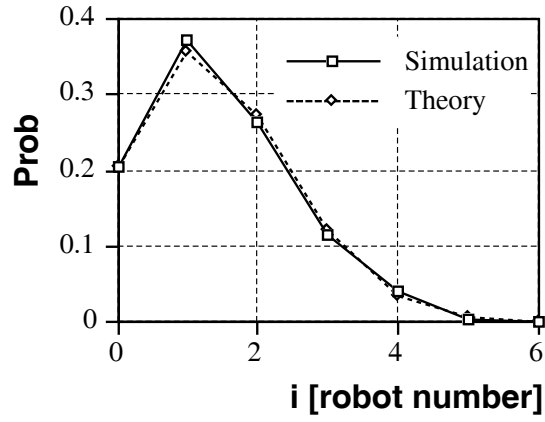
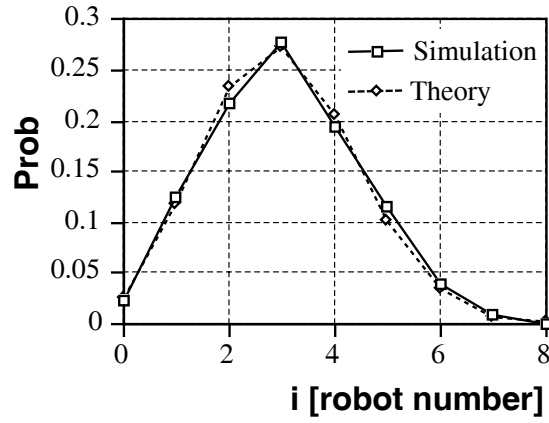
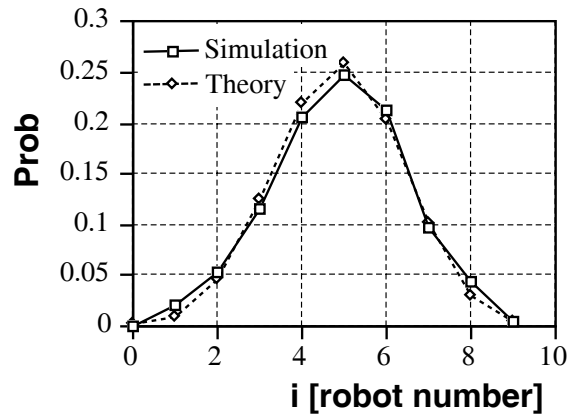
(a) 通信半径 $R_c=0.5$ のとき(b) 通信半径 $R_c=1.0$ のとき(c) 通信半径 $R_c=1.5$ のときFig. 4.13 空間分布のシミュレーション結果 $\text{Prob}_{sim}[i|i \in \mathcal{S}(R_c)]$

Fig. 4.13 では、シミュレーション結果に対する計算値の誤差はほぼ 10%以内に収まっている。このように、協調搬送作業の場合においても、ランダム探索・掃引の場合と同様、空間分布に関する解析の有効性が示された。

4.3.1.3 分割された領域を探索・掃引するロボットの空間分布のモデル化

この作業は、多数のロボットで広い環境を探索・掃引する協調作業である。[Kura95] などに見られるように、各ロボットに均等に分割した領域を割り当て、その領域をロボットが掃引することを想定している。本章におけるこの作業のモデルは、前節 4.2.2 項の Fig. 4.5(3) に示した。モデルでは、分割された領域を一辺が単位長さの正方形とし、それぞれの領域に 1 台ずつロボットを割り当て、その柵目の中でランダムに動き回るとした。

1 台のロボットに割り当てられた領域の面積を S_r とすると、ロボット密度 ρ は $\frac{1}{S_r}$ である。情報出力範囲に、平均 x 台ロボットを見たとすると、そのときの出力範囲の面積 A は

$$A = \frac{x}{\frac{1}{S_r}} = xS_r$$

となる。すなわち、

$$x = \frac{A}{S_r}$$

である。このように、通信範囲 x は、情報出力範囲の面積 A の領域の面積 S_r に対する比率であるので、領域の一辺の長さが増え、空間分布の定性的な性質は変化しない。4.2.2 に示したモデルは、一辺の長さが 1 であるので $S_r=1$ となる。よって、

$$x = A$$

である。

分割された領域の掃引・探索作業における空間分布 $\text{Prob}[i | i \in \mathcal{S}(x)]$ をモデル化するため、Fig. 4.5(3) に示すような多数のロボットを計算機上に実現した。ロボットは 25 台、環境は 5×5 とする。これを 25 個の正方形領域に分割し、それぞれに 1 台ずつロボットを割り当てる。各ロボットが探索すべき領域は一辺が単位長さの正方形であり、各ロボットはその領域内で Fig. 4.7 と同様のランダム移動を行なう。本章 4.3.1.1 のランダム探索・掃引の場合に対して行なったシミュレーションの考察から、ランダム移動の方法は空間分布に影響を与えないと考えられるので、ランダム移動は一通りとし、Table 4.2 の中のパラメータのうち、 $v=0.1$, $\theta=90$, $\tau=3$ を用いた。

以上に示した環境において、通信範囲 A を変えて通信範囲内に存在するロボット台数の分布 $\text{Prob}_{sim}[i | i \in \mathcal{S}(x)]$ を調べた。

このような領域探索作業では、 x が小さいときと大きいときとで、通信範囲に存在するロボットの分布のしかたが異なる。これらを同時に解析的にモデル化することは困難であるた

め、ランダム探索や協調搬送の場合のように解析的な空間分布モデルを得ることはできない。そこで、まず通信範囲 x に対して、その内部に存在するロボット数 i の平均 μ と分散 V をシミュレーションから計算し、これらを x の関数として近似する。そして、 $\text{Prob}_{sim}[i|i \in \mathcal{S}(x)]$ が近似された平均と分散を持つ正規分布に従うと仮定し、これを検証することにする。

次に示す式 (4.5) は、通信範囲 x に存在するロボット数 i の平均 μ と分散 V のシミュレーション結果を、次のような方法で x の関数として近似したものである。

- x が大きいときには、通信範囲 x に存在するロボット数 i の平均 μ は、自分を除き $x - 1$ 台である。よって、 μ は x が大きいときに $x - 1$ に近づく関数とする。
- しかし $\mu = x - 1$ とおくと、 x が小さいときには当てはまらない。そこで、 x が増加するにつれて $\mu = x - 1$ に近付き、 x が小さい場合にも近似の良い関数を試行錯誤的に求める。ここでは、 $\mu = \sqrt[3]{x^3 + 1} - 1$ とした。
- i の分散 V についても同様に、当てはまりのよい関数を求めた。

$$\begin{aligned}\mu &= \sqrt[3]{x^3 + 1} - 1 \\ V &= 0.6\sqrt{\mu}\end{aligned}\tag{4.5}$$

通信範囲 x を 1 から 5 まで変化させたときの μ, V のシミュレーション結果と、式 (4.5) による近似値を Fig. 4.14 に示す。式 (4.5) の近似により、 μ, V のシミュレーション結果がほぼ正確にモデル化されていることがわかる。

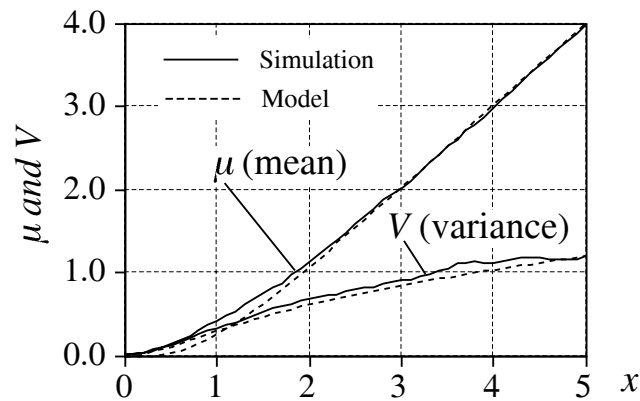
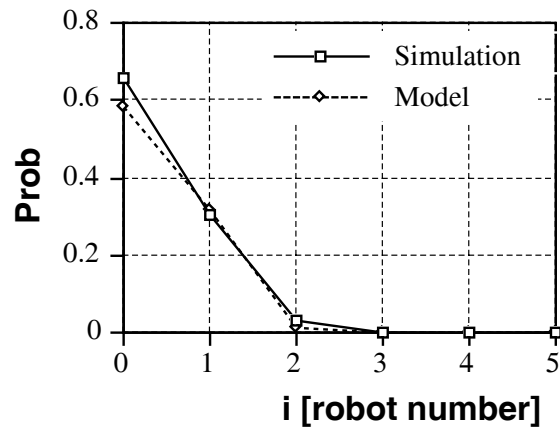
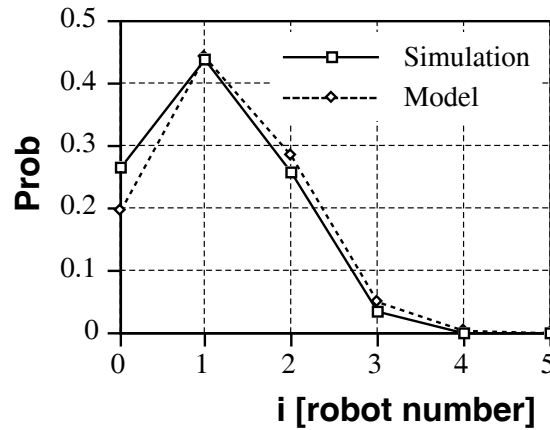


Fig. 4.14 通信範囲の平均ロボット台数 i の平均 μ と v の近似

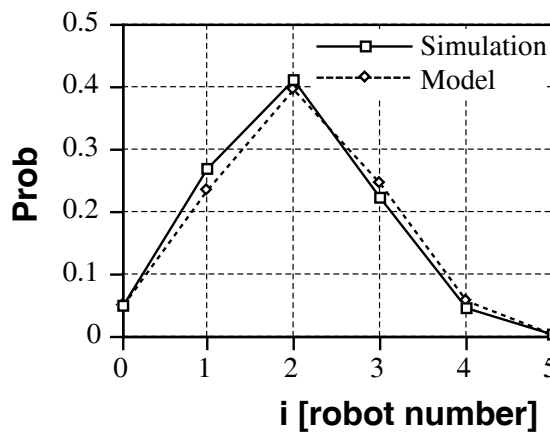
通信範囲 x を 1, 2, 3 ととり、シミュレーションから得られたロボット台数の分布 $\text{Prob}_{sim}[i|i \in \mathcal{S}(x)]$ と、このときの i の平均 μ と分散 V を用いた正規分布を積分して離散化したものを比較する。これを、Fig. 4.15 に示す。実線で結ばれている点がシミュレーション結果、点線で結ばれている点が理論値を示している。



(a) 通信範囲 $x=1$ のとき



(b) 通信範囲 $x=2$ のとき



(c) 通信範囲 $x=3$ のとき

Fig. 4.15 空間分布のシミュレーション結果 $\text{Prob}_{sim}[i|i \in \mathcal{S}(x)]$

通信範囲が比較的大きいときには、分布がほぼ左右対象となり、正規分布によるモデル化が妥当であることが分かる。通信範囲が小さいときにも、同様に正規分布によるモデル化は正確である。

このように、正規分布を用いて分割された領域を探索する場合のロボットの空間分布を近似することができる。

4.3.2 情報獲得の確率の導出 (1 台に対する情報伝達)

多数移動ロボット系における協調作業時のロボットの空間分布がモデル化されたので、これを用いて情報獲得の確率 P を導出する。まず、最も基本的と考えられる、1 台のロボットに対する情報伝達について考察する。

ここでは、

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

ことを目的とする。 P の変数となるパラメータの定義は下の通りである。

Table 4.3 P の変数となるパラメータの定義

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 p_e	ロボットの最大情報獲得台数 ロボットの情報出力確率

4.2.1 節では、最大情報獲得台数 c よりも多数のロボットからの情報出力があったときに、全く情報が獲得できなくなる衝突ありの場合と、 c 台からは情報を獲得できる獲得なしの場合とがあることを述べた (Fig. 4.4)。

それぞれの場合について、情報獲得の確率 $P(c, p_e, x)$ を、

$$\begin{cases} P_I(c, p_e, x) & (\text{衝突あり}) \\ P_N(c, p_e, x) & (\text{衝突なし}) \end{cases}$$

として導出する。ただし、協調搬送作業に対しては、設計対象のパラメータは通信半径 R_c となる。またこの作業では、入力パラメータも、ロボット密度 ρ に代わって作業におけるロボット総数 m を用いることになる。

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 $\text{Prob}[i|i \in \mathcal{S}(x)]$ 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、 $\text{Prob}[i|i \in \mathcal{S}(x)]$ 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、

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

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。

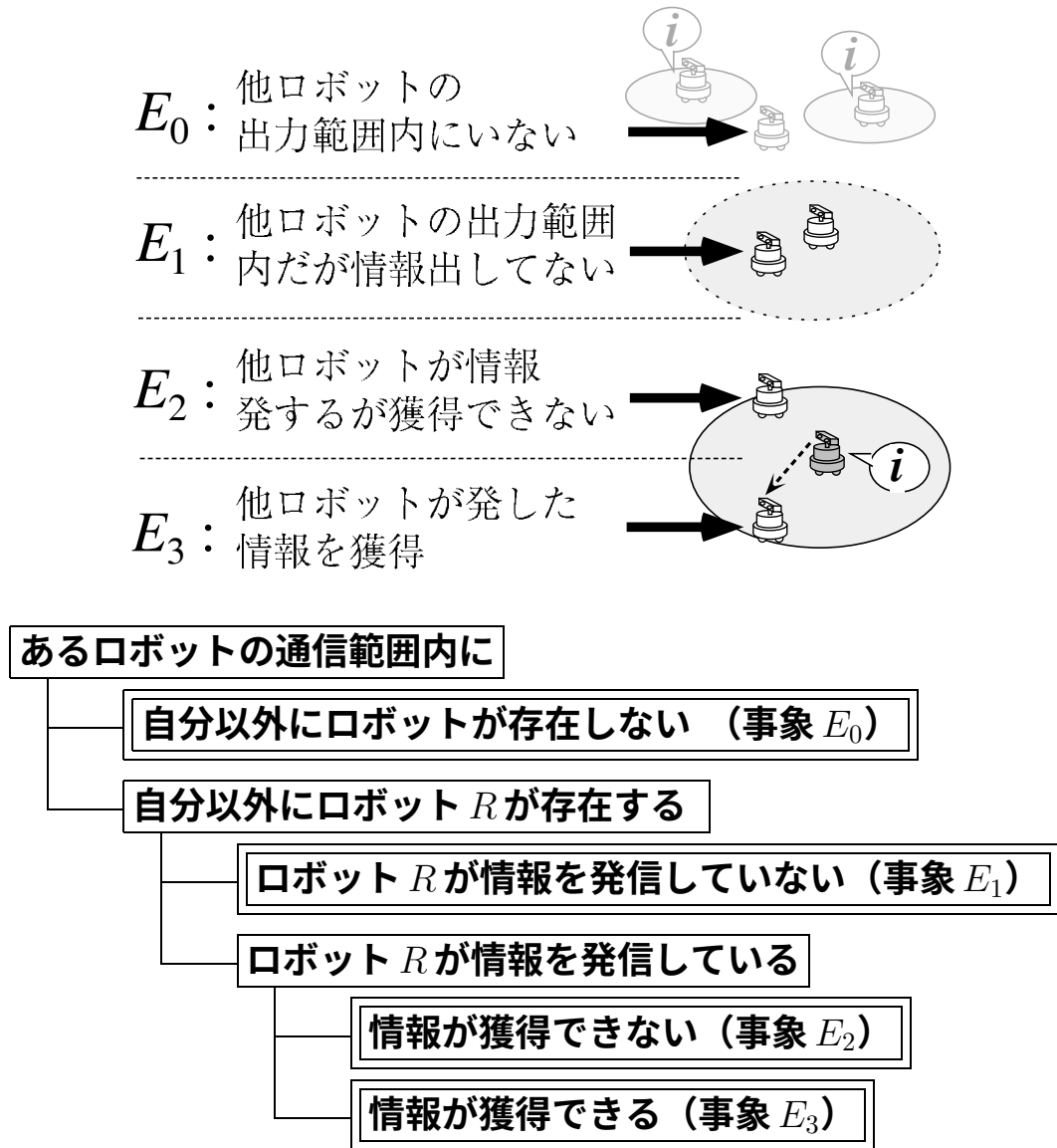


Fig. 4.16 情報を獲得するロボットの可能な事象

$P_I(E_i)$ 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で、 $i \leq c$, $j \leq i$ の全て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.

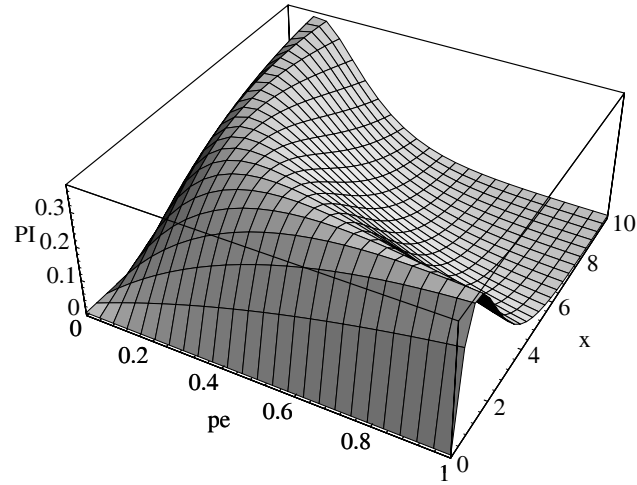


Fig. 4.17 情報獲得の確率 P_I と通信範囲 x , 情報出力確率 p_e の関係 (衝突あり, $c=1$)

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、ロボットが情報パケットを獲得したとき、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 $Q_{ij}(p_e, x)$

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

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 $P_I(c, p_e, x, t)$, $P_N(c, p_e, x, t)$ と書け、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、

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

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

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

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

と求められる．また，衝突なしの場合も同様に計算でき，

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

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。

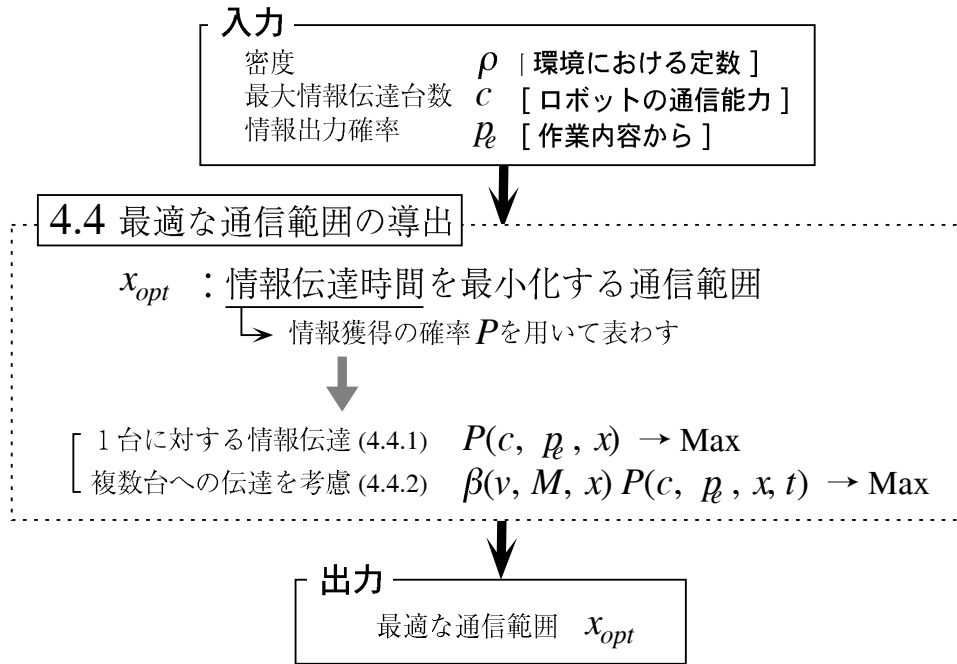


Fig. 4.18 最適な通信範囲 x_{opt} の導出

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

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

↓

W を最小化する最適な通信範囲 x_{opt}

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

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 [バーク 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定することにより, 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。

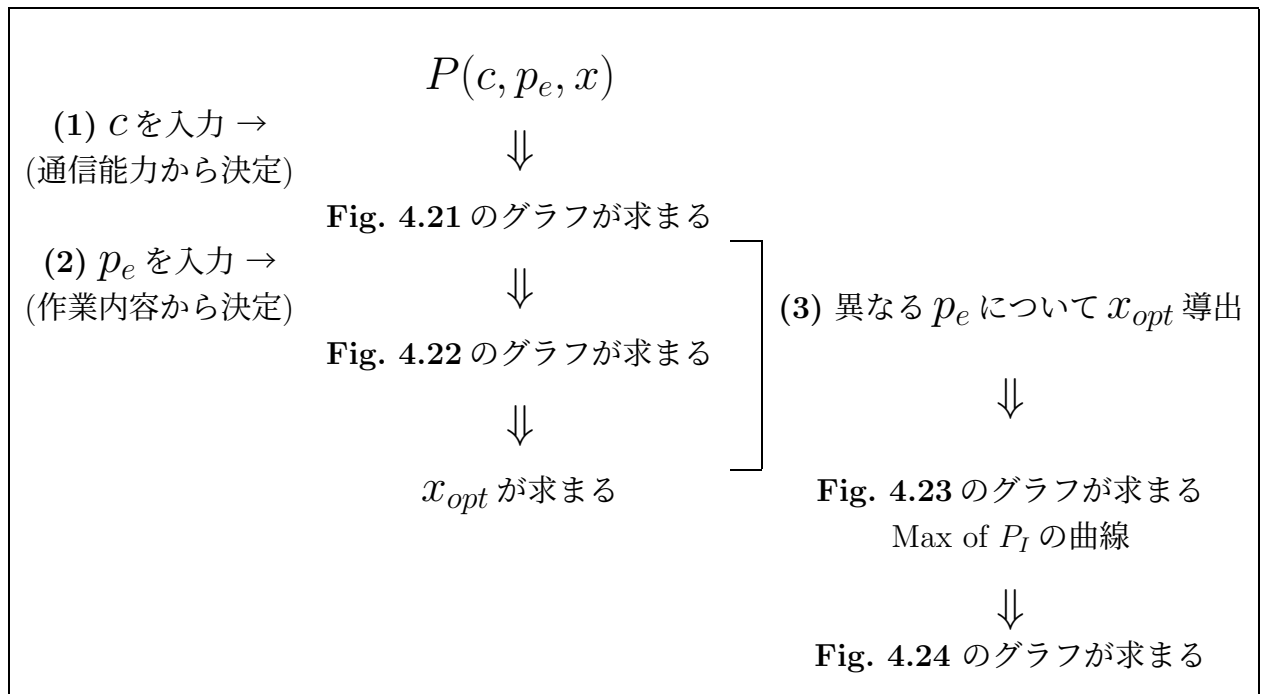
Fig. 4.20 $P(c, p_e, x)$ を最大化する通信範囲 x の導出手順

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.

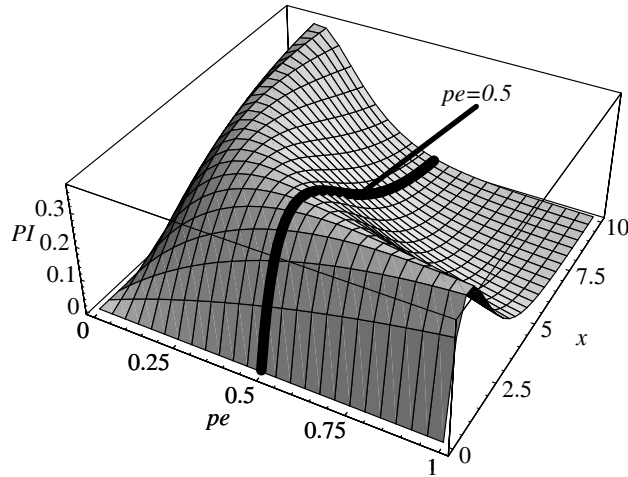


Fig. 4.21 P_I と (x, p_e) の関係 (ランダム探索, 衝突あり, $c=1$)

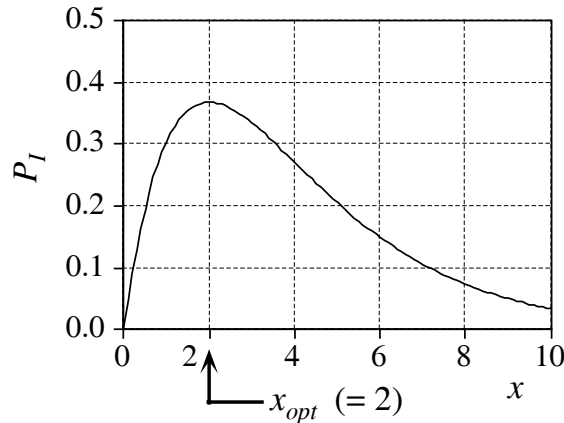


Fig. 4.22 P_I と x の関係 (ランダム探索, 衝突あり, $c=1, p_e=0.5$)

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。

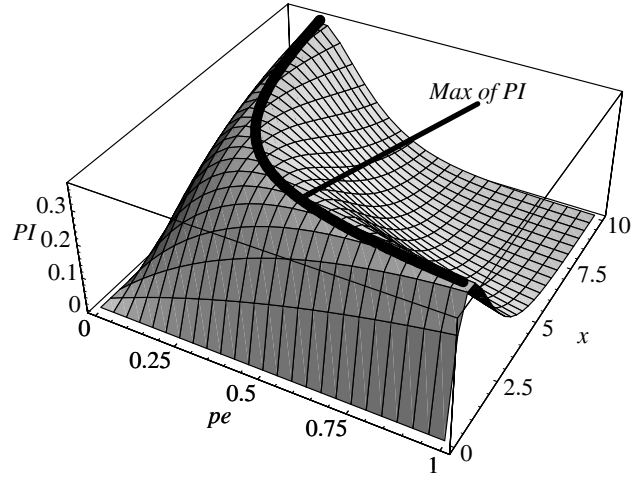


Fig. 4.23 与えられた p_e に対して P_I を最大化する x_{opt} を表す曲線 (ランダム探索, 衝突あり, $c=1$)

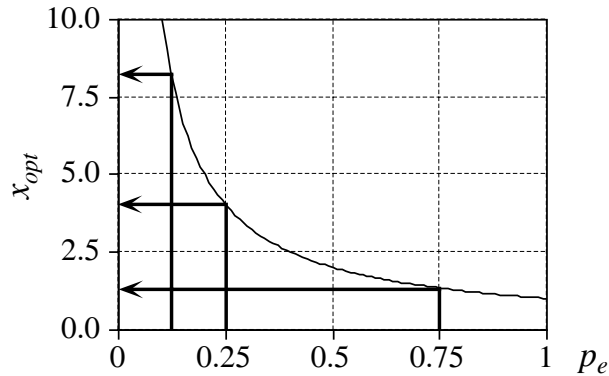


Fig. 4.24 x_{opt} と p_e の関係 (ランダム探索, 衝突あり, $c=1, p_e=0.5$)

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 $Prob[i|i \in \mathcal{S}(x)]$ 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。

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

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

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

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.

$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$ 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,

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

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,

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

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

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、

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

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、

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

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

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

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

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

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。

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

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

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。

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

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。最大情報伝達台数 $c=1$ 、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

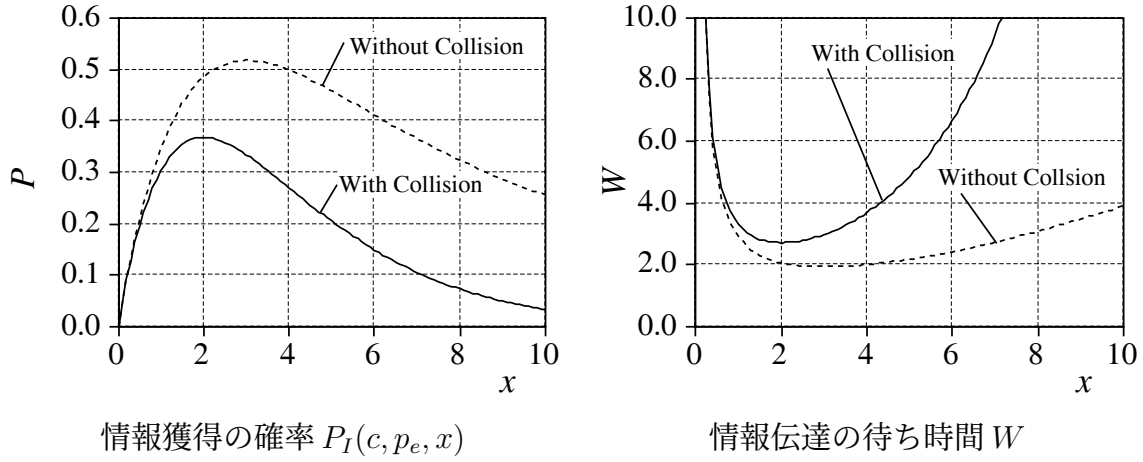


Fig. 4.25 ランダム探索における 情報獲得の確率 P_I と伝達時間 W
 $(c=1, p_e=0.5)$

て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 に関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.

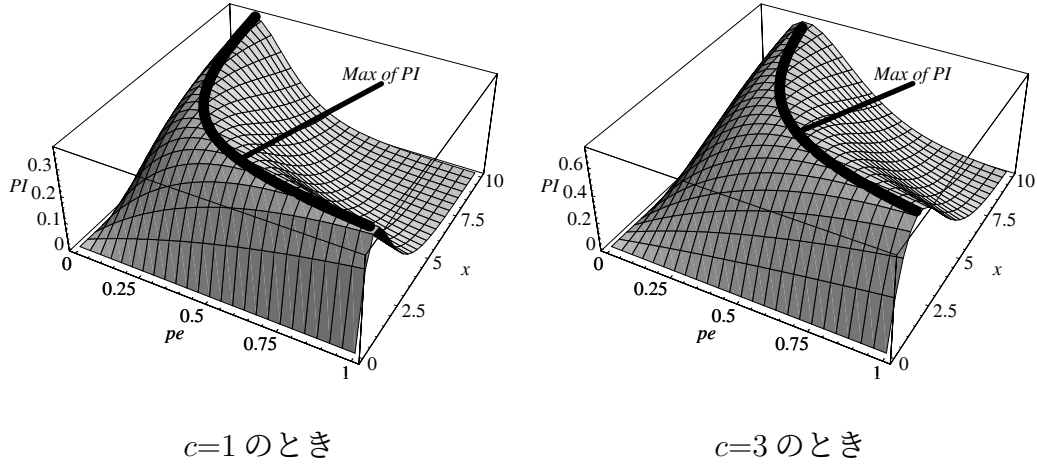


Fig. 4.26 c が変化したとき, p_e と x_{opt} の関係を表す曲線 (ランダム探索, 衝突あり)

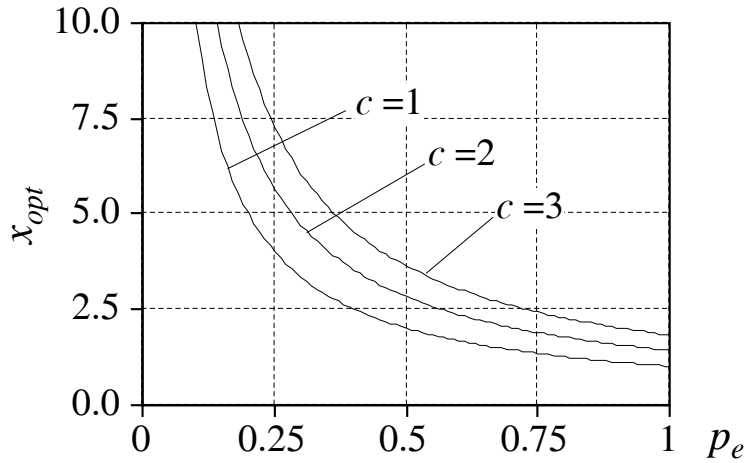


Fig. 4.27 c を変化させたときの x_{opt} と p_e の関係

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.

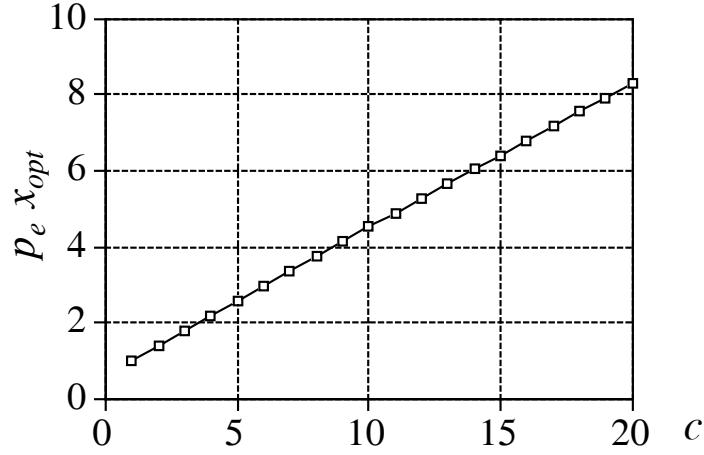


Fig. 4.28 反比例の定数 $p_e x_{opt} = F_I(c)$ と c の関係

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。

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

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

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

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. 4.25 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。

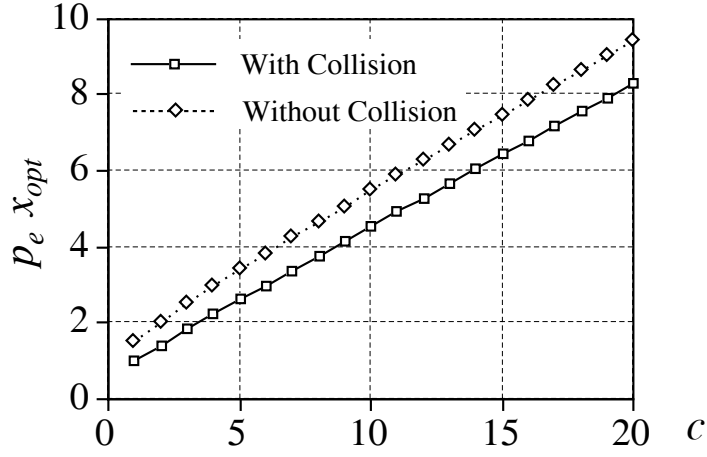


Fig. 4.29 反比例の定数 $F_N(c)(=p_e x_{opt})$ と c との関係

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 $\text{Prob}[i|i \in \mathcal{S}(R_c)]$ 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 $\text{Prob}[i|i \in \mathcal{S}(R_c)]$ を表す式 (4.4) を再び示す。

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

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

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

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、 $R_{c_{opt}}$ 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

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

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。

$$\sum_{i=j}^{m-1} {}_{m-1}C_i \nu^i (1-\nu)^{m-1-i} {}_iC_j p_e^j (1-p_e)^{i-j} \quad (4.49)$$

まず、式 (4.49) で、二項係数の積は、次のように変形できる。

$${}_{m-1}C_i {}_iC_j = {}_{m-j-1}C_{i-j} {}_{m-1}C_j \quad (4.50)$$

これを用いて、式 (4.49) を変形すると、

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

となる．ここで，式 (4.51) の総和部分は二項分布に等しく，

$$\begin{aligned} \sum_{i=j}^{m-1} {}_{m-j-1}C_{i-j} \{\nu(1-p_e)\}^{i-j} (1-\nu)^{m-1-i} &= \sum_{i=0}^{m-j-1} {}_{m-j-1}C_i \{\nu(1-p_e)\}^i (1-\nu)^{m-j-1-i} \\ &= \{\nu(1-p_e) + (1-\nu)\}^{m-j-1} \\ &= (1-\nu p_e)^{m-j-1} \end{aligned} \quad (4.52)$$

と簡単化できる．式 (4.52) を式 (4.51) に代入して，式 (4.49) は

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

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 $P_I(c, p_e, R_c, m)$

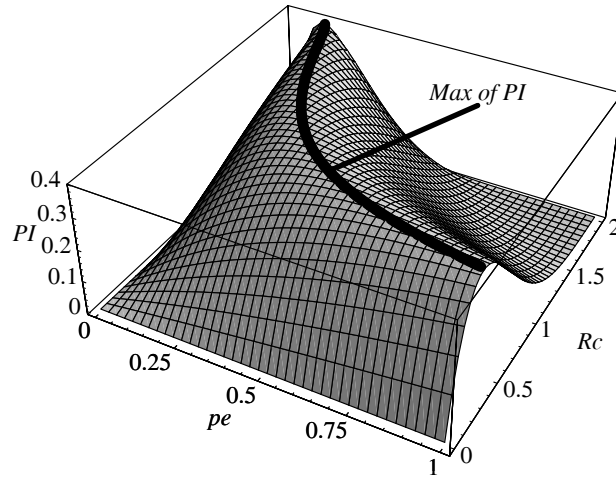


Fig. 4.30 与えられた p_e に対して P_I を最大化する $R_{c_{opt}}$ を表す曲線 (協調搬送，ロボット総数 $m=10$ ，衝突あり， $c=1$)

を最大とする $R_{c_{opt}}$ 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 $R_{c_{opt}}$ 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。

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

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

(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

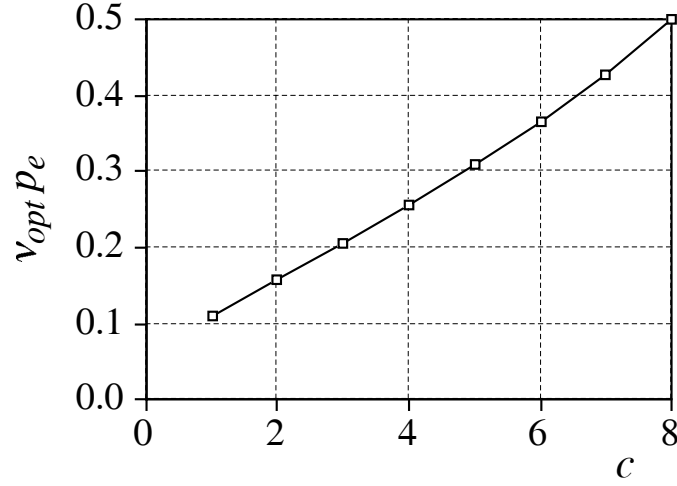


Fig. 4.31 反比例の定数 $F_I(m, c) = \nu_{opt} p_e$ と c の関係 (ロボット総 $m=10$)

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．

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

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

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 ” で示された曲線を (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．

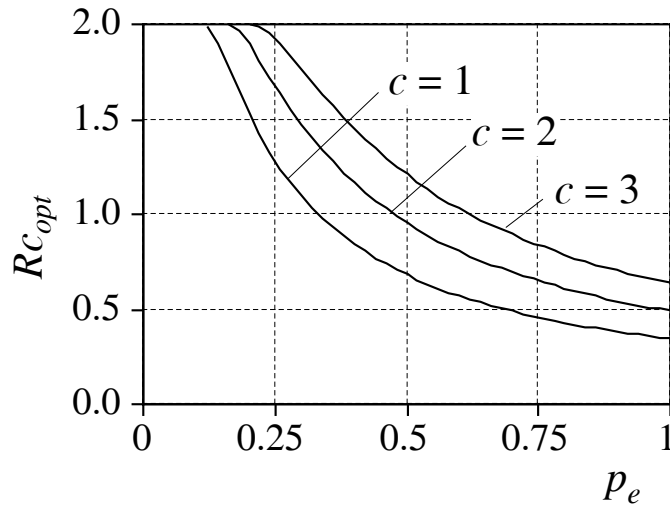


Fig. 4.32 c を変化させたときの $R_{c_{opt}}$ と p_e の関係 (衝突あり, ロボット総数 $m=10$)

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 $R_{c_{opt}}$ 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.

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 $\text{Prob}[i|i \in \mathcal{S}(x)]$ 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 ” $\rightarrow$ 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 $\text{Prob}[i|i \in \mathcal{S}(x)]$ 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。

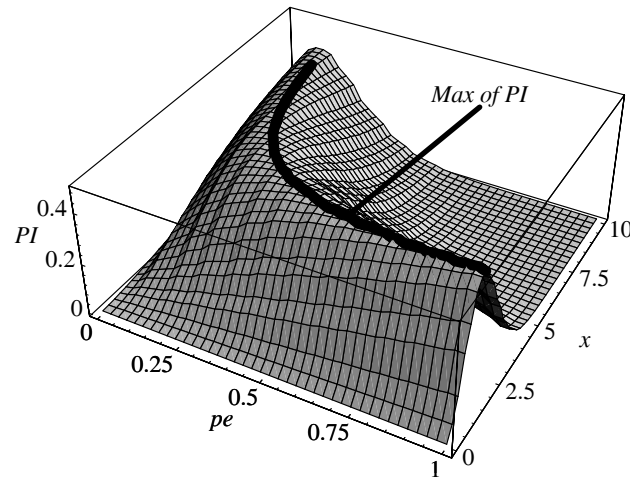


Fig. 4.33 情報獲得の確率 P (分割された領域の探索, $c=1$, 衝突あり)

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 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 ν_{opt} の値が p_e に反比例すること

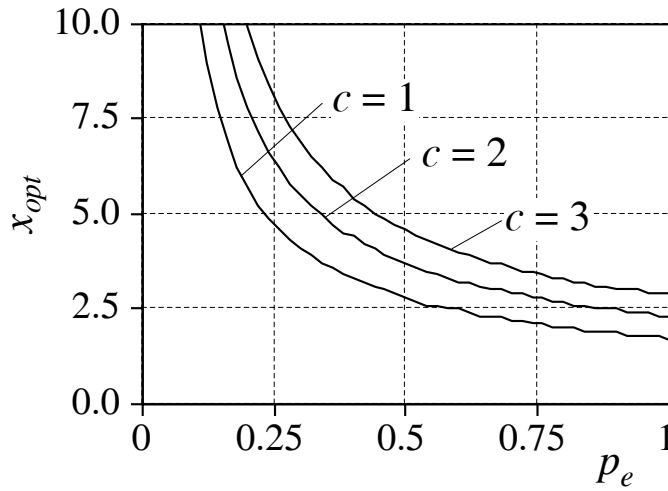


Fig. 4.34 c を変えたときの x_{opt} と p_e との関係 (分割された領域の探索)

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 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.

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}

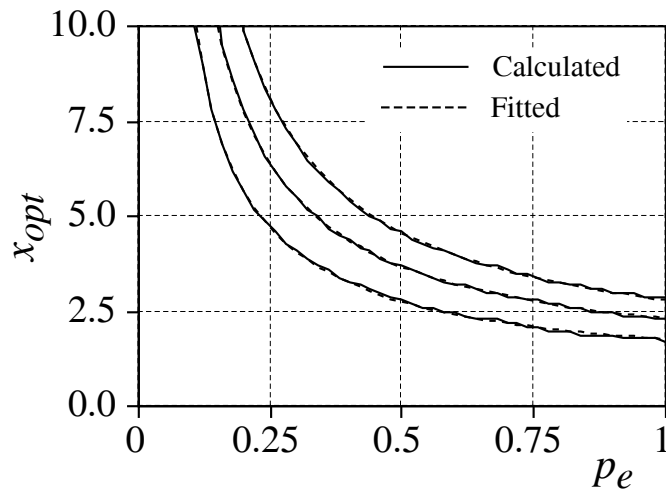


Fig. 4.35 式 (4.61) のモデルの x_{opt} への当てはめ ($c=1\sim3$)

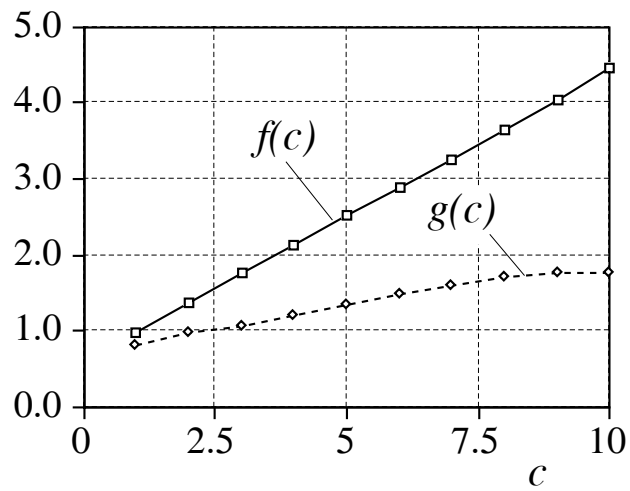


Fig. 4.36 式 (4.61) における係数 $f(c)$, $g(c)$ (分割された領域の探索)

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、複数台への情報伝播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播に与える影響を考慮し、また情報伝播の時間的性質を解析しなければならない。これらは、5 章の情報伝播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 に譲ることにする。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できる。

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なわない。

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。

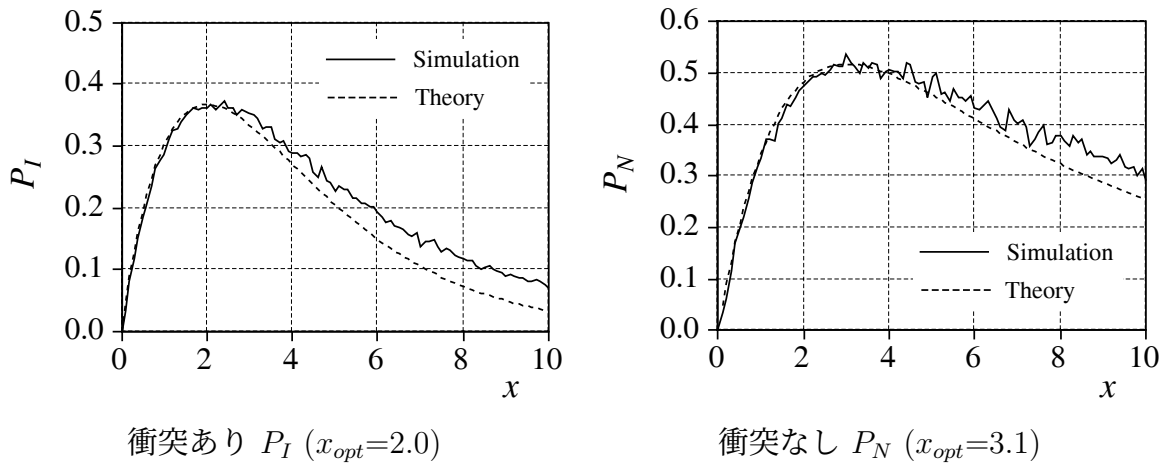


Fig. 4.37 情報獲得の確率 P のシミュレーション結果 ($c=1, p_e=0.5$)

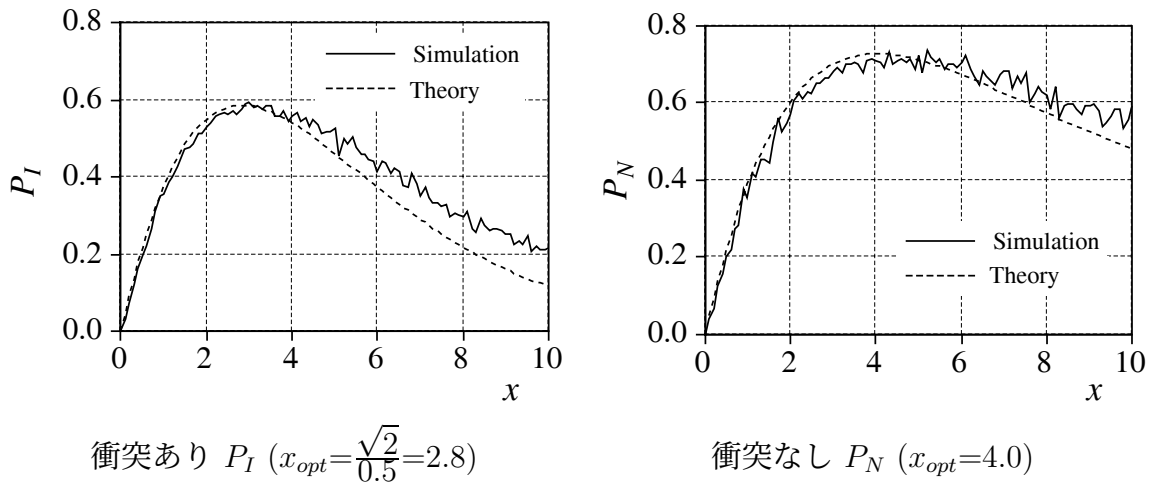


Fig. 4.38 情報獲得の確率 P のシミュレーション結果 ($c=2, p_e=0.5$)

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 の逆数として求まる。

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。

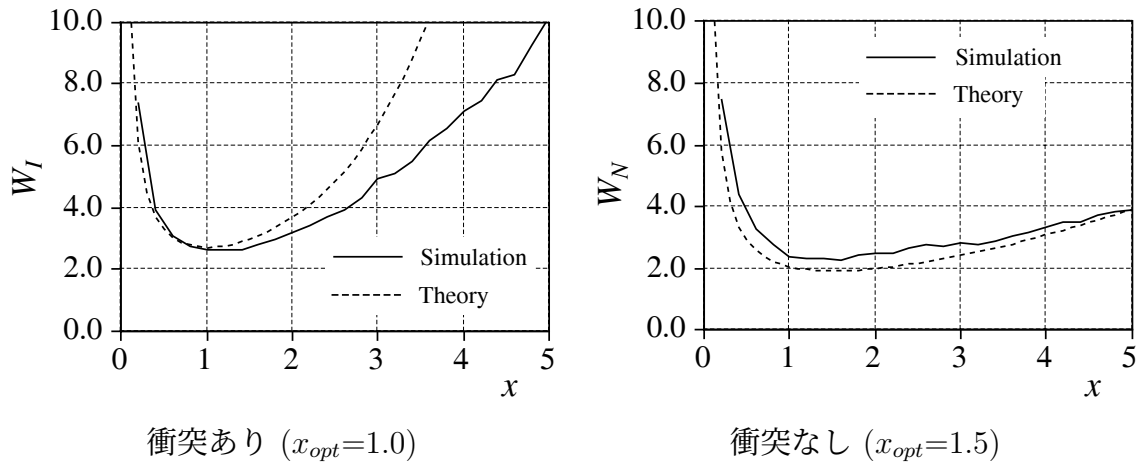


Fig. 4.39 情報獲得の待ち時間 W のシミュレーション結果 ($c=1, p_e=1.0$)

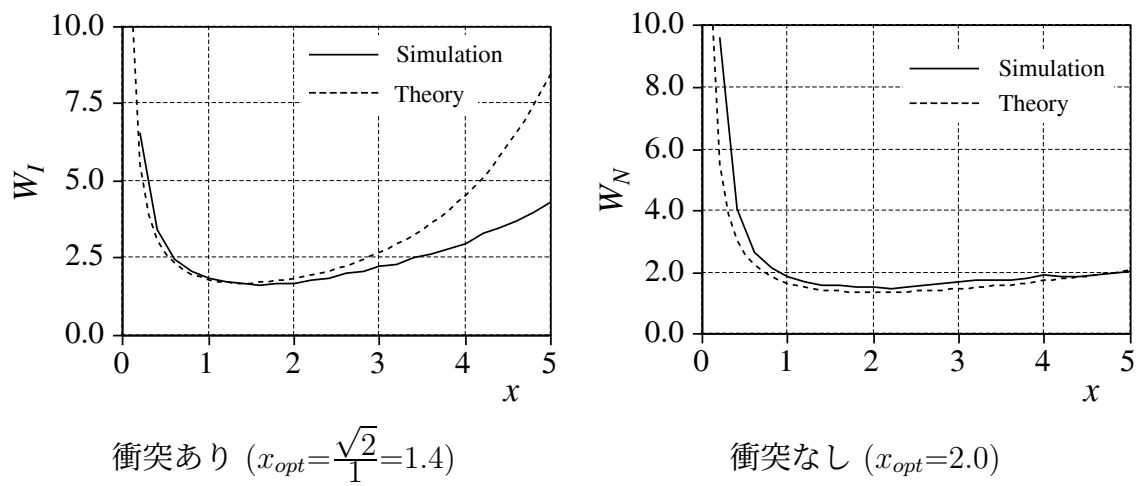


Fig. 4.40 情報獲得の待ち時間 W のシミュレーション結果 ($c=2, p_e=1.0$)

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。

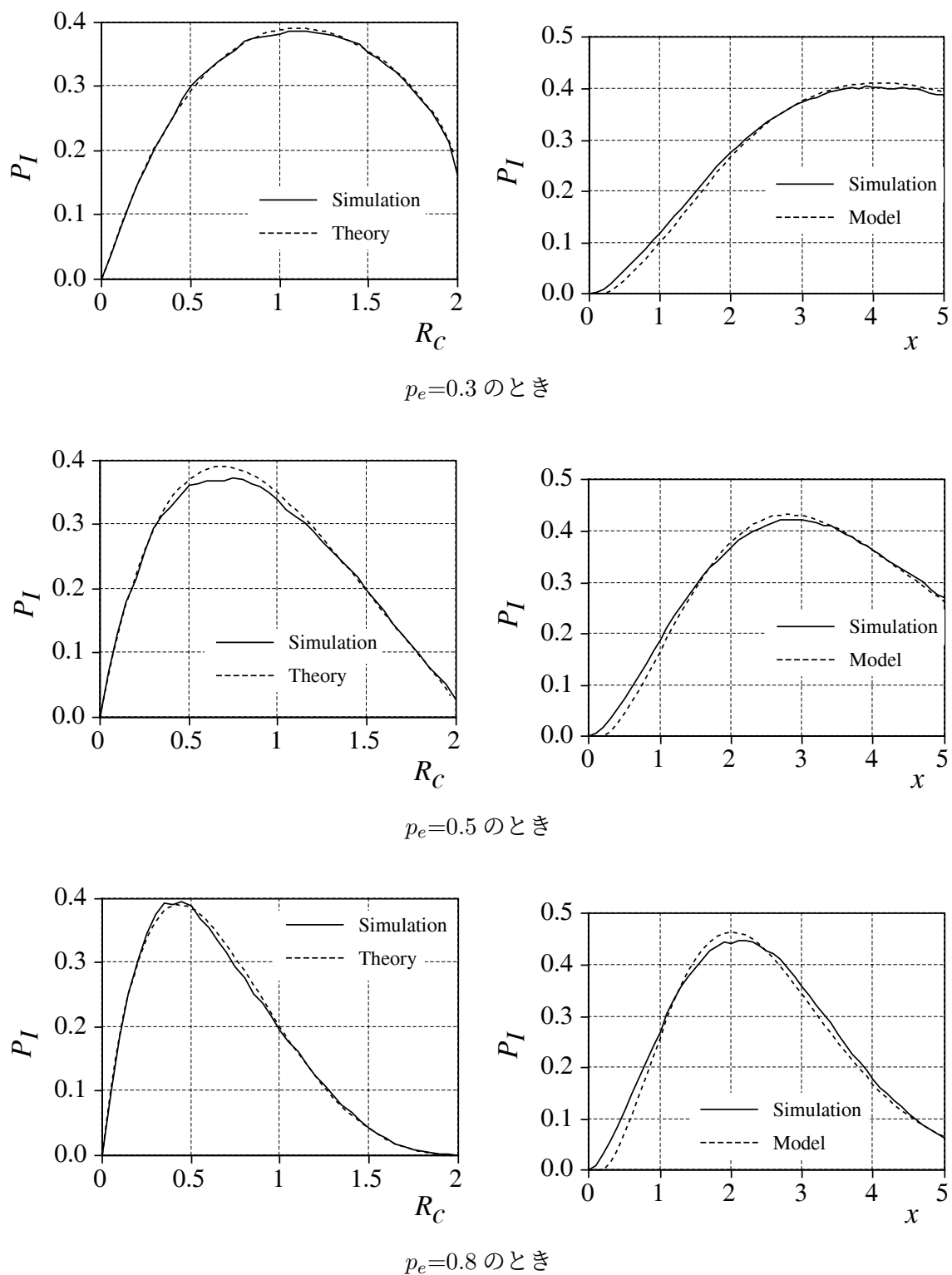
ただ、解析から導出した最適な通信範囲の付近ではモデルは十分正確であるので、最適な通信範囲の設計には影響しない。

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に実現し、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_{copt} 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。

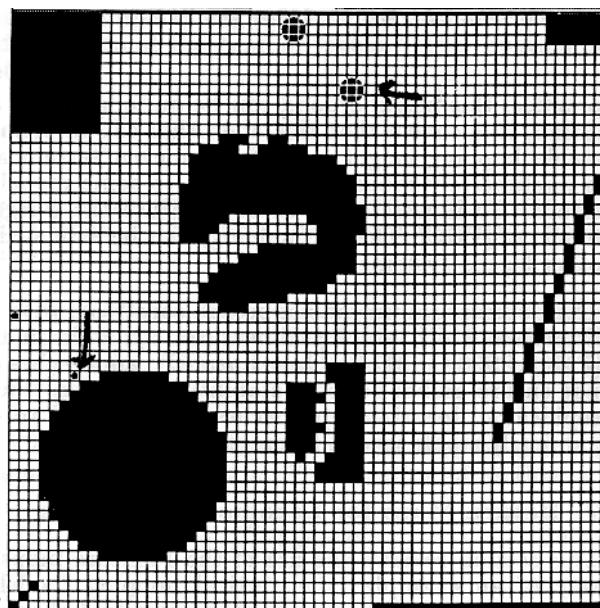


Fig. 4.42 複数ロボットによる探索・地図生成作業環境 [Singh93]

これらを考慮し，通信に用いる情報 packets を Fig. 4.43 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]
	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 packets

ここでヘッダ部は，4.6 節であとで述べるように，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] を基準に考え、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	2400[bps]
		19200[bps]
v	ロボットの移動速度	$1.0 [\text{グリッド}/t_u]$ (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 $t_u[\text{sec}]$ として、

$$W = 2.71t_u$$

である．実際の待ち時間は，転送速度が $2400[\text{bps}]$ のときは $5.05[\text{sec}]$ ， $19200[\text{bps}]$ のときは $0.62[\text{sec}]$ 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[byte]×10 = 80[byte]	= 640[bit]
各ロボットの 位置情報 (10 台分)	ロボット 1 ... 円周上の θ 座標: Float 型, 10 台分 ロボット j ... ロボット 10	4[byte] × 10 = 40 [byte]	= 320[bit]
合計		136[byte]	=1088[bit]

Fig. 4.44 協調搬送作業における情報パッケージ

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	$2 \times \frac{1088}{2400} = 0.91$ [sec]
		$2 \times \frac{1088}{19200} = 0.11$ [sec]

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

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 $R_{copt} = 1.37$ [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] となる．

以上まで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] 2400 0.23[sec] 19200	7.57 [グリッド]	2.71 5.05 0.62
協調搬送 [Ota95] (円形対象物，半径 2[m])	1088[bit]	0.91[sec] 2400 0.11[sec] 19200	1.37[m]	2.57 2.33 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関係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

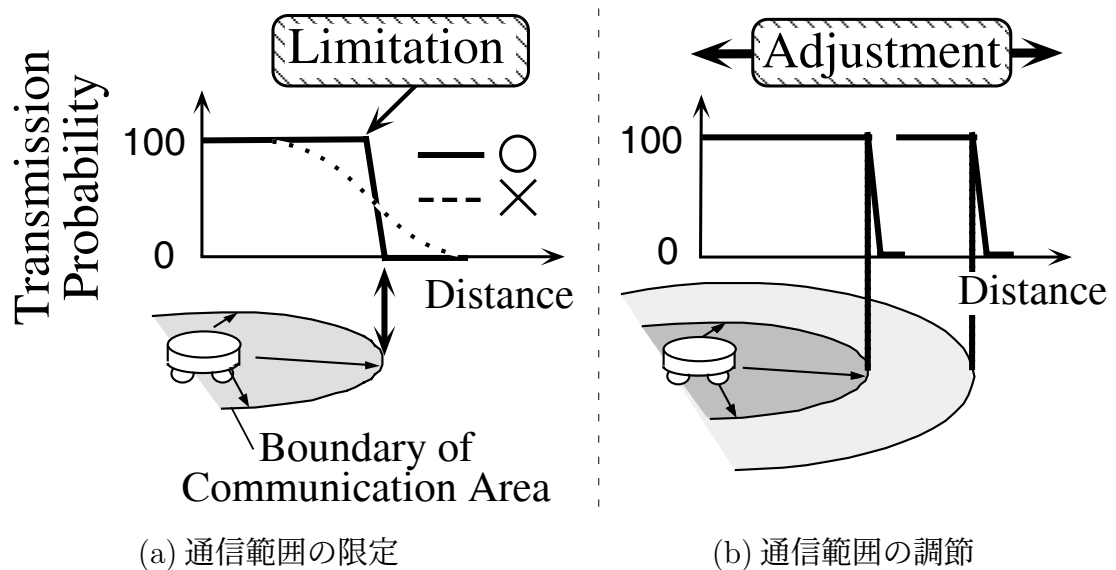


Fig. 4.45 通信範囲の限定と調節

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。

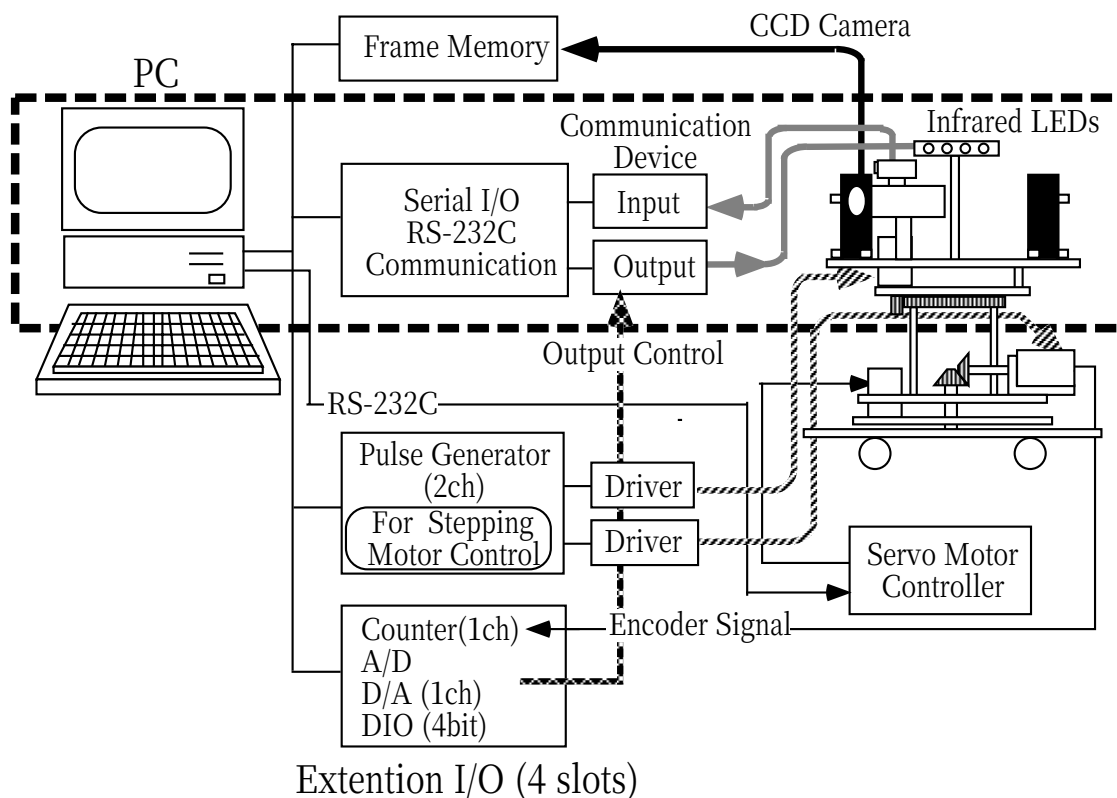


Fig. 4.46 赤外線を用いた通信実験装置の全体図

通信は赤外線 LED を用いて行なっており、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。

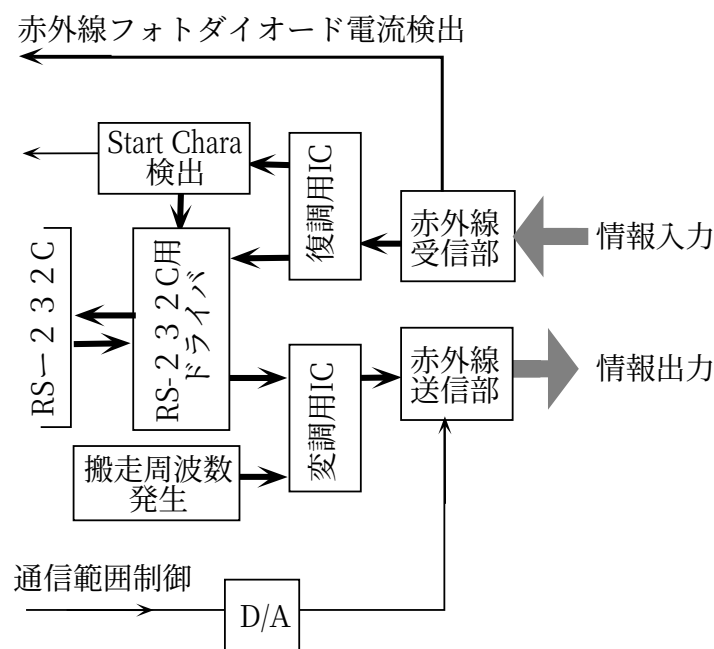


Fig. 4.47 通信部の構成

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]

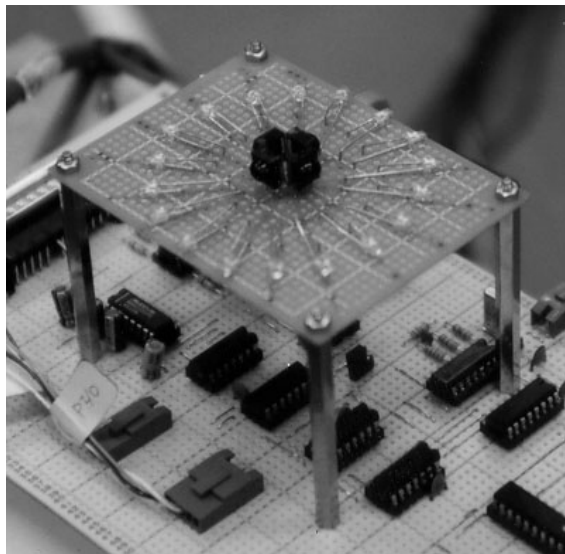


Fig. 4.48 赤外線通信装置

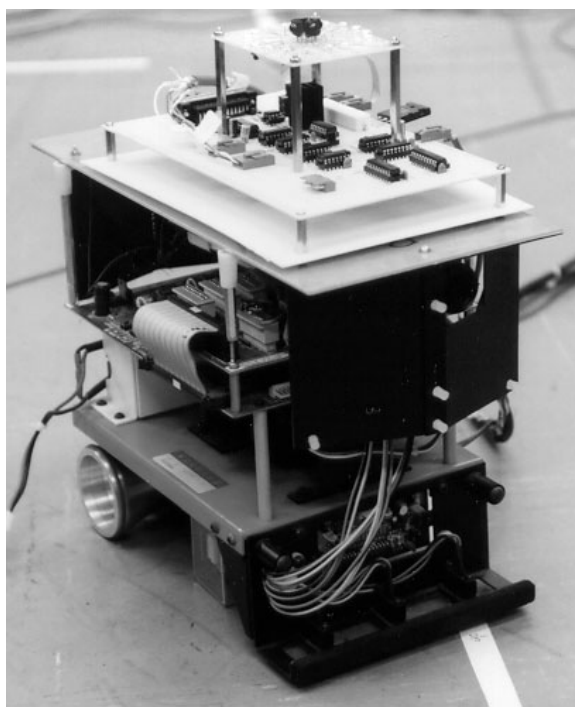


Fig. 4.49 移動ロボットに搭載した通信装置

通信速度 : 2400 bps

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 $\pm 45^\circ$ 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 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。

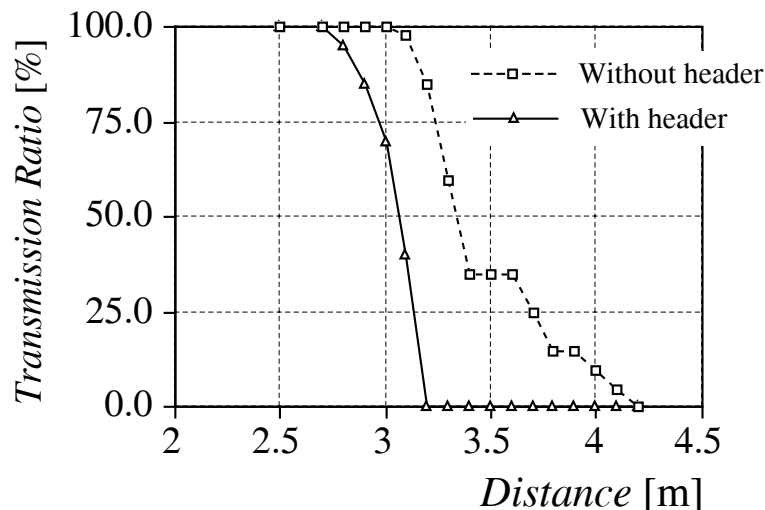


Fig. 4.50 通信の限定の実験：通信距離 (Distance) と情報伝達率 (Transmission Ratio) の関係

Fig. 4.50 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。

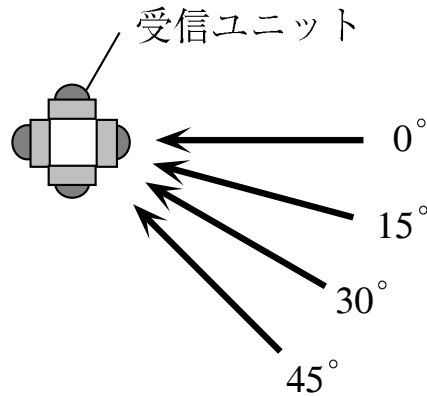


Fig. 4.51 赤外線受信ユニットに対する入射角

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、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。

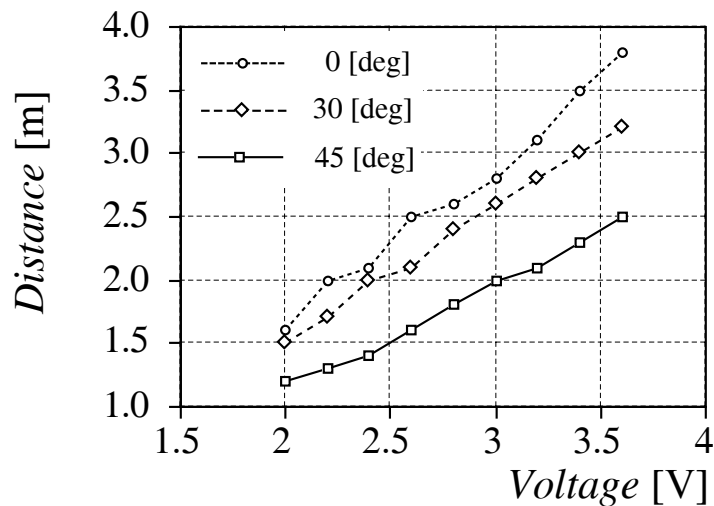


Fig. 4.52 通信距離 (Distance) と出力電圧 (Voltage) の関係

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

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

となる．

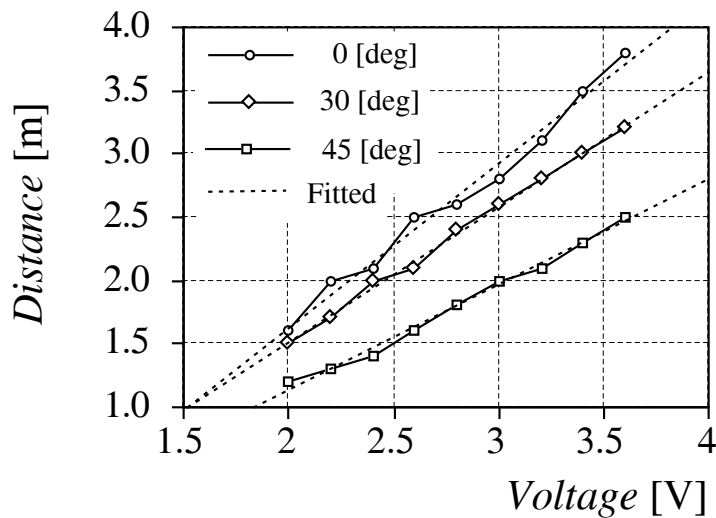


Fig. 4.53 通信距離 (Distance) と出力電圧 (Voltage) の関係の線形近似

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ないたいときに，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。

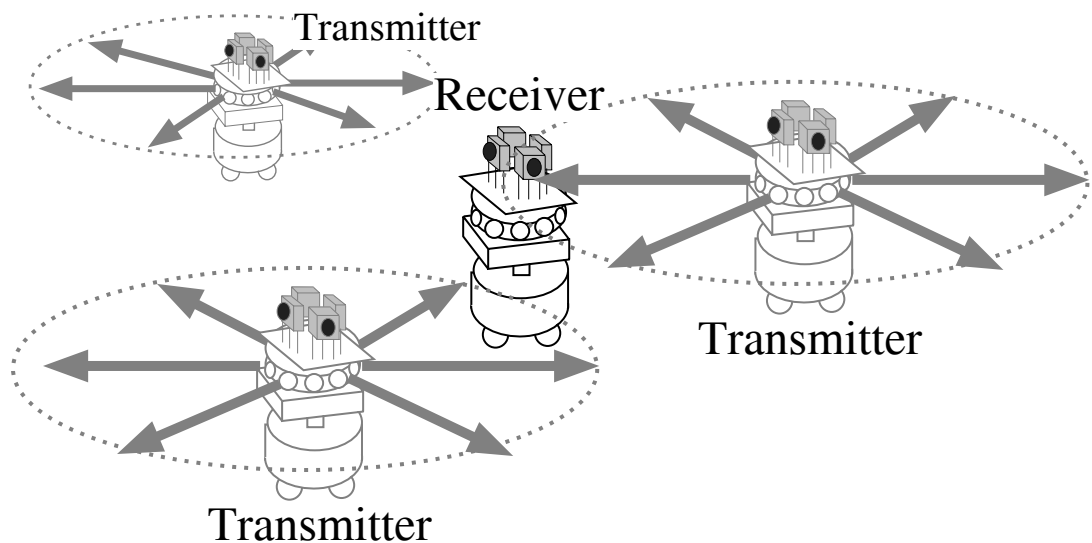


Fig. 4.54 最適な通信範囲検証の実験 (ランダム探索)

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

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

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 a °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けば，衝突が生じない

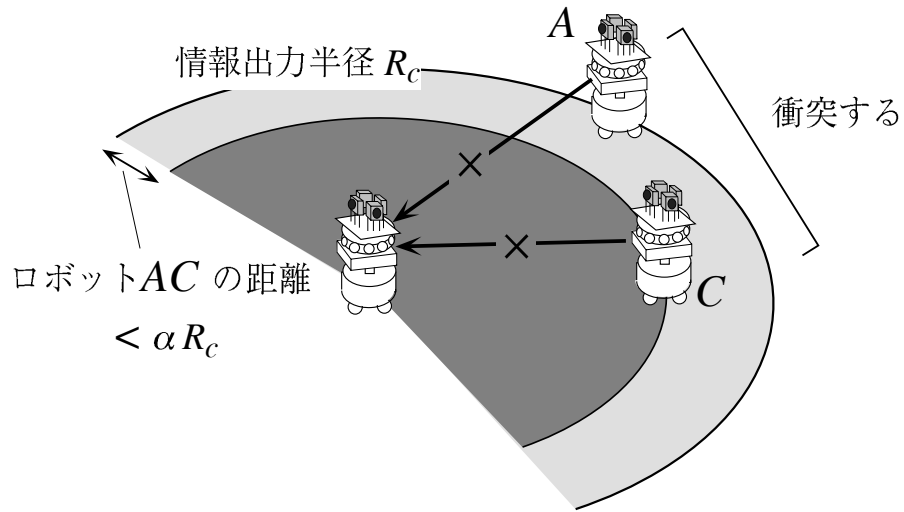


Fig. 4.55 赤外線を用いた局所通信装置で衝突が生じる場合

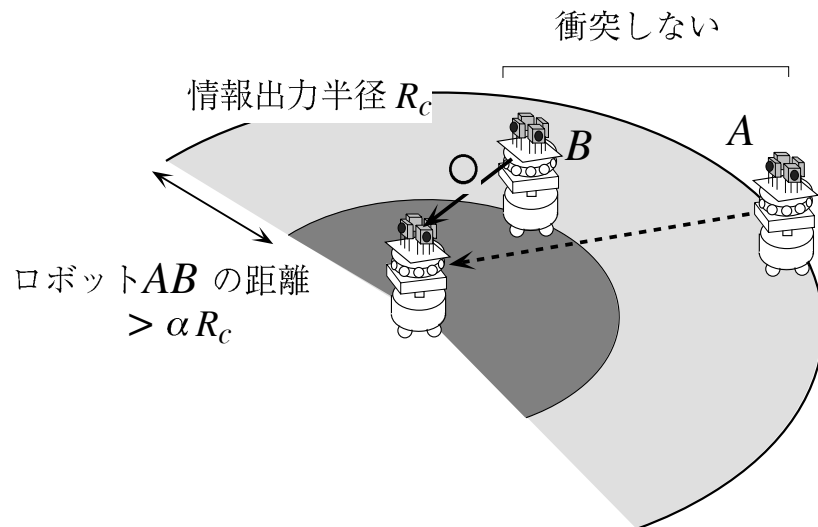


Fig. 4.56 赤外線を用いた局所通信装置で衝突が生じない場合

- 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

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

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

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 番目に近いものとの距離 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]。

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

また同様にして、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

$$\begin{aligned} \text{Prob}[R_2 - R_1 > \alpha R_c] &= \int_0^{\{R_c(1-\alpha)\}^2} \int_{(\sqrt{\xi+\alpha R_c})^2}^{R_c^2} \text{Prob}[\xi \leq R_1^2 < \xi + d\xi] \text{Prob}[\zeta \leq R_2^2 < \zeta + d\zeta] \\ &= \int_0^{\{R_c(1-\alpha)\}^2} \int_{(\sqrt{\xi+\alpha R_c})^2}^{R_c^2} (\rho \pi)^3 \zeta e^{-\rho \pi (\xi+\zeta)} d\xi d\zeta \end{aligned} \quad (4.71)$$

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。

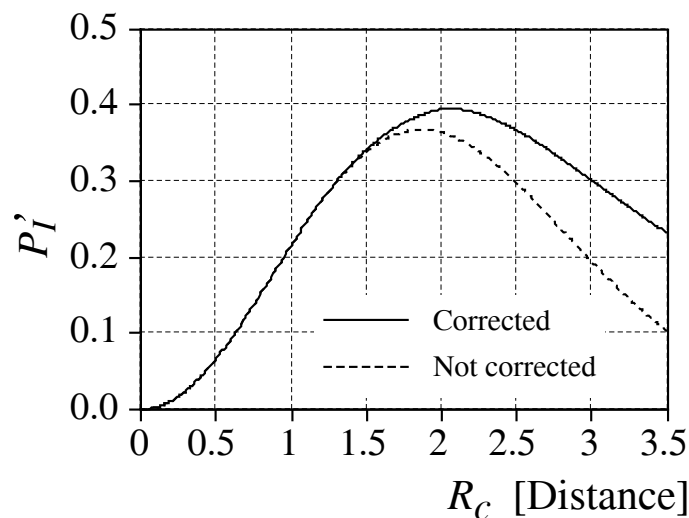


Fig. 4.57 赤外線による通信装置の衝突を考慮した情報獲得の確率

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_{Iexp} として用いる。

Fig. 4.58 に、測定された情報獲得の確率 P_{Iexp} (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_{Iexp} 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 $R_{copt}=2.03$ であり、十分近い値となっている。

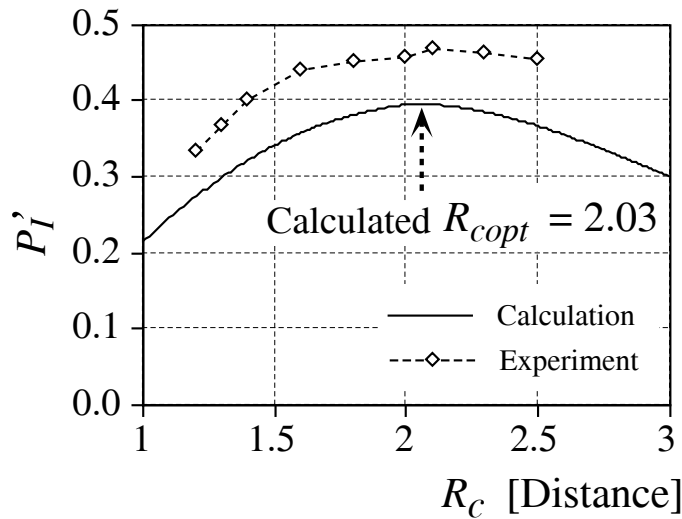


Fig. 4.58 情報獲得の確率の実験結果

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_{copt} 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 . . .	174
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調作業実行には、

- (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

の后者に焦点を当て、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。

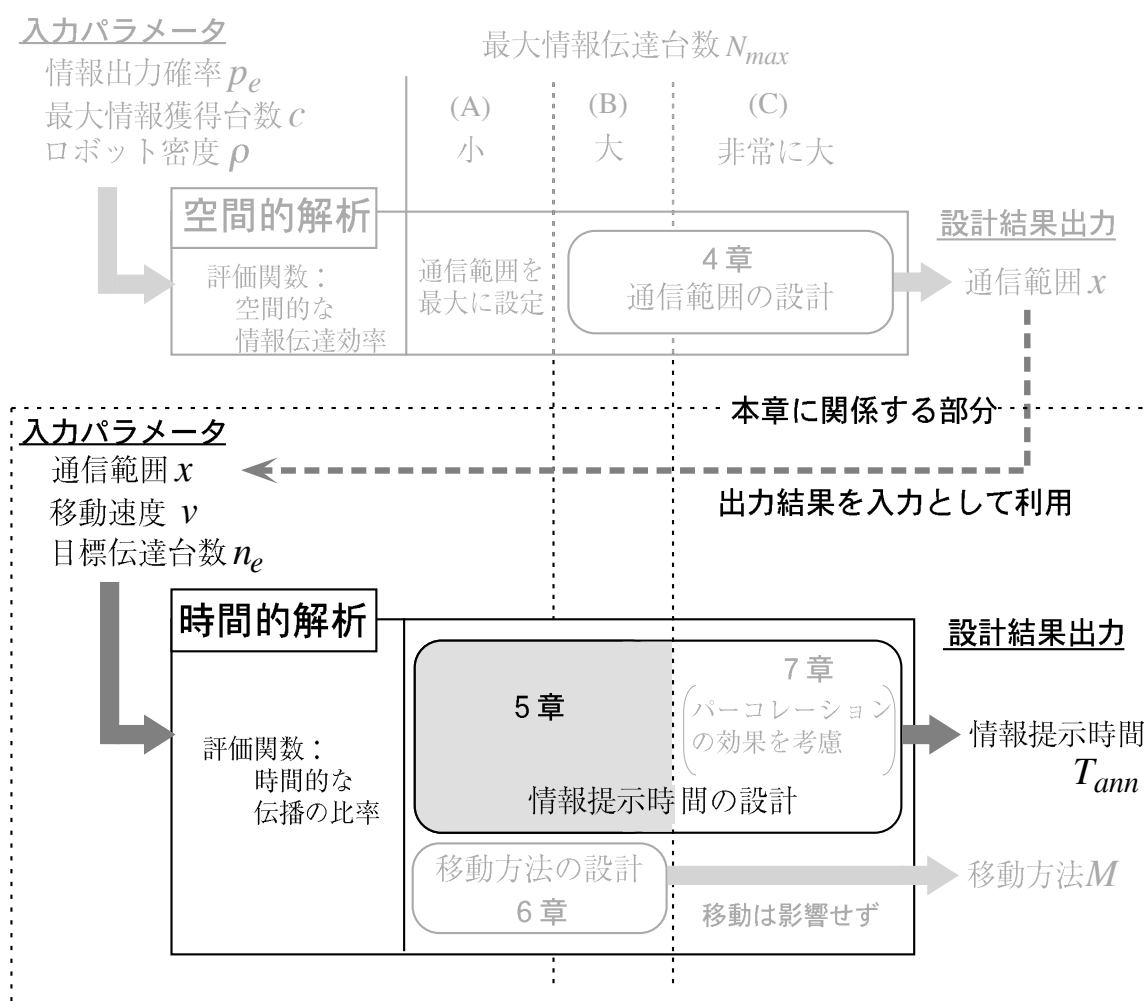


Fig. 5.1 局所的通信の解析・設計における本章の位置付け

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 節で示した一般的な環境のうち，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

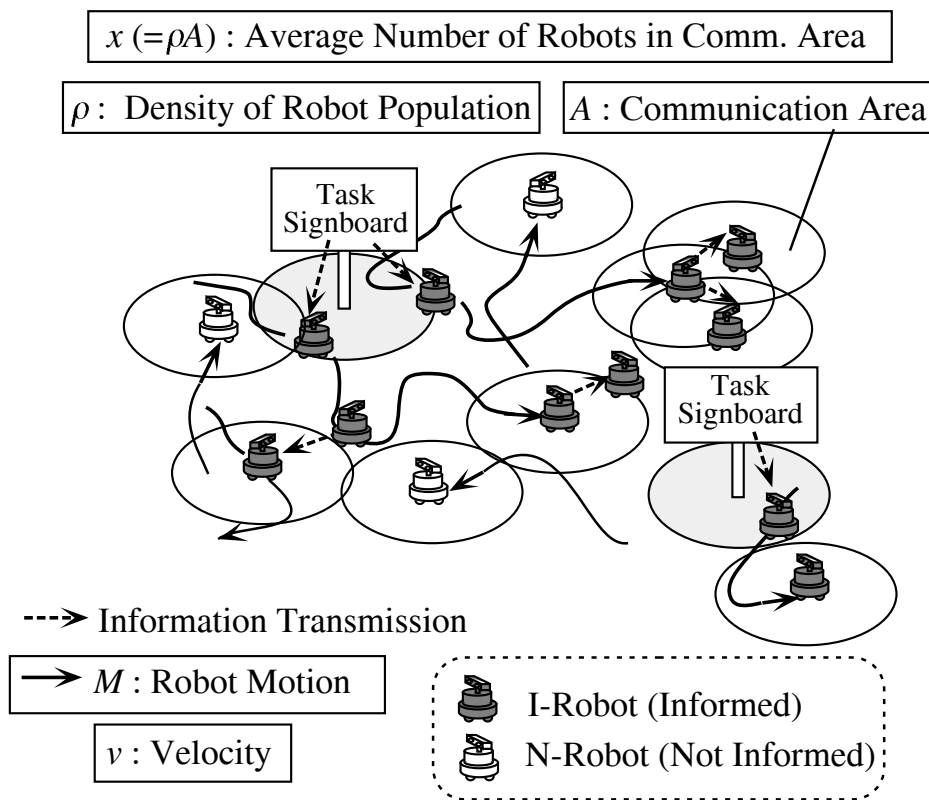


Fig. 5.2 局所的通信のパラメータ

ト」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、設計を行なって、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設計において、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
	$\mathcal{M}$	移動方法	
	n_e	目標伝達台数	作業内容
	x	通信範囲	$\begin{cases} \text{最大値 } x_{max} & (3.4 \text{ 節の分類 (A)}) \\ x_{opt}(4 \text{ 章で設計}) & (3.4 \text{ 節の分類 (B)(C)}) \end{cases}$
	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 $v, \mathcal{M}$ 、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。

$v, \mathcal{M}$ 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 $\mathcal{M}$ 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、 $\mathcal{M}$ 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 $\mathcal{M}$ 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。

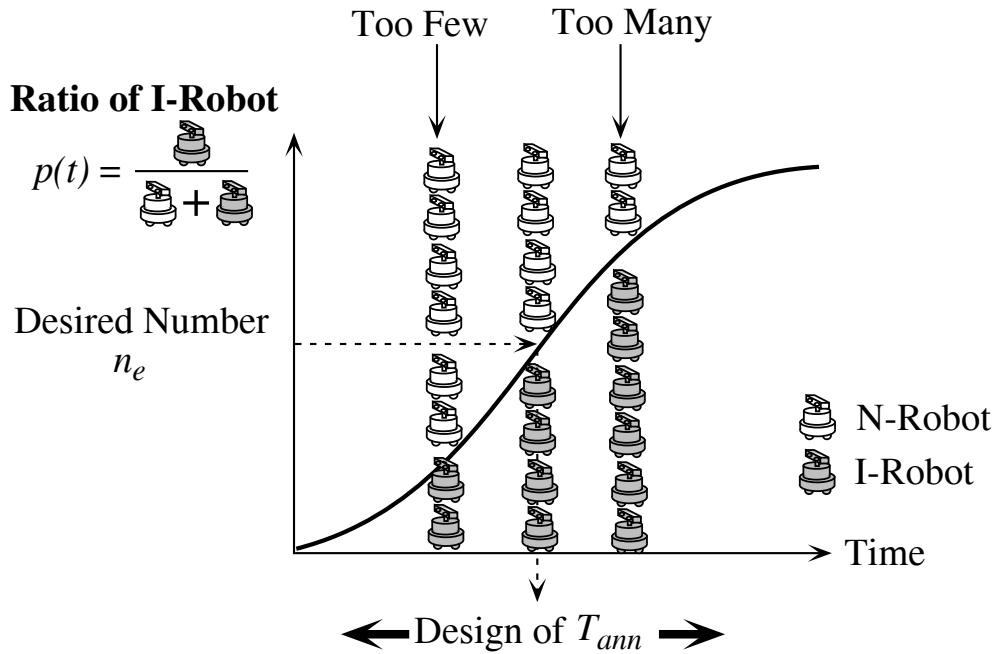


Fig. 5.3 目標伝達台数 n_e と T_{ann} の設計

3.2 節では、情報はパケット単位で伝えられ、作業情報周知の通信 (1) では、1つの情報パ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、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

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

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

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

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。

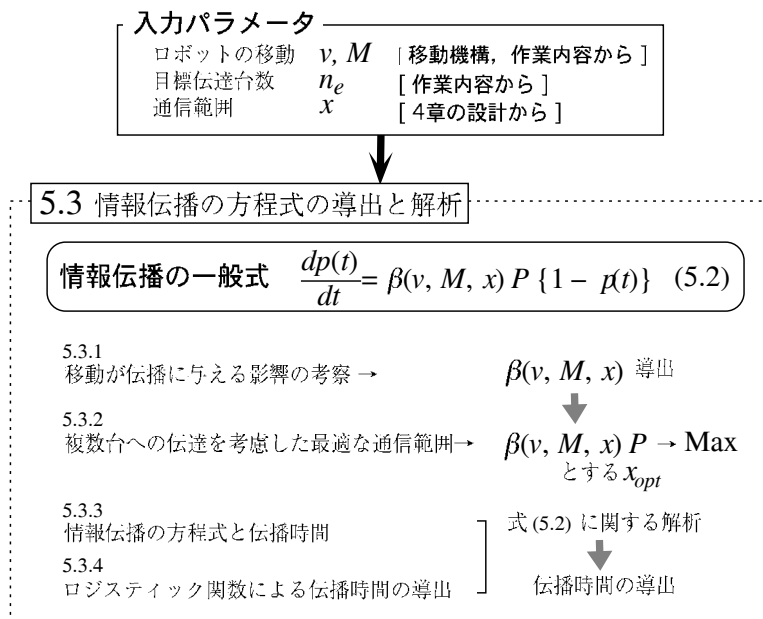


Fig. 5.4 情報伝播に関する解析の手順

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 $\beta(v, \mathcal{M}, x)$ 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 $\beta(v, \mathcal{M}, x)P$ 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 $\beta(v, \mathcal{M}, x)\Delta t$ 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 $\mathcal{M}$ 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 $\mathcal{M}$ などから求められるので、

$$S = S(R_c, \phi, \mathcal{M})$$

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。

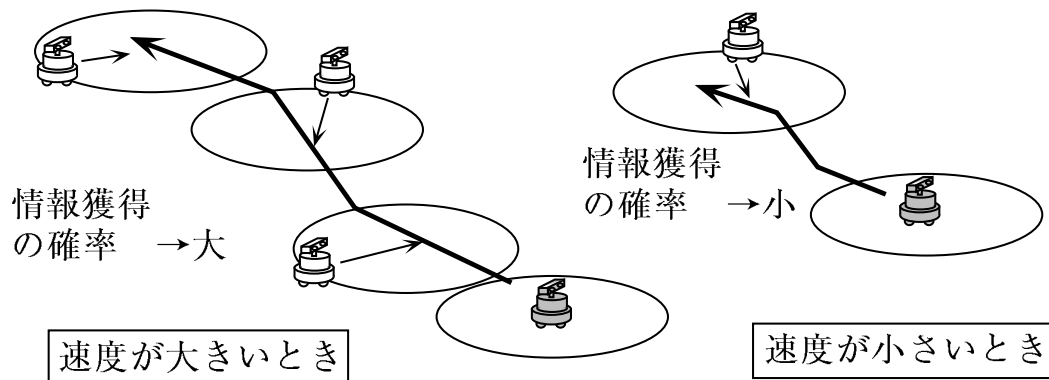


Fig. 5.5 速度 v が情報伝播に与える影響

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

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

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、

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

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ると考えられる。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

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

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

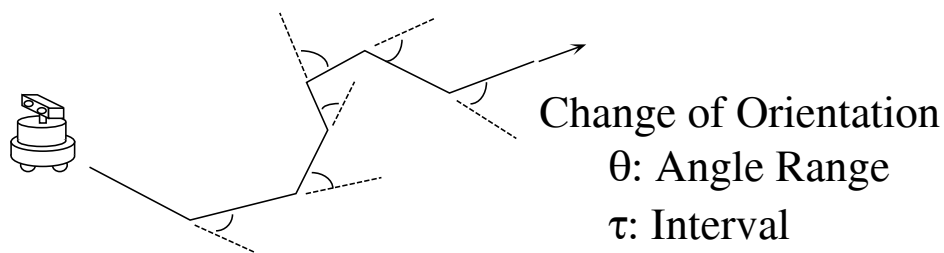


Fig. 5.6 ランダム移動 (再掲)

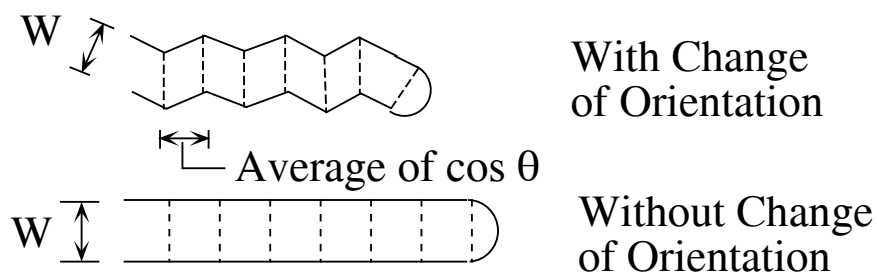


Fig. 5.7 ランダム移動による掃引面積に関する考察

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 $\beta(v, \mathcal{M}, x)$ 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 $\text{Prob}[i \mid i \in \mathcal{S}(x)]$ 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。

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

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、

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

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} が求める.
- (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.

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

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。

- (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。

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	$60^\circ, 3$

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

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

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.

また, $c=2$ のときには,

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

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.

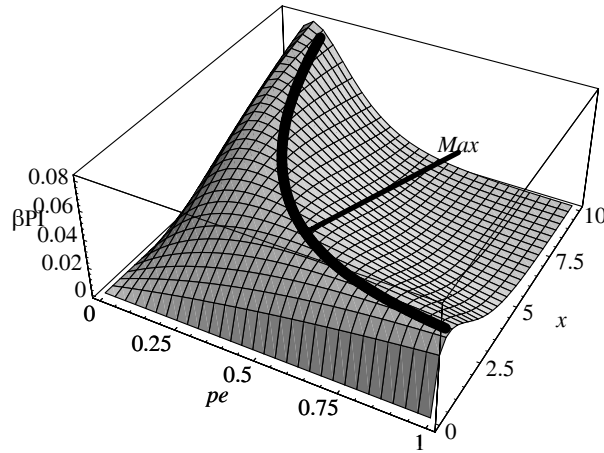


Fig. 5.8 βP と (x, p_e) の関係 (ランダム探索, 衝突あり, $c=1$)

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.

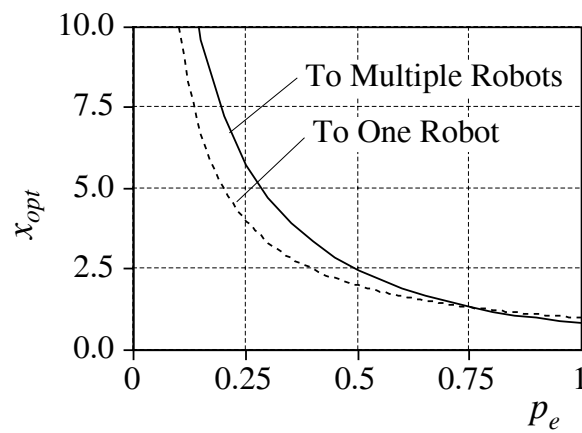


Fig. 5.9 p_e と x_{opt} の関係 (ランダム探索, 衝突あり, $c=1$)

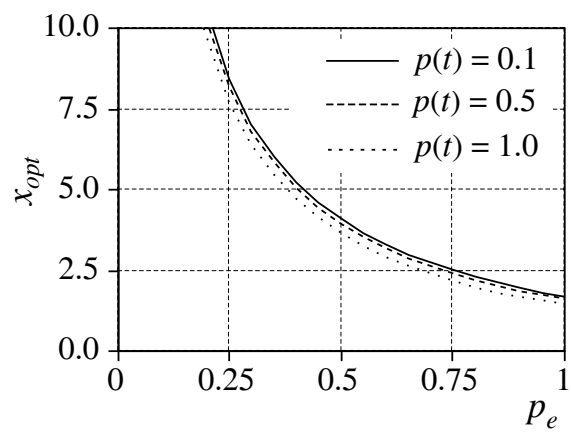


Fig. 5.10 p_e と x_{opt} の関係 [$p(t)$ 変化時](ランダム探索, 衝突あり, $c=2$)

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、

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

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

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

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

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

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 $p_e \cdot \text{I-Robot}$ 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

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

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

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、

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

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。

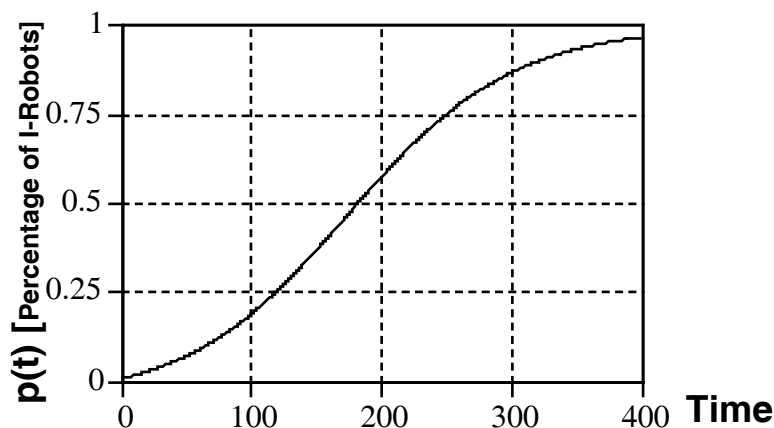


Fig. 5.11 ロジスティック関数. ($\beta=1.0$, $v=0.1$, $\rho=0.1$, $\rho_{sign}=0.005$, $R_c=1.0$
 $\phi=\pi$ [rad])

- (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、 $N = 0.7$ と非常に大きくとっても、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、 $N_{max} < 0.5$ 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，それにしただ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。

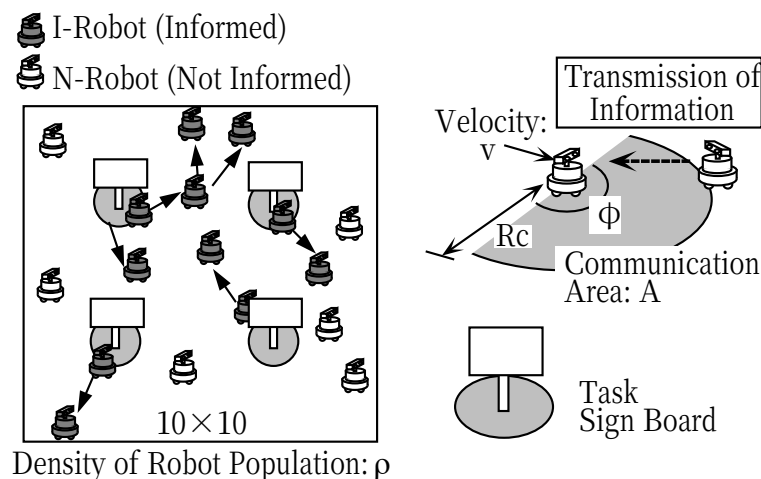


Fig. 5.12 シミュレーション環境

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．

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

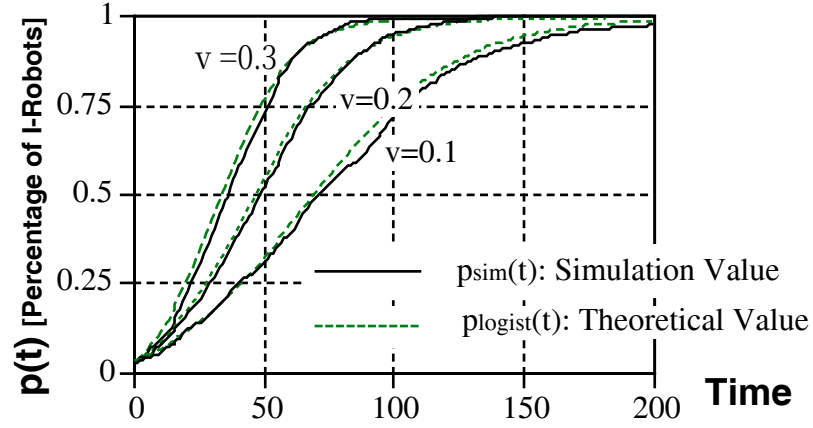
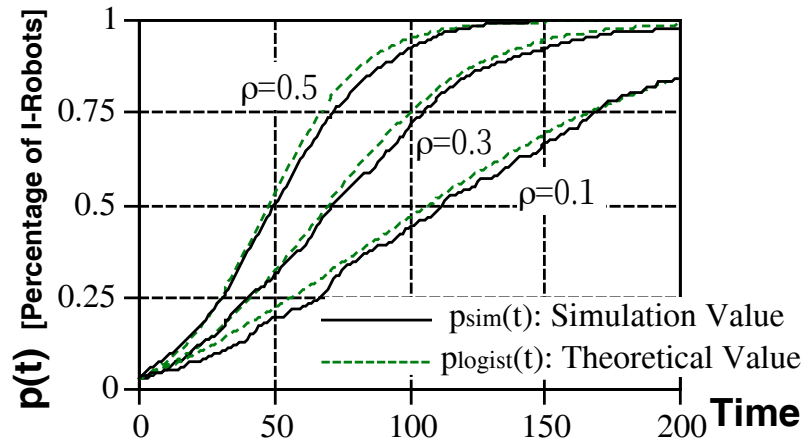
ρ (Density of Robot Population)	0.1 ~ 0.5
v (Velocity of Random Walking)	0.1 ~ 0.3
ρ_{sign} (Density of task signboards)	0.01
R_c (Radius of Communication Area)	1.0
ϕ (Visual Angle of Communication Area)	180[deg]
θ (Range of Orientation Change)	60[deg]
τ (Interval of Orientation Change)	2
β (Constant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

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．

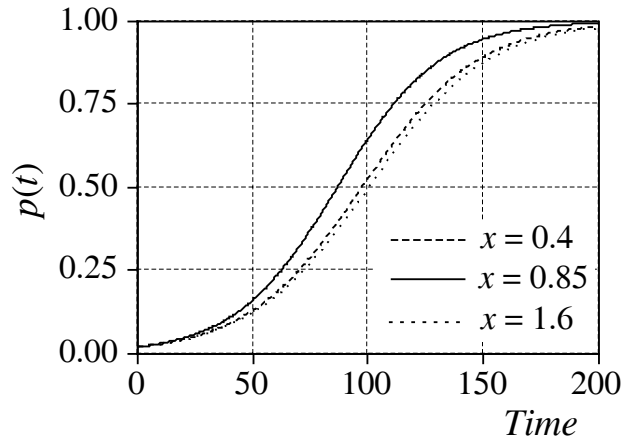


Fig. 5.15 情報伝播過程 $p(t)$ の計算結果 ($c=1$, $p_e=1.0$)

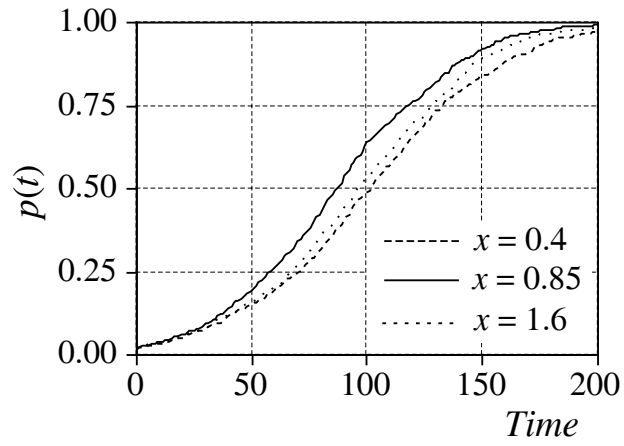


Fig. 5.16 情報伝播過程 $p(t)$ のシミュレーション結果 ($c=1$, $p_e=1.0$)

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 $t_u=0.23[\text{sec}]$ 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 $\times 10$) 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，作業地点に近い作業を選択し，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．

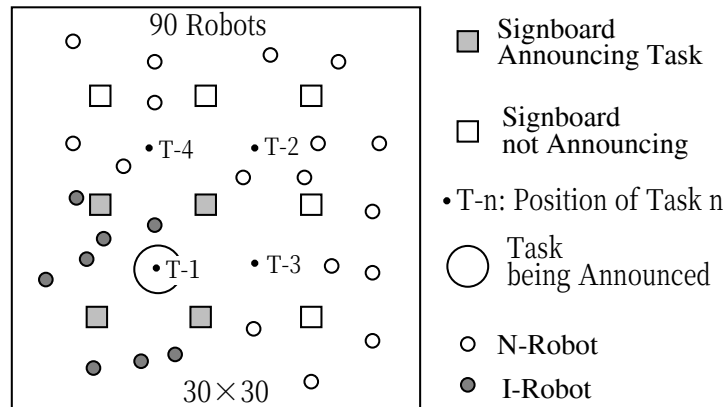
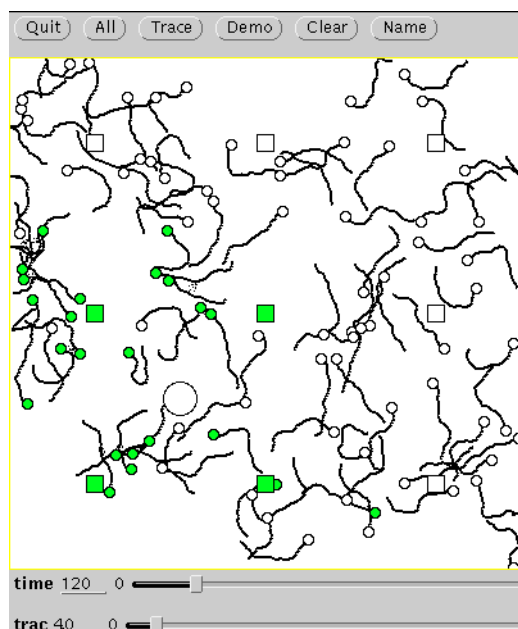


Fig. 5.17 協調作業シミュレーション環境

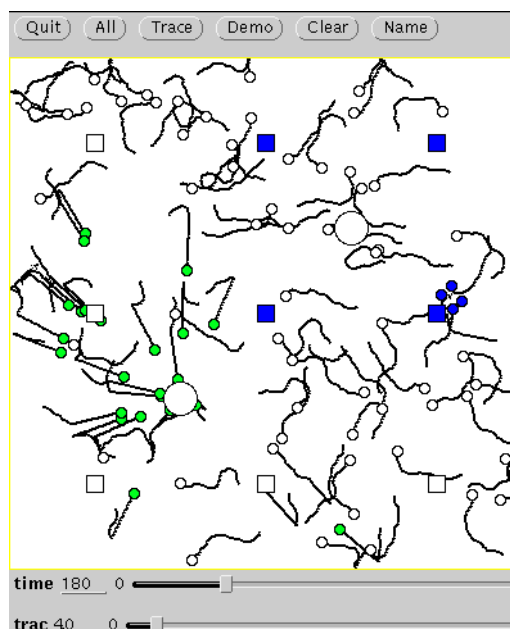
Table 5.5 協調タスクシミュレーションのパラメータ

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)

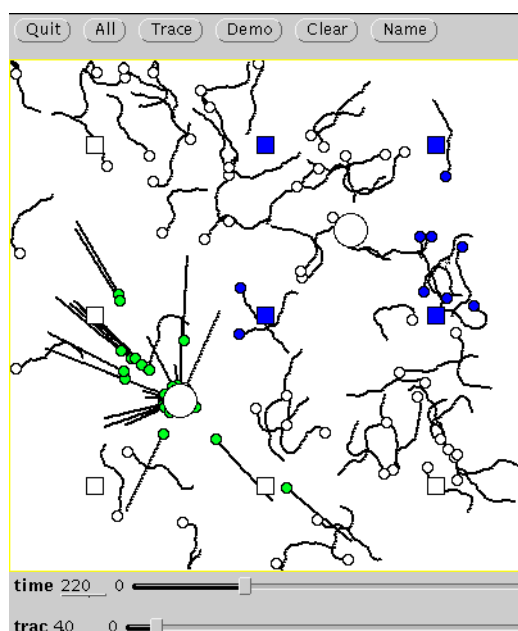
Fig. 5.18(a) では、作業 1 の情報が作業地点の近傍の 4 個の「告知板」から伝播している。作業提示が終了すると、作業 1 の情報を得たロボットは、Fig. 5.18(b) に示されるように作業地点に集合を開始し、また作業 2 の提示が始まっている。Fig. 5.18(c) は、すでに 10 台以上のロボットが集合して作業 1 が開始され、実行中の状態を示している。Fig. 5.18(d) では、作業 1 が完了し、作業に参加したロボットは再びランダム移動を開始し、一方で作業 2 の情報は伝播を続けている。このように、各作業が次々に提示・実行される。



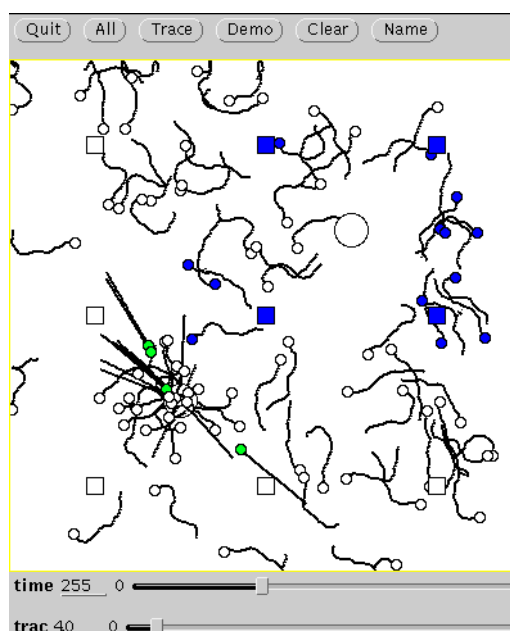
(a) $t = 120$ (作業 1 に関する情報の伝播)



(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

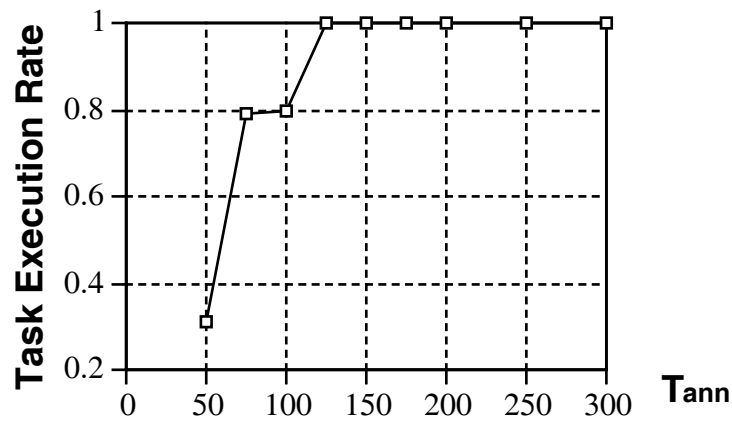


Fig. 5.19 作業達成率

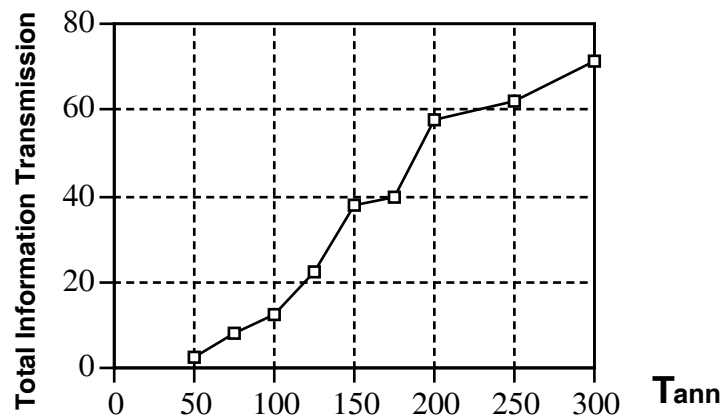


Fig. 5.20 情報伝達回数

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な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、図 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、

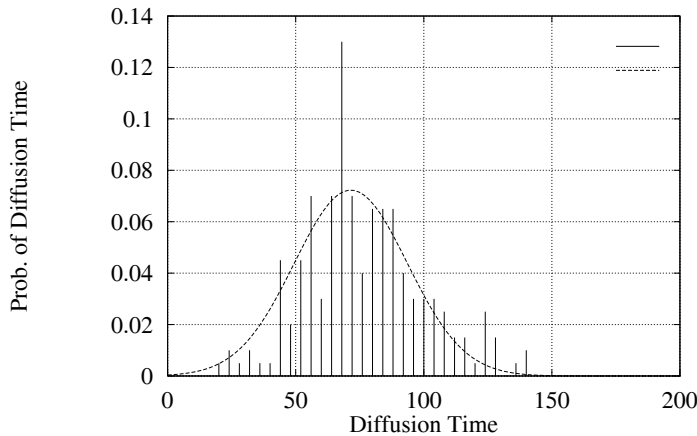


Fig. 5.21 伝播時間 T_{logist} の確率分布

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う．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]
	作業識別子	2[byte]	= 16[bit]
作業情報 1	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		$15+12i[\text{byte}] = 120+96i[\text{bit}]$	

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 に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 番めに近いものとの距離を求めた．これを拡張し、 k 番め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 $56.4[\text{sec}]$ 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なものである。

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められることが分かった。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なわずに、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、不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	206
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

6.1 はじめに

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

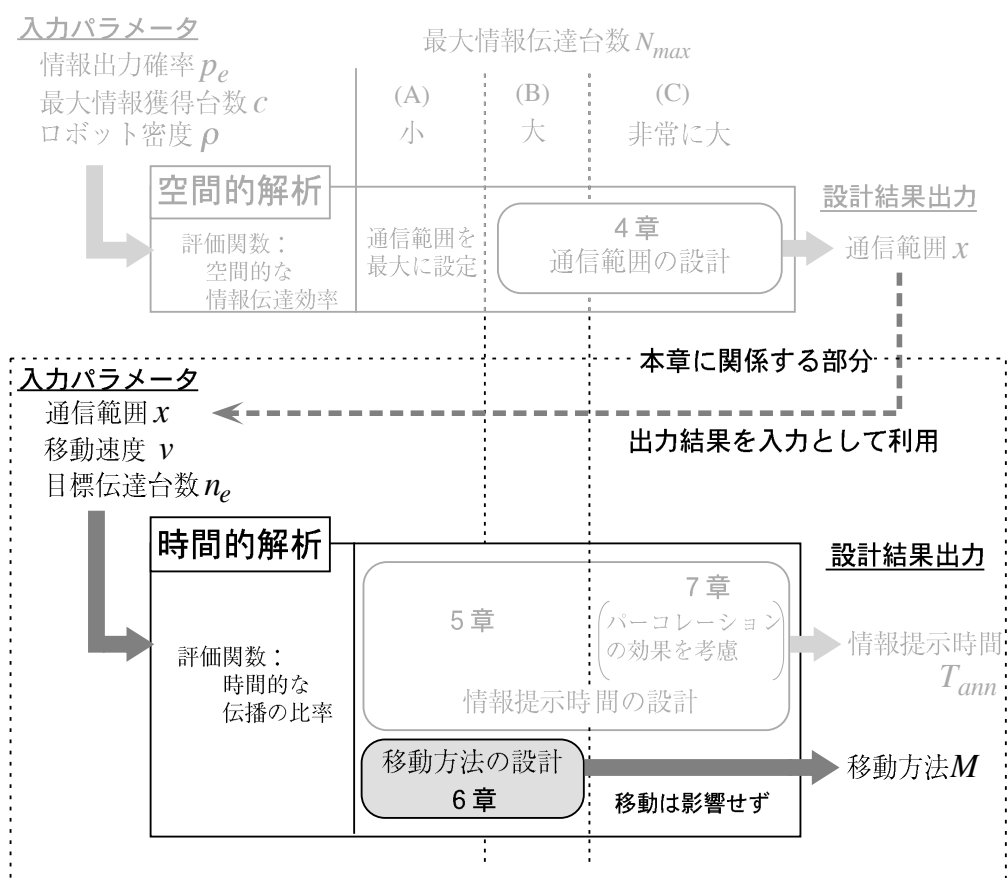


Fig. 6.1 局所的通信の解析・設計における本章の位置付け

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

6.2 群移動モデルと情報伝播の解析

本節では、群移動を行うロボット間の情報伝播を解析する。

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

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

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

群を構成するロボット台数

が設計の対象となる。これを**群規模**と呼び、 k で表す。

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

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

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

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

6.2.1 群移動モデル

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

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

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

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

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

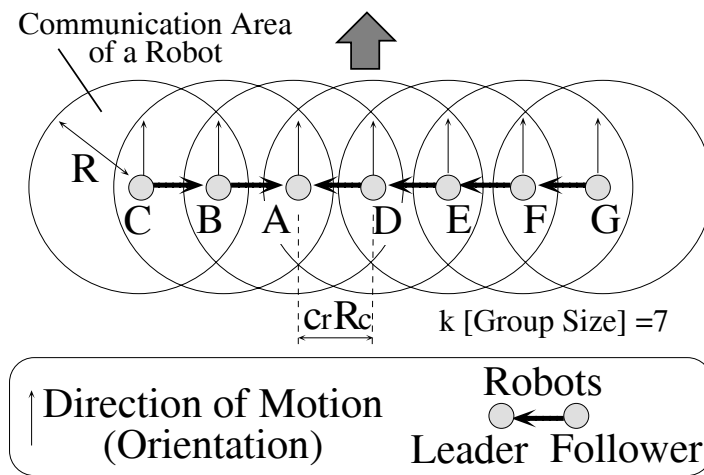


Fig. 6.2 ロボットの群移動のモデル

- 隊列内では，進行方向 (Fig. 6.2 の細い矢印) を合わせるために他の 1 台を見て移動する (Fig. 6.2 の太い矢印)．見る側をフォロワ，見られる側をリーダと呼ぶ．Fig. 6.2 ではロボット B は A のフォロワで，C のリーダとなっている．

結果的に，自ら進行方向を決定するリーダロボットが 1 群に 1 台存在することになる (Fig. 6.2 で A)．

- 先に述べたように，群を構成するロボット数 k を**群規模**とする．Fig. 6.2 では $k = 7$ である．また，相対距離を $c_r R_c$ とする ($c_r < 1$)．
- ロボット系における各ロボット群の群規模 k は同一とする．

6.2.2 ロボット群間の情報伝播の解析

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

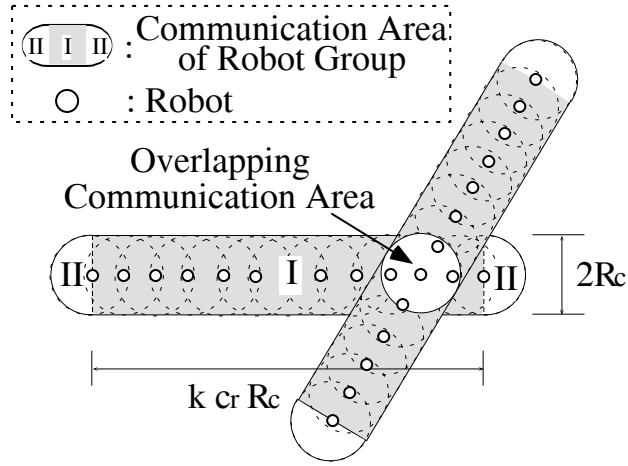


Fig. 6.3 ロボット群の通信範囲

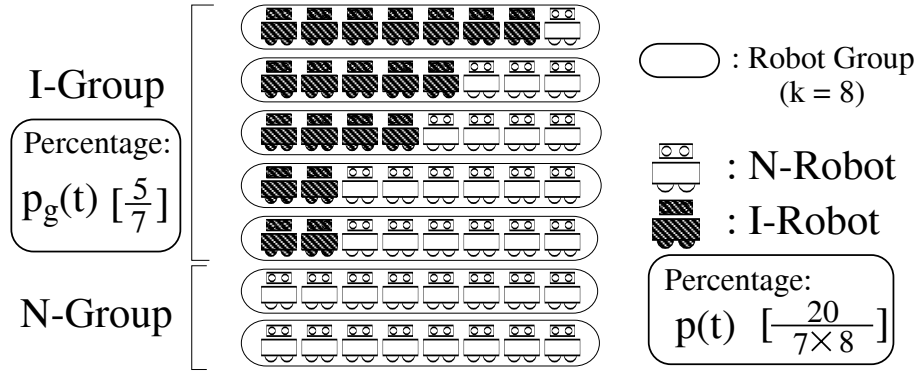


Fig. 6.4 ロボット群間の情報の伝播

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

とすればよい。

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

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

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

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

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

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

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

式 (6.8) は指数関数の線形近似を行った式である。

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

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

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

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

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

と求められる。

また、 N_{max} が小さい場合には、式 (5.22) と同様の方法で

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

となり、ランダム移動の場合と同様に β_g はロボットの移動速度 v に比例する。

6.2.3 ロボット群内の情報伝播の解析

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

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

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

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

$$p_\alpha = \begin{cases} \begin{cases} 1 - (1 - p_e)^\alpha - p_e^\alpha & (\text{衝突あり}) \\ 1 - (1 - p_e)^\alpha & (\text{衝突なし}) \end{cases} & c = 1 \\ 1 - (1 - p_e)^\alpha & c \geq 2 \end{cases} \quad (6.13)$$

とすることができる。

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

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

Table 6.1 局所的通信システムのパラメータ

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

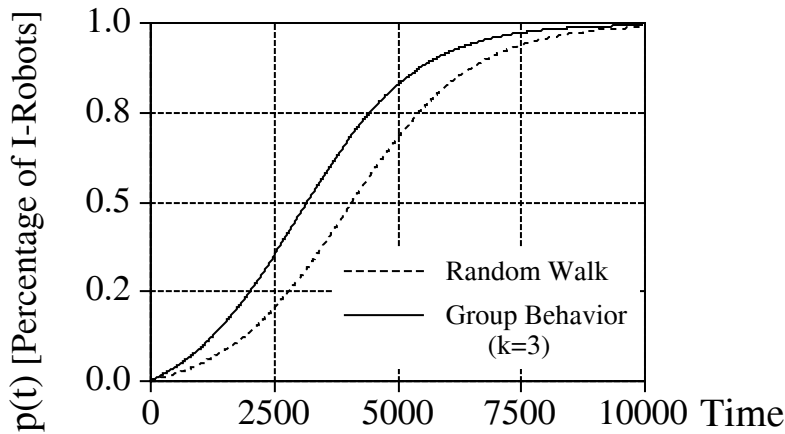


Fig. 6.5 群移動を行なった場合の情報伝播 (衝突なし, $k=3$)

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

6.3 伝播時間と最適群規模の導出

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

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

6.3.1 伝播時間の算出

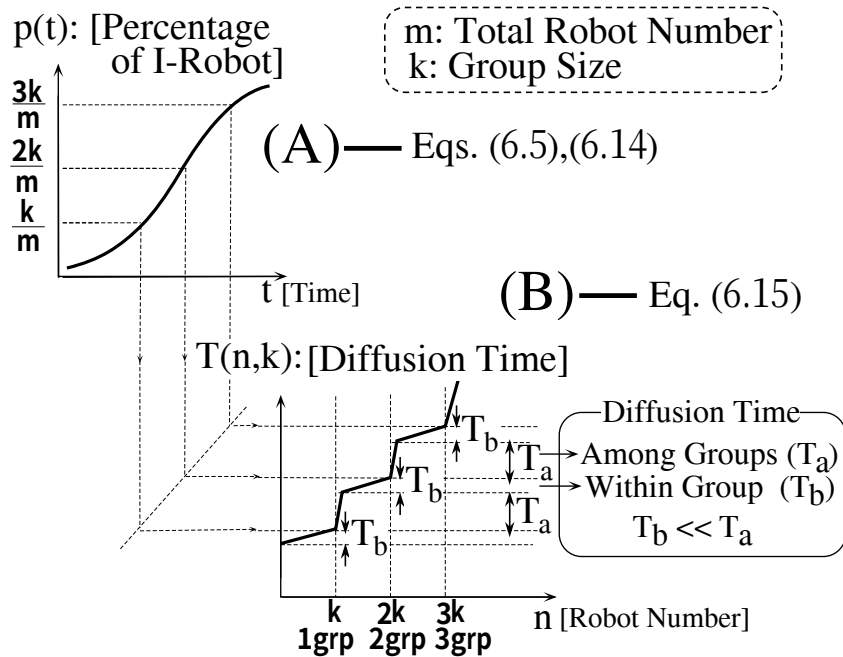


Fig. 6.6 伝播時間の計算

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

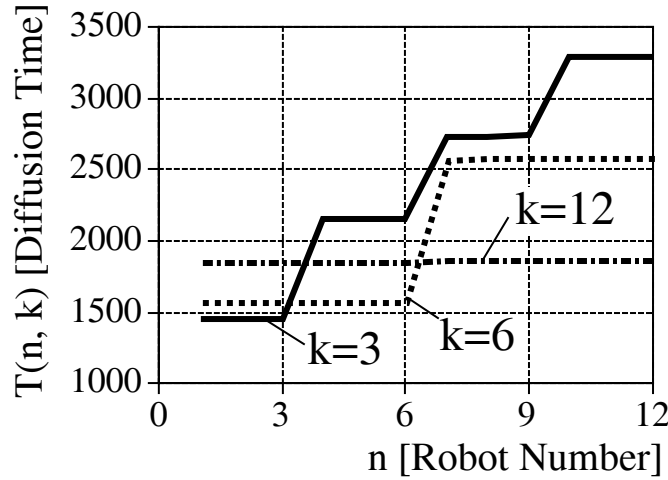


Fig. 6.7 群移動を行なった場合の伝播時間

式 (6.5), (6.14) の情報伝播過程 $x = p(t)$ から求めた, 比率 x への伝播時間 t を $t = q(x)$ とする. 伝播した群の数 i を $i = \lfloor \frac{n}{k} \rfloor + 1$ とすると, $T(n, k)$ は式 (6.15) のようになる.

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

ただし, $[a]$ は a を超えない最大の整数を表す.

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

6.3.2 最適群規模の導出 (目標伝達台数一定の場合)

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

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

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

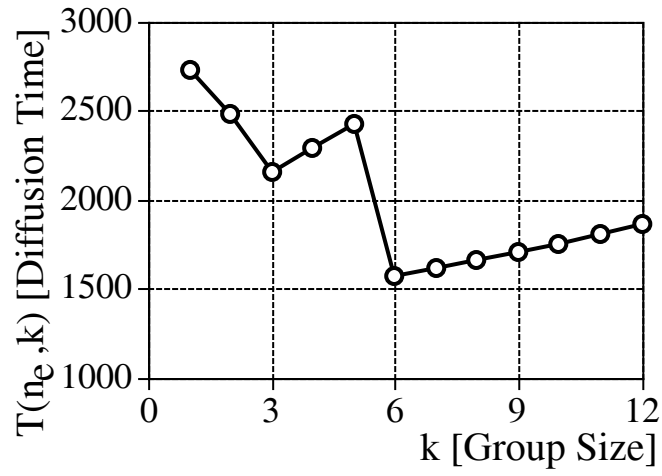


Fig. 6.8 群規模と伝播時間の関係 ($n_e=6$)

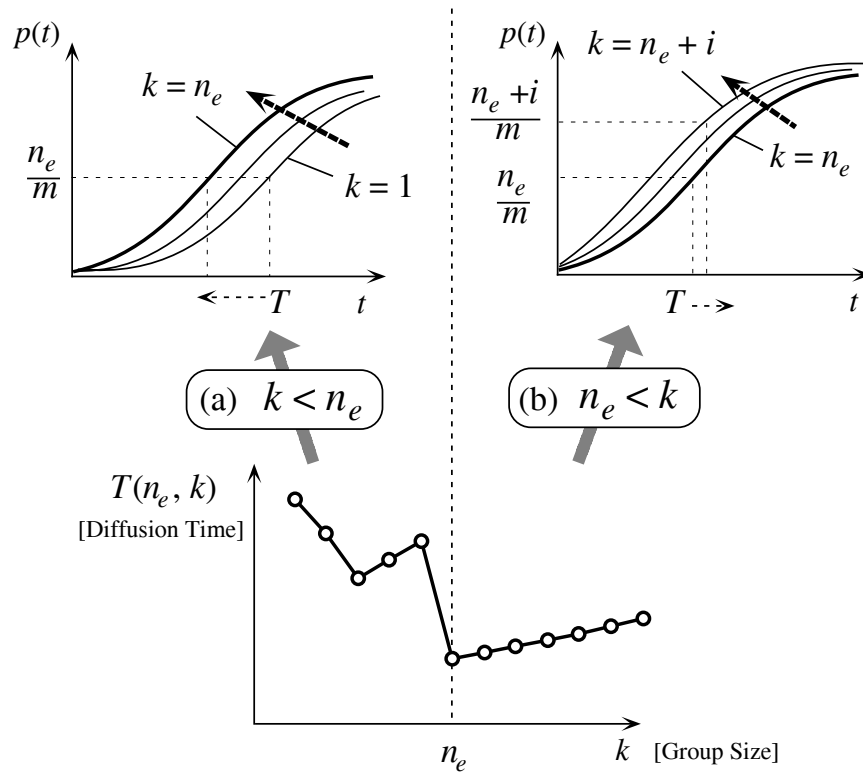


Fig. 6.9 最適な群規模 k_{opt} に関する考察

まず、群規模 k が目標伝達台数 n_e よりも小さい場合は、ロボット総数を m とすれば情報は比率 $\frac{n_e}{m}$ まで伝達されなければならない。よって、 $k \leq n_e$ の範囲では k が増加するに従い

伝播時間 $T(n_e, k)$ は減少する傾向を示す (Fig. 6.9 の (a) の部分). この範囲で途中 $T(n_e, k)$ が増加するところがあるが, これは n_e が k で割り切れない場合に, より多くの群に情報を伝達しなければ n_e 台への伝達が達成されないからである. 例えば, $n_e = 6$ で $k = 4$ のときには, 2つの群に情報を伝達しないと 6 台に情報が伝達されない. $k = 3$ でも 2つの群に伝達すれば良いのであるから, k が 3 のときの方が $T(n_e, k)$ が小さくなる.

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

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

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

6.3.3 最適群規模の導出 (目標伝達台数が確率分布の場合)

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

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

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

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

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

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

本節では, n_e の分布が確率分布する場合にも, その分布が与えられれば, 最適な群規模

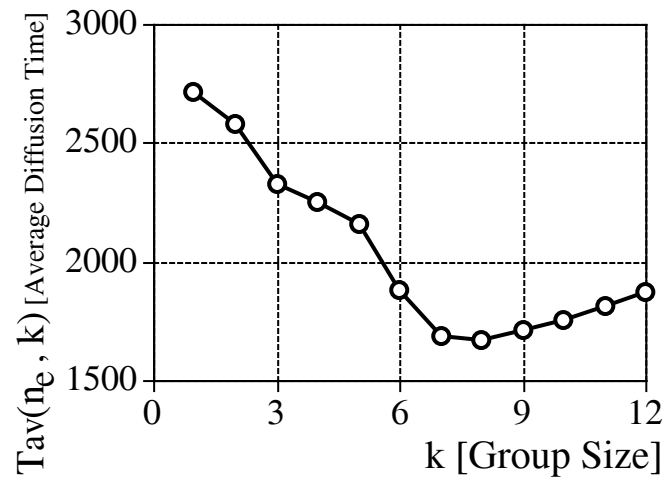


Fig. 6.10 群規模と平均伝播時間 T_{av} の関係 ($n_e=6.0$, $\sigma=1.0$)

k_{opt} を式 (6.15), (6.16) から解析的に求めることができることが示された。最適な群規模は、目標伝達台数が一定のときのように一意には決まらず、それより増加する傾向があることが分かった。

6.4 シミュレーションによる解析の検証

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

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

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

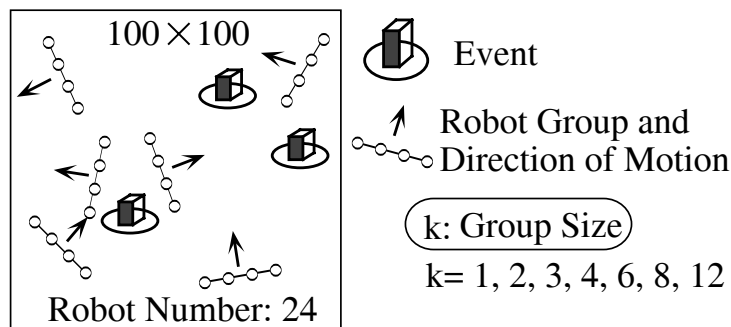


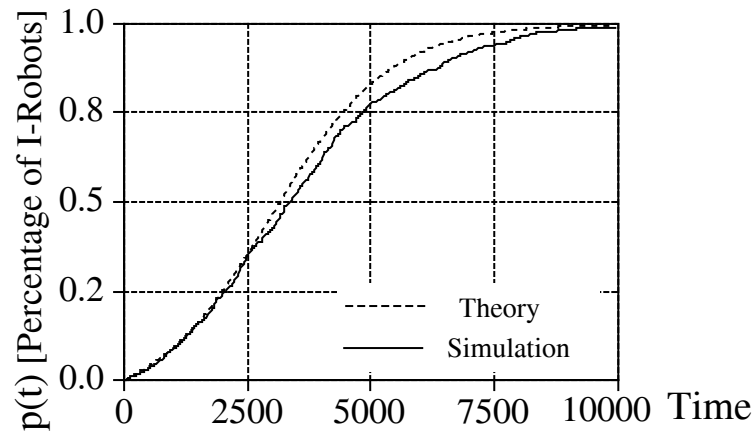
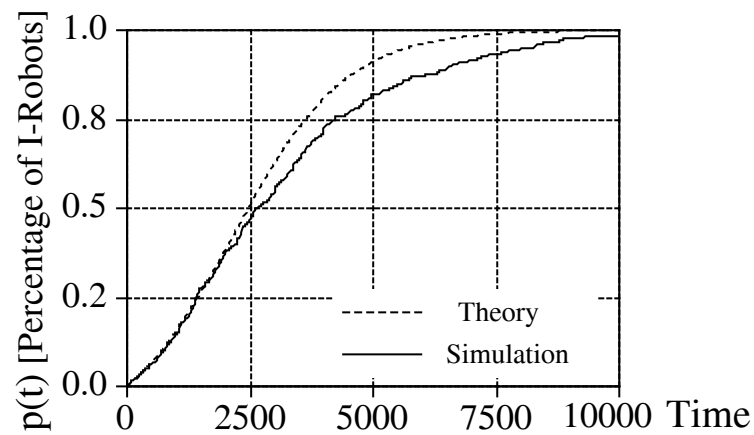
Fig. 6.11 シミュレーション環境

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

6.4.1 情報伝播の方程式の検証

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

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

Fig. 6.12 情報伝播のシミュレーション ($k=3$)Fig. 6.13 情報伝播のシミュレーション ($k=6$)

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

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

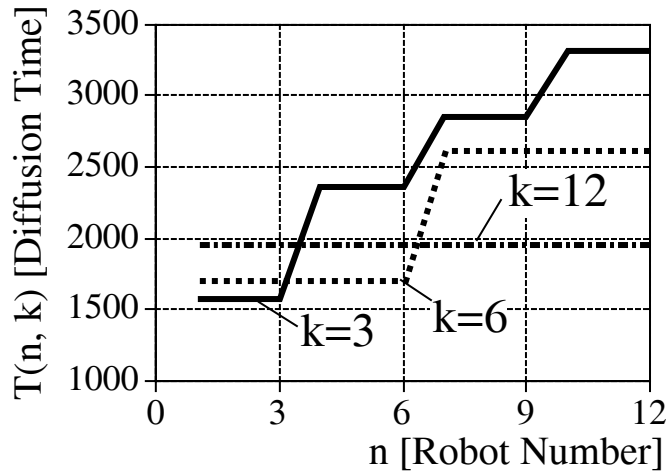


Fig. 6.14 群移動を行なった場合の情報伝播のシミュレーション結果

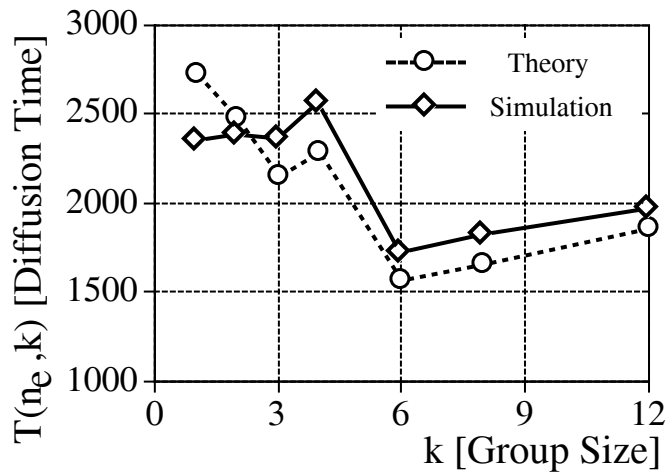


Fig. 6.15 群規模と伝播時間の関係 ($n_e=6$)

6.4.2 伝播時間と最適群規模の検証

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

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

目標伝達台数 n_e に情報を伝達する場合の、群規模 k と伝播時間 $T(n_e, k)$ の関係を調べると、Fig. 6.15 のようになる。6.2.1 節で系における群規模 k は同一であるとしたので、本

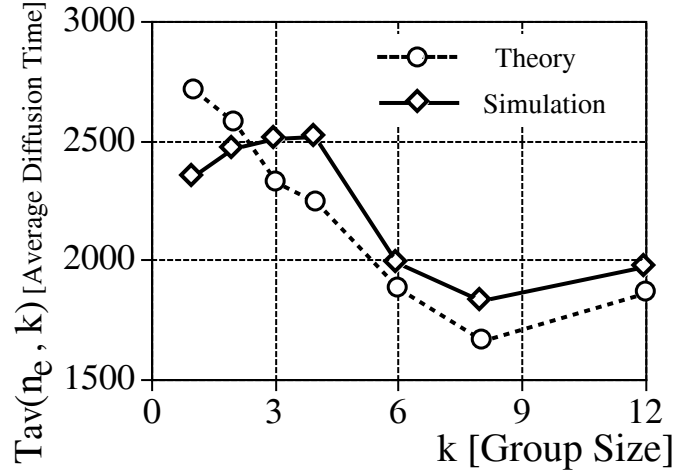


Fig. 6.16 群規模と平均伝播時間 T_{av} の関係 ($n_e=6.0$, $\sigma=1.0$)

節では $k=1,2,3,4,6,12$ を解析とシミュレーションの対象とする。シミュレーションによる値は、前節のモデル化誤差の範囲で理論値と傾向が一致し、 $k_{opt} = n_e$ となっている。

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

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

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

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

6.5 群形成アルゴリズム

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

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

6.5.1 群形成のアルゴリズム

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

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

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

局所的通信による, 自己組織化のための簡単なアルゴリズムを以下に示す.

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

```
quit-group( $A$ ):  
     $X \rightarrow S_c$  を 1 にリセット  
     $X \rightarrow ID_g$  を  $X \rightarrow ID$  にリセット
```

(グループ A でロボット X に隣接していたロボットは S_c を 1 減らす)
 enter-group(B):
 グループ B で新しく隣接するロボットから S_c と ID_g を読み込む
 $X \rightarrow S_c$ に 1 を加える
 $X \rightarrow ID_g$ を $B \rightarrow ID_g$ にセットする
 (グループ B で新しく隣接するロボットは S_c に 1 を加える)

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

```

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

```

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

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

6.5.2 群形成のシミュレーション

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

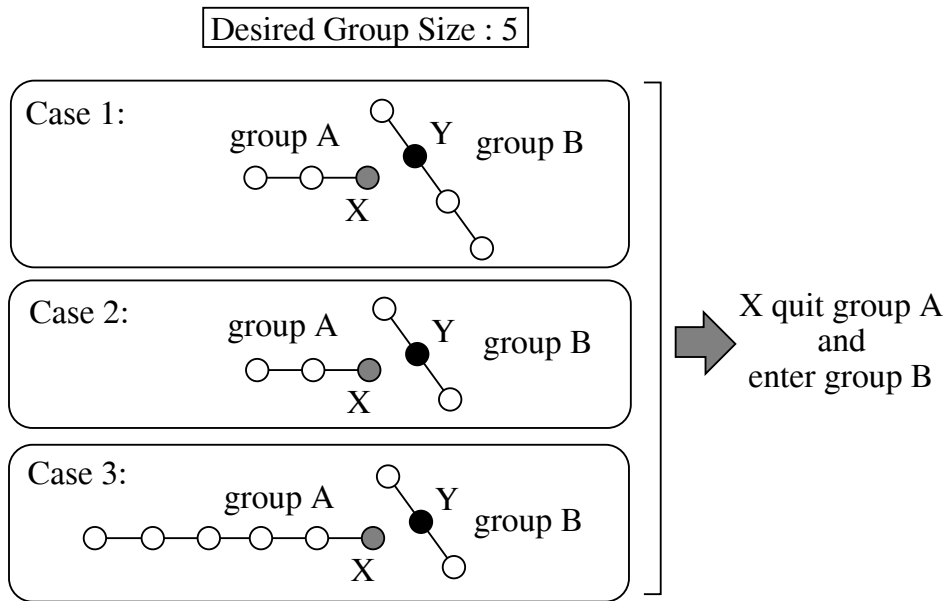
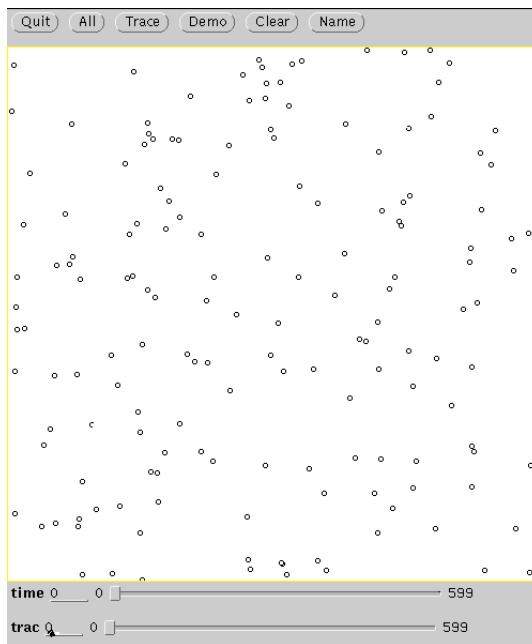
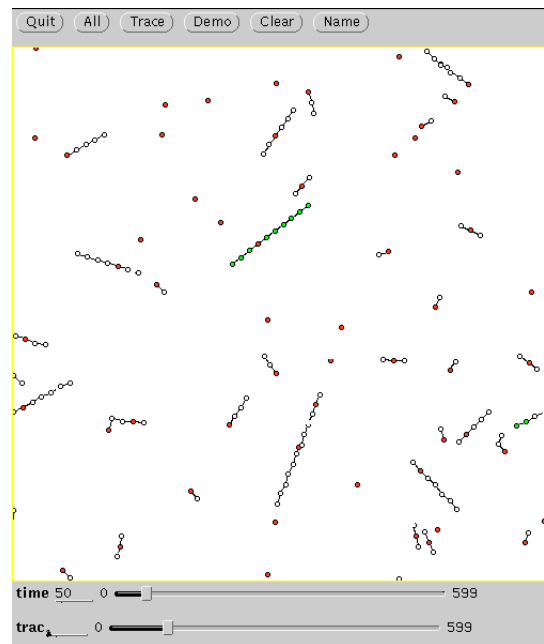
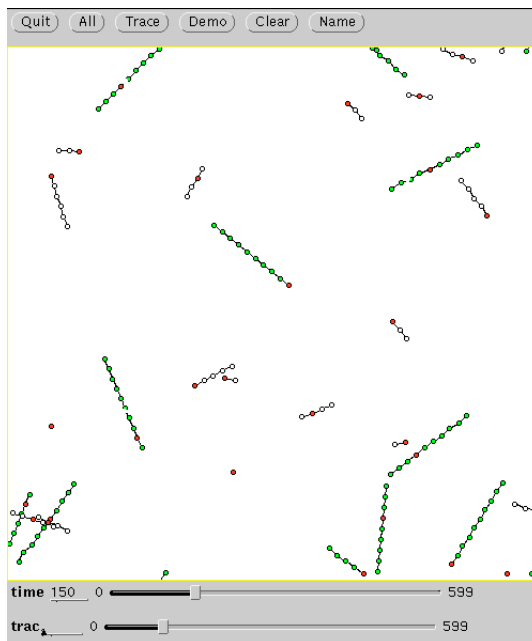
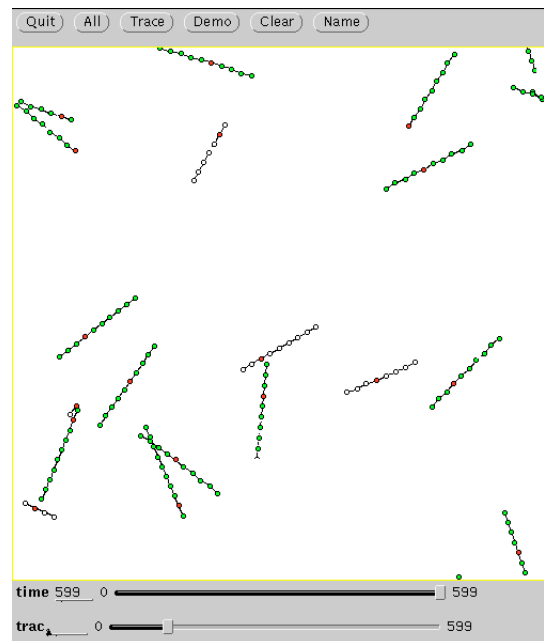


Fig. 6.17 ロボットが群を離脱する場合

Fig. 6.18(a) ~ (d) は, $k = 10$ のときの群形成過程を示す. これらのシミュレーション結果から, 目的とするサイズの群が形成されていることがわかる. Fig. 6.18 (a) のようにすべてのロボットがランダムに配置されている初期状態 (時間 0) から始まって, Fig. 6.18(d) でほとんどすべての群が時間 600 で達成されていることが分かる. これにより, アルゴリズムの有効性が示された.

Table 6.2 群形成シミュレーションのパラメータ

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

(a) $t = 0$ (b) $t = 50$ (c) $t = 150$ (d) $t = 600$ **Fig. 6.18** (a)~(d) 群形成のシミュレーション

6.6 おわりに

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

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

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

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

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

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

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

付録: 最適群規模 $k_{opt}=n_e$ となることの証明

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ただし、 $y = \frac{\pi}{2} - c_r (> 0)$

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

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

とした. これを用いると、 $a, b, p_g(0)$ は

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

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

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

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

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

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

となる.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

と表される.

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

(a) $k \leq n_e$ のとき

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

(b) $k > n_e$ のとき

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

(a) $k \leq n_e$ のとき

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

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

補題 1

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

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

は $k > 0$ で k の単調増加関数である。

証明

$f_a(k)$ を k で微分すれば明らかである。

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

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

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

となる． $g(k)$ を k で微分すると， p_{n_e} が定数であることを考慮して，

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

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

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

は単調増加関数となる．

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

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

に対し， k が $[0, m]$ の範囲を動くとき，

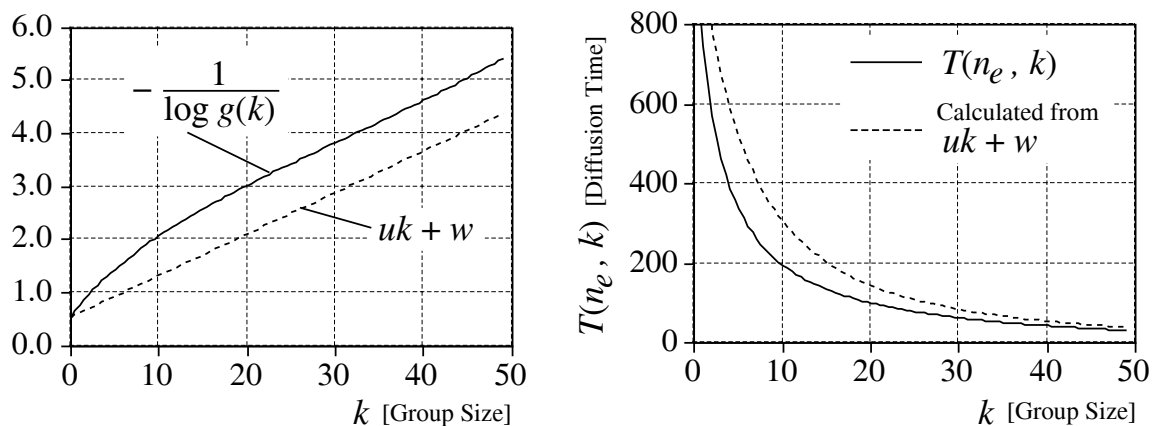
- 単調増加関数 $l_g(k)$ と $k = 0$ での初期値が一致する．
- 単調増加関数 $l_g(k)$ よりも増加率が常に小さくなる．

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

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

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

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



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

(2) 伝播時間 $T(n_e, k)$

Fig. 6.19 (a) $k \leq n_e$ における伝播時間の計算 ($\rho=0.01$, $\rho_{sign}=0.001$, $m=50$, $n_e=10$, $R_c=1.0$, $c_r=0.8$)

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

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

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

しかしながら、 $k \leq n_e$ の範囲では $T(n_e, k)$ が $k = n_e$ で最小値をとることには変わりないため、解析は有効である．

(b) $k > n_e$ のとき

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

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

補題 2:

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

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

は $k > 0$ で k の単調増加関数である．

証明

$f_b(k)$ を k で微分する．

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

よって， $f_b(k)$ は単調増加である (**証明終**)．

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

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

となる．

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

る．これを式 (6.32) の $g(k)$ に適用して

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

と近似される．これを k で微分すると，

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

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

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

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

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

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

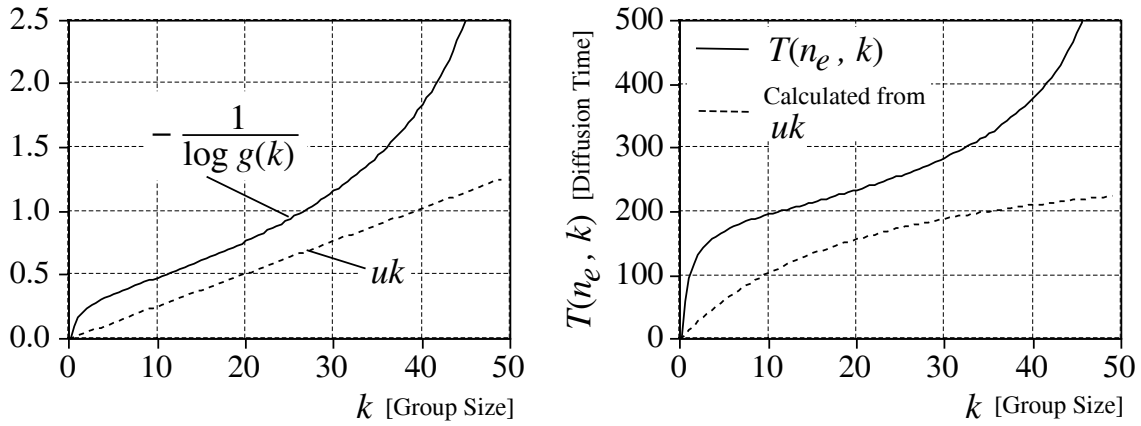
$$T(n_e, k) = -\frac{1}{a+b} \log g(k) \quad (6.36)$$

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

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

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

Fig. 6.19 の計算と同じパラメータを用い，まず $-\log g(k)$ を **Fig. 6.20(1)** に示す．点線で示した直線は，補題 2 で用いた原点を通る k の一次関数 uk である ($u=0.026$)．この傾き


 (1) $-\log g(k)$ と uk のグラフ

 (2) 伝播時間 $T(n_e, k)$

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

u は、 $-\log g(k)$ の傾きよりも常に小さくなるように、 $[0, m]$ の範囲での $\frac{-d \log g(k)}{dk}$ の最小値とした。Fig. 6.20(1) では、式 (6.37) が成り立っていることが分かる。

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

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

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

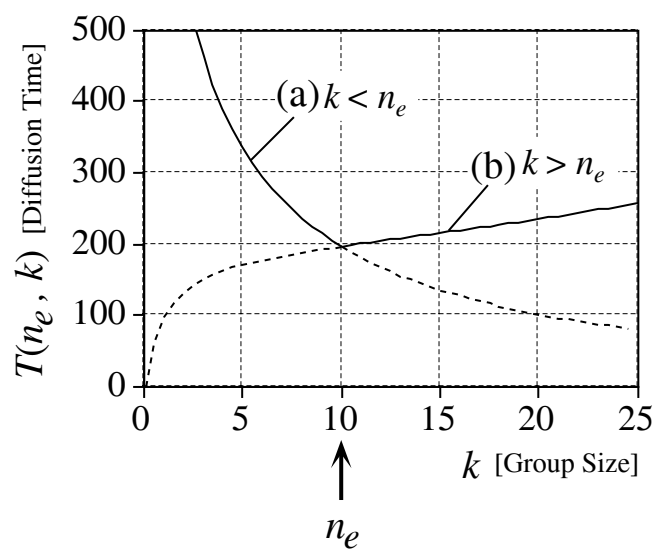


Fig. 6.21 伝播時間の計算 ($\rho=0.01$, $\rho_{sign}=0.001$, $m=50$, $n_e=10$, $R_c=1.0$, $c_r = 0.8$)

第7章 パーコレーションを用いた情報伝播モデルの検討

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

7.1 はじめに

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

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

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

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

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

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

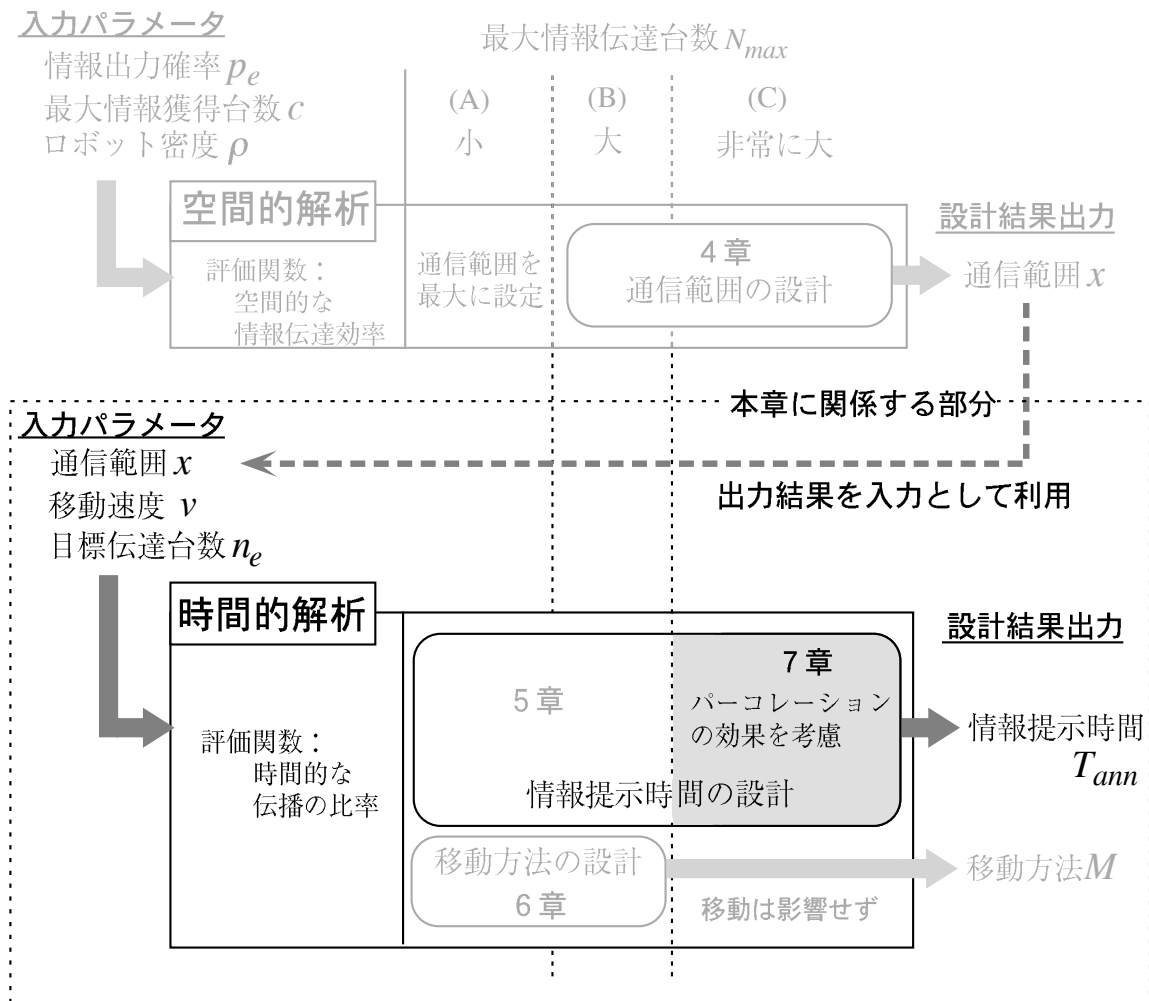


Fig. 7.1 局所的通信の解析・設計における本章の位置付け

7.2 ロボット移動の伝播への影響に関する解析

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

7.2.1 シミュレーション環境

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

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

これを、以下に再び示しておく。

Table 7.1 本章において重要なロボットシステムのパラメータ

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

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

7.2.2 回帰分析を用いた速度の影響の解析

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

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

となる。

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

$$\begin{aligned} P_I(c, p_e, x, t) &= e^{-p_e x} \left(\sum_{k=0}^c \frac{(p_e x)^k}{k!} - 1 \right) - e^{-p_e x} \left(\sum_{k=0}^c \frac{\{p_e x(1 - p(t))\}^k}{k!} - 1 \right) \\ P_N(c, p_e, x, t) &= e^{-p_e x} \sum_{i=0}^c \frac{(p_e x)^i \{(1 - p(t))^c - (1 - p(t))^i\}}{i!} + 1 - (1 - p(t))^c \end{aligned} \quad (7.2)$$

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

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

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

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

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

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

と求められる。

式 (7.5) で、速度が関係する部分は係数 $\beta(v, \mathcal{M}, x)$ である。ランダム移動を、4 章 4.3.1 に示したように 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する移動とする。これを 5.3 節で示したように $\mathcal{R}(\theta, \tau)$ と表したとき、単位時間・単位速度あたりの掃引面積を示す式 (5.8) を用いて、 $\beta(v, \mathcal{M}, x)$ は式 (5.12) に示したように

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

$$\begin{aligned} W(R_c, \phi) &= 2R_c \quad (\phi > \pi), \quad 2R_c \sin \phi/2 \quad (0 \leq \phi \leq \pi) \\ \beta(v, \mathcal{R}(\theta, \tau), x, R_c, \phi) &= \frac{1 - e^{-\rho S(R_c, \phi, \theta, \tau)v}}{1 - e^{-x}} \end{aligned} \quad (7.7)$$

となる。

β の式 (7.7) において、分子に線形近似を行なうと、

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

となり、 β は移動速度 v に比例する。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

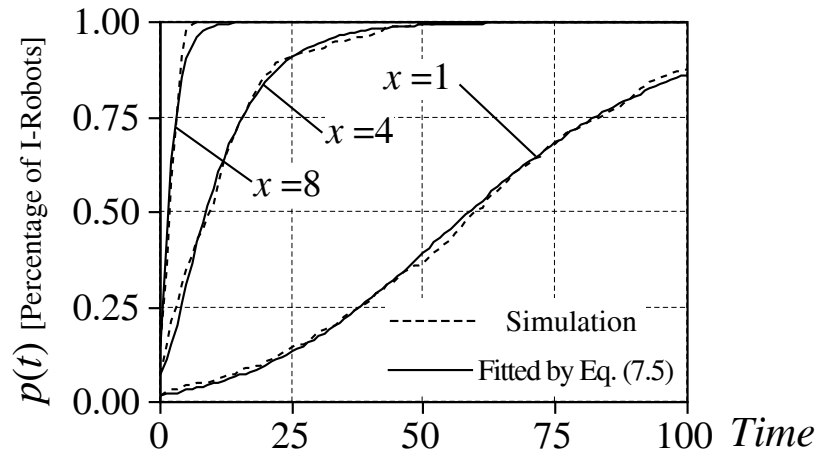


Fig. 7.2 シミュレーション結果への情報伝播式のあてはめ

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

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

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

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

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

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

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

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

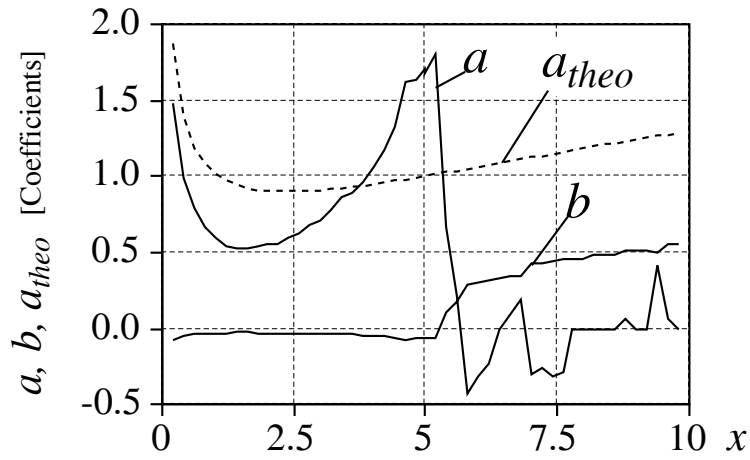


Fig. 7.3 回帰分析により求めた係数 a, b と理論値 a_{theo}

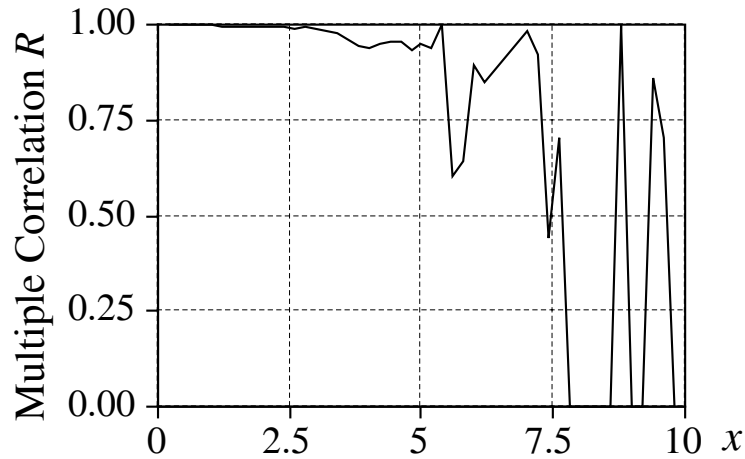


Fig. 7.4 回帰分析における重相関係数

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

7.2.3 パーコレーション理論における浸透閾値との関係

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

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

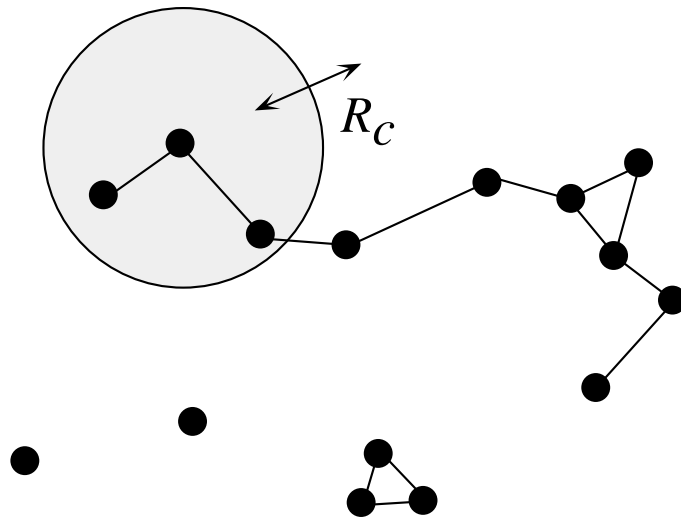


Fig. 7.5 平面内に分布する点のうち、半径 R_c 内の点同士が繋がりを作るパーコレーション

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

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

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

これを通信範囲の平均ロボット数で表すと、浸透閾値 x_{cr} は、

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

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

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

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

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

7.3 情報伝達数が大きい場合の伝播モデル

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

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

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

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

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

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

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

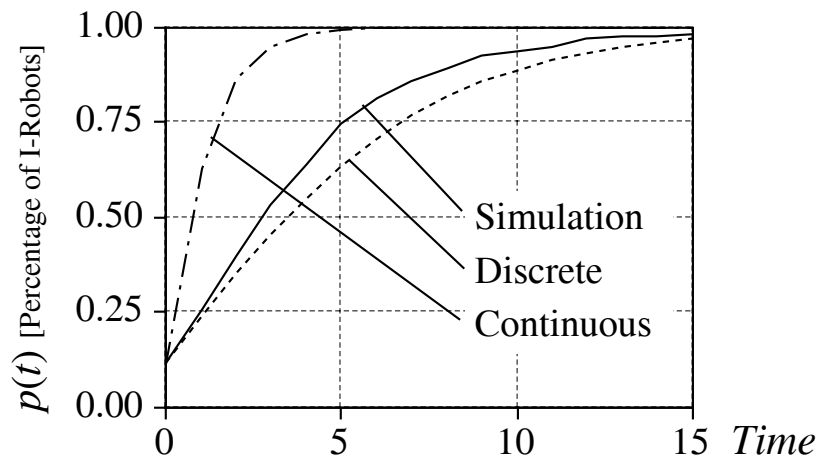


Fig. 7.6 差分方程式による情報伝播のモデル化 ($x=6$, 環境 20×20)

準偏差の 3 倍の許容範囲を加えて算出することができる.

7.4 おわりに

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

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

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

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

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

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

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

次章では、大域的通信と局所的通信の比較を行ない、その評価を試みる。

第8章 評価

8.1	はじめに	238
8.2	大域的通信のモデルと解析	239
8.3	局所的通信のモデルと解析	243
8.4	伝達時間による比較	247
8.5	おわりに	253

8.1 はじめに

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

従来の研究でしばしば用いられてきた大域的な通信は、2章で述べたように、

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

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

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

以下で進めていく大域的な通信と局所的な通信の比較において、通信の目的は、

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

こととする。両者の比較は、この情報伝達に必要な時間 T を用いて行なう。

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

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

8.2 大域的通信のモデルと解析

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

そこで、本章でもその方式を用いることにし、以下のようにモデル化する。

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

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

大域通信には、[プレム 91a] の CAR-Net のトークンリング方式と、[Wang94b] で用いられるランダムアクセス割り当て方式、[矢向 94] で用いられる時分割方式などが考えられる。この中でランダムアクセス方式は、台数が多い場合には待ち時間が非常に長くなってしまふ。 n_f 台がランダムに情報を出力するとき、各ロボットの情報出力確率を $\frac{1}{n_f}$ としたときに最も伝達の成功確率が大きい [Metcalf73]。そのときの一度の送信で送信権が獲得できる確率 P は、情報を出力する確率 $\frac{1}{n_f}$ に、そのときに成功する確率 $\{1 - \frac{1}{n_f}\}^{n_f-1}$ を乗じた

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

である [Metcalf76]。そして、 n_f 台の送信が成功するまでに要する時間 W が w 単位時間である確率 $\Pr(W=w)$ は負の二項分布に従うので

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

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

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

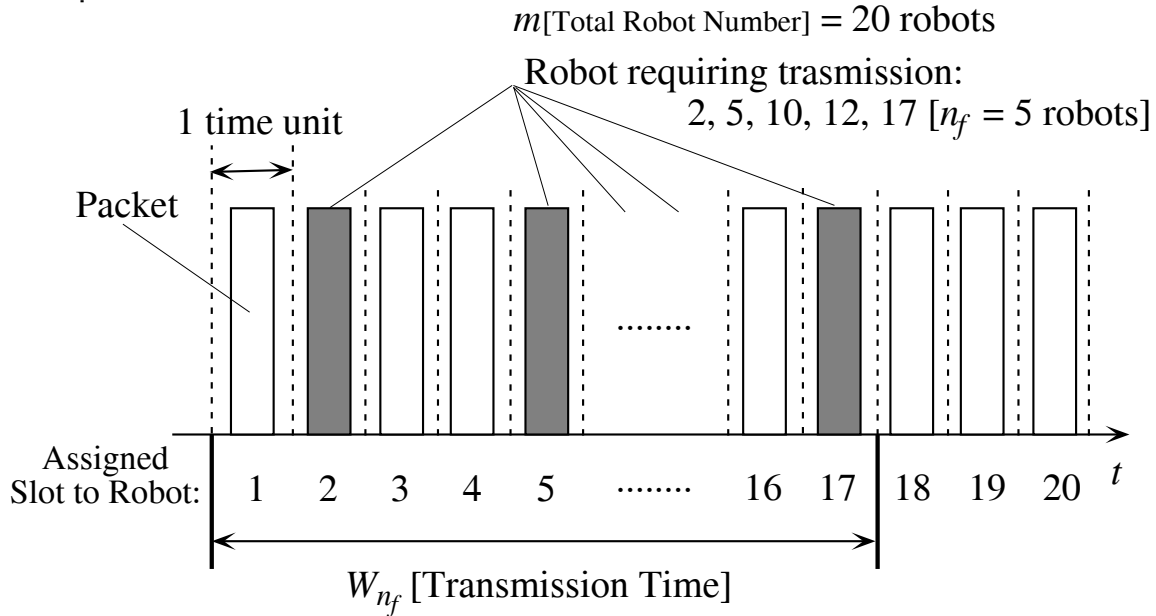


Fig. 8.1 時分割・割り当て型の大域的な通信による情報伝達のモデル

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

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

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

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

の時間の期待値である．これは，以下の形で計算される．

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

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

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

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

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

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

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

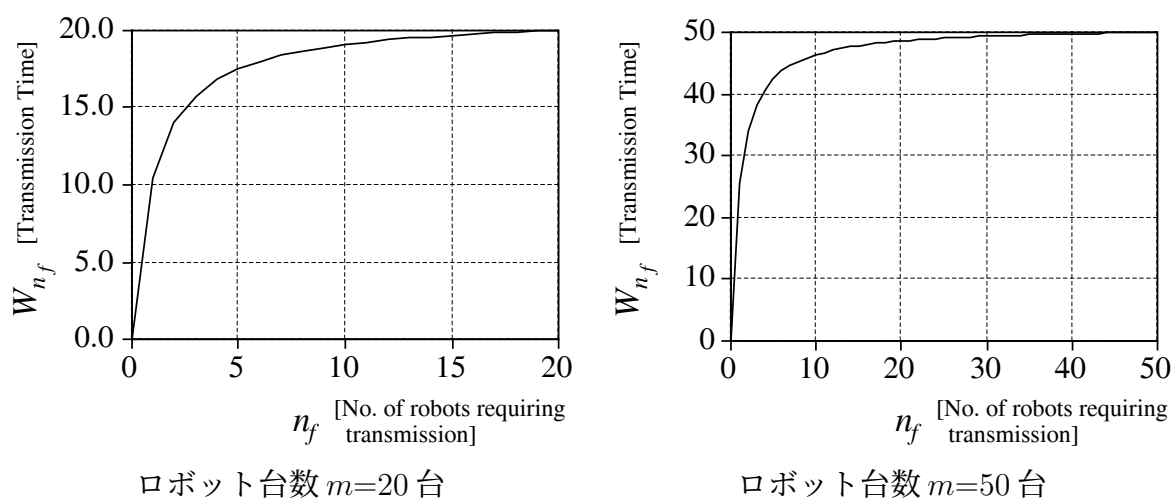


Fig. 8.2 時分割・割り当て型の大域通信における送信台数 n_f と伝達時間 $W(n_f)$ の関係

8.3 局所的通信のモデルと解析

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

これは，局所的通信においては，次のような場合に相当する。

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

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

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

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

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

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

Table 8.1 比較対象とする局所的通信システムのパラメータ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

となる。ただし、通信半径 R_c は x と密度 ρ から決まり、視野角 ϕ は 2π 、ランダム移動の定数 θ , τ は Table 8.1 に示す通りである。

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

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

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

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

と求まる．

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

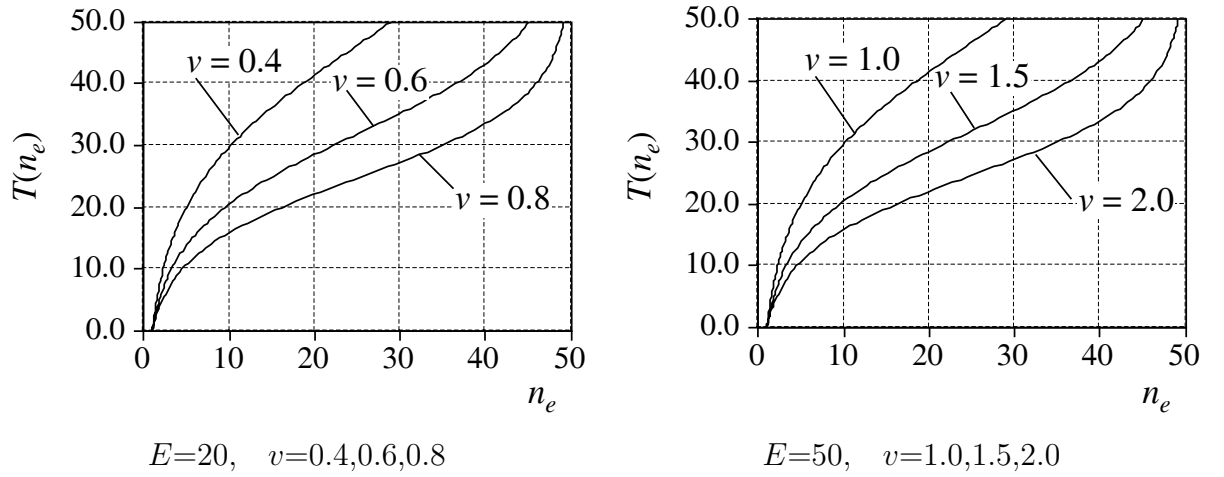


Fig. 8.3 局所通信における目標伝達台数 n_e と伝播時間 $T(n_e)$ の関係 (ロボット台数 $m=50$ 台)

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

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

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

となり，環境の一辺の長さ E に比例する．よって，式 (8.8) で単位速度・単位時間あたりの掃引面積を表す S は R_c に比例するので，以下のように E に比例する．

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

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

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

と線形近似する．例えば，環境の一辺の長さ $E=20$ ，ロボット数 $m=20$ のとき， v を大きく 1.0 としても $\rho S v=0.25$ で誤差 10% 程度である．

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

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

となる．これと式 (8.11) から結局

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

である．

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

このように， E と v の比例関係を維持すれば伝播過程は等しいことが分かったので，局所通信の環境は固定して考えて良い．よって，以降の比較では，環境の一辺の長さ $E=20$ とする．

8.4 伝達時間による比較

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

本節では, 冒頭で述べたように,

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

ことを通信の目的とした.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

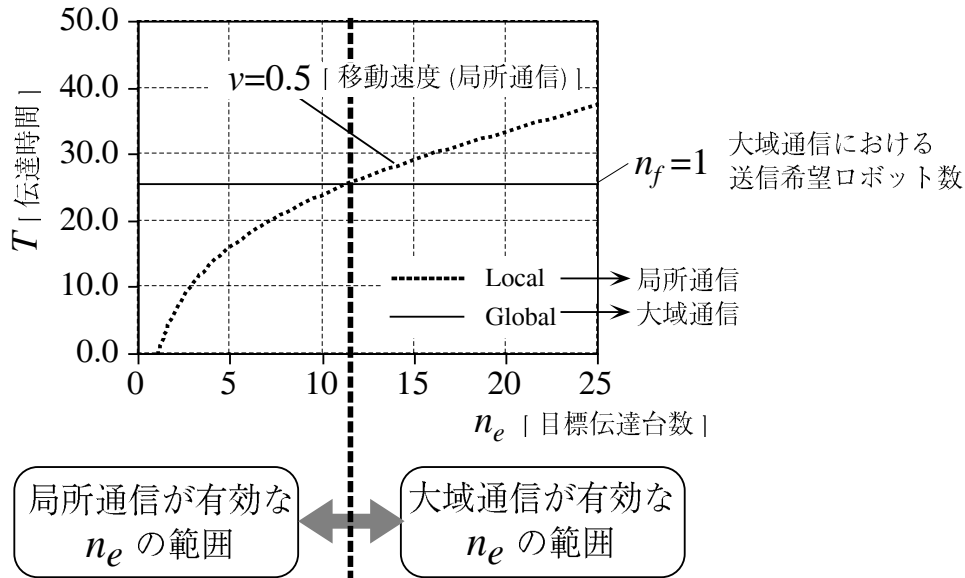


Fig. 8.4 局所通信と大域的通信との伝達時間の比較

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

- 大きいときは，局所的な通信が有効
- 小さいときは，大域的な通信が有効

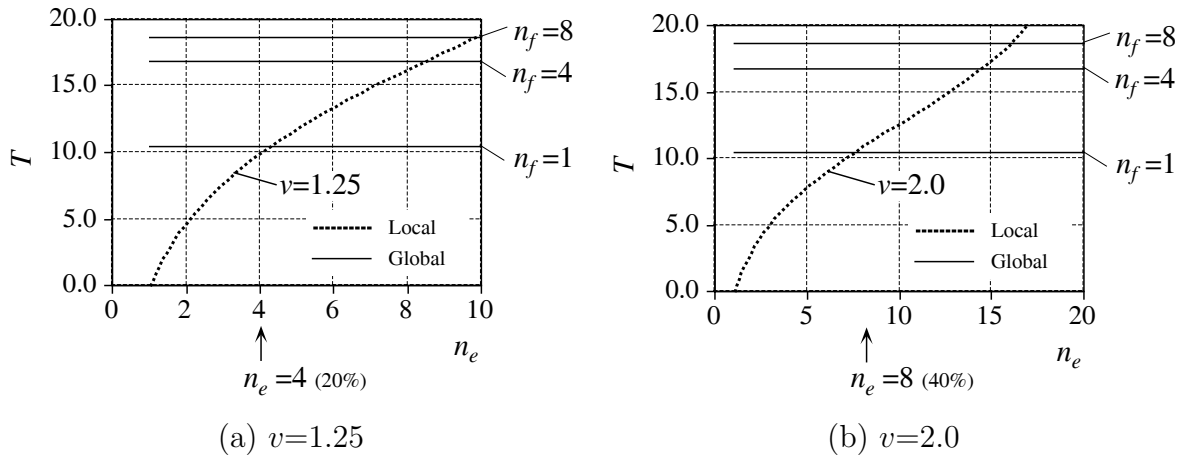
となる．

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

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

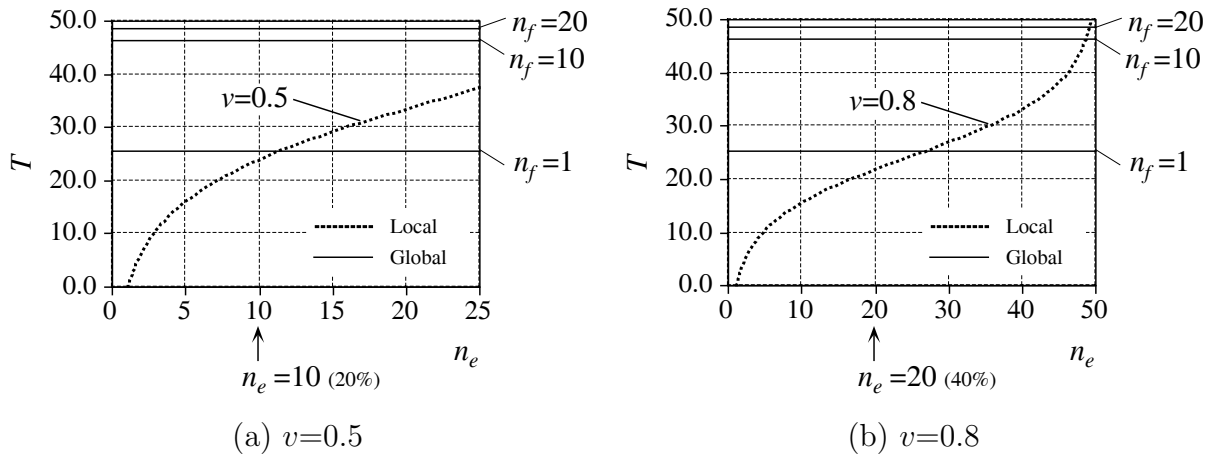
局所的通信における伝達時間 $T(n_e)$ は， n_e に関して単調増加していること，また，速度 v が大きくなると，同じ台数に伝達するまでの時間が短くなることが分かる．

Fig. 8.5，Fig. 8.6 から，次のことが分かる．



v :速度, n_e :目標伝達台数, n_f :情報を送信するロボット数

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



v :速度, n_e :目標伝達台数, n_f :情報を送信するロボット数

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

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

動速度が小さいので、密度が小さい場合に比較し局所通信の有効性が高まる。

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

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

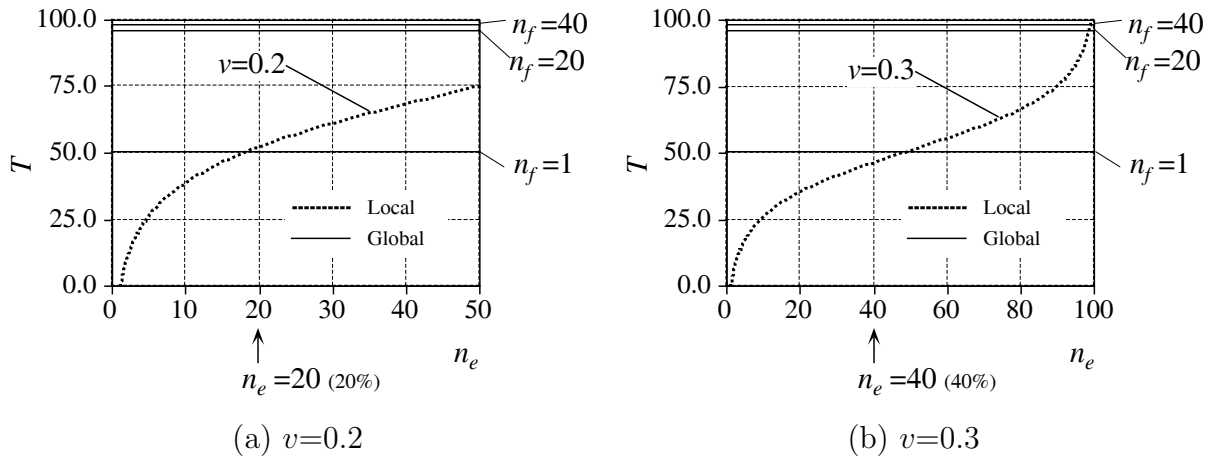
大域通信において 1 台しか情報を送信しない場合と比較しても、ロボットの移動速度 v がある値 (Fig. 8.5(a) では 1.25) 以上ならば、目標伝達数 n_e (総数 $m=20$ の 20% で $n_e=4$ 台) に伝達するのに局所的な通信が大域的な通信よりも有利になるわけである。このときの v は、1 単位時間に環境の一辺の $1/20$ 程度を動く速度であり、やや大きいが実現可能であると考えられる。特に、上に大域通信で n_f が大きい値のとき、つまり多くのロボットが送信を希望するときには、さらに大きな n_e に対しても局所通信の有効性が高くなる。このように、多数のロボ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

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

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

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

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



v :速度, n_e :目標伝達台数, n_f :情報を送信するロボット数

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

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

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

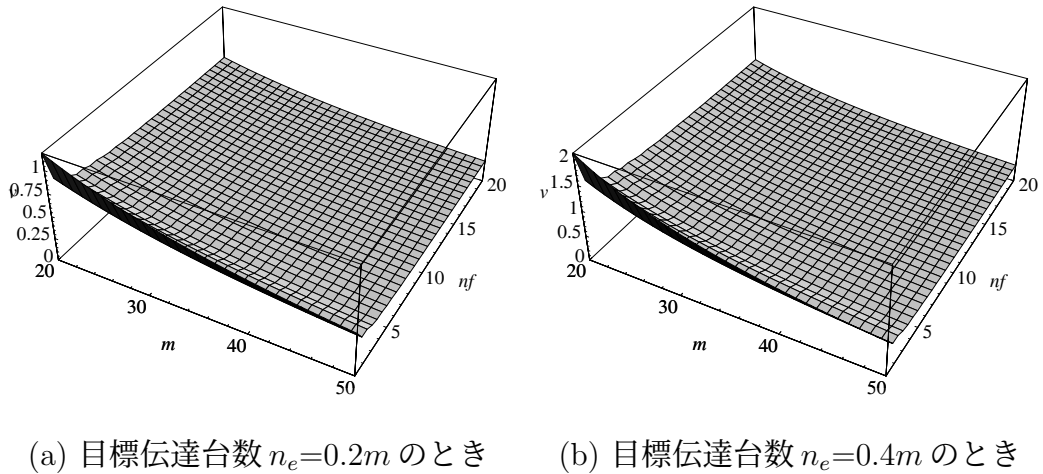


Fig. 8.8 大域通信よりも伝達時間 T が短くなる速度 v と、ロボット数 m 、送信台数 n_f との関係 (環境の一边 $E=20$)

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

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

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

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

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

8.5 おわりに

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

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

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

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

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

第9章 結論

9.1 結論	256
9.2 今後の展望	258

9.1 結論

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

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

1 章、2 章で述べたように、本論文では、

- (1) 作業情報周知
- (2) 作業時の情報伝達

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

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

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

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

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

ことに設定した。

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

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

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

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

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

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

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

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

9.2 今後の展望

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

通信範囲の動的な調節

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

非同質な系への適用

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

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

他の通信手法との併用

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

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

協調作業システムへの統合

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

謝辭

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

東京大学大学院 工学系研究科精密機械工学専攻 教授 新井 民夫 先生

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

また、本論文をまとめるにあたり、貴重なる御意見をいただいた

東京大学大学院 工学系研究科機械情報工学専攻 教授 井上 博允 先生

東京大学大学院 工学系研究科電気工学専攻 教授 原島 博 先生

東京大学大学院 工学系研究科精密機械工学専攻 助教授 富山 哲男 先生

東京大学大学院 工学系研究科精密機械工学専攻 助教授 佐々木 健 先生

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

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

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

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

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

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

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

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

平成8年2月

吉田 英一

参考文献

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

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

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

-
- [Pike74] G. E. Pike and C. H. Seager: Percolation and Conductivity: A Computer Study. I. *Physical Review B*, Vol. 10, No. 4, pp. 1421–1433, 1974.
- [Sasaki95] Jun Sasaki, Jun Ota, Eiichi Yoshida, Daisuke Kurabayashi, and Tamio Arai: Cooperating Grasping of a Large Object by Multiple Mobile Robots. *Proc. of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1205–1210, 1995.
- [Singh93] Karansher Singh and Kikuo Fujimura: Map Making by Cooperating Mobile Robots. *Proc. of 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 254–259, 1993.
- [Smith80] Reid E. Smith: Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. *IEEE Transactions on Computers*, Vol. C-29, No. 12, pp. 1104–1113, 1980.
- [Steels90] Luc Steels: Cooperation between Distributed Agents through Self-Organization. In Y. Demazeau and J.-P. Muller, editors, *Decentralized AI*, pp. 175–196. North Holland, 1990.
- [Stilwell94] Daniel J. Stilwell and John S. Bay: Optimal Control for Cooperative Mobile Robots Bearing a Common Load. *Proc. of 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 58–63, 1994.
- [Suzuki95] Shoji Suzuki, Hajime Asama, Akira Uegaki, Shin ya Kotosaka, Takanori Fujita, Akihiro Matsumoto, Hayato Kaetsu, and Isao Endo: An Infra-Red Sensory System with Local Communication for Cooperative Multiple Mobile Robots. *Proc. of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '95)*, Vol. 1, pp. 220–225, 1995.
- [Takagi84] Hideaki Takagi and Leonard Kleinrock: Optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals. *IEEE Transactions on Communication*, Vol. COM-32, No. 3, pp. 246–257, 1984.
- [Valadas92] Rui T. Valadas, Adriano C. Moreira, and A. M. de Oliveira Duarte: Hybrid (Wireless Infrared / Coaxial) Ethernet Local Area Networks. *Proc. of 1992 IEEE International Conference on Wireless LAN Implementation*, pp. 21–29, 1992.
- [Wang94a] Jing Wang: On Sign-board Based Inter-Robot Communication in Distributed Robotic Systems. *Proc. of 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1045–1050, 1994.
- [Wang94b] Jing Wang and Suparuk Premvuti: Resource Sharing in Distributed Robotic

- Systems Based on a Wireless Medium Access Protocol (CSMA/CD-W). *Proc. of 1994 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '94)*, pp. 784–791, 1994.
- [Wang95] Jing Wang, Suparuk Premvuti, and Abdullah Tabbara: A Wireless Medium Access Protocol (CSMA/CD-W) for Mobile Robot Based Distributed Robotic Systems. *Proc. of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2561–2566, 1995.
- [Yoshida94] Eiichi Yoshida, Tamio Arai, Jun Ota, and Tomoyoshi Miki: Effect of Grouping in Local Communication System of Multiple Mobile Robots. *Proc. of 1994 IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '94)*, pp. 808–815, 1994.
- [Yoshida95a] Eiichi Yoshida, Masakazu Yamamoto, Tamio Arai, Jun Ota, and Daisuke Kurabayashi: A Design Method of Local Communication Area in Multiple Mobile Robot System. *Proc. of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2567–2572, 1995.
- [Yoshida95b] Eiichi Yoshida, Masakazu Yamamoto, Tamio Arai, Jun Ota, and Daisuke Kurabayashi: A Design Method of Local Communication Range in Multiple Mobile Robot System. *Proc. of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '95)*, Vol. 2, pp. 274–279, 1995.
- [浅間 91] 浅間一, 尾崎功一, 石田慶樹, 松元明弘, ハビブ, 嘉悦早人, 遠藤勲: 自律分散型ロボットシステム ACTRESS (第5報) —複数の自立型移動ロボット間のネゴシエーション—. 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 221–222, 1991.
- [浅間 92] 浅間一: マルチエージェントロボットシステム研究の動向と展望. 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 428–432, 1992.
- [新井 92] 新井民夫, 太田順: 複数移動ロボット系の計画. 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 444–449, 1992.
- [新井 94a] 新井民夫, 木村久幸, 前田健太郎, 太田順, 梅田和昇: 移動ロボット相互の位置・姿勢実時間計測システムの開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 3, pp. 472–478, 1994.
- [新井 94b] 新井民夫, 吉田英一, 太田順: 複数移動ロボット系の局所的な通信に関する研究. 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 6, pp. 886–892, 1994.
- [石岡 92] 石岡宏治, 開一夫, 安西祐一郎: 複数の自律移動ロボットによる地図生成システム MARSHA の設計と実装. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'92

- 論文集, pp. 85–90, 1992.
- [石田 92a] 石田慶樹, 富田昇吾, 尾崎功一, 浅間一, 松元明弘, 遠藤勲: 自律分散型ロボットシステム ACTRESS (第 6 報) —プロセス間通信による通信機能の実現—. 第 10 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 291–292, 1992.
- [石田 92b] 石田慶樹, 浅間一, 尾崎功一, 松元明弘, 遠藤勲: 自律分散型ロボットシステムのための通信機能の設計と通信シミュレータの開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 544–551, 1992.
- [石田 93] 石田慶樹, 尾崎功一, 琴坂信哉, 横田一隆, 浅間一, 松元明弘, 嘉悦早人, 遠藤勲: 自律分散型ロボットシステム ACTRESS (第 10 報) —群ロボットのためのネットワーク・アーキテクチャー. 第 11 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 899–900, 1993.
- [石田 94] 石田亨: 自律エージェントのコミュニケーション. 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 6, pp. 802–807, 1994.
- [石村 92] 石村貞夫: すぐわかる多変量解析. 東京図書, 1992.
- [石綿 92] 石綿陽一, 稲葉雅幸, 井上博允: 複数のロボットによる環境の協調認識. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'92 論文集, pp. 79–84, 1992.
- [市川 92] 市川純章, 原文雄: 群ロボットの相互通信を利用した協調移動に関する研究. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'92 論文集, pp. 593–596, 1992.
- [市川 93] 市川純章, 原文雄: 呼びかけ通信を利用した群ロボット協調的経路探索行動の研究 —ロボット相互の衝突の影響を考慮した群行動の特性—. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'93 論文集, pp. 919–923, 1993.
- [市川 94] 市川純章, 原文雄: 群ロボットにおける協調行動の実験的一検討. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'94 論文集, pp. 11–16, 1994.
- [市川 95] 市川純章, 原文雄: 群ロボットシステムにおける群 知能の発現特性に関する研究 —空間探索能力とその応用—. 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 8, pp. 1138–1144, 1995.
- [巖佐 90] 巖佐庸: 数理生物学入門. HBJ 出版局, 1990.
- [ウィルソン 83] E. O. ウィルソン, 伊藤監訳: 社会生物学 (第 2 巻). 思索社, 1983.
- [植山 92] 植山剛, 福田敏男ほか: 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究 (第 10 報, CEBOT の群構造に対するネットワーク・エネルギー評価を用いた組織の分散制御). 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 58, No. 549, pp. 1466–1473, 1992.

- [植山 93] 植山剛, 福田敏男, 杉浦恒彦, 酒井彰, 上杉武弘: 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究 (第 16 報、情報の局所性と分散型遺伝アルゴリズムを用いた協調分散探索). 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 59, No. 568, pp. 3837–3844, 1993.
- [ACVS95] 機械システム振興協会: 車々間走行データ伝達システムの開発に関するフィージビリティスタディ報告書. 機械システム振興協会, 自動車走行電子技術協会, 1995.
- [太田 94] 太田順, 吉田英一, 倉林大輔, 佐々木順, 宮田なつき, 新井民夫, 大隅久: 複数の移動ロボットの協調による搬送作業の実現 (第 3 報: 持ち替え動作を含んだ障害物回避行動の実現). 第 12 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 395–396, 1994.
- [岡本 79] 岡本栄一: 数理モデル. 新曜社, 1979.
- [奥村 86] 奥村, 進士 (監修): 移動通信の基礎. 電子情報通信学会編, 1986.
- [尾崎 94] 尾崎功一, 浅間一, 石田慶樹, 松元明弘, 嘉悦早人, 遠藤勲: ネゴシエーションによる協調のためのチーム編成. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'94 論文集, pp. 5–10, 1994.
- [小田垣 93] 小田垣孝: パーコレーションの科学. 裳華房, 1993.
- [小山 95] 小山峰乙, 吉田英一, 太田順, 新井民夫: 赤外線を用いた移動ロボット間局所的通信システムの実現. 1995 年度精密工学会春季大会論文集, pp. 185–186, 1995.
- [金森 92] 金森哉吏, 梶谷誠: 複数台の移動ロボットのための通信方式. 第 10 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 287–290, 1992.
- [木村 93] 木村, 太田, 新井: 画像を用いた移動ロボット間の通信システム. 1993 年度精密工学会春季大会論文集, pp. 897–898, 1993.
- [木本 95] 木本実: PHS をめぐる最近の動きについて. インターフェース 1995.4, pp. 199–204, 1995.
- [國吉 91] 國吉康夫: 観察に基づく協調 -第 1 報: 協調行動パターンの分類に関する検討. 第 9 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 583–584, 1991.
- [國吉 92] 國吉康夫, 坂根茂幸: 観察に基づく協調 -第 2 報: 定型的協調行動パターンの表現方法に関する検討. 第 10 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 303–304, 1992.
- [倉林 94] 倉林大輔, 太田順, 新井民夫: 複数台のロボットによる領域探索行動. 第 12 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1027–1028, 1994.

- [倉林 95] 倉林大輔, 太田順, 新井民夫: 探索作業における複数移動ロボットの協調手法. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 論文集, pp. 812–815, 1995.
- [SICE92] 計測と制御: 特集: 群知能ロボット. 計測と制御, Vol. 31, No. 11, 1992.
- [SICE90] 計測と制御: 特集: 自律分散システム. 計測と制御, Vol. 29, No. 10, 1990.
- [SICE93] 計測と制御: 特集: 自律分散システムの研究の課題と新たなる展開. 計測と制御, Vol. 32, No. 10, 1993.
- [小菅 92] 小菅一弘: 複数のマニピュレータによる協調制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 439–443, 1992.
- [小西 94] 小西聡, 藤田博之: 自立分散型マイクロ搬送システム — 搬送制御手法に関する考察 —. 第 12 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 479–480, 1994.
- [小西 95] 小西聡, 藤田博之: 分散型マイクロ搬送システム (マイクロ搬送システム). 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 論文集, pp. 427–430, 1995.
- [近藤 93] 近藤晴彦: 分散制御フレキシブル組立ライン. 第 3 回ロボットシンポジウム, pp. 363–368, 1993.
- [坂尾 94] 坂尾知彦, 南都寛, 梅田靖, 富山哲男: 細胞型機械の構築 (第 5 報) — 細胞型自動倉庫の実現 —. 1994 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 913–914, 1994.
- [坂尾 95] 坂尾知彦, 南都寛, 梅田靖, 富山哲男: 細胞型機械の構築 (第 6 報) — 細胞型自動倉庫の製作 —. 1995 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 327–328, 1995.
- [佐々木 94] 佐々木順, 太田順, 吉田英一, 倉林大輔, 大隅久, 新井民夫: 複数移動ロボットによる協調搬送時における把持位置決定法. 第 12 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 357–358, 1994.
- [下原 94] 下原勝憲: ロボット集団における生物的コミュニケーションと協調制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 6, pp. 808–812, 1994.
- [信学 85] 電子情報通信学会: 移動通信特集. 電子情報通信学会誌, Vol. 68, No. 11, 1985.
- [鈴木 95] 鈴木昭二, 新井義和, 琴坂信哉, 浅間一, 嘉悦早人, 遠藤勲: 移動ロボットの協調のための赤外線センサ通信システム. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 論文集, pp. 824–827, 1995.
- [仙石 86] 仙石正和: 自動車電話の周波数有効利用 — チャンネルの割当てアルゴリズム —. 電子情報通信学会誌, Vol. 69, No. 4, pp. 351–356, 1986.

- [津村 93] 津村俊弘, 大久保博志, 小松信雄, 青木伸也: 複数移動体の為のレーザとコーナキューブを用いた光通信システム. 第 11 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 885–886, 1993.
- [土井 89] 土井, 中島, 津谷, 亀井: 移動ロボット用光空間伝送システムの開発 (第 4 報) —システムの総合特性—. 第 7 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 33–34, 1989.
- [RSJ94] 日本ロボット学会誌: 特集: ネットワーク型ロボットシステム. 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 6, 1994.
- [RSJ95] 日本ロボット学会: 重点領域研究: 群ロボット. 第 13 回日本ロボット学会学術講演会, pp. 1167–1182, 1995.
- [沼岡 92a] 沼岡千里: 自律エージェントの集団的戦略変更. 日本ソフトウェア科学会第 9 回大会, pp. 69–72, 1992.
- [沼岡 92b] 沼岡千里: 自律ロボット集団のチームワーク. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'92 論文集, pp. 69–74, 1992.
- [長谷川 91] 長谷川勉, 坂根茂幸, 佐藤知正: 知能行動のための情報処理. 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 1, pp. 112–121, 1991.
- [バーク 89] ハワード・C・バーク, 寺本英他訳: 生物学におけるランダムウォーク. 法政大学出版社, 1989.
- [福田 89] 福田敏男, 中川: 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究 (第 1 報、セル間の自動接近・結合・分離制御). 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 55, No. 509, pp. 114–118, 1989.
- [福田 91] 福田敏男, 植山剛ほか: 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究 (第 7 報、ネットワークのエネルギー評価法に基づくマスタ・セル決定法). 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 57, No. 537, pp. 1652–1660, 1991.
- [福田 94a] 福田敏男, 関山浩介: ネットワーク型ロボットシステム ～インテリジェントコミュニケーションを目指して～. 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 6, pp. 780–784, 1994.
- [福田 94b] 福田敏男, 入谷剛, 新井史人, 杉浦恒彦, 酒井彰, 山田康二: 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究 (第 75 報、環境変化に対応する群行動の再構成). 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'94 論文集, pp. 815–816, 1994.
- [プレム 91a] スパルーク・プレムウッティ, 油田信一: 簡単な自律型移動ロボットの協調行動モデルのインプリメンテーション. 第 9 回日本ロボット学会学術講演会予稿

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

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

研究業績書

査読付き学術論文

新井民夫, 吉田英一, 太田 順 :

複数移動ロボット系の局所的な通信に関する研究,

日本ロボット学会誌, Vol.12, No.6, pp.886-892, 1994.

吉田英一, 三木友由, 新井民夫, 太田 順 :

複数移動ロボット系における局所的通信に対する群行動の効果,

日本ロボット学会誌, Vol.13, No.5, 727-733, 1995.

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

Motion Skills in Multiple Mobile Robot System,

Robotics and Autonomous Systems, to be appeared (1996).

佐々木順, 太田 順, 新井民夫, 吉田英一, 倉林大輔 :

複数移動ロボットによる未知対象物の協調把持,

日本ロボット学会誌, 論文査読中.

吉田英一, 山本正和, 新井民夫, 太田 順, 倉林大輔 :

多数移動ロボットシステムの最適な局所的通信範囲の設計,

日本ロボット学会誌, 論文査読中.

査読付き講演論文

Tamio Arai, Eiichi Yoshida and Jun Ota:

Information Diffusion by Local Communication of Multiple Mobile Robots,

Proc. of 1993 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics,
Vol.4, pp. 535-540, 1993 (Le Touquet, France).

Hisashi Osumi, Tamio Arai and Eiichi Yoshida:

Cooperative Control between Multiple Manipulators with Flexibility,

Proc. of 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '93), pp.1935-1940, 1993 (Yokohama, Japan).

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

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

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

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

Cooperating Grasping of a Large Object by Multiple Mobile Robots,

Proc. of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1205-1210, 1995 (Nagoya, Japan) .

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

A Design Method of Local Communication Area in Multiple Mobile Robot System,

Proc. of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2567-2572, 1995 (Nagoya, Japan).

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

A Design Method of Local Communication Range in Multiple Mobile Robot System,

Proc. of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '95), Vol.2, pp.274-279, 1995 (Pittsburgh, USA).

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

An Algorithm of Dividing a Work Area to Multiple Mobile Robots,

Proc. of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '95), Vol.2, pp.286-291, 1995 (Pittsburgh, USA).

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

Transferring and Regrasping a Large Object by Cooperation of Multiple Mobile Robots,

Proc. of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '95), Vol.3, pp.543-548, 1995 (Pittsburgh, USA).

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

A Study on Group Behavior for Efficient Local Communication in Distributed Mobile Robot System,

Proc. of 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp.3292-3297, 1995 (Vancouver, Canada).

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

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

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

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

Cooperative Sweeping by Multiple Mobile Robots,

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

口頭発表

大隅 久, 新井民夫, 吉田英一, 佐藤宏行:

2つの弾性アームにより保持された物体の搬送制御,

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

吉田英一, 大隅 久, 新井民夫:

複数の弾性アームによる協調制御,

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

吉田英一, 新井民夫, 太田 順:

複数ロボット系における協調作業のための群形成,

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

吉田英一, 新井民夫, 太田 順, 木村 久幸:

複数移動ロボット間の分散型通信に関する研究,

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

吉田英一, 新井民夫, 太田 順:

分散型の通信による複数移動ロボット協調,

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

吉田英一, 新井民夫, 太田 順:

局所的通信による複数移動ロボットの協調,

第11回日本ロボット学会学術講演会, pp.895-898, 1993.

吉田英一, 新井民夫, 太田 順, 三木友由:

局所的通信を行なう移動ロボットの群行動の効果,

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

吉田英一, 新井民夫, 太田 順:

移動ロボット間の局所的通信による情報伝達コストに関する考察,

1994 年度精密工学会春季大会論文集, pp.349-350, 1994.

太田 順, 佐々木順, 吉田英一, 倉林大輔, 大隅 久, 新井民夫:

複数の移動ロボットの協調による大型対象物の把持,

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

吉田英一, 新井民夫, 太田 順, 三木 友由:

複数移動ロボットの局所的通信に対する群行動の効果,

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

吉田英一, 山本正和, 太田 順, 新井民夫:

複数ロボット系における局所的通信範囲の設計法,

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

吉田英一, 新井民夫, 太田 順, 三木友由:

複数移動ロボットの局所的通信に対する群行動の効果,

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

佐々木順, 太田 順, 吉田英一, 倉林大輔, 大隅 久, 新井民夫:

複数移動ロボットによる協調搬送時における把持位置決定法,

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

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

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

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

小山 峰乙, 吉田英一, 太田 順, 新井民夫:

赤外線を用いた移動ロボット間局所的通信システムの実現,

1995 年度精密工学会春季大会論文集, pp.185-186, 1995.

吉田英一, 新井民夫, 太田 順:

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

太田 順, 宮田なつき, 吉田英一, 佐々木順, 新井民夫:

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

山本正和, 吉田英一, 太田 順, 新井民夫:

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

宮田なつき, 太田 順, 佐々木順, 吉田英一, 倉林大輔, 新井民夫:

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

山本正和, 吉田英一, 太田 順, 新井民夫:

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

吉田英一, 新井民夫, 太田 順:

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

太田 順, 吉村裕司, 吉田英一, 倉林大輔, 井上康介, 新井民夫:

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

吉田英一, 山本正和, 太田 順, 新井民夫, 佐々木雄飛:

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

宮田なつき, 太田 順, 佐々木 順, 吉田英一, 倉林大輔, 新井民夫:

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

太田 順, 吉村裕司, 吉田英一, 倉林大輔, 井上康介, 新井民夫:

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

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

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

吉村裕司, 太田 順, 吉田英一, 倉林大輔, 井上康介, 新井民夫:

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

その他

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

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

