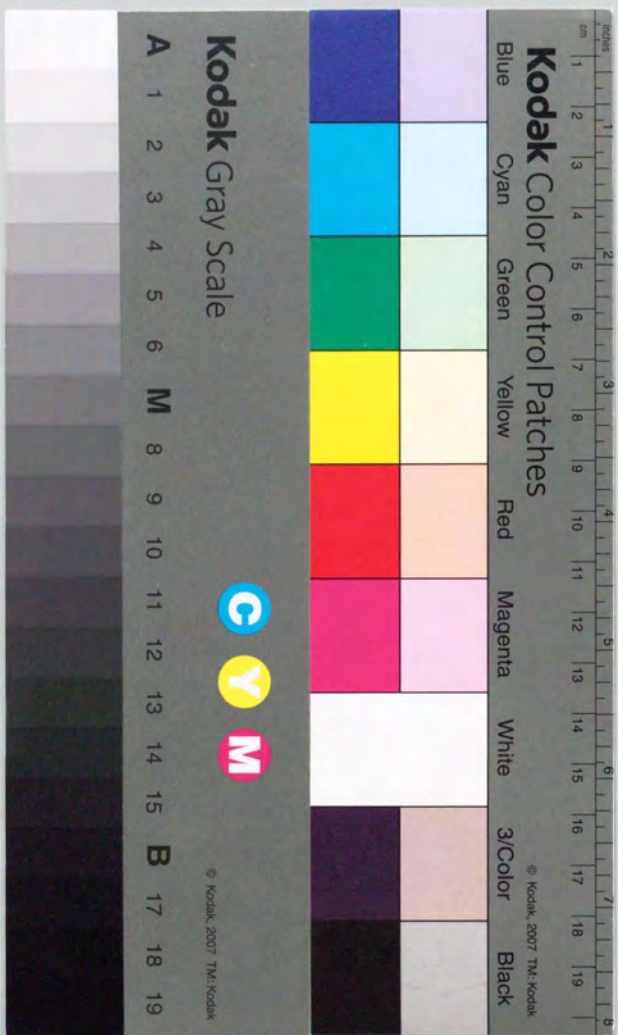


移動ロボットの局所的通信による
情報伝播モデルの解析

吉田 英一



博士論文

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・設計を行なってから、次に時間的な解析・設計に移ることにする。

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もっとも短い」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、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

1 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
2 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	41
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	44
2.6 おわりに	47
3 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
4 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
5 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	173
5.4.3 複数台への伝達を考慮した最適な通信範囲の検証	175
5.4.4 具体例の計算	177
5.5 協調作業における情報提示時間の設計	180
5.5.1 協調作業のシミュレーション	180
5.5.2 シミュレーション結果の考察	183
5.5.3 具体的な計算例	185
5.6 おわりに	188
6 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	205
6.5 群形成アルゴリズム	208
6.5.1 群形成のアルゴリズム	208
6.5.2 群形成のシミュレーション	209
6.6 おわりに	212
7 バ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	情報伝達数が多い場合の伝播モデル	233
7.4	おわりに	235
8	評価	237
8.1	はじめに	238
8.2	大域的通信のモデルと解析	240
8.3	局所的通信のモデルと解析	244
8.4	伝達時間による比較	248
8.5	おわりに	254
9	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

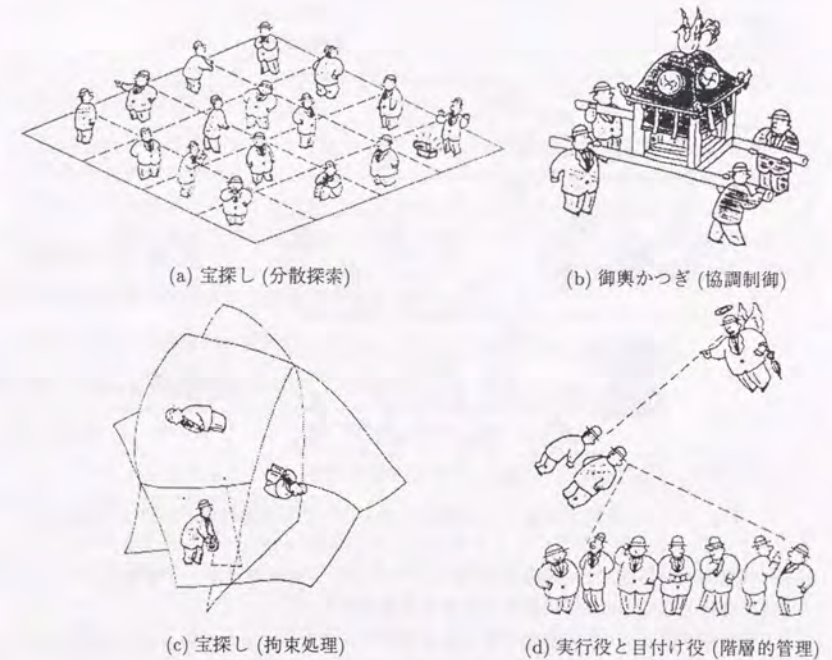


Fig. 1.1 多数ロボットによる協調形態の分類 ([長谷川 91] より)

獲得して学習を行なったりすることが可能となる。

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。

- (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

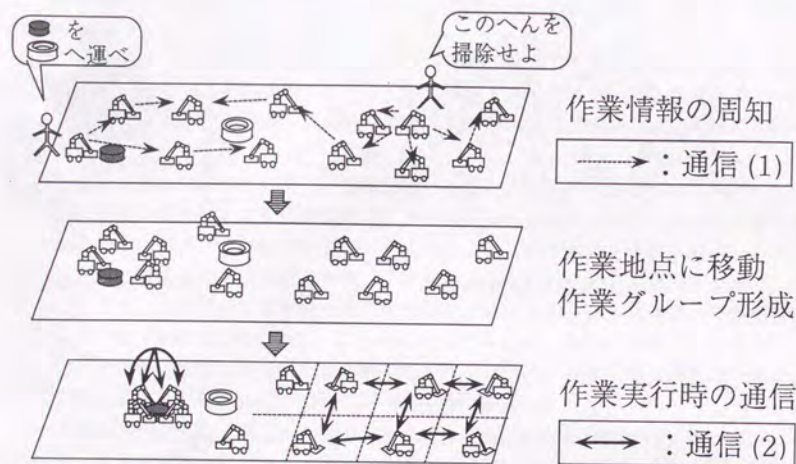


Fig. 1.2 本論文で対象とする多数ロボットによる協調作業システムの概念図

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。

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な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

- 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)。

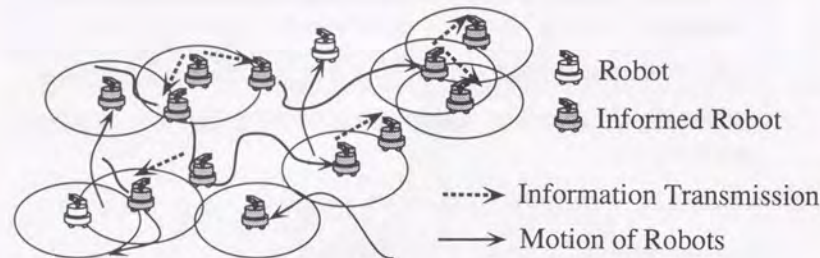


Fig. 1.3 複数ロボット間の情報伝播

「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	設計	情報出力範囲調節が可能
	通信容量	入力	ロボットの通信能力に依存
	通信の信頼性	入力	ロボットの通信能力に依存
	情報出力の確率（間隔）	入力	一般に作業に依存
	ロボット密度	入力	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	入力	作業に依存
	情報の提示時間	設計	情報の有効期間設定が可能
	移動速度	入力	通常機能的に許される最大値
	移動方法	設計	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

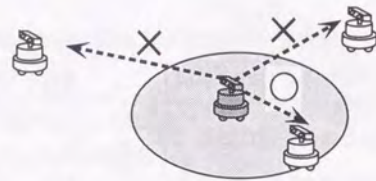


Fig. 1.4 通信の空間的設計

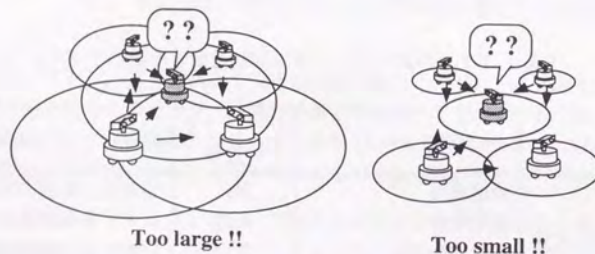


Fig. 1.5 通信範囲の最適化

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た。

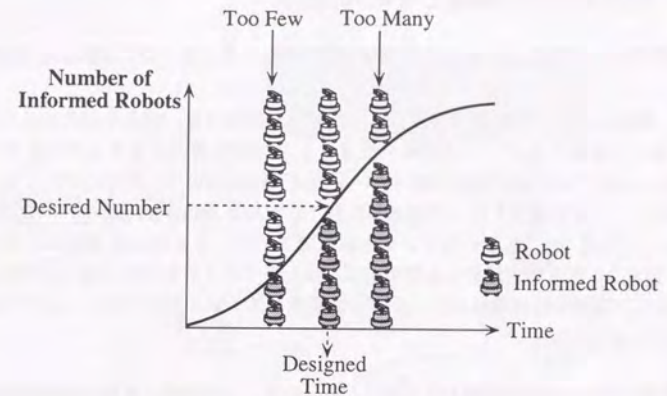


Fig. 1.6 通信の時間的設計

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ヒックが高くなる。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

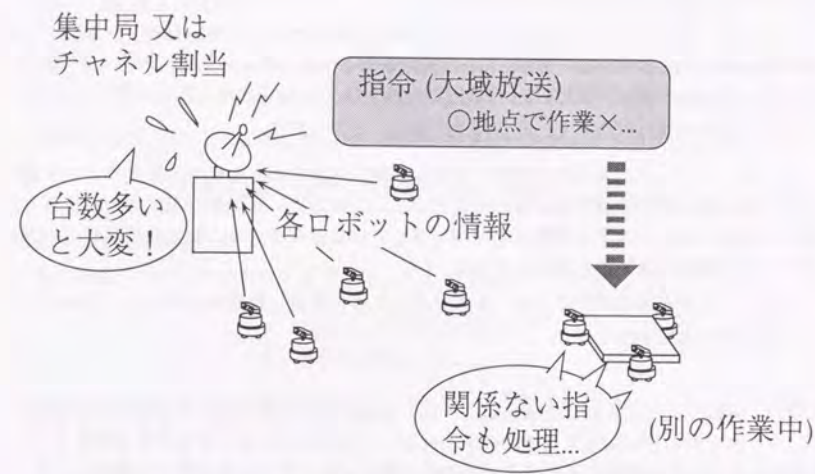


Fig. 1.7 大域的な通信の問題点

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。入力の前章と同様であるが、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。

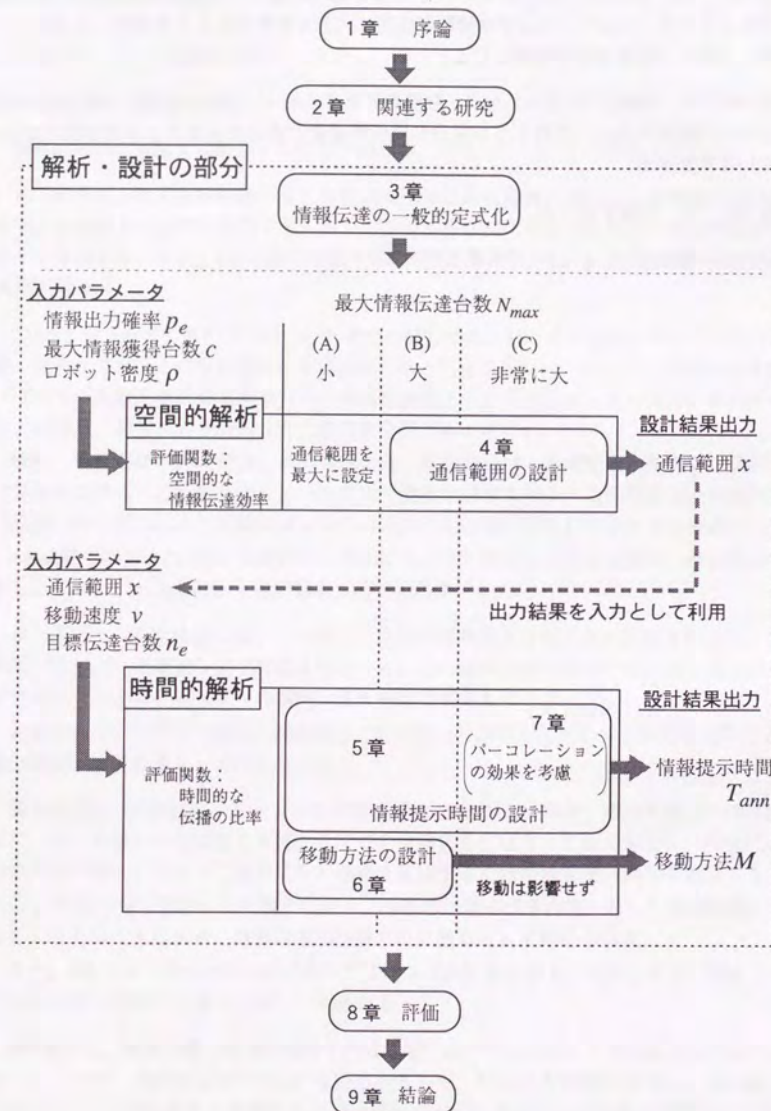


Fig. 1.8 論文の構成

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	41
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	44
2.6 おわりに	47

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。ミツパ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]

プレムウツティら [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。

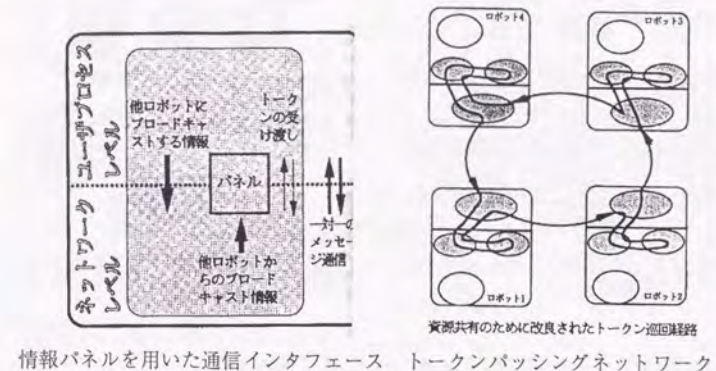


Fig. 2.1 CAR-Net2 [プレム 91b]

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つてどのような環境情

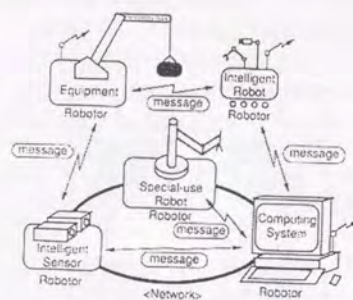
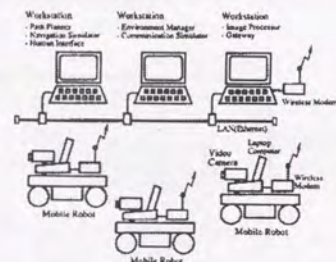


Fig. 2.2 ACTRESS の概念 [松元 89]

Fig. 2.3 ACTRESS の通信システム
[石田 92a]

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]

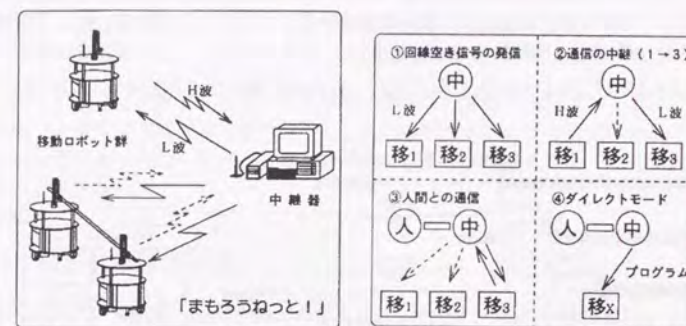
金森 [金森 92] は、移動ロボットによる協調搬送作業を実現するため、Fig. 2.4 のような、無線中継局を介した通信システム Mamoro Net (Communication Network for Multiple Autonomous Mobile Robots) を開発した。協調作業として資材の運搬作業を想定し、対象とするロボットの台数は 10 台以下としている。

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出す。



ロボット間無線通信システムの構成

ネットワークの通信形態

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。

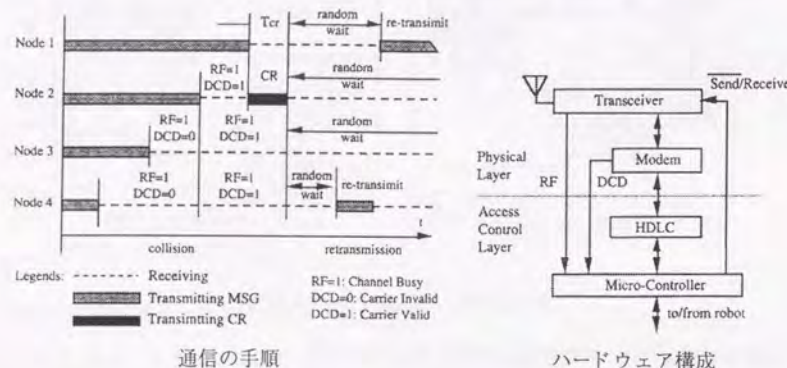


Fig. 2.5 分散制御ロボット通信プロトコル CSMA-CD/W [Wang94b]

[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 Acknowledgment using multicast)がある。この研究では、実際の複数移動ロボット同士では、「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数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力し、その満足度をもとにして条件に合致する通信相手を選定する。

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、また移動局同士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、全体としての協調的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、そ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。

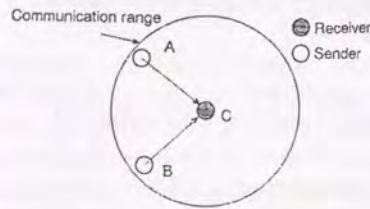


Fig. 2.6 Hello-Call Communication

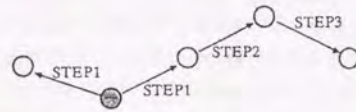


Fig. 2.7 通信の連鎖 [Hara92]

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

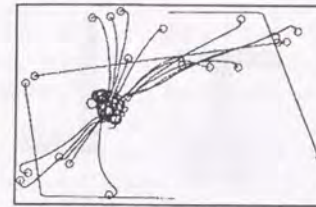


Fig. 2.8 限られた通信範囲をもつロボットによる集結行動 [市川 92]

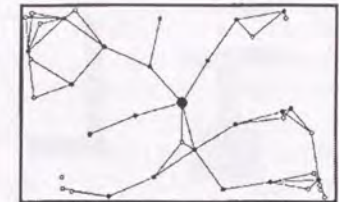


Fig. 2.9 経路探索行動 [市川 93]

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ー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。

以上に示した空間探索・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。

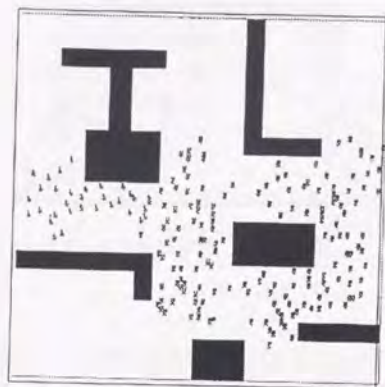
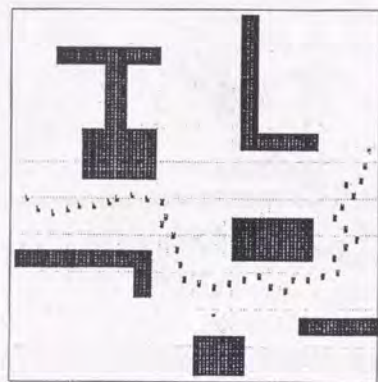


Fig. 2.10 ステップ「雲」の形成

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ー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けれども、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、知ることで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、現在の局所状態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 (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ため、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、餌を集めるといった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]。

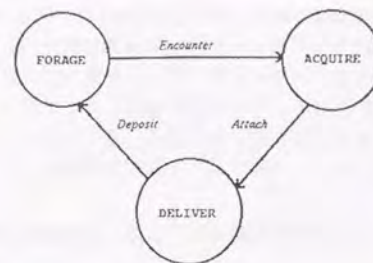


Fig. 2.12 餌集めロボットの行動原理

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出来る。

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。

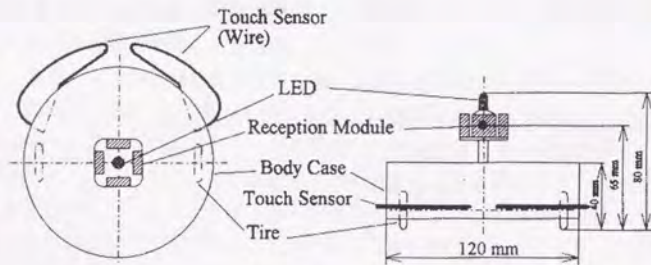


Fig. 2.14 局所的な通信に基づいて行動するロボット [市川 94]

[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

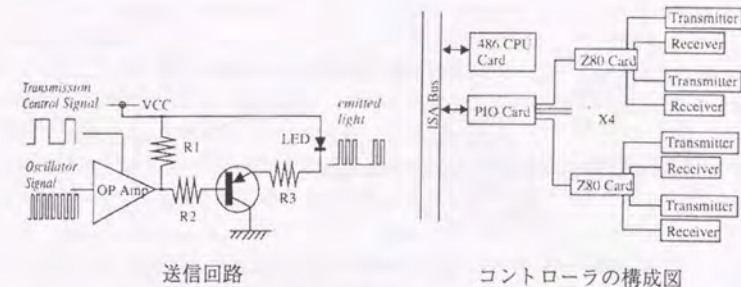


Fig. 2.15 赤外線センサ・通信システム [鈴木 95]

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的高速・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、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

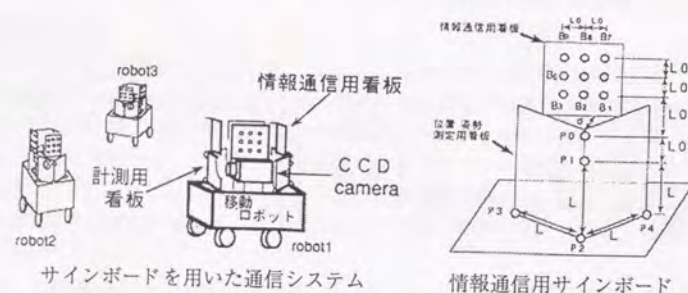


Fig. 2.16 画像を用いたロボット間相互位置・姿勢計測システムと通信装置
[新井 94a]

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。

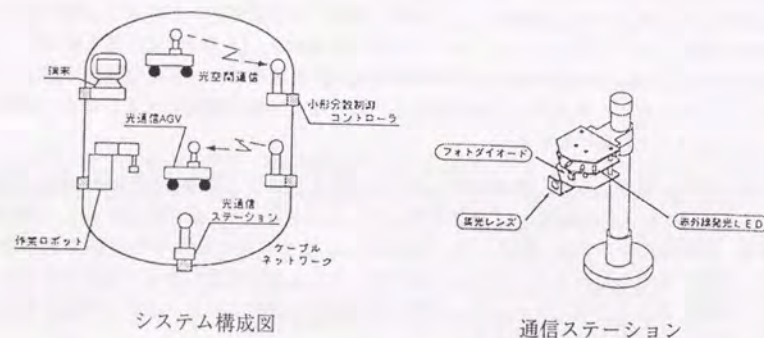


Fig. 2.17 分散制御フレキシブル組立ライン [近藤 93]

[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ー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、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。

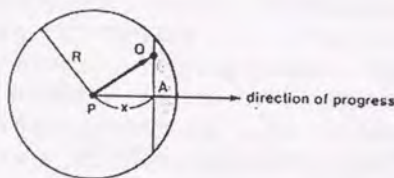


Fig. 2.19 無線端末間の情報伝達と目標とする伝達方向 [Takagi84]

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定める必要がある。

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を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ネルを多数のゾーンで使用する場合には、チャネル割当て (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変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

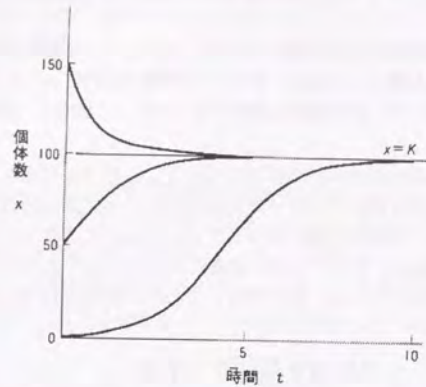
$$x(t) = \frac{K}{1 + C \exp(-rt)} \quad (2.2)$$

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。

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。

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

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、その時間的な伝播過程の解析に関するものはほとんど見られない。

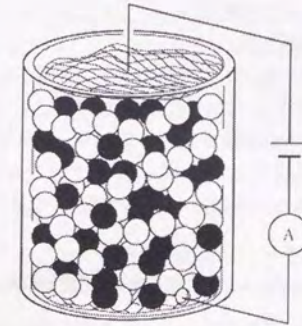


Fig. 2.21 広口ビンの中に金属球●と絶縁体球○をある割合で詰め、上下に敷いた金属シートの上に電流が流れるかどうかを測定する。金属球の割合がいくらあれば電流が通じるか、また系全体の電気伝導度は金属球の割合にどのように依存するかを調べる [小田垣 93]。

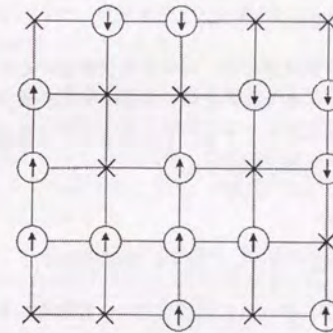


Fig. 2.22 希薄強磁性体のイジングスピン模型。↑, ↓が強磁性スピン, ×が非磁性元素を表す。最近接相互作用のみが存在する場合、系が絶対0度で強磁性を示すには、隣り合ったスピンの繋がりが無限に広がっている必要がある。そのためには、強磁性スピンの割合がいくら以上必要かを調べる [小田垣 93]。

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。
 - － 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標とする。

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な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な定式化を行なう。

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台行ってしまう、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	<ul style="list-style-type: none"> 作業開始・終了座標 荷物の重量 	<ul style="list-style-type: none"> 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]、黒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

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	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 各自の位置情報 各自の荷重情報 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	<ul style="list-style-type: none"> 各自の位置情報 各自の荷重情報
		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) 情報はバ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、バ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)の情報バ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つの情報バ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、情報バケットは、

- ・ 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、バ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回のバケットの伝達により行なわれる。

これらのバ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。

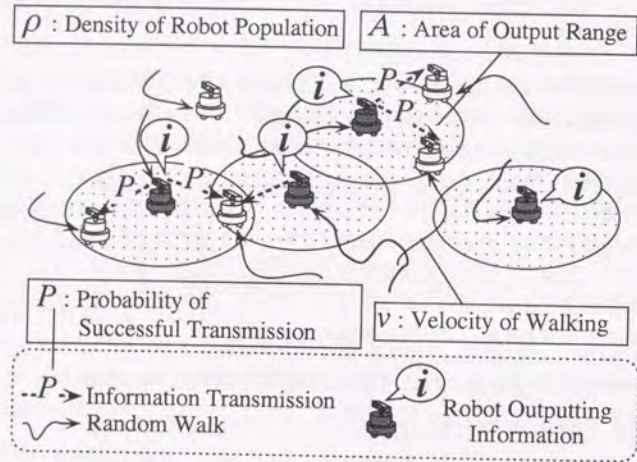


Fig. 3.1 局所的通信の一般的環境

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 よりも直観的

Table 3.5 ロボットシステム的环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 , M	ロボットに依存するパラメータ
x (または A), 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

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 , 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制的な制限、通信能力から決定される。また、移動方法 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。空間的解析は情報伝達時間の短縮に、そして時間的解析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

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]

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	設計
		最大情報伝達数	c	入力
		情報出力確率	p_e	入力
		ロボット密度	ρ	入力
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	入力
		情報の提示時間	T_{ann}	設計
		移動速度	v	入力
		移動方法	M	設計

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い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。

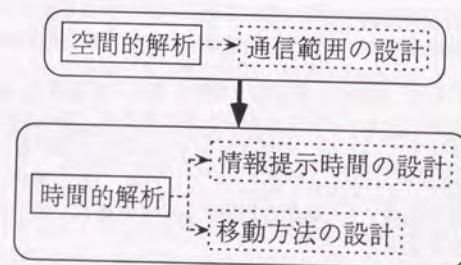


Fig. 3.2 局所的通信システムの解析・設計の手順

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。

入力パラメータ

情報出力確率 p_e
最大情報獲得台数 c
ロボット密度 ρ

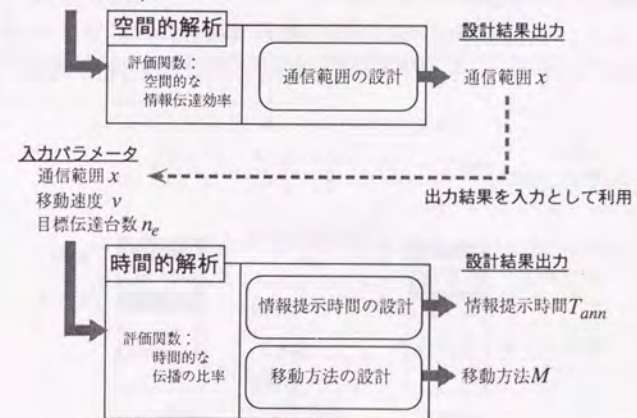


Fig. 3.3 システム設計における評価指標、設計・入力パラメータの関係

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達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。

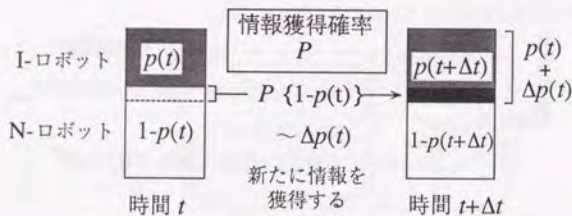
3.2節で示したように、情報の伝播比率 $p(t)$ は、ある情報が時間0で発生したとして、その情報を時間 t までに獲得したI-ロボットの比率であり、「また聞き」による情報の「クチコミ」的な伝播過程を表す。以下では、 $p(t)$ の時間的な変化を考えていく。

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 M などに依存する比例定数を $\beta(v, M, x)$ を導入して、移動の掃引による効果を $\beta(v, M, x)\Delta t$ でモデル化すると、 $\Delta p(t)$ は

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

Fig. 3.4 I-ロボットの比率 $p(t)$ の時間的な変化

と書ける。これから $p(t)$ に関する微分方程式

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

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・設計を行な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。

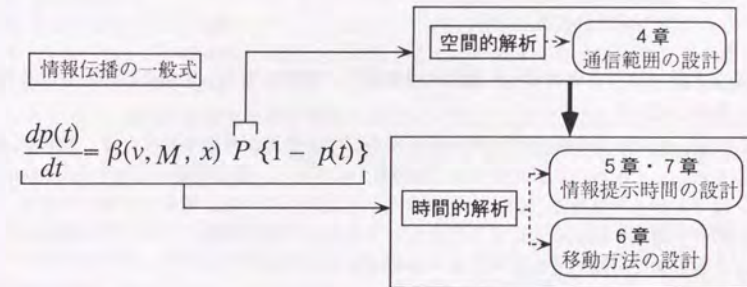


Fig. 3.5 情報伝播の一般式 (3.2) と解析・設計の手順との関係

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的环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 x 」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 を大きくすると、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「バーコレーション」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。

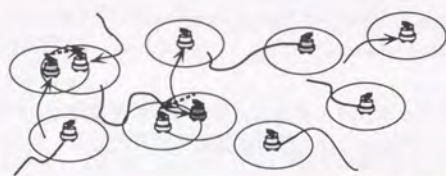
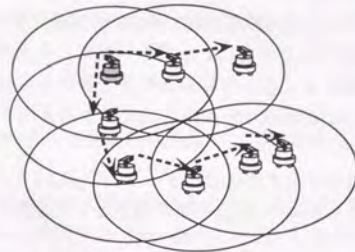
このように、最大の通信量を表す環境パラメータ N_{max} により、設計に適用する解析が異なってくる。ここで、どれくらいの N_{max} の値を境界として適用する解析の違いが生じるのかを考えてみる。

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。

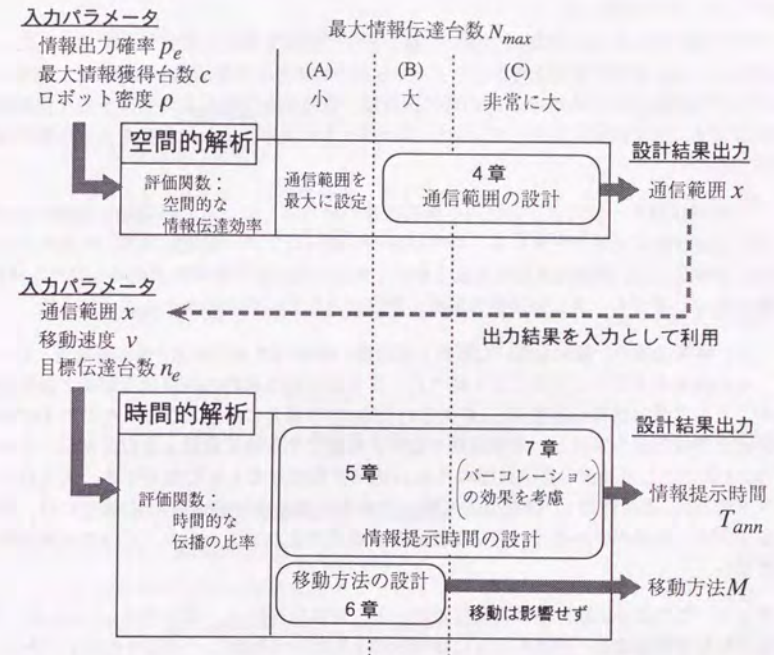


Fig. 3.9 N_{max} による分類に対する解析と、評価指標、設計・入力パラメータの関係

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・設計を行なってから、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章で述べ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バーコレーションの効果が支配的になる。これに関して、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。

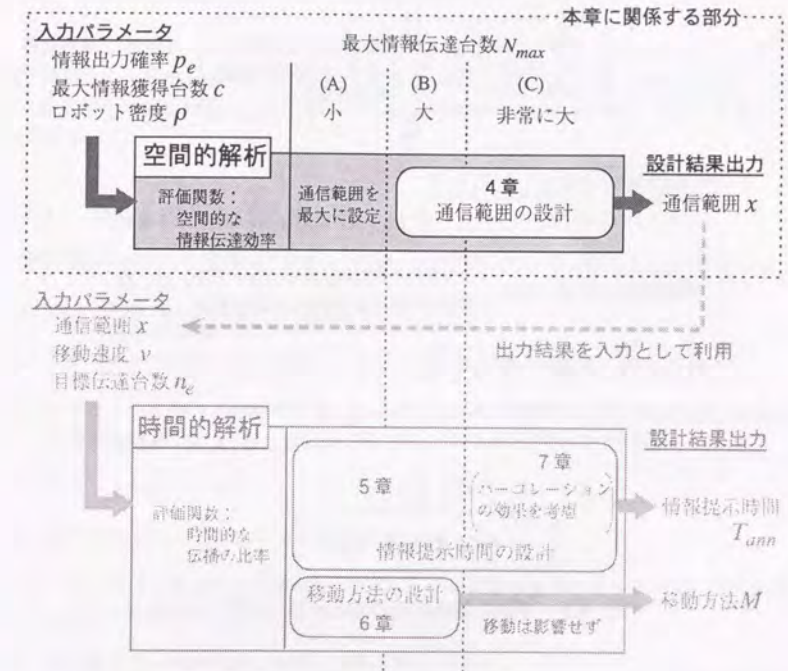


Fig. 4.1 局所的通信の解析・設計における本章の位置付け

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、

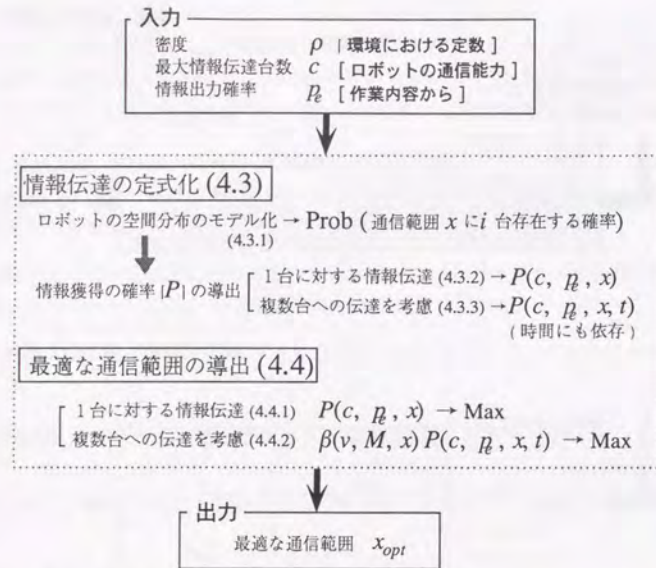


Fig. 4.2 最適な通信範囲の導出過程 (4.3節, 4.4節)

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

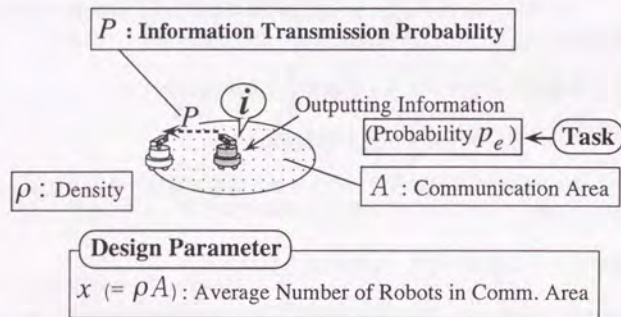


Fig. 4.3 本章の設計に関係する主なパラメータ

- (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。

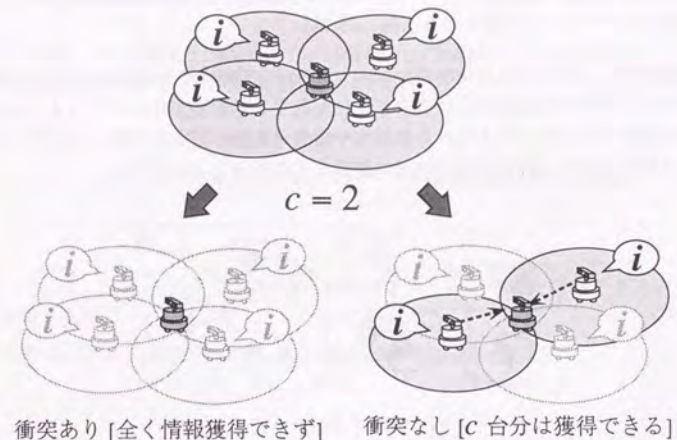


Fig. 4.4 多数のロボットから情報の出力を受けた場合の情報の衝突

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に一台ずつ存在し、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。

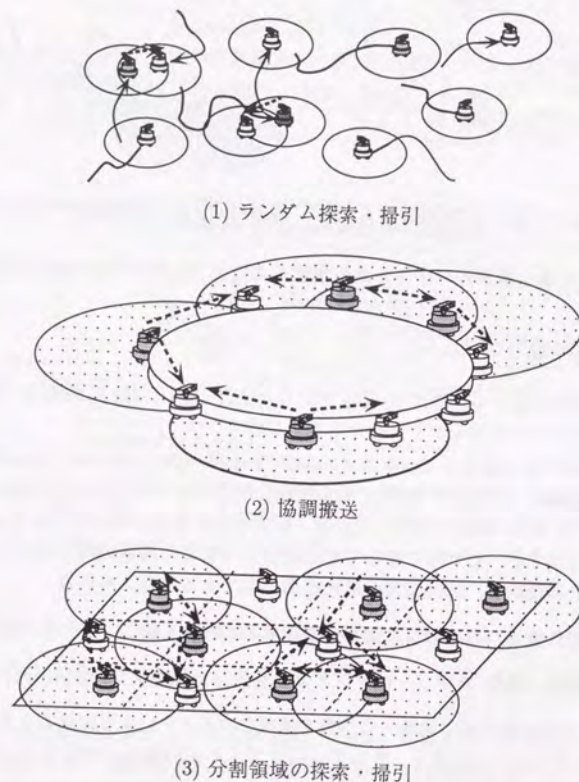


Fig. 4.5 協調作業のモデル化

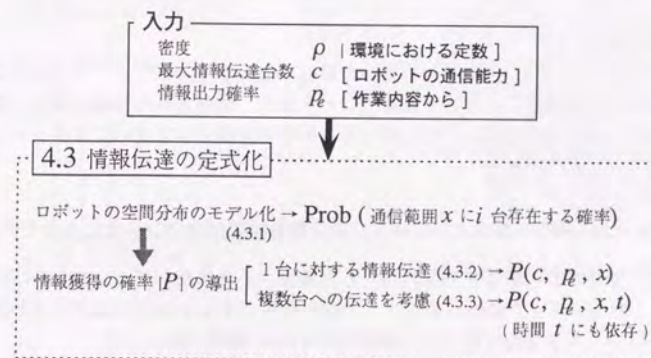
4.3 情報伝達の定式化

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、

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

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 , ρ , x の関数となり $P(c, \rho, x)$ 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と、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 $S(x)$ に個体が i 個存在する確率

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

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 $S(T)$ に個体が i 個存在する確率 $\text{Prob}[i | i \in S(T)]$ は、平均 κT のポアソン分布

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

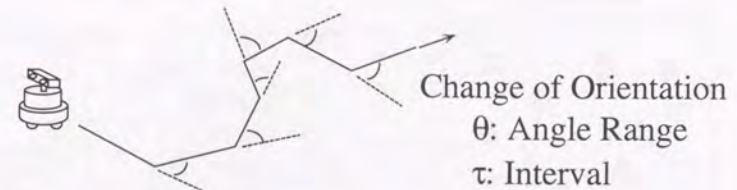


Fig. 4.7 ランダム移動

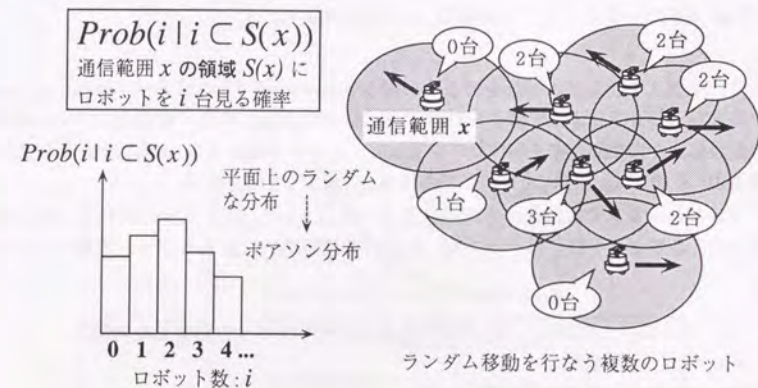


Fig. 4.8 多数ロボット系へのポアソン分布の適用

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 $\text{Prob}[i | i \in S(x)]$ は

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

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%より小さくすれば、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。 $\text{Prob}[i | i \in S(0.99x)] = \frac{(0.99x)^i}{i!} e^{-0.99x}$ 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±5%以内となる。

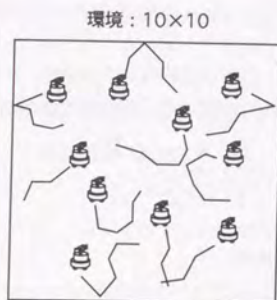


Fig. 4.9 シミュレーション環境

Table 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%

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。

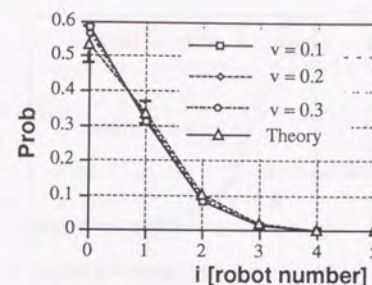
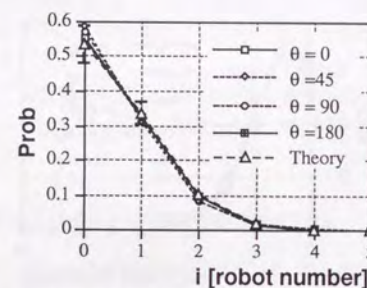
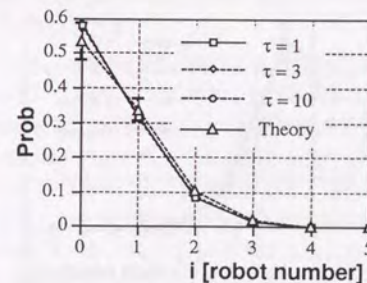
$M_r[i]$: ロボット r が通信範囲 A にロボットを i 台観測した回数
s	: 総ステップ数
m	: ロボット台数

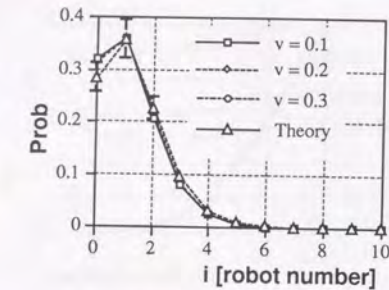
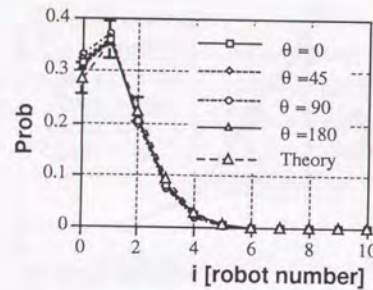
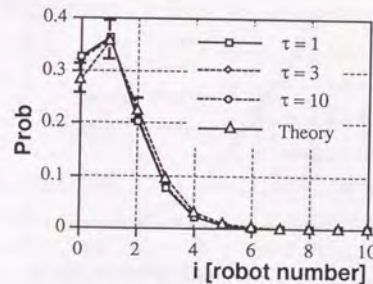
といて、面積 A の通信範囲内に、ロボットを i 台発見する確率の全てのロボットに関する平均 $\text{Prob}_{sim}[i|i \in S(x)]$

$$\text{Prob}_{sim}[i|i \in S(x)] = \frac{\sum_r M_r[i]}{ms} \quad (4.3)$$

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

(a) 速度 v を変化した場合(b) 角度変化範囲 θ を変化した場合(c) 角度変化周期 τ を変化した場合Fig. 4.11 シミュレーション結果 $\text{Prob}_{\text{sim}}[i \in S(x)]$ ($\rho=0.4, R_c=1$)

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 $\text{Prob}[i \in S(x)]$ は、移動の仕方にかわらず、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 $\text{Prob}[i \in S(R_c)]$ 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 $\text{Prob}[i \in S(R_c)]$ 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。 $\text{Prob}[i \in S(R_c)]$ 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、

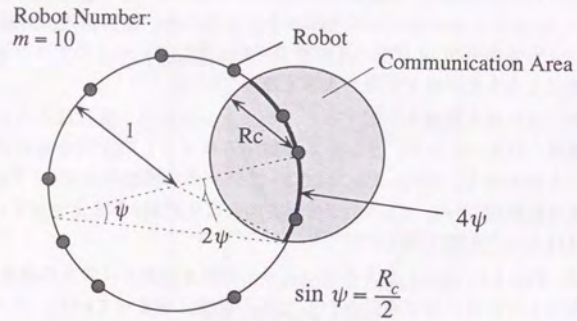


Fig. 4.12 協調搬送作業における空間分布の導出過程

$$\mu = \frac{2(m-1)}{\pi} \sin^{-1} \frac{R_c}{2}$$

$$\text{Prob}[i|i \in S(R_c)] = {}_{m-1}C_i \left(\frac{\mu}{m-1}\right)^i \left(1 - \frac{\mu}{m-1}\right)^{m-1-i} \quad (4.4)$$

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 $\text{Prob}[i|i \in S(R_c)]$ を、ロボット分布のシミュレーション結果 $\text{Prob}_{sim}[i|i \in S(R_c)]$ 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。

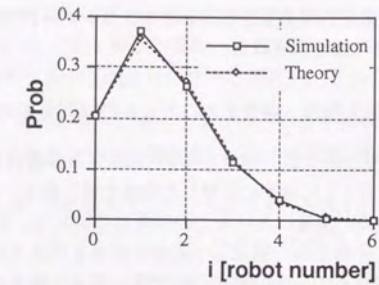
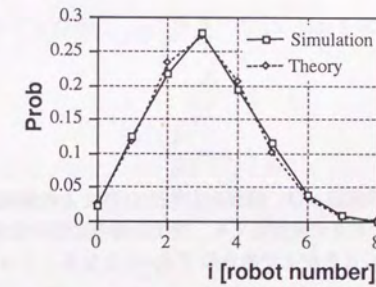
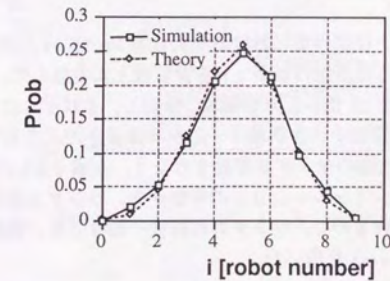
(a) 通信半径 $R_c=0.5$ のとき(b) 通信半径 $R_c=1.0$ のとき(c) 通信半径 $R_c=1.5$ のときFig. 4.13 空間分布のシミュレーション結果 $\text{Prob}_{sim}[i|i \in S(R_c)]$

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、その枠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変化しても、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 $\text{Prob}[i | i \in S(x)]$ 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 $\text{Prob}_{\text{sim}}[i | i \in S(x)]$ 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、 $\text{Prob}_{\text{sim}}[i | i \in S(x)]$ 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。

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

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。

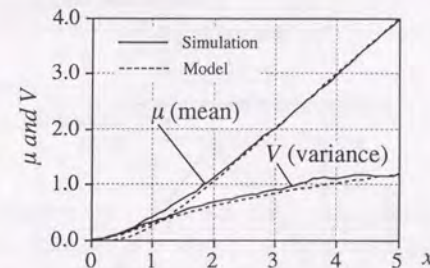
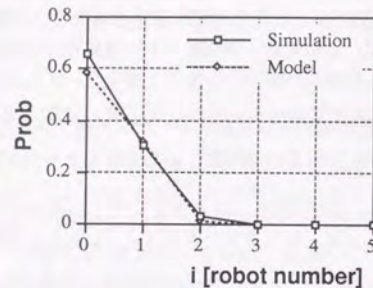
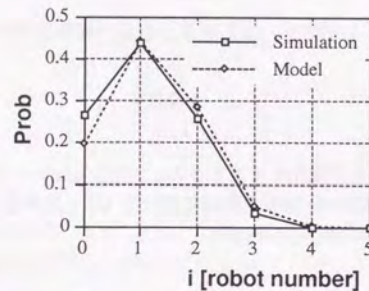
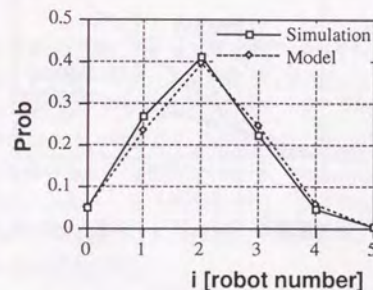


Fig. 4.14 通信範囲の平均ロボット台数 i の平均 μ と v の近似

通信範囲 x を1,2,3にとり、シミュレーションから得られたロボット台数の分布 $\text{Prob}_{\text{sim}}[i | i \in S(x)]$ 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 $\text{Prob}_{\text{sim}}[i \in S(x)]$

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	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

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。