



自律分散型ロボットシステムのための無線通信システムの開発*

尾崎功一** 浅間 一*** 石田慶樹† 松元明弘†† 遠藤 勲†††

Development of a Wireless Communication System for a Distributed Autonomous Robotic System

Koichi OZAKI, Hajime ASAMA, Yoshiki ISHIDA,
Akihiro MATSUMOTO and Isao ENDO

In this paper, authors discuss about development of a wireless communication system for a distributed autonomous robotic system, which is composed of various types of multiple agents. In order to achieve cooperative behavior among multiple agents including mobile robots, it is required to enable performance of communication with flexibility, reliability and interoperability. Based on these requirements, a wireless communication system based on the Carrier Sense Multiple Access (CSMA) have been designed and developed by using wireless MODEM's. A hierarchical architecture is adopted for consistency and for interoperability. This communication system is applied to a prototype system consisting of actual mobile robots and a workstation. In this paper, it is shown experimental results of inter-communication by using the prototype system. Authors have proved above performance required in the wireless communication system.

Key words: wireless communication, CSMA, layering architecture, distributed autonomous robotic system, mobile robot, cooperation

1. 緒 言

自律分散型ロボットシステム (Distributed Autonomous Robotic System: 以下DARS) では、複数の自律ロボットが協調的行動を行うことにより、ロバスト性および柔軟性を達成することを目標としている。各々のロボットには、相互に状態を把握し、状況に適応した行動を自律的に生成し、実行できるような協調行動メカニズムが要求される。本論文では、協調行動を実現するためにロボット間の情報交換が必要であると考え、エージェント間の通信機能について議論する。ロボット間通信は、(1) 直接的手段による方法と(2) 間接的手段による方法とに分類されるが¹⁾、ここでは、通信の信頼性および柔軟性が重要であると判断し、直接的手段を利用した通信を採用する。

これまでのDARS、特に移動ロボットの協調に関する研究では、複数のロボットが存在する広い環境を前提とするため、シミュレーションによる手法の開発が多く、ここでは、エージェント間通信が単にプロセス間通信で置き換えられている。しかし、実際の移動ロボットを用いるとなると、通信システムを実現することが必要となる。これまでに複数の移動ロボットの協調における通信の必要性を指摘している研究は多いが^{2)~6)}、協調のためにどのような通信機能が必要であるか、それをどう実現するか議論は行われていない。これまで実際に開発されている通信システムは、特定の協調行動のためのアドホックなものが多い⁴⁾。金森らはポーリング/セレクトイング方式に基づいた無線通信システムを開発したが⁵⁾、この通信方式は、通信の管理者を必要とする集中管理システムとなるため、柔軟性およびロバスト性が低い。また、プレムウッティらはトークン・パッシング方式に基づいた無線通信システムを開

発したが⁶⁾、この通信方式では、情報伝達の流れが固定されており、また、トークン喪失の取扱いなどが問題となるため、柔軟性も低い。柔軟なエージェント間通信を実現するために、矢向らは時分割多重方式に基づいた無線通信システムを開発した⁷⁾。しかし、これらの通信方式では、ロボットの増加に伴いむだな通信が増え、通信を利用するための待ち時間が長くなるため通信効率が低くなる。

これまで我々は、機能分散および協調の概念に基づいてACTRESSと呼ばれるDARSの開発研究を行ってきた⁸⁾。本論文の目的は、DARSによる協調を実現するための通信の要求仕様を明らかにし、これに基づいた無線通信システムの設計開発を行うことである。

2. DARSのための通信機能

まず本論文では、様々な機能および形態を持つエージェント(ロボットあるいは計算機などの機器)から構成されるDARSにおけるエージェント間通信機能に対する前提および要求仕様について述べる。

本研究では、ある室内での作業環境を想定し、移動ロボットの台数を数台(10台以下)と仮定する。また、移動ロボット間の通信は、複雑な状況での衝突回避、協調作業で発生した問題の解決などの際に行われる交渉や、経路計画に必要な環境情報の要求・獲得など、イベントに基づいて行われることとする⁹⁾¹⁰⁾。よって、通信の頻度は数~数十秒に1回程度と想定される。すなわち、通信のトラフィックは比較的疎である。ただし、イベントによっては、通信のトラフィックが突発的に密になる状況も想定される。また、複数のエージェント間で交換する情報に関してすでに議論したが¹⁰⁾、本論文では、ロボットのコマンド(手続きレベル)、地図情報(知識レベル)、協調の依頼(概念レベル)など、高いレベルでの情報をメッセージとして交換することとする。

次に、これまでに述べたDARSの前提に基づいてエージェント間通信に要求される機能を明らかにする。

移動ロボットなどの自由に動き回れる動的エージェントが存

* 原稿受付 平成6年12月5日

** 学生会員 埼玉大学大学院(浦和市下大久保255)

*** 正会員 理化学研究所(和光市広沢2-1)

† 正会員 九州大学大型計算機センター(福岡市東区箱崎6-10-1)

†† 正会員 東洋大学工学部(川崎市鯉井中野台2100)

††† 理化学研究所

在する通信システムは、これらの自由な動きを阻害しないことが望ましい。また DARS は、計算機のような静的エージェントに関しても作業目標に応じてシステム構成を変更する場合に対し、それを容易に移動できるような柔軟性が必要である。

DARS では、複数の自律エージェントが存在しており、緊急を要するような情報を伝達する場合などを考えると、あらゆるエージェントへ通信する機能が必要であると考えられる。または、エージェントの自律性を考慮すると、通信がいつ必要となるか予測できない。このような非定常的通信においても、通信の滞りが避けられむだのない効率的な通信が必要である。さらに、エージェントが広域にわたり分散している可能性もあるため、離れたエージェントとも通信できなければならない。すなわち、大局的な通信機能が必要となる。

これまでの議論の結果、DARS に要求される通信形態として、(a) 交渉、(b) 通知、(c) 問合せ、(d) 提供、(e) 同期が必要となることが明らかになった¹⁰⁾。(a) 交渉では、多数のエージェントに問題を通知しながら、特定のエージェントとのメッセージ交換によりその問題を解決する。(b) 通知では、すべてのエージェントに情報を与える。(c) 問合せでは、特定のエージェントに依頼し、そのエージェントから必要な情報を獲得する。(d) 提供では、特定のエージェントに情報を与える。(e) 同期では、複数のエージェントの同期をとる。したがって、(a) 交渉、(c) 問合せ、(d) 提供において一対一の通信が必要になるばかりでなく、(a) 交渉、(b) 通知、(e) 同期では一対多の通信も必要となる。また、一対多の通信でもすべてのエージェントへ通信するブロードキャストのみならず、グループを限定した一対多の通信が必要となる。なぜなら、ブロードキャストの多用は、エージェントの数が増すにつれ、エージェント間の不要なメッセージの増加や、通信回線の占有による通信の低効率化を招く可能性が高くなるためである。

またエージェント間通信には、高い信頼性が必要である。これには通信失敗時の検出・再送信などを行えるような頑健性も含まれる。さらに、すべてに共通の通信プロトコルを装備する必要があるため、通信機能に相互接続性が要求される。特に、開発を容易にするためにハードウェアの差異を吸収できるようにアーキテクチャが必要となる。

以上の要求仕様をまとめる。

- (1) エージェントの移動性を損なわない (移動性)
- (2) システム構成を容易に変えられる (柔軟性)
- (3) 効率的に通信を利用できる (効率性)
- (4) 大域的な通信領域を持つ (大局性)
- (5) 多様な通信形態 (一対一通信、一対多通信) を実現できる (多様性)
- (6) 通信の信頼性が高い (信頼性)
- (7) 任意のエージェント間で通信を行える (相互接続性)

3. 無線通信システムの基本設計

前章で明確にした要求仕様に基づいて基本設計を行った。まず、要求仕様 (1) 移動性、(2) 柔軟性および (5) 多様性を考慮し、通信手段を無線とした。特に (4) 大局性を実現するために通信メディアの通信距離が長距離であるものを選ぶこととした。また、(2) 柔軟性、(3) 効率性および (5) 多様性を実現するために、LAN の通信方式で標準的な CSMA 方式¹¹⁾ に基づいた手法を採用した。CSMA 方式による通信では、トークン・パッシング方式のように通信回線の接続が固定されてい

いため、エージェントは通信を行う際に、通信回線が空き状態であることを検出し、この回線を利用して通信データ (パケット) を送信する。パケットには通信のあて先 (アドレス) が記述されており、エージェントが自分あてのパケットを認識しそれを読むことにより、通信が実現される。したがって、アドレスを個別に指定することにより一対一通信が実現でき、また、あらかじめ複数を対象とするアドレスを定義し、それを指定することにより一対多通信が実現できる。さらに、グループを限定した一対多の通信を実現するため、通信メディアのアドレスにグループを指定できることとした。本論文では、グループ内に閉じた一対多の通信をグループキャストと呼ぶ。計算機のための通信方式として、一対多通信の一種でマルチキャスト¹²⁾と呼ばれる通信機能が存在するが、グループキャストは、グループのメンバーが目的に応じて動的に構成されるためマルチキャストとは異なる。

(6) 信頼性および (7) 相互接続性を実現するために、無線通信システムのソフトウェア構成を層構造とした。さらに、ロボットを制御する機器が計算機であることに注目し、計算機で標準的な TCP/IP プロトコルと相互接続性のある無線通信システムを設計した。この構成の対比を図 1 に示す。本無線通信システムは、最下層から無線通信メディア (無線モデム)、インタフェース層、モデム制御層、メッセージ・プロトコル層、応用層で構成される。各層の役割を以下に示す。

- (1) インタフェース層 (Interface Layer) : インタフェース層では、通信メディアとエージェント間の通信データの入出力を制御する。
- (2) モデム制御層 (MODEM Control Layer) : モデム制御層では、通信メディアの制御を行う。エージェントに接続される通信メディアは、通信データを単に電波に変換するだけのものから、機器自体が通信に関する制御を行うものまで幅が広い。前者の通信メディアを利用する場合は、通

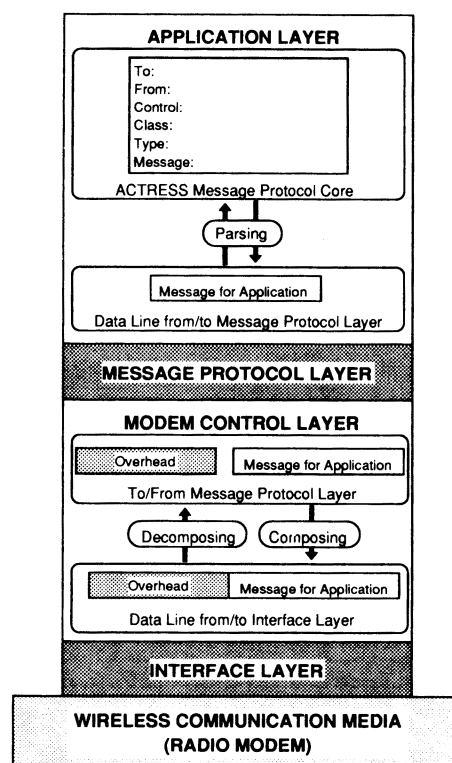


Fig. 1 Architecture of wireless communication system

信制御・エラー処理など低レベルの制御をこの層で行う必要がある。また後者の通信メディアを利用する場合は、メディアに適応した制御を行う必要がある。したがってこの層では、エージェントに接続される通信メディアの差異を吸収する役割を行う。

(3) メッセージプロトコル層 (Message Protocol Layer) : 通常の区分では応用層に位置し、本 DARS に一般に要求される通信機能を実現する。本層を TCP/IP プロトコルにかぶせることにより、相互接続性を満たすことができる。具体的には、通信の大域的なネットワークの管理、あるいは様々な通信形態の管理を行う。例えば、無線と Ethernet を接続するためには、両者の整合性をとることが必要である。すなわちこの層では、通信メディアやプロトコルの違いを調整し、上位層での整合性を保つ役割を果たす。

(4) 応用層 (Application Layer) : 応用層では、基本的な通信機能として、送信 (一対一通信あるいは一対多通信) と受信が用意されている。通信プログラムはこの層のみを利用して記述できるようになっており、特にこれ以下の層を意識する必要はない。

4. 無線通信システムの構築

我々はすでに、ラップトップコンピュータ (以下、パソコンと呼ぶ) により制御できる自律型移動ロボット¹³⁾を試作しており、このロボットに搭載可能な無線通信システムを構築した。本論文では、通信メディアとして無線モデムを用い、無線通信システムをパソコン上に構築した。この無線モデムの仕様は、449 MHz の周波数帯に制御用 1 チャンネル、通信用 9 チャンネルを装備し、通信距離は 100 m であり、モデム自体の機能として、CSMA 方式により一対一通信および一対多通信を行うことができる。無線モデムとコンピュータは RS-232 C シリアルインタフェースを介して接続される。無線通信システムの構築には、移動ロボットを制御するプログラム同様、DOS 上の C 言語を用いた。無線通信システムのソフトウェア構成を図 2 に示す。

インタフェース層には、RS-232 C の入出力制御を行うためのプログラムを構築した。RS-232 C の設定は、無線モデムの設定要求に合わせ、通信速度 4800 bps、ビット長 8 ビット、ストップビット 1 ビット、ノンパリティとした。無線モデムは通信データを蓄積するバッファを持つため、送信データは直接無線モデムへ伝送される。無線モデムからの受信データは、割込制御により 1024 バイトのリングバッファに蓄積される。リングバッファは非同期で逐次的に受信される通信データを確保するために用いており、現在のところ 1 回の受信データは 1024 バイト以下としてリングバッファの容量を決定した。このリングバッファにデータが蓄積されている場合、ロボット制御プログラムに対して割込信号が生成されるため、移動ロボットは受信データの着信を認識できる。また、無線モデムとパソコン間の通信で発生した通信誤りは、この層において処理される。

モデム制御層では、無線モデムを制御するためのプログラムを構築した。この無線モデムはコンピュータからコマンドを送信することにより制御が可能である。送信を行う際は、通信データにコマンドを付加する。また受信を行う際は、通信データに受信状態が付加される。したがってモデム制御層では、通

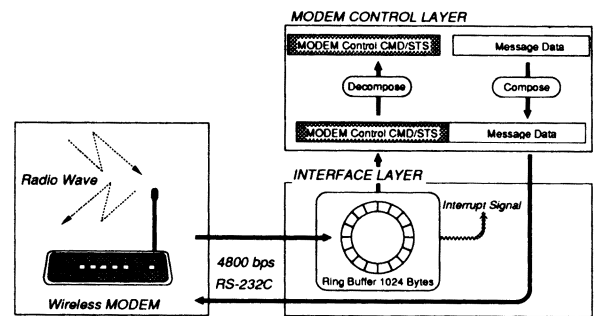


Fig. 2 Implement of wireless communication system on mobile robots

信形態に応じてモデムのコマンドを選択し、通信データを生成する。もし、他の無線モデムを利用して無線通信システムを構築する場合には、この層のプログラムを書き換えるのみで他層のプログラム変更は不要である。ここで発生する通信誤りは無線モデムの制御に関するものであり、この場合はこの層で処理される。

メッセージプロトコル層では、通信データの整合をとり、モデム制御層と応用層との接続を行うプログラムの構築を行った。メッセージプロトコルコア⁹⁾に基づいた通信プログラムの構築は応用層で行う。

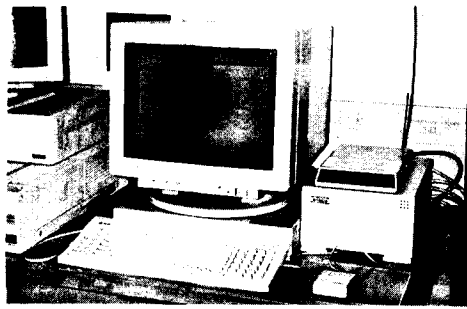
また、パソコンと同様に、Ethernet を装備するワークステーションにも無線通信システムを構築した。ワークステーションでは、インタフェース層として RS-232 C を制御するドライバソフトを構築し、モデム制御層から上位はパソコンで構築したソフトウェアのインストールを行うのみで、無線通信を実現することが可能となる。メッセージプロトコル層では、Ethernet と無線とを接続するために、通信データの整合をとるためのプログラムを構築した。さらにこの層では、両者のアドレスを管理し、通信データの流れを制御することにより、本ワークステーションはゲートウェイとしても機能する。

本無線通信システムでは、無線モデムのアドレスを 4 バイトの文字データで指定する。一対一通信は通信先をアドレスで指定することにより実現できる。本システムでは、通信アドレスとしてワイルドカード (*) を応用できるようにした。これによりブロードキャストは、すべてを通信対象とするため、アドレスを「****」と指定することにより実現できる。また、グループキャストもこのアドレスを利用して実現できる。例えば、送信先のアドレスを「MR **」と示すことにより、MR から始まるアドレスを持つ無線モデムのみが受信することが可能となる。本通信システムでは、グループに応じて動的にアドレスを変更することにより、状況に応じたグループの組織化が可能である。

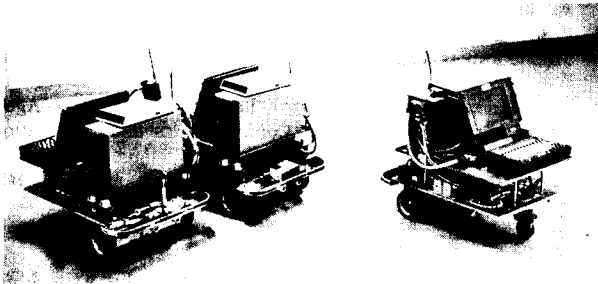
本論文では、実際に 3 台の移動ロボットと 1 台のワークステーションに無線通信システムを搭載させることにより、ACTRESS のプロトタイプシステムを開発した。このシステムの外観を図 3 に示す。

本論文で開発した無線通信システムの特長を以下に示す。

- (1) 無線通信によりエージェントの移動性を確保できる。
- (2) 無線モデムの性能により、大域的な通信を行うことができる。
- (3) CSMA 方式により、通信の負荷が少なく効率が高い。
- (4) CSMA 方式により、多様な通信 (一対一および一対多の通信) を実現できる。



(a) Workstation with Wireless MODEM



(b) Mobile Robots

Fig. 3 Photographs of prototype system with wireless communication system

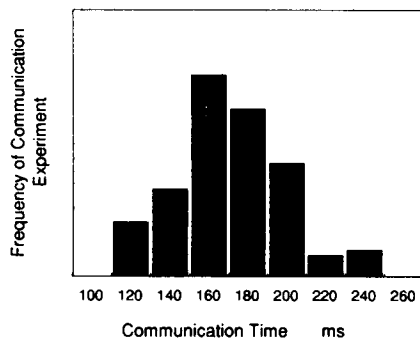


Fig. 4 Frequency of communication time

- (5) 無線による CSMA 方式により、柔軟なシステムの組織化が可能である。
- (6) 各層ごとにエラー処理を行うことにより信頼性の高い通信を行うことができる。
- (7) 相互接続性が高い。

5. 通信実験

本無線通信システムの性能を調べるために、移動ロボット間の通信実験を行った。この通信システムでは、1回の通信で256バイトのメッセージを送信することが可能である。まず、ある無線モデムがメッセージを送信し、それを他の無線モデムが受信するのに要する時間を計測した。この計測結果のヒストグラムを図4に示す。1回の送信にかかる通信時間は平均約160 ms、ばらつきは約±40 msとなった。この原因としては、接続要求（キャリア：carrier）の制御あるいは他電波によるノイズ処理などが考えられる。また無線モデムで対一通信を行う場合は、メッセージを受信したモデムが通信データを検査し、その検査結果（以下 ACK と呼ぶ）を返信するので、往復の所用時間は約320 msとなる。移動ロボットが0.2 m/sで走行しながら通信した場合、なお約80 msの通信時間のばらつきによる位置の誤差は約16 mmであり、十分に小さいと考え

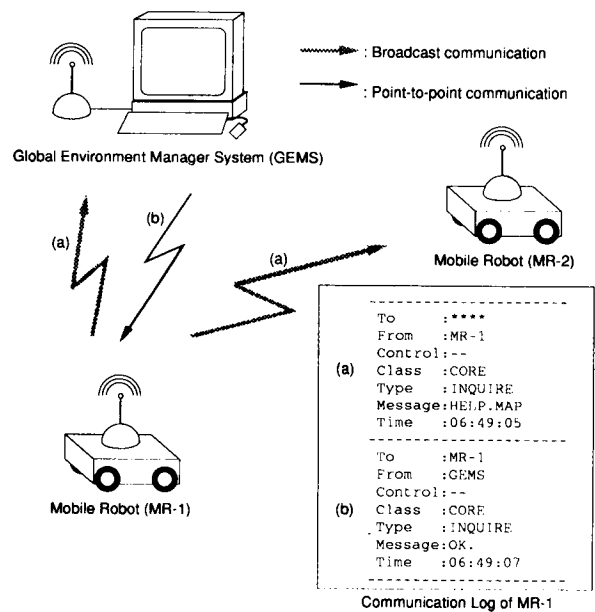


Fig. 5 Example of communication (Search for GEMS)

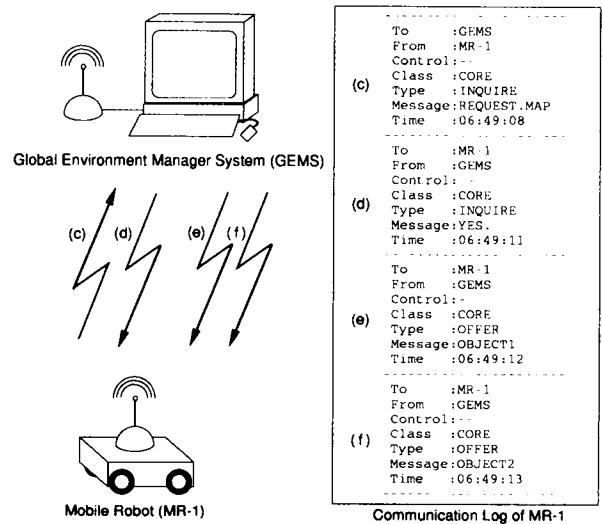


Fig. 6 Example of communication (Obtaining map from GEMS)

られる。

図5~7にプロトタイプシステムにおいて行った通信の実行例と、通信時刻を含めた通信ログ（ロボットの通信内容を記録したもの）を示す。これは、大局的に環境情報を管理するワークステーション（Global Environment Manager System：GEMS）と3台の移動ロボット（MR-1, MR-2）が環境情報に関する通信を行った例である。

- (1) GEMSの検索（図5）：通信(a)はすべてのロボットに対して環境情報（地図）を持つエージェントを検索するための問合せである。これに対し、地図を持つGEMSは、MR-1に通信(b)を返答する。これにより、MR-1はGEMSの存在とそのアドレスを知ることができる。
- (2) 環境情報の獲得（図6）：通信(c)は、MR-1からGEMSへの環境情報の要求メッセージである。通信(d)はGEMSからの返答である。その後、GEMSは通信手順OFFERに基づいて、OBJECT1に関する情報(e)、引き続きOBJECT2に関する情報(f)をMR-1へ送信する。
- (3) グループキャストによる作業開始指令（図7）：MR-1,

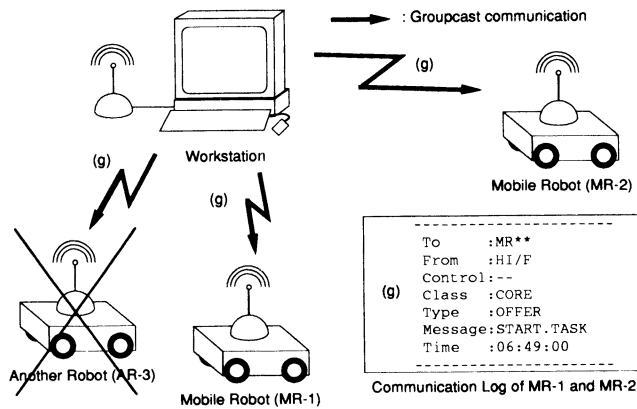


Fig. 7 Example of communication (Groupcast)

MR-2 および AR-3 の 3 台の移動ロボットが存在する環境におけるグループキャストによるワークステーションからの作業開始要求 (g) の送信である。ここでは、通信対象を「MR **」としたため、AR-3 はこのメッセージを受信しない。

以上の実験による通信ログから、一対一および一対多の通信が実現できたことを確認した。

本通信システムの通信速度は、無線を用いているため比較的遅いが、数台までのエージェントで構成される DARS を前提とした通信システムとしては十分に満足できるものと判断される。エージェントの数がさらに増加すると、通信の停滞を避けるために何らかの工夫が必要となる。これについては、例えば、数台のエージェントごとにグループに分け、各グループに専用の電波を割り当てゲートウェイを置き、グループを越えた通信を行う際には、ゲートウェイを介して通信を行うなどの方法が考えられる。

6. 結 言

本論文では、DARS の特徴である柔軟性およびロバスト性を実現するような無線通信について議論し、DARS に要求される通信機能の要求仕様を明らかにし、無線通信システムの設計を行った。さらに、無線通信システムを実際に構築し、3 台の移動ロボットと 1 台のワークステーションで構成される

ACTRESS のプロトタイプシステムを開発した。このプロトタイプシステムを用いて通信実験を行い通信の実行例を示した。この実験により、通信の柔軟性、多様性、信頼性および相互接続性を確認し、本無線通信システムが DARS に有用であることを実証した。

なお、本研究は、原子力基盤技術研究の一環として理化学研究所で行われた。

参 考 文 献

- 1) 浅間 一：複数の移動ロボットによる協調行動と群知能、計測と制御, 31, 11 (1992) 1155.
- 2) F. R. Noreils : An Architecture for Cooperative and Autonomous Mobile Robots, Proc. 1992 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, (1992) 2703.
- 3) L. E. Parker : Designing Control Laws for Cooperative Agent Teams, Proc. 1993 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, (1993) 582.
- 4) 市川純章, 原 文雄：群ロボットにおける協調的帰還行動の実験的検証, 第 12 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1994) 1155.
- 5) 金森哉史, 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, (1992) 287.
- 6) スパルーク・プレムウッティ, 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, (1991) 595.
- 7) 矢向高弘, 岩沢 透, 安西祐一郎：開放型分散ロボット環境における無線パケット通信のための動的なタイムスロット割り当て機構, 日本ロボット学会誌, 12, 8 (1994) 1157.
- 8) 松元明弘, 浅間 一, 石田慶樹, 田中澄人：自律分散型ロボットシステム ACTRESS の開発研究 (第 1 報) ——システムの構想, 1989 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1989) 115.
- 9) 尾崎功一, 浅間 一, 石田慶樹, 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 の開発研究 (第 9 報) ——複数の自律移動ロボットによる衝突回避のための戦略, 1991 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1991) 529.
- 10) 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, 10, 4 (1992) 544.
- 11) 上谷晃弘：ローカルエリアネットワーク——イーサネット概説, 丸善, (1985) 58.
- 12) D. Comer (村井 純, 楠本博之訳)：TCP/IP によるネットワーク構築 Vol. 1 —原理・プロトコル・アーキテクチャ, bit 別冊, 共立出版, (1991) 22.
- 13) 松元明弘, 板倉広明, 石塚弘宣, 浅間 一, 遠藤 勲, 石田慶樹：自律分散型ロボットシステム ACTRESS の開発研究 (第 5 報) ——移動ロボットの開発, 1991 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991) 963.