

通信を用いた分散的管理に基づく 複数の自律型ロボットの協調的作業分担決定手法

浅間 一* 尾崎 功一** 松元 明弘**
石田 慶樹*** 遠藤 勲*

A Method of Cooperative Task Assignment by Multiple Autonomous Robots Based on Decentralized Management Using Communication

Hajime ASAMA Koichi OZAKI Akihiro MATSUMOTO
Yoshiki ISHIDA Isao ENDO

As one of problems that occur when multiple autonomous robots act in a common environment, task assignment is discussed in this paper. There are two patterns in terms of action of multiple robots. Namely, one is parallel, individual action, and another is cooperative action. Object pushing problem is taken as a typical task, where both of patterns of action are necessary. At first, a method of decentralized management of situation of tasks and robots using communication is proposed. Then, algorithm for robots to process tasks related to the situation based on the managed information is developed. Finally, a simulation system for object pushing tasks and a wireless communication system between the simulators are developed. As a result of experiments using the simulation system, the tasks are processed by robots cooperatively, and the proposed method is verified. In addition, the efficiency by parallel action and the executability of high-level tasks by cooperative action are proved.

Key Words : Task Assignment, Multiple Autonomous Robots, Decentralized Management, Communication, Cooperative Problem Solving

1. 緒 言

知能ロボットには、状況に応じた動作が可能であることが要求される。しかし、状況として、作業対象の状態や環境のみならず、ロボットの故障などを考慮すると、状況に応じた動作を実現するには、ロボットの機能を動的に変化させることができるような柔軟な仕組みが必要となってくる。このような仕組みを実現する一つのアプローチとして、ロボットシステム全体の機能を複数のロボットに分散化し、それらを状況に応じて動的に協調さ

せることが考えられる。分散化・マルチロボット化は、複数のロボットの並列的な行動（並列行動）による効率的処理、複数のロボットが協力し合うこと（協調行動）による高度な作業の処理、冗長性を生かした耐故障性・頑健性などの、効果が期待できる¹⁾。

このような背景から、我々は機能分散と協調という概念に基づいた自律分散型ロボットシステム ACTRESS の研究開発を行っている²⁾。本システムは、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。本システムを実際に開発する上で最も大きな課題は、通信を用いた複数のロボットの協調的動作の実現である。

原稿受付 1992年3月3日

* 理化学研究所, ** 東洋大学工学部,

*** 東京大学工学部

複数のロボットが同一環境内で行動する場合、様々な問題が生じる。これまでに、複数のロボットの協調的動作の研究の例として、MRC(MultiRobot Control Level)と呼ばれる協調のための制御機構を各ロボットに付加する手法³⁾、集中的計画と分散的計画を組み合わせたスケジューリング手法⁴⁾、遠慮的協調(Modest Cooperation)による衝突デッドロック回避手法⁵⁾などが提案されている。本研究では、複数の自律型ロボットの作業分担決定問題を取り上げる。複数のエージェント間での作業分担決定のための通信の枠組みとして契約ネット(Contract-net protocol)⁶⁾が提案されている。ここでは作業の管理を集中的に行うエージェントが存在しているが、これに対して本研究では、集中的管理者を仮定せず、各自律型ロボットが作業の状況やロボットの状況を通信を用いて分散的に管理しながら、作業分担を決定する手法について述べる。本手法は、作業分担をミッション開始前に決定するのではなく、状況に応じて作業を発見的に選択し、また協調作業が必要な状況が生じると、その場で協調相手を探索・決定し、作業の実行にともなって徐々に作業分担を決定していく点が特徴となっている。

2. 複数のロボット間での作業分担決定問題

2.1 作業分担決定問題

作業分担決定問題とは、複数のロボットで複数の作業を処理する場合、各作業をどのロボットが処理するかを決定する問題である。ただし、作業によっては、ロボットが単独では処理することが不可能な、すなわち、複数のロボットによる協調作業が必要なものが含まれる。ここでは、作業の進行状況をいかに各ロボットが分散的に管理し、競合が起きないように作業分担を決定するか、協調作業が必要なときに、いかに協調相手を確保するかが問題となる。

ロボットが1台の場合には (Fig. 1 (a)), 与えられた目標 (作業) に対して、行動を計画、作業を実行し、状況に応じて再計画を行うのに対し、複数の作業を複数

のロボットで協調的に処理する場合には (Fig. 1 (b)), まず他のロボットと競合しないように作業を選択する過程が必要となる。また状況に応じて、他のロボットの協力が必要な場合には、協調作業を実行するグループを組織化が必要となる。本研究で対象とする作業分担決定問題は、複数のロボットが行動する場合に特徴的である、Fig. 1 (b) の太線で示した部分 (作業の選択、協調作業を行うグループの組織化) を対象とする。

2.2 荷片付け作業

本研究では、作業分担決定の例題として、荷片付け作業を取り上げる。荷片付け作業とは、ある部屋の中に複数の荷が散在している状況で、これをロボットが壁際まで押していくことによって片付けるという作業である。ただし、移動する荷の目標位置は特定されないものとする。荷には、ロボット単独で押すことが可能な「軽い荷」と、複数のロボットが共同で押さなければならない「重い荷」が存在することとする。荷片付け作業の環境の例を Fig. 2 に示す。ここで番号は荷を表し、アルファベットは移動ロボットを表わしている。

荷片付け作業の前提として、以下のような仮定を置く。
 (1) 環境情報および作業情報として、部屋と荷の形

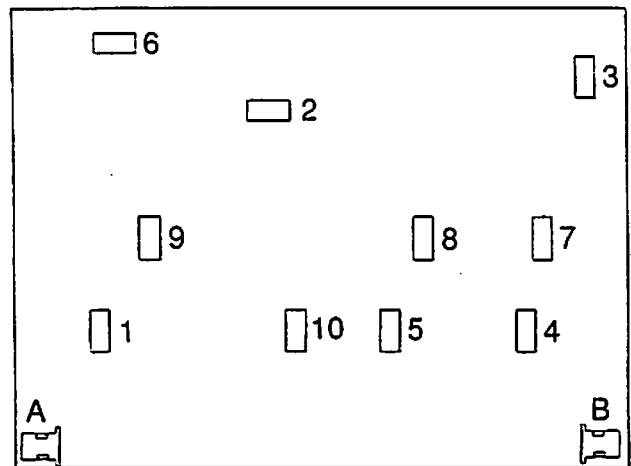


Fig. 2 Typical environment of object pushing task

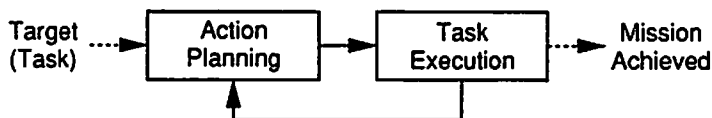


Fig. 1 (a) Action process for a single robot

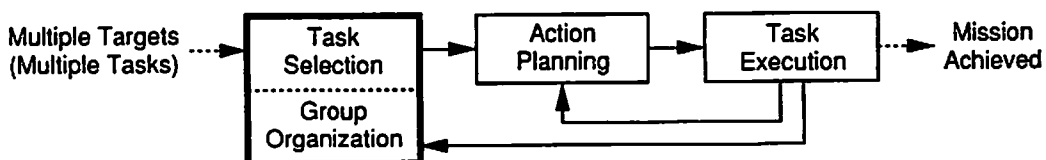


Fig. 1 (b) Action process for multiple robots

状、位置が予め与えられているが、その重さ（単独で作業を処理できるか、協調が必要であるか）は荷の位置に移動するまで未知であり、行動形態は作業中に動的に決定する。

- (2) 各ロボットは自律的に処理する作業を選択し、行動計画を行い、それを実行する。
- (3) 環境情報、作業情報、およびロボットの行動状況を管理するためにロボット間の通信機能を利用する。

以上の仮定により、荷片付け作業は、「軽い荷を片付ける」という並列行動と、「重い荷を片付ける」という協調行動の両者が必要で、かつ「荷の重さが未知」であるために、ミッション開始後、作業を実行しながら状況に応じて作業分担を決定しなければならない問題の典型的例題とみなすことができる。したがって、次章以下で述べる、荷片付け作業における作業分担決定手法は、このような状況が想定される一般的なあらゆる作業に適用可能であると考えられる。

3. 作業分担決定手法

3.1 作業管理手法

各ロボットの意思決定によって作業分担を決定するには、各ロボットが任意の時点で作業の状況を把握していなければならない。また、ロボットがある作業を行うための行動計画を立てるには、任意の時点で環境の状況を把握していなければならない。荷片付け作業の場合、荷の移動は、作業の実行であると同時に、環境の変化である。したがって、荷の状況を管理することによって、作業および環境情報を得ることができるようにした。荷の状況とは、作業情報として荷の状態、環境情報として、荷の形状および位置であることとした。

なお、各荷の状態は

- (N) 未片付け
- (x) ロボットxが片付け中 (xはロボットのID)

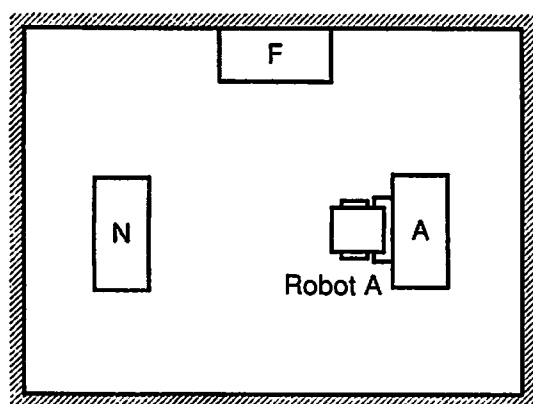


Fig. 3 States of objects

(F) 片付け完了

のいずれかであるとした。また、荷の位置としては、片付け前である場合は初期位置、片付け後は移動した最終位置を表わすものとし、移動中の位置までは管理しないものとした。荷の状態を Fig. 3 に示す。荷は初期状態では片付いていない状態 (N) であるが、ロボットAが片付け作業を始めると状態 (A) へ変化し、作業し終わると状態 (F) へ変化する。

ここでは、作業情報および環境情報を各ロボットが分散的に管理する手法を開発した。各ロボットが、荷の状態を通信に基づき管理するけめの手続きを以下に示す。

(1) 荷の初期状態の入手

各ロボットが初期状態における荷の情報を、通信によってミッションを与える者から獲得する。ただしそれが不可能な場合には、ミッションを与える者が事前に初期状態における荷の情報を各ロボットに伝達する。ここで荷の情報とは、荷の状態および位置を指す。初期状態では、荷の状態はすべて (N) とする。

(2) 荷の選択と宣言

片付ける荷を選択し、これを通信によって他のロボットに対し宣言する。この通信を受信した他のロボットは、その荷の状態を (x) に変更する。

(3) 荷片付けの実行と終了の報告

荷片付け作業を実行した後に、このことを通信によって他のロボットに報告する。この通信を受信した他のロボットは、その荷の状態を (F) に変更する。

3.2 ロボットの行動状況管理

ロボットが自律的に協調行動を行う場合、他のロボットに協力を依頼する必要がある。そのためには、作業や環境の状況だけでなく、各ロボットがすべてのロボットの行動状況を把握していなければならない。ただし、ロボットが行動している場合には、その位置や行動内容は動的に変化していくので、すべてのロボットの詳細な状況を常に管理することは不可能である。ここでは、協調行動の依頼において必要となる、各ロボットの行動状況として、ロボットの状態を行動モードとして定義し、すべてのロボットの行動モードを各ロボットが分散的に管理する手法を開発した。ロボットの行動モードを以下に示す。

- (1) 単独行動：軽い荷を処理するのに、単独で並列的に作業を行っている状態
- (2) 協調行動1(依頼)：重い荷を処理するのに、他の移動ロボットに協力を依頼して作業を行う状態
- (3) 協調行動2(支援)：重い荷を処理するのに、他の移動ロボットに協力し、支援しながら作業を行う状態

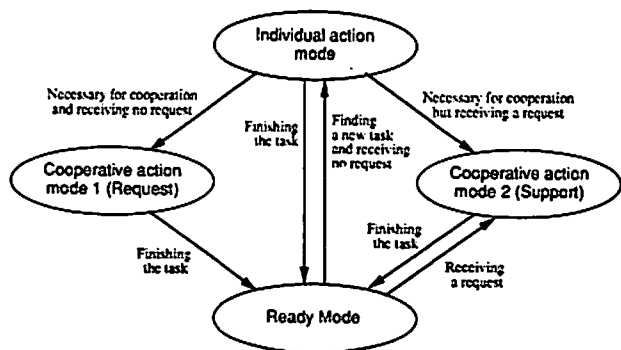


Fig. 4 Transition graph on action modes

(4) 待機：荷の処理を行わずに待機している状態

各ロボットが、ロボットの行動モードを通信に基づき管理するための手続きを以下に示す。

(1) ロボットの初期状態の設定

各ロボットの行動モードを待機に設定する。

(2) 行動状態への変更

他のロボットから、荷片付け開始の際の荷の選択の宣言を受信した場合、そのロボットの行動モードを単独行動に変更する。また、他のロボットから協調の依頼を受信した場合、そのロボットの行動モードを協調行動1に変更する。さらに、他のロボットから協調の承諾を受信した場合、そのロボットの行動モードを協調行動2に変更する。

(3) 待機状態への変更

他のロボットから、荷片付け終了の際の終了報告を受信した場合、そのロボットの行動モードを待機に変更する。

ロボットの行動モードの遷移図を Fig. 4 に示す。待機モードからは、協調依頼の有無に応じて、単独行動モード、あるいは協調行動2（支援）モードへ移行する。また、単独行動モードからは、重い荷に出会った際の協調依頼の有無に応じて、協調行動1（依頼）モード、あるいは協調行動2（支援）モードへ移行する。また、いずれのモードにおいても、荷片付け終了ごとに待機モードに復帰する。

3.3 ロボットの行動アルゴリズム

ロボットの行動アルゴリズムの流れ図を Fig. 5 に示す。初期状態では、ロボットはまず待機モードになり、すべてのロボットが待機状態になるのを待つ。行動開始後、ロボットは荷片付け作業を開始するが、荷を選択する前に協力の依頼があるかどうかをチェックする。協力要請があるかどうかは、各ロボットが管理している他のロボットの行動モードで、協調行動1（依頼）が存在するかどうかによって判断できる。依頼がある場合にはロボットは協調行動2（支援）モードになり、依頼がない

場合には、単独行動モードになる。

単独モードでは、状態が(N)である荷の中から適当な荷を選択し、片付け開始の宣言を他のロボットに対して送信する。次に、経路計画を行い、ロボットが作業位置へ移動後、荷が重いか、軽いかを判断する。軽い荷の場合には、単独行動によって荷片付け作業を実行し、荷片付け終了後にそれを他のロボットに対して送信する。

重い荷の場合には、まず協力の依頼があるかどうかをチェックする。依頼がある場合にはロボットは協調行動2（支援）モードになり、依頼がない場合には、協調行動1（依頼）モードになる。

協調行動1（依頼）モードでは、協調の依頼を送信した後に、協調作業位置へ移動して待機する。他のロボットから、協調の承諾および協調準備完了（協調作業位置まで移動完了）を受信した後に、協調作業開始指令を送信し、協調作業による荷片付け作業を実行する。荷片付け終了後にそれを他のロボットに対して送信する。

協調行動2（支援）モードでは、協調の承諾を送信した後に、協調作業位置へ移動し、協調準備完了を送信して待機する。協調作業開始指令を受信すると、協調作業開始指令を送信し、協調作業による荷片付け作業を実行する。

荷片付けが終了するたびに、ロボットは待機モードになり、荷の状態をチェックする。すべての荷の状態が(F)になっていると、ミッションが終了したと判断し、行動を終了する。状態が(N)である荷が残っていると、再び荷片付け作業を開始する。ミッションは終了していないが、状態が(N)である荷が残っていない場合には、他のロボットから協力を依頼される可能性があるため、ミッション終了まで待機状態を維持する。荷片付け終了ごとに、随時処理を行ったロボットが通信によってそれを報告するので、作業の進行状況は各ロボットが分散的に管理でき、複数のロボットが同一作業を選択するような競合が発生しないようになっている。

ここで用いる通信方法としては、協調承諾の返答と、協調作業開始の指令についてのみ1対1の通信を行い、それ以外はブロードキャストを行う。

本アルゴリズムは、

(1) 荷片付け作業が終了するたびに、他のロボットからの協調の依頼の有無をチェックし、依頼があればそれに応じる

(2) 重い荷を片付ける際、自分から協調の依頼を行う前に、他のロボットからの協調の依頼の有無をチェックし、依頼があれば自分が直面している重い荷を放棄して他からの依頼に応じる

という戦略を取っている点が特徴である。すなわち、

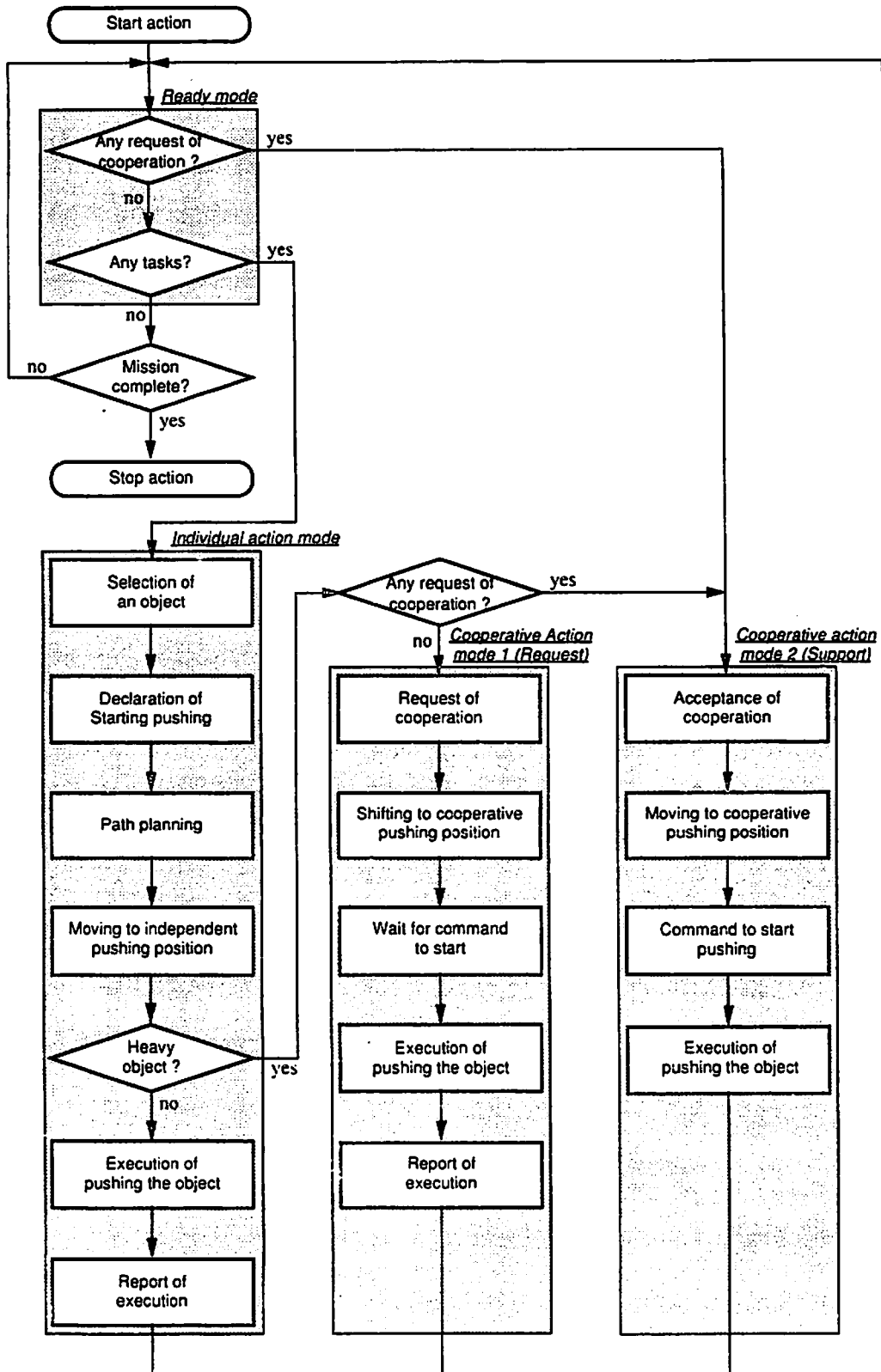


Fig. 5 Flow chart of robot's action

一般的には、各ロボットが単独行動を並列的に行っている最中に協調行動が必要となると、作業目標の競合が発生するが、本手法では、単独で行動したり、協調を他のロボットに依頼することにより、他のロボットからの協調依頼を承諾することを優先するという、一種の思いやり機構を組み込むことによって、複数のロボットが依頼し合って永遠に待たされるような競合が生じないようにしている。

4. 作業分担決定システムの構築

4.1 システム構成

開発した作業分担決定手法の検証を行うために、2台の移動ロボットを模擬する2台のパソコン、およびその間の無線通信システムからなる荷片付け作業のシミュレーションシステムを試作し、このパソコン上に作業分担決定システムを構築した。シミュレーションシステムの構成を Fig. 6 に示す。実際に荷片付け作業を行う各自律移動ロボットに計算機を搭載することが想定されるので、本シミュレーションシステムにおいて各パソコンは、搭載用計算機の機能を代行するものとして、作業分担決定における各ロボットの意思決定および走行行動を模擬する。各ロボットの軌跡は、各パソコンのディスプレイに表示され、荷片付け作業の様子を観察できる。

各計算機のリアルインタフェース (RS 232 C) に無線モデムが接続されており、計算機間の通信はこれを介して行われる。計算機と無線モデル間の転送速度は、1200(bps)である。また、通信方式として、キャリアセンス方式を採用し、複数のロボットが同時に通信するような衝突を避けている。したがって、通信メッセージは逐次的に交換されるので、作業の選択や協調の依頼などに関しては、ブロードキャストによって先に宣言したロボットが、自動的に優先されることになる。

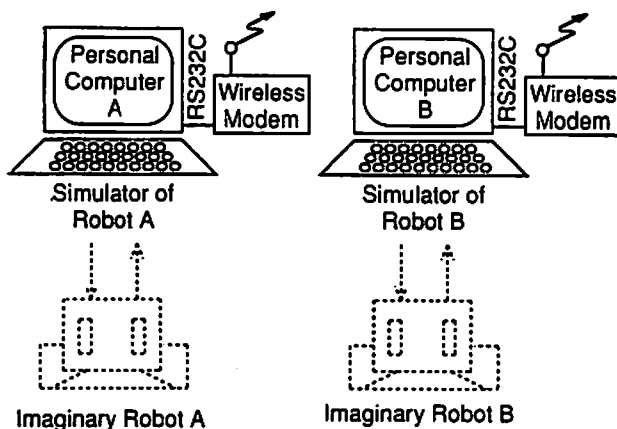


Fig. 6 Configuration of prototype system for simulation of object pushing task



ST : Start
 SI : Sender Identifier
 RI : Receiver Identifier
 CT : Communication Type
 DL : Data Length
 DT : Data
 CH : Checking Sum

Fig. 7 Basic format of communication protocol

4.2 無線通信システム

ここで用いた無線モデルは市販のものであり、2チャンネルの周波数 (250~380 MHz 帯) で送受信を行う。データの受信は割り込み処理によって行っている。

ここでは、Fig. 7のフォーマットのBasic手順通信プロトコルを設定した上で、無線通信システムを開発した。このフォーマットで、STはヘッダーを表わし、SI、RIにそれぞれ送信者および受信者のIDを記述する。CTには通信タイプ (送信、受信OK、受信エラーのいずれか) を、またDLには可変長データDTのデータ長を記述する。DTが、通信データで、CHはエラーチェックのためのチェックサムである。

荷片付け作業では、前述のアルゴリズムに従った行動を行わせるために以下のような通信手続きを必要とする。

- (1) 行動開始の報告 (START ACTION)
 - (2) 荷片付け開始の宣言 (START OBJ_i)
 - (3) 荷片付け終了の報告 (FINISH OBJ_i)
 - (4) 協調依頼の問い合わせ (HELP)
 - (5) 協調承諾の返答 (SUPPORT)
 - (6) 協調作業開始の指令 (EXECUTE)
 - (7) 行動終了の報告 (STOP ACTION)
- (iは荷の番号)

このうち、(5)、(6)は1対1通信で、その他はブロードキャストである。これらの通信内容は、移動ロボットのIDや荷の番号などの情報とともに、DTの通信データに記述される。

4.3 シミュレーションにおける荷片付け作業

ロボットが作業を処理していく過程に伴って、協調作業が必要となる状況を模倣的に作りだしながら、作業分担を決定する本手法を検証することを目的として、シミュレーションシステムの各計算機 (各ロボットに対応) 上に、本研究で提案したロボットの行動アルゴリズムを構築した。ロボット間のメッセージ交換は、計算機間の無線通信によって実現されている。ここで、重い荷に関しては、2台の協調で片付けが可能であることとした。また、作業環境は2次元空間として扱うこととした。また、荷を選択する場合、環境情報を参照しながら、荷の位置情報に基づき、その重心位置がロボットの現在位置に最も近いものを選択することとした。

経路計画に関しては、まず、荷を初期位置から壁まで移動させる経路および荷の目標位置を計画する。このとき、動的な状況は管理されていないので、静止している荷の環境情報のみを考慮して、干渉を起こさない経路を計画する。次に、作業開始位置、すなわち荷押し動作におけるロボットの荷との接触点を決定する。単独作業では、計画された荷の移動経路に基づき、移動方向と反対の面の中央の位置として、荷との接触点を求める。なお、2台のロボットで協調作業を行う場合には、協調を依頼したロボットは荷の左側を協調作業位置、協調を承諾したロボットは荷の右側を協調作業位置とし、2台のロボットが左右に並んで押すこととした。支援を行うロボットは、協調作業位置に到着すると、それを通信によって報告するが、それが同時に協調作業開始の指令となる。さらに、ロボットが、現在の位置から計画された作業開始位置まで移動する経路の計画を行う。ここでも、静止している荷の環境情報のみを考慮して、干渉を起こさない経路を計画する。

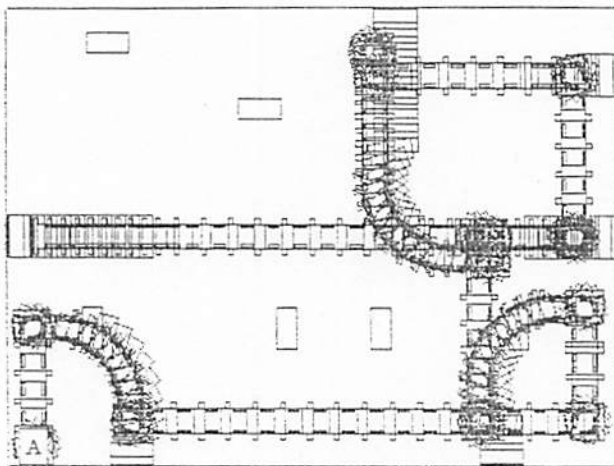


Fig. 8 (a) Simulated trajectory of Robot A

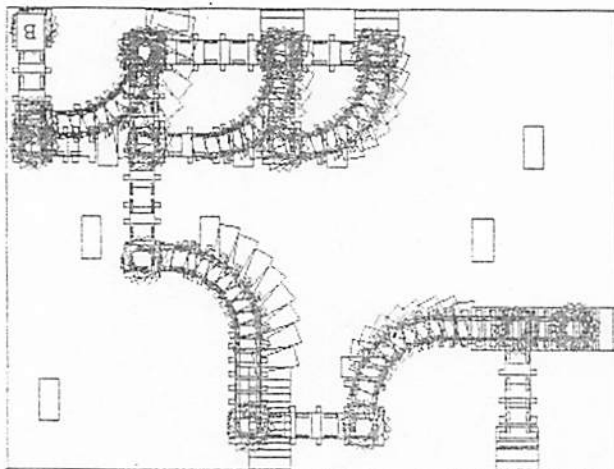


Fig. 8 (b) Simulated trajectory of Robot B

4.4 シミュレーション実験

Fig. 2 に示した作業環境について、シミュレーションによる荷片付け作業実験を行った。10個の荷のうち8個が軽い荷、2個が重い荷である。2台のロボット (Robot A および Robot B) でシミュレーションを行った結果、各パソコン上に表示された各ロボットの軌跡を Fig. 8 に示す。ロボット A は、単独作業で荷 1 を片付けた後、ロボット B を支援しながら荷 4 を協調作業で片付け、次にロボット B の協力を得て荷 8 を協調作業で片付け、さらに単独作業で、荷 3、荷 7、荷 9 を片付けた。また、ロボット B は、ロボット A の協力を得て荷 4 を協調作業で片付けた後、単独作業で荷 5、荷 10 を片付け、次にロボット A を支援しながら荷 8 を片付け、さらに単独作業で荷 2、荷 6 を片付けた。また、このときの各ロボットの送信データを Table 1 に示す。約 3 分ほどのシミュレータ実験中に、ロボット A、B とも 15 回のメッセージの送信が行われた。なお、1 回当りの通信 (メッセージ送信とそれに対する ACK/レジの返信) に要する時間は、約 1 秒であった。

この実験結果から、本手法によって、各ロボットが作業分担を自律的に決定しながら、並列的な単独行動および協調行動によって、すべての荷を片付け、ミッションを達成していることがわかる。また、開発した通信システムが機能し、荷の状況やロボットの状態が正しく管理されていることが確認された。本作業分担決定手法は、3 台以上のロボットに対しても有効である。本シミュレーションでは、2 チャンネルの無線モデルを用いているために、2 台のロボットを用いて、1 対 1 通信のみによって実験を行った。3 台以上のロボットで実際に通信を行うには、ブロードキャストなどの通信機能を実現するためには、何らかの技術的工夫が必要となる。本研究では、1 台を通信マネージャとしたポーリング方式を採用することで、3 台以上の通信も可能にした。ただし、通信速度、オーバーヘッドを考慮すると、数台までが限度であると考えられる。

また、この 10 個の荷の種類を全て軽い荷とした場合についても実験を行い、1 台のロボットおよび 2 台のロボットによる荷片付けシミュレーションを行い、その作業実行時間を計測、比較した。その結果を Table 2 に示す。ロボットの台数が 1 台のときと 2 台のときを比較すると、まず軽い荷のみの場合は、ロボットが 2 台のときは並列処理の効果によって、作業実行時間はほぼ半減する。ただし、通信にある程度の時間を要するために、1/2 強となっている。また、重い荷を含む場合には、ロボットが 1 台では作業を遂行することはできないが、2 台では協調作業が可能となり、荷片付けが達成された。

Table 1 Transmitted messages

ROBOT A	TIME	ROBOT B
ON START OBJECT1(0'01")	0'00"	ON START OBJECT4(0'01") HELP(0'11")
FINISH OBJECT1(0'22") SUPPORT(0'22")	0'30"	
EXECUTE(0'47")		FINISH OBJECT4(0'57") START OBJECT5(0'57")
START OBJECT7(1'01")	1'00"	
FINISH OBJECT7(1'21") START OBJECT8(1'21") HELP(1'30")	1'30"	FINISH OBJECT5(1'20") START OBJECT10(1'21")
		FINISH OBJECT10(1'43") SUPPORT(1'43")
	2'00"	EXECUTE(2'03")
FINISH OBJECT8(2'23") START OBJECT3(2'24")	2'30"	START OBJECT2(2'20")
FINISH OBJECT3(2'39") START OBJECT9(2'39")		FINISH OBJECT2(2'50") START OBJECT6(2'51")
	3'00"	FINISH OBJECT6(3'04") STOP ACTION(3'04")
FINISH OBJECT9(3'11") STOP ACTION(3'11")		

Table 2 Comparison of executed time in simulation

Given task	Single robot	Two robots
10 light objects	3' 42" (Robot A only) 3' 36" (Robot B only)	2' 04" (Robot A and B)
8 light objects and 2 heavy objects	Impossible	3' 11"

4.5 複数のロボットによる作業実行に関する考察

以上述べた作業分担決定手法によって、ミッション開始後、作業の実行にともなって、状況に応じて複数のロボットで作業分担を決定し、かつ必要に応じて協調行動のためのグループの組織化を行うことが可能になった。しかし、このような環境で、実際に複数のロボットを動作させ、作業を実行するには、さらに議論すべき問題が残されている。荷片付け作業を実現するだけでも、自律的にナビゲーションを行う機能、荷を押せるかどうかを判定する機能、衝突回避のための経路計画機能などが必要となると考えられる。

特に、動的に環境が変化する状況を考慮すると、すべ

てのロボットの動作を考慮した経路計画は現実的ではなく、静的な環境情報から経路計画を立て、移動ロボットどうしの衝突回避に関しては、動的に計画し直すことが妥当であると考えられる。動的経路計画手法の開発は、今後の課題であるが、局所的回避手法、ルールに基づく回避、通信を用いた交渉によるデッドロック解決など、複合的な手法が求められる。

複数の移動ロボット間でデッドロックを解決する問題についての議論も行われているが⁷⁾、一般的なデッドロック検出・解決手法は未だ提案されておらず、今後十分に議論を行う必要がある。

また、あるロボットが作業実行中に何らかの異常が発生する状況が考えられるが、このような場合も、他のロボットに助けを要求するという、一種の協調作業と考え、本作業分担決定手法（協調の依頼）を用いて、バックアップ体制作りが実現可能であると考えられる。ただし、あるロボットに異常が発生した状況でも、そのロボットがそれを検出できることと、通信機能が確保されていることが必要となる。

5. 結 言

複数の自律型ロボットが並列的な行動および協調行動によって作業を行う場合を想定し、作業分担を自律的にかつ分散的に決定する手法を開発した。具体的に、荷片付け作業を例に取り、通信を用いながら作業の状況やロボットの状況を分散的に管理する手法、およびロボットが状況に応じて協調的に行動するアルゴリズムを開発した。また、ロボットによる荷片付け作業のシミュレーションシステムおよびロボット間の無線通信システムを開発し、これを用いた実験を行った。実験の結果、通信に基づく並列行動および協調行動を確認し、本手法の妥当性を検証した。さらに、ロボットが複数台存在することの効果として、並列行動による効率化、協調行動による高度な作業の遂行可能性を確認した。

本作業分担決定手法は、分散型の作業分担決定を前提とし、作業の競合が生じないことに重点を置いて設計した。ロボットの特性や作業全体の効率・最適性までも考慮した、より高度な作業分担決定手法の開発が今後の課題として挙げられる。一方、今回開発した荷片付け作業のシミュレータに関しては、ここで開発した通信システムでは、1対1の通信を用いているが、ロボットの台数が増加するに従い、通信の管理を行う必要がある。ここで開発した手法に基づき、実際のロボットを動作させるには、考察で述べたような機能を実現するための技術をさらに開発する必要がある。最後に、自律分散型ロボットシステム開発の課題としては、複数のロボットが存在

することによって生じる問題がまだ数多く残っており、今後これらの解決手法を開発する予定である。

参考文献

- 1) 浅間 一：マルチエージェントから構成された自律分散型ロボットシステムとその協調的活動，精密工学会誌，Vol.57, No.12, pp.37-42, 1991.
- 2) 石田慶樹，浅間一，尾崎功一，松元明弘，遠藤 勲，自律分散型ロボットシステムのための通信機能の設計と通信シミュレータの開発，日本ロボット学会誌，Vol.10, No.4, pp.544-551, 1992.
- 3) F. R. Noreils, "Integrating MultiRobot Coordination in a Mobile Robot Control System", Proc. IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp.43-49, 1989.
- 4) C. Le Pape, "A Combination of Centralized and Distributed Methods for Multi-agent Planning and Scheduling", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.488-493, 1990.
- 5) S. Premvuti and S. Yuta, "Consideration on the Cooperation of Multiple Autonomous Mobile Robots", Proc. IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp.59-63, 1990.
- 6) R. G. Smith and R. Davis, "Frameworks for Cooperation in Distributed Problem Solving", IEEE Trans. on SMC, Vol.11, No.1, pp.61-70, 1981.
- 7) J. Wang, "Deadlock Detection and Resolution in Distributed Robotic Systems", Proc. Japan/USA Symp. on Flexible Automation, pp.673-677, 1992.



浅間 一 (Hajime ASAMA)

1959年1月18日生。1984年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学修士課程修了。1986年理化学研究所化学工学研究室研究員補，現在研究員。分散型知能ロボットシステム，バイオプロセスの知能化技術の開発に従事。工学博士。IEEE，精密工学会，日本機械学会，化学工学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)



尾崎功一 (Koichi OZAKI)

1967年6月10日生。1992年東洋大学大学院博士課程前期課程修了。現在埼玉大学大学院博士後期課程在学中。自律分散型ロボットシステムの研究。特に，ロボットシステムのための通信，移動ロボットとその協調に関する研究に従事。



松元明弘 (Akihiro MATSUMOTO)

1983年6月8日生。1983年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学修士課程修了。1983年東京大学工学部助手，1988年東洋大学工学部講師，1990年同大助教授，現在に至る。工学博士。ロボット言語，自律分散型移動ロボットシステムの研究に従事。精密工学会，日本機械学会，IEEEの会員。

(日本ロボット学会正会員)



石田慶樹 (Yoshiki ISHIDA)

1961年10月18日生。1988年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学修士課程修了。1988年東京大学工学部助手，現在に至る。分散型ロボットシステムの通信，コンピュータ・ネットワークの研究開発に従事。WIDEプロジェクトのメンバー。IEEE，精密工学会，情報処理学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)



遠藤 勲 (Isao ENDO)

1940年8月14日生。1965年東京大学工学部化学工学科卒業。1970年東京大学大学院工学研究科博士課程卒業，理化学研究所化学工学研究室勤務，現在，同主任研究員，生物工学，特にバイオプロセスエンジニアリングの研究に従事，1978年化学工学協会論文賞受賞，化学工学会，発酵工学会，日本農芸化学会，計測自動制御学会，アメリカ化学工学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)