

推薦論文

自律分散型ロボット間通信のための 適応型メディアアクセス制御プロトコルの性能評価

荒井 順平^{†1,†2} 小山 明夫^{†3} バロリ・レオナルド^{†4}

自律分散型ロボットシステムは複数台で協調動作を行うことにより、単独型ロボットでは困難な高度で複雑なタスクを実行することが可能となる。協調動作を実行するためにはロボット間通信が不可欠となる。本論文では、複数台の自律移動ロボットによる協調搬送作業を想定し、実時間性・適応性を考慮したメディアアクセス制御プロトコル AR-TDMA (Adaptive Reservation-Time Division Multiple Access) 方式を提案する。提案方式は予約機構を持たせることにより送信頻度にばらつきがある通信環境で従来方式より小さな遅延を示す。また、動的なタイムスロット割当て方式によりロボット数の変化に柔軟に適應する。さらにロボットのバッテリー残量を指標にしたタイムスロット割当て方式により、パケットの衝突を従来方式より軽減する。シミュレーションによる性能評価の結果、本方式は従来方式に比べ通信遅延特性、スケーラビリティ特性、運搬時間特性に優れていることを確認した。

Performance Evaluation of an Adaptive Medium Access Control Protocol for Robot Communication in Autonomous Distributed Systems

JUNPEI ARAI,^{†1,†2} AKIO KOYAMA^{†3} and LEONARD BAROLLI^{†4}

In autonomous distributed robot systems, many robots cooperate together to carry out many difficult tasks that single robot can not realize. But, in order to cooperate together the robots should communicate with each other. Therefore, the communication among robots is very important problem to be solved. In this paper, we propose an Adaptive Reservation-Time Division Multiple Access (AR-TDMA) medium access control protocol which show small delay time than a conventional method in a heterogeneous environment of robot intercommunication by using a reservation mechanism. Also, by using an adaptive time slot allocation method, the protocol has a flexible behavior and can deal with the changes of number of robots. Furthermore, the proposed protocol can reduce the packet collision probability. We carried out computer simulation to evaluate the performance of proposed method. The simulation results show that the proposed method has better transmission characteristics, scalability characteristics and object transportation time characteristics compared with a conventional method.

1. はじめに

近年の急速な少子高齢化と技術の進歩により、生産

技術としてのロボット技術が、介護や福祉また建築現場など非製造業分野への応用も進んでいる。また原子力施設のメンテナンス、都市災害時のレスキュー、地雷探知・撤去などへの対応も急務となっている¹⁾。

このようにロボットへの作業要求は高度で多様化しており、従来のような単独型ロボットですべての作業を達成することは困難になりつつある。

そこで近年、複数台の自律移動ロボットを協調させ

†1 山形県立産業技術短期大学校情報制御システム科
Department of Information and Control Engineering,
Yamagata College of Industry and Technology

†2 山形大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Yamagata
University

†3 山形大学工学部
Faculty of Engineering, Yamagata University

†4 福岡工業大学情報工学部
Faculty of Information Engineering, Fukuoka Institute
of Technology

本論文の内容は2004年12月のDPSワークショップにて報告され、プログラム委員長により情報処理学会論文誌への掲載が推薦された論文である。

高度で複雑な作業を効率良く行わせる、自律分散型ロボットシステムの研究がさかに行われている²⁾⁻¹³⁾。複数台に分散化することにより、ロボット1台あたりの機能を単純化することができ、コストと信頼性を向上させることができる。足りない機能は、複数台のロボットが協調し合うことで補うことができる。また、1台のロボットが故障しても残りのロボットでタスクを達成できるといった耐故障性と、入口が狭く移動経路が入り組んでいるような大規模プラント内・災害現場などで、行動形態を分散・集中させてタスクを実行できるといった柔軟性も向上させることができる。

自律分散型ロボットシステムの行動形態には個別行動と協力的行動の2種類がある^{2),13)}。個別行動は、複数のロボットが別々の目的を持ち並列的に動作する形態である。たとえば、各ロボットがそれぞれ異なる対象物を持ち、各々の目的地まで搬送するような行動形態がそれにあたる。一方、協力的行動は、複数のロボットが共通の目的のために、チームを組んで共同作業を行う形態である。たとえば、単独型ロボットでは搬送不可能な大きくて重い対象物を、複数のロボットが協調して搬送するような行動形態がそれにあたる。いずれの行動形態においても、ロボットの持つセンサだけで他のロボットの行動を観察し、協調行動を実現するのは技術的に限界がある。したがってロボット間の意思疎通を図るための効率の良い情報交換の仕組み、つまりロボット間通信プロトコルが必要不可欠となる。

特に、個別行動に比べ協力的行動は同時並行的な動作が要求されるため、協調ロボット数が増えるほど、また作業の難易度が高くなるほど、各ロボット間の同期のとり方が難しくなり、通信プロトコルに実時間性(ここでいう実時間性とは、ロボットどうしが即座に情報交換を行い、全体が行おうとしている協調動作にいかん早く自己の動作を合わせられるかということである。実時間性が高いほどロボット間の同期が正確にとれ、信頼性の高い協調動作が可能となる)が要求される。また協調動作中にロボットの故障や作業条件変更などにより、ロボットの離脱・新規参入などの入れ替え処理が生じた場合、柔軟に適應できることも通信プロトコルには要求される。

以上のようなことは、一般的な情報機器間の通信プロトコルではさほど重要視されないが、ロボット間通信ではきわめて重要な問題となる。したがって、一般的な情報機器を対象とした、既存の通信プロトコルをそのまま適用することはできず、自律分散型ロボットシステムに特化した通信プロトコルが必要となる。しかしながら、現在のところ自律分散型ロボット間通信

を対象とした通信プロトコルの研究はあまり行われていない。

そこで本論文では、主として自律分散型ロボットシステムの協力的行動を対象とし、実時間性、柔軟性に重点をおいたロボット間通信プロトコルを提案する。

前述のような協力的行動を行うロボット間通信を実現するためには、各ロボットからの通信の多重アクセスを制御するMAC(Medium Access Control;メディアアクセス制御)プロトコルが必要となる³⁾⁻⁷⁾。現在、移動体通信のMACプロトコルとして、スケジュール型のTDMA(Time Division Multiple Access), FDMA(Frequency Division Multiple Access), CDMA(Code Division Multiple Access), ポーリング方式、トークン方式などが提案されている¹⁴⁾。これらの方式はあらかじめ割り当てられたタイミングで通信を行うため原則としてパケットの衝突は発生しない。しかしノード数が増えると送信できるまでの待ち時間が長くなる欠点がある。他にランダムアクセス型としてALOHA, CSMA(Carrier Sense Multiple Access)などが提案されている¹⁴⁾。これらの方式は任意のタイミングで通信を行うことができるため、通信待ち時間がノード数に影響されることはスケジュール型より少ないが、パケットの衝突が発生する。このパケット衝突はノード数が増えるほど多くなり通信効率を低下させる。したがって実時間性が要求されるようなロボット間通信には適していない。

実時間性の高い同時並行的なロボット間通信を実現するためには、パケット衝突が発生しないスケジュール型のMACプロトコルが適している。しかし、先に述べたようにノード数により通信できるまでの時間が変わってくるため、既存の方式をそのまま適用したのでは協調動作に支障をきたす。また、ノード数が動的に変化するようなネットワーク環境でのスケジューリングにも適應できない。

以上のような問題点をふまえ、これまで筆者らは自律分散型ロボットシステムによる協調搬送作業を想定し(図1), TDMA方式を基本として、実時間性・適應性を考慮したメディアアクセス制御プロトコルAR-TDMA(Adaptive Reservation-Time Division Multiple Access)方式を提案している¹⁵⁾。TDMA方式を採用したのは、パケット衝突が発生せず通信機構の工夫によって実時間通信に応用可能なこと、ロボットの入れ替え処理に対応可能なこと、協力的行動において各ロボットが同期をとるために必要なブロードキャストが行えること、1つの周波数帯で各ロボット間の通信が実現できること、その結果として通信コストを低

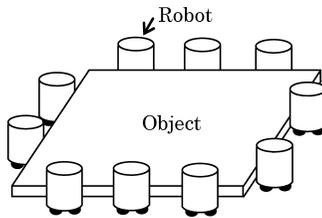


図 1 複数台のロボットによる協調搬送作業

Fig.1 Object transportation by many robots.

く抑えられること，などによる。

本論文では，シミュレーションによる性能評価により，本方式が従来方式に比べ通信遅延特性，スケーラビリティ特性，運搬時間特性に優れていることを示す。

本論文の構成は次のようになる，2章で関連研究について述べる．3章では従来方式の問題点について述べる．4章では，AR-TDMA方式の基本動作について述べる．5章では，AR-TDMA方式の伝送特性などをシミュレーションによって求め，従来方式と比較し性能評価を行う．6章は本論文のまとめである。

2. 関連研究

本研究の関連分野は，ロボット間通信に基づいた協調動作が中心となる．研究のアプローチとしては，ロボット間の協調動作を既存の通信方式を用いて行う方法と，通信プロトコルそのものを開発し協調動作を研究する方法とがある．本研究では後者のアプローチをとっている。

前者は主に，IEEE802.11a/11b/11gで規定されているCSMA/CA (CSMA with Collision Avoidance) と呼ばれる無線ネットワークプロトコルを用いて協調動作を行わせるものである．ロボット台数が2~3台と少数で，個別行動のように比較的時間性が低い協調動作を対象としており，文献10)~12)などがある．一方，後者はロボット間通信に適したMACプロトコルの研究で，文献3)~7)などがある。

文献3)はCSMA/CD-W (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection for Wireless) というMACプロトコルを提案している．これはEthernetで使われているCSMA/CD方式に改良を加え無線で使用できるようにしたプロトコルであるが，CSMA/CA方式との類似点が多い．ランダムアクセス型のMACプロトコルは，前述したようにノード数が増えるとパケット衝突が増える問題点がある。

文献4)はCDCSMA-CD (Code Division Carrier Sensing Multiple Access with Collision Detection) という，CSMA方式とCDMA方式を合わせたMAC

プロトコルを提案している．CDMA方式は符号理論を用いて複数の通信が同時に行える利点があるが，ノード間の同期が必要となる，複数の周波数を使うため広い帯域が必要となる，各ロボットが違う周波数を使用するためブロードキャストができない，符号処理のために能力の高い計算機が必要となり通信コストが高くなる，などの問題点がある。

文献5)はトークンリング方式を採用したMACプロトコルを提案している．トークンと呼ばれる送信許可証を巡回させることによって順繰りに通信する方式である．パケットの衝突が発生せず，ノード間の同期も必要ないので分散システムに向いているが，トークンを紛失した場合の再発行の手続きや，ロボットの入れ替え処理が発生する場合にはトークンの管理が複雑になり実時間性を損ねる問題点がある。

文献6), 7)はTDMA方式を採用したMACプロトコルを提案している．TDMA方式は各ノード間の同期が必要となるが，パケットの衝突が発生せず確実に送信できる利点がある．しかし，ノード数が増えると送信できるまでの待ち時間が長くなる，ノードの増減にともなうスケジューリング管理が困難になる，などの問題点がある(後述する)．文献6)ではロボットの入れ替え処理をともなうスケジューリング管理について議論されていない．文献7)ではTDMA/TP (TDMA in Temporal and Partial area)方式というMACプロトコルを提案している．各ロボットへのタスク割当てやロボットの入れ替え処理について議論されているが，実時間性や柔軟性について問題点がある(後述する)．

以上より，本研究で対象としている協調搬送作業のように，ロボット数が多く実時間性が要求され，また故障などによりロボットの入れ替え処理が生じるような環境において，ただちに適用できるロボット間MACプロトコルは現在のところ存在しない．しかしながら，協調搬送作業に必要な以下のようなMACプロトコルの条件に最も近い性能を持っているものは文献7)である。

- 実時間通信を行うためにパケット衝突が発生しない。
- ロボットの離脱・新規参入などの入れ替え処理に適応できる。
- 各ロボットが同期をとるために必要なブロードキャストが行える。
- 通信コストをできるだけ低く抑えられる。

このような理由から，本研究では文献7)のTDMA/TP (TDMA in Temporal and Partial area)方式を比較対象とする。

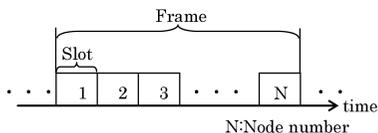


図 2 TDMA 方式の概念図

Fig. 2 An illustration of TDMA method.

3. 従来方式の問題点

はじめに本論文で基本とする TDMA (Time Division Multiple Access; 時分割多重アクセス) 方式について述べる. TDMA 方式とは, 時間軸を一定間隔で分割し, 分割された時間のなかでノードの送信権を切り替えることでパケットの衝突なしに伝送を行う通信方式である¹⁴⁾. 図 2 に TDMA 方式の概念図を示す. 一定時間に分割された時間軸はスロットと呼ばれ, スロット群の 1 周期をフレームと呼ぶ. 各ノードはあらかじめ割り当てられたスロットを使い送信する. 受信ノードはスロット内の宛先アドレスを参照し自分宛のデータの時は受信し, それ以外の宛先アドレスの場合は破棄する. 各ノード間では同期が必要なため, 同期させるための大域時計もしくはネットワーク全体の同期が必要となる. また全体のノード数も既知でなければスケジューリングができない. したがって協調動作中にロボットが離脱・新規参入するような, ノード数が動的に変化するような環境に適用するためには工夫が必要である.

すでに述べたように, ロボット間通信の MAC プロトコルとして, TDMA/TP (TDMA in Temporal and Partial area) 方式が提案されている⁷⁾. これはロボット間の通信範囲を, 最初に協調動作を要求したロボットから 1 ホップで届く領域内に限定し, その領域内だけに一時的で部分的なタイムスロットを割り当てる方式である. 協調動作が終了した時点で割り当ては解放される. このタイムスロットは固定されたものでなく, 新たなロボットからの通信要求により割り当てを拡張したり, 逆に通信が終了したタイムスロットを抜き出し, 割り当てを縮小したりといった動的な割り当て機構を持つ.

しかし, TDMA/TP 方式には次のような問題点がある. (1) フレーム内のスロットは各ノードに静的に割り当てられているため (図 3), そのフレーム内で通信要求が発生しないノードの割り当ては無駄になってしまう. 図 3 においてノード 3 からの通信要求がないとすると, このスロット割り当ては無駄に時間を消費することになる. 静的割り当て方式の場合, 各ノードが毎

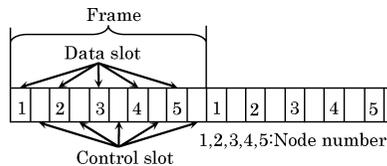


図 3 TDMA/TP 方式の静的スロット割当て

Fig. 3 Static slot allocation method of TDMA/TP.

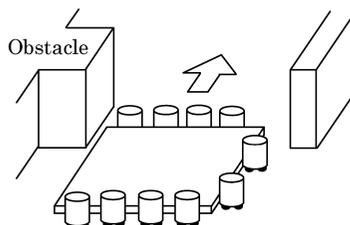


図 4 握持箇所を替えながらの協調搬送作業

Fig. 4 Different nodes have different sending requests.

周期とも均一に送信要求があるような場合には効率的だが, たとえば 図 4 のように協調搬送を行う環境内に, 張り出した障害物がありかつ両側が壁で大きく迂回できないような場合, 障害物と接触しそうなロボットは, 握持箇所を持ち替える必要がある⁸⁾. 持ち替え動作を行うロボットは他のロボットに比べ必然的に通信量が増えることになり, 静的割当て方式では実時間制御に適應できなくなってしまう. (2) タイムスロットの割り当てを, タスクを依頼するロボットが周辺ロボットに対し条件を与え, その条件に応じられるロボットが応答する, 契約ネット⁷⁾ を応用した選択機構で行っている. そのため, 最終的なタイムスロットが割り当てられるまで, 告知・入札・条件判断・落札など数段階の処理が必要となってくる. これらの処理では入札の終了を通知するパケットや, 最終スロット割当てを通知するパケットなど, 重要なパケットの送信をコントロールスロット (図 3) で行っている. このコントロールスロットは, このほかに新たなロボットからのスロットの拡張要求受付や, 通信が完了したロボットからの縮小 (スロットの抜き出し) 要求受付などにも使われる. ただし, これらの拡張・縮小要求は, 最終的なタイムスロットが割り当てられるまでの間, つまり入札・落札などの処理が行われている間は, 前述の重要な通知のパケットとの衝突を防ぐため, 送することができない仕組みになっている. したがって任意のタイミングで行えず柔軟性に欠ける. この問題はスロット割当てに関するすべての処理を, コントロールスロットで行っていることに起因する. (3) 同時に 2 つ以上のスロットの拡張・縮小要求があった場合, パケットの衝突を起こす可能性があり, これらに対する

対策が議論されていない。

本研究ではこれらの問題点を解決するメディアアクセス制御プロトコルの開発を目的としている。

4. 提案方式

4.1 AR-TDMA 方式の概要

送信頻度にばらつきがある通信環境やロボット数の変化など動的な環境に適応できるように、本方式には以下のような特長がある。

- (1) 遅延を小さくするため、TDMA/TP 方式の問題点である静的スロット割当て方式に代わり、予約機構を取り入れた動的スロット割当て方式を採用している。
- (2) ロボットの離脱・新規参入に柔軟に適応するため、処理内容によってスロットを分けている。
- (3) 複数台のロボットから同時に新規参入要求があった場合の packets 衝突対策として、ロボットの動力源であるバッテリー残量を指標としたスロット割当て方式を採用している。

なお設計にあたっては次の仮定をしている。

- 協調搬送の作業形態は、1 台のロボットがリーダーとなり経路計画を行い、残りのロボットがフォロワとなりそれに従うリーダー・フォロワ型とする⁹⁾。
- 通信範囲は TDMA/TP 方式同様、最初に協調動作を要求したロボットから 1 ホップで届く領域内とし、協調動作終了後はスロット割当てが解放されるものとする。
- 通信の同期方式は、協調動作を要求したロボット（リーダーロボット）が発信する同期開始信号に、自己のクロックを合わせて行うこととする。
- 各ロボットには、あらかじめ ID 番号 (ID=1, 2, 3...n) が割り振られているものとする。
- 協調動作に参加するロボット数は、最大 50 台を想定している。これはそれ以上多くなると実時間性が損なわれ、正確な協調動作の遂行が困難になることが予想されるためである。

予約機構を用いた MAC プロトコルは、ビットマッププロトコルとしてすでに提案されている¹⁴⁾。ビットマッププロトコルは、競合区間と呼ばれるノードごとに分割されたスロットに、送信要求がある場合は 1 のビットを書き込む。最後のノードまで処理が進んだ後、1 のビットを書き込んだノードがデータを送信するというものである。したがって送信要求のあるノードだけにタイムスロットが割り当てられるため余分な時間が生じず実時間性に優れる。AR-TDMA 方式は、予約機構の部分においてはビットマッププロトコルと同

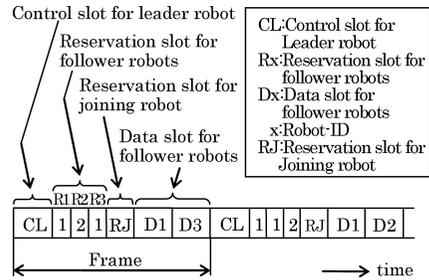


図 5 AR-TDMA 方式のフレーム構造
Fig. 5 Slot allocation of AR-TDMA.

様である。

しかし、前述したようにロボット間の協調動作においては、協調動作中にロボットの故障や作業条件変更などにより、ロボットの離脱・新規参入などの入れ替え処理やパケットの衝突が生じる可能性がある。そのためスロットの削除・追加などの動的な処理が通信機構には必要となる。つまりロボット間通信プロトコルには、実時間性を満たすための通信機構部分と、柔軟性を満たすための通信機構部分の 2 つが要求される。ビットマッププロトコルは予約機構を持つ点では実時間性を満たしているが、柔軟性の部分は満たしていない。AR-TDMA 方式は両条件とも満たしている点で、ビットマッププロトコルと大きく異なる。

4.2 AR-TDMA 方式のフレーム構造

AR-TDMA 方式のフレーム構造を図 5 に示す。本方式のフレームは、リーダーロボット用コントロールスロット（以下 CL）、フォロワロボット用予約スロット（以下 Rx, x はロボット ID）、新規参入ロボット用予約スロット（以下 RJ）、フォロワロボット用データスロット（以下 Dx, x はロボット ID）より構成される。それぞれ、CL は予約スロットの割当ておよび経路情報送信に、Rx はフォロワロボットからの送信・離脱要求受付に、RJ は新たに協調動作に加わりたいロボットからの要求受付に、Dx は各フォロワロボットから他のロボットへの情報伝達に使われる。なお、RJ は条件によりミニスロットを加え拡張される（後述する）。各スロット長は、CL: 156 [bit], Rx: 2 [bit], RJ: 6 [bit], Dx: 200 [bit] である。

基本的な動作としては、まずデータを送信する前に予約を行い、その予約状況をもとにデータスロットが割り当てられ、その後実際のデータパケットを送信するという手順である。したがって送信予約状況によってフレーム長が変わる。また予約はブロードキャストによって行われるため、各ロボットは互いの予約状況を把握しており、予約の確認処理は必要としない。

予約機構により通信が必要なノードだけにデータスロットが割り当てられるため、静的割当て方式のように通信の必要がないノードまでスロットが割り当てられ、余分な時間が生じるということがない。

最大フレーム長 T_{max} は、フォロワロボット台数を n 、CL スロット長を t_{CL} 、Rx スロット長を t_{res} 、RJ スロット長を t_{join} 、Dx スロット長を t_{data} とすると式 (1) で表される。

$$T_{max} = t_{CL} + n \times t_{res} + t_{join} + n \times t_{data} \quad (1)$$

4.3 協調動作の手順

次に複数台のロボットによる協調動作の手順を述べる。

- (1) まず協調動作を要求するロボットはリーダロボットとなり、周辺ロボットに対し応援要請メッセージをブロードキャストする。この応援要請メッセージには、各ロボット間の同期のずれをなくすための、同期開始信号の発信時刻 (T_{sync}) が書き込まれている。以後このリーダロボットが最後まで協調動作をコーディネートする。
- (2) 応援要請メッセージを受信した周辺ロボットはフォロワロボットとなり、 T_{sync} の時点で、リーダロボットが発信する同期開始信号を受信し、自己のクロックをリーダロボットのクロックに合わせ同期を開始する。その後、自己の ID とバッテリー残量を、ID 番号と比例した時間差 ($T_{sync} + ID$, $ID = 1, 2, 3 \dots n$ [ms]) で、ID 番号の小さい方から順次応答する。なお、バッテリー残量は 10 段階に分かれており、各ロボットは自己のバッテリー残量をセンサで計測し、何段階にあるかを判断し送化する。
- (3) フォロワロボットからの応答を受信したリーダロボットは、各ロボットのバッテリー残量を評価し、バッテリー残量の多いロボットを優先的に、ID 番号の小さい方から作業計画に組み入れる。バッテリー残量を評価することにより、各ロボットが平均的に協調動作に参加できるようになる。
- (4) リーダロボットは協調動作に参加させるフォロワロボットが決定した時点で、各フォロワロボットからの送信要求を受け付けるための予約スロット割当てを ID 番号の小さい方から行い、CL でブロードキャストする。
- (5) 通信要求のあるフォロワロボットはリーダロボットより割り当てられた予約順番に従い予約コード (予約あり: 1, 予約なし: 2) を Rx に書き込み応答する。予約コードが書き込まれない場合は、故障したと見なされ、次フレーム以降の

表 1 AR-TDMA の予約コード
Table 1 Reservation code of AR-TDMA.

Rx	Reservation code	
	Sending request	1
No sending request	2	
Leaving request	3	

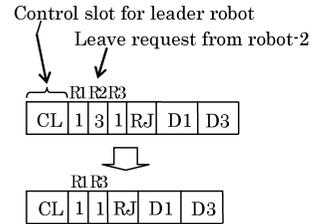


図 6 フォロワロボットが離脱する場合
Fig. 6 A case of leaving robot.

リーダロボットの指示により、新しいロボットとの交換が行われる。予約コードの一覧を表 1 に示す。表中、離脱コード 3 については後述する。

- (6) 最後の予約スロットまで処理が進んだ後、予約コード 1 を書き込んだフォロワロボットが、自己のデータスロットの割当てで順序に従いデータパケットを送信する。
- (7) 以後 1 フレームごとにリーダロボットは CL でフォロワロボットに指示を出し、その指示を受信したフォロワロボットは、送信要求がある場合には Rx に予約コードを書き込みデータパケットを送信するという一連の動作を繰り返す。もしリーダロボットからの指示がない場合は、リーダロボットが故障したと見なしリーダロボットの交換が行われる (後述する)。

4.4 動的なタイムスロット割当て

協調動作中、作業状況の変化やロボットの故障、バッテリー残量不足などにより、フォロワロボットの離脱、協調動作に参加していない他のロボットの新規参入、またリーダロボットの交換などが発生することが予想される。このような状況に柔軟に適應するため、本方式ではスロットの動的な割当てを行う。図 6 にフォロワロボットの離脱、図 7 に他のロボットの新規参入、図 8 にリーダロボット故障時の処理手順を示す。

まず、フォロワロボットが協調動作から離脱する場合には、(1) 協調動作から離脱したいフォロワロボットは、Rx に離脱専用のコード (離脱: 3) を書き込む。(2) リーダロボットは Rx に離脱コードが書き込まれたことを認識すると、離脱要求があったフォロワロボットの予約スロットを消去し予約割当てをやり直

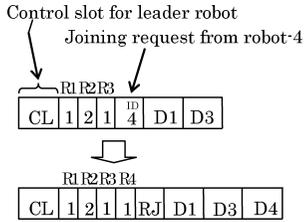


図 7 他のロボットが新規参入する場合 Fig. 7 A case of joining robot.

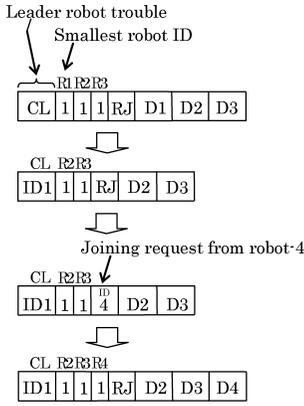


図 8 リーダロボット故障時の処理 Fig. 8 Processing for leader robot trouble.

す。そして新たな予約割当てを次フレームの CL でブロードキャストする。(3) 以後新たな予約割当てに従い動作を行う。

次に新規参入の場合には、(1) 協調動作に新たに加わりたいロボットは、RJ に自己の ID を書き込む。(2) リーダロボットは RJ に新規 ID が書き込まれたことを認識すると、新規参入要求があったロボットの予約スロットを新たに加え予約割当てをやり直す。そして新たな予約割当てを次フレームの CL でブロードキャストする。(3) 以後新たな予約割当てに従い動作を行う。

次に、協調動作の中心的な役割を果たすリーダーロボットが故障した場合には、(1) CL からリーダーロボットの指示がない場合、フォロワロボットはリーダーロボットが故障したと見なす。(2) その際 ID 番号の最も小さいフォロワロボットが次フレームの CL で、自分が新しくリーダーロボットに昇格することをブロードキャストする。(3) 新たに昇格したリーダーロボットが協調動作に参加していない他のロボットへ応援要請を行う。(4) 新しいフォロワロボットが図 7 の新規参入の手順に従い補充される。(5) 以後通常の協調動作を行う。

4.5 パケットの衝突回避方法

新規参入の要求を複数台のロボットが持っている場合、送信タイミングが同じであればパケットの衝突が

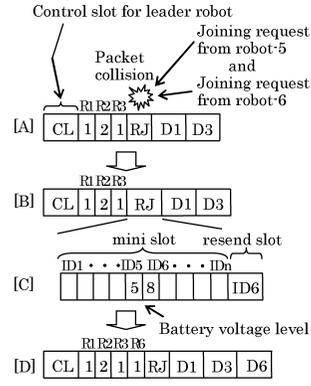


図 9 パケット衝突時の処理 Fig. 9 Processing of packet collision.

発生する。そこで本方式では、パケット衝突が発生した際、2 回目以降のパケット衝突を以下のようなロボットのバッテリー残量を指標にしたタイムスロット割当て方式により回避する。図 9 に処理の手順を示す。(1) リーダロボットは信号レベルを検知することによりパケット衝突を認識する(図 9 [A])。 (2) パケット衝突を認識したリーダーロボットは次フレームの CL で、RJ を通常データ領域の前に ID 番号順に構成されたミニスロット領域を加え拡張することをブロードキャストする(図 9 [B])。 (3) 新規参入要求を持つロボットは、拡張された RJ 内のミニスロットに、自己のバッテリー残量を ID 番号の小さい方から順次書き込む。そして、最後のミニスロットまで処理が進んだ後、バッテリー残量の最も多いロボットが自己の ID を予約領域に書き込み、新規参入要求を再送信する。同じバッテリー残量の場合には、ID 番号の小さいロボットが再送信する(図 9 [C])。 (4) 新規参入要求の再送信を行ったロボットが最終的に新規参入を果たすことができる(図 9 [D])。

以上のように AR-TDMA 方式は、予約機構を持っている点、ロボットの離脱・新規参入などの処理内容によってスロットが分かれている点、パケット衝突時の動的なスロット割当ての点、において従来方式である TDMA/TP 方式と大きく異なる。

5. 性能評価

提案方式である AR-TDMA 方式と、従来方式である TDMA/TP 方式の性能をシミュレーションにより評価する。性能評価の尺度としては、まずデータ発生率と平均伝達時間の関係を表す通信遅延特性について行う。次にロボット数と平均伝達時間の関係からスケラビリティ特性について行う。さらに運搬時間特

性について行う．ここでデータ発生率とは，各ロボットの送信要求パケット生成間隔から求められる送信要求の発生割合のことである．生成間隔が短くなるほどデータ発生率が高くなる．平均伝達時間とは，各ロボットにおける送信要求パケット発生から待ち時間を経て，各ロボットの割当てスロットで処理されるまでの時間の平均である．スケーラビリティ特性とは，ロボット数の増加に対する通信遅延の増加量を示す特性である．ロボット数が増すほどロボット間の同期がとりにくくなるため，通信遅延が協調動作に及ぼす影響が大きくなる．したがってロボット数が増加しても通信遅延の増加量が小さいほど，スケーラビリティ特性に優れていることになる．運搬時間特性とは，複数台のロボットが通信を行いながら協調搬送作業を行うとき，ある距離まで進むのに要した時間のことである．時間が短いほど性能が優れていることになる．

シミュレーションの諸条件を次のように仮定する．

- (1) 作業ロボット数は 20 台とし，1 台がリーダロボット，残りがフォロワロボットとする．各ロボットのタイムスロット割当ては完了しているものとする．
- (2) フレーム長は TDMA/TP 方式は固定長 500 [byte]，AR-TDMA 方式は送信予約によってデータスロットが割り当てられるため，可変長 263 ~ 500 [byte] とする．
- (3) 送信要求パケットの生成間隔は，指数分布とする．
- (4) ロボットの通信速度は 11 [Mbps] とする．
- (5) ロボットの移動速度は，障害物回避などの作業状況に合わせ 0 ~ 0.1 [m/s] まで変化するものとする．
- (6) 協調搬送距離は 20 [m] とする．
- (7) シミュレーション時間は 200 [sec] とする．
- (8) 上記の条件に加え，スケーラビリティ特性評価時のロボット数は 5 ~ 50 台とする．その際のフレーム長はロボット台数によって異なり，台数が増えるほど長くなる．また運搬時間特性評価時の協調搬送距離は最大 100 [m]，シミュレーション時間は 1,200 [sec] とする．

5.1 通信遅延特性

図 10 にデータ発生率と平均伝達時間の関係を表す通信遅延特性を示す．横軸は各ロボットからの送信要求パケット発生率，縦軸は送信要求パケット発生から待ち時間を経て，データスロットで処理されるまでの時間の平均を表している．協調搬送中の各ロボットからの送信要求によって通信遅延がどのような特性を示

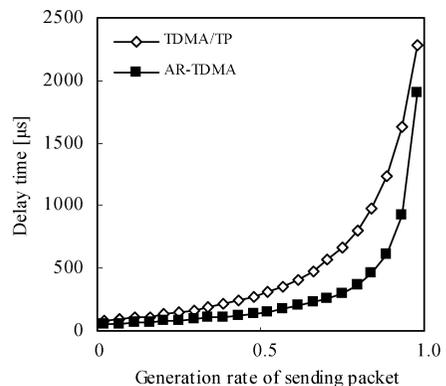


図 10 通信遅延特性

Fig. 10 Transmission characteristics.

すかを計測する．

図 10 より，パケット発生率が 90% までは TDMA/TP 方式に比べ，AR-TDMA 方式の方が遅延の増加率が小さく優れた特性を示している．これは動的割当てにより，送信要求のあるロボットだけにタイムスロットが割当てられ，フレーム長が短くなるためである．この特性は，3 章で述べたように障害物回避などにより，特定のロボットだけ頻繁に通信しなければならないような，送信頻度にばらつきがある通信環境 (図 4) で有効となる．しかし，パケット発生率が 90% を超えると遅延の増加率が大きくなり，TDMA/TP 方式との遅延の差が小さくなり性能が低下している．これはトラヒックがつかねにあるような状況下では，トラヒックに応じたスロット割当てが可能という，動的割当て方式の長所が生かされないためである．

以上より，AR-TDMA 方式は送信頻度にばらつきがある通信環境において優れた通信遅延特性になることが示された．

5.2 スケーラビリティ特性

図 11 にスケーラビリティ特性を評価するための，ロボット数と平均伝達時間の関係を示す．横軸は協調搬送を行っているロボット数，縦軸は送信待ち時間の平均を表している．平均パケット生成間隔は 1.25 [ms] (パケット発生率 38%)，2.5 [ms] (パケット発生率 19%) とし，2 つのトラヒック状態を示している．

図 11 より，2 つのトラヒック状態とも，ロボット数増加にともない，通信遅延は増加しているが，TDMA/TP 方式に比べ，AR-TDMA 方式は遅延が少なく優れた特性を示している．次に，ロボット数増加にともなう，各方式のトラヒックの違いによる通信遅延増加量に着目すると，ロボット数 50 台における TDMA/TP 方式の増加量が約 1,200 [μs] なのに対し，

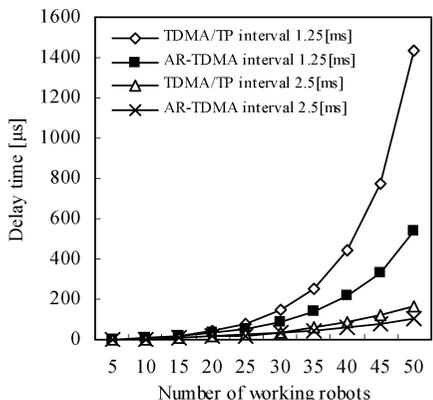


図 11 スケーラビリティ特性

Fig.11 Scalability characteristics.

AR-TDMA 方式は約 400 [μs] と、TDMA/TP 方式の 1/3 となっている。これはロボット数が増加しても通信遅延の増加量が小さいという、スケーラビリティ特性に優れていることを示している。

以上よりスケーラビリティ特性においても AR-TDMA 方式の有効性が示された。

5.3 運搬時間特性

本研究で想定しているロボット間協調動作は、各ロボットがツねに通信を行い、互いの状態を把握しながら協調動作を進めていくことを基本としている。そのため、ロボット間の通信方式が直接ロボットの位置や速度制御に影響してくる。したがって通信方式を評価するうえで、運搬時間特性は重要となる。

シミュレーションを行うにあたっては 図 12 のような移動形態および移動経路を想定している。図 12 は運搬作業の模式図で、分かりやすくするためロボット数や移動経路を省略している。シミュレーション想定上の移動形態は、1 台のリーダーロボットと 19 台のフォロワーロボットの計 20 台による協調搬送作業である。移動経路上には図 12 のような張り出した障害物 (X 方向 1 [m], Y 方向 0.5 [m]) が、3 [m] 間隔で散在している。リーダーロボットは、移動経路上の障害物の有無など大まかな情報をフォロワーロボットに与える。フォロワーロボットはリーダーロボットからの情報をもとにより詳細な環境認識を行い、障害物と接触しそうな場合は減速し、握持箇所を持ち替えながら協調搬送を進める。各ロボットの packets 発生率は作業状況により変化し、持ち替え動作を行うフォロワーロボットの packets 発生率が最も高くなる。各ロボットからの送信要求間隔が、各ロボットの割当てスロットでの処理時間より短くなると、送信待ち時間が増え続け、通信ができなくなってしまう輻輳状態となる。協調搬送中こ

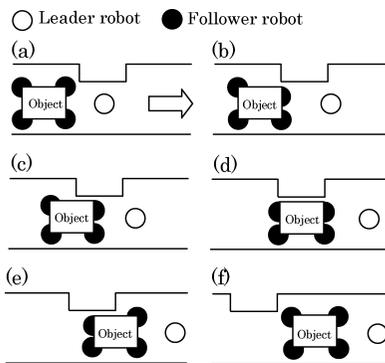


図 12 移動形態および移動経路の模式図

Fig.12 An illustration of moving formation and route.

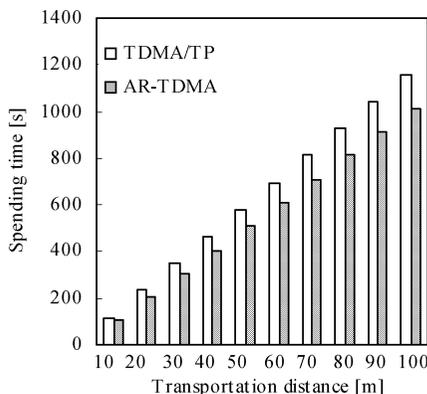


図 13 運搬時間特性

Fig.13 Object transportation distance and time characteristics.

のような輻輳状態により情報交換ができない場合には、ロボット間の同期が正確にとれなくなるため、正常な通信状態に回復するまで協調搬送は全ロボットが一時停止する。以上のような条件のもとで協調搬送開始から目的地到達までの時間を計測して運搬時間特性の評価とする。

運搬時間特性を示す搬送距離と所要時間の関係を 図 13 に示す。横軸は協調搬送を開始してから搬送距離、縦軸は協調搬送を開始してから、ある距離まで到達するのに要した時間を表している。協調搬送中に通信が滞りなく行われないとロボットの軌道修正が効率的に行われず、搬送に要する時間も多くなる。

図 13 より、いずれの搬送距離においても TDMA/TP 方式に比べ、AR-TDMA 方式の方が優れた性能を示している。特に搬送距離が長くなるほど、所要時間の差が顕著になっている。搬送距離 100 [m] における所要時間に着目すると、ロボットの移動速度が最大 0.1 [m/s] であることから、所要時間約 1,015 [sec] で

ある AR-TDMA 方式は最大移動速度に近い速度を維持しながら協調搬送を行ってきたことが分かる．これは AR-TDMA 方式の予約機構によりロボット間の同期が正確にとれ、協調動作が滞りなく行われたことを意味する．よって AR-TDMA 方式は遅延が小さく応答時間が良いといえる．一方、TDMA/TP 方式は約 1,160 [sec] である．これは通信待ち時間の増加により、通信が滞り障害物回避のための軌道修正が効率的に行えなかったことによるものである．

以上より運搬時間特性においても AR-TDMA 方式の有効性が示された．

6. おわりに

本論文では、複数台の自律移動ロボットによる協調搬送作業を想定し、実時間性・適応性を考慮した自律分散型ロボット間通信のための MAC プロトコル、AR-TDMA 方式を提案した．さらに本方式の特性を検証するためシミュレーションによって性能評価を行った．その結果、

- (1) 本方式は、障害物回避などにより、特定のロボットだけ頻繁に通信しなければならないような送信頻度にばらつきがある通信環境において、TDMA/TP 方式より優れた通信遅延特性を示す、
 - (2) 本方式は、ロボット数が増加しても通信遅延の増加量が小さく、スケーラビリティ特性に優れている、
 - (3) 本方式は、ロボットの最大移動速度に近い速度で運搬が行える運搬時間特性を有している、
- ということを確認した．

今後は実装により、実時間性、適応性を検証していく予定である．

参 考 文 献

- 1) 浅間 一：共存工学のための分散適応ロボティクス，日本ロボット学会誌，Vol.20, No.6, pp.577–578 (2002).
- 2) 尾崎功一，浅間 一，石田慶樹，松元明弘，遠藤 勲：通信を用いた複数自律移動ロボットの相互衝突回避，日本ロボット学会誌，Vol.14, No.7, pp.961–967 (1996).
- 3) Wang, J. and Premvuti, S.: Resource sharing in distributed robotic systems based on a wireless medium access protocol (CSMA/CD-W), *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.19, pp.33–56 (1996).
- 4) Parnichkun, M. and Ozono, S.: CDCSMA-CD communication method for cooperative

robot systems, *Advanced Robotics*, Vol.11, No.7, pp.669–694 (1998).

- 5) Wilke, P. and Braunl, T.: Flexible Wireless Communication Network for Mobile Robot Agents, *Industrial Robot*, Vol.28, No.3, pp.220–232 (2001).
- 6) Mock, M. and Nett, E.: Real-Time Communication in Autonomous Robot Systems, *Proc. of International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS'99)*, pp.34–41 (1999).
- 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，Vol.12, No.8, pp.1157–1165 (1994).
- 8) 宮田なつき，太田 順，新井民夫，相山康道，佐々木順：車輪形移動ロボット群による持ち替え協調搬送の実現，日本機械学会論文集 (C 編)，Vol.65, No.631, pp.165–172 (1999).
- 9) 井上健司，中島俊信：異なるタスクを持つ複数ロボットによる単一物体の協調搬送，日本ロボット学会誌，Vol.19, No.7, pp.888–896 (2001).
- 10) Rybski, P.E., Stoeter, S.A., Gini, M., Hougen, D.F. and Papanikolopoulos, N.P.: Performance of a Distributed Robotic System Using Shared Communications Channels, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.18, No.5, pp.713–727 (2002).
- 11) Chaimowicz, L., Sugar, T., Kumar, V. and Campos, M.F.M.: An Architecture for Tightly Coupled Multi-Robot Cooperation, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2001)*, pp.2992–2997 (2001).
- 12) Ye, W., Vaughan, R.T., Sukhatme, G. S., Heidemann, J., Estrin, D. and Mataric, M.J.: Evaluating Control Strategies for Wireless-Networked Robots Using an Integrated Robot and Network Simulation, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2001)*, pp.2941–2947 (2001).
- 13) 長田 正ほか：自律分散をめざすロボットシステム，オーム社 (1995).
- 14) Tanenbaum, A.: *Computer Networks, 4th Edition*, Prentice Hall (2003).
- 15) Arai, J., Koyama, A. and Barolli, L.: An Adaptive Medium Access Control Protocol for Robot Inter-communication in Autonomous Distributed Systems, *Proc. IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA2004)*, pp.545–550 (2004).

(平成 17 年 4 月 18 日受付)

(平成 17 年 9 月 2 日採録)

推薦文

本論文で、著者らは、自律分散型ロボット間通信のために、TDMA/TPの問題点を解消した適応予約型プロトコルAR-TDMAを提案し、シミュレーションにより性能評価を行っている。本論文は、DPSWS12において優秀論文賞を受賞している。よって、本論文を論文誌掲載にふさわしいと考え、推薦する。

(マルチメディア通信と分散処理ワークショッププログラム委員長 上原 稔)



荒井 順平 (正会員)

1987年山形大学工学部情報工学科卒業。省力化機器開発エンジニアを経て、1990年山形県入庁。1993年山形県立産業技術短期大学校情報制御システム科講師。2005年同短期大学校助教授。現在、山形大学大学院理工学研究科博士後期課程在学中。ネットワークロボティクスに関する研究に従事。IEEE, 日本ロボット学会, 電子情報通信学会各会員。



小山 明夫 (正会員)

1987年山形大学工学部情報工学科卒業。会津大学コンピュータソフトウェア学科講師を経て、2002年より山形大学工学部情報科学科助教授。博士(工学)。ルーティングプロトコル、高速ネットワークプロトコル、エージェント、医療・介護用ネットワークサービス、遠隔教育、携帯電話向けサービスに関する研究に従事。IEEE Computer Society, 電子情報通信学会各会員。



バロリ・レオナルド (正会員)

1989年アルバニア・ティラナ大学工学部電子工学科卒業。同年同大学工学部助手。1997年山形大学大学院博士後期課程修了。同年同大学工学部日本学術振興会外国人特別研究員。1999年山形大学人文学部助手。2002年埼玉工業大学工学部講師。2003年福岡工業大学情報工学部助教授。2005年同大学同学部教授。工学博士。国際会議 AINA2004, ICPADS2005 Program Chair, AINA2006 General Co-Chair。トラヒック制御, ファジー制御, 遺伝的アルゴリズム, 協調エージェント, 遠隔教育, センサネットワークに関する研究に従事。IEEE, IEEE Computer Society, 日本知能情報ファジィ学会各会員。