

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

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

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もたせることにより均一な通信量でない環境での実時間性を保証する。また、動的なタイムスロット割り当て方式によりロボット数の変化に柔軟に適応する。さらにロボットのバッテリ残量を指標にしたタイムスロット割り当て方式により、パケットの衝突を従来方式より軽減する。

An Adaptive Medium Access Control Protocol for Robot Inter communication in Autonomous Distributed Systems

Junpei Arai^{†,††}, Akio Koyama^{†††} and Leonard Barolli^{††††}

In autonomous distributed robot systems many robots cooperate together to carry out many difficult tasks that single robots can not realize. But, in order to cooperate together the robots should communicate with each other. Therefore, the inter 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 can realize a real time communication among robots in a heterogeneous environment 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.

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、産業用ロボットに見られるような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、人道的地雷探知・撤去など、人間が開発してきた技術によって生じた課題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の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高度で複雑な作業を効率よく行わせる自律分散型ロボットシステムの研究が盛んに行われている^{2)~7)}。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。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。

このように複数台に分散化するメリットは大きいですが、同時に複数台のロボットが共通した目的のタスクつまり協調動作を遂行するためには、自己の作業目的に基づいて行動するだけでなく、他のロボットやシステム全体の目的も考慮した協調行動をとる必要がある。

ロボット間の協調動作には、助け合う協調と邪魔しない協調がある。前者は単独では処理できないような高度な作業をチームを組んで作業にあたる行動形態、後者は互いの進路を譲り合い衝突を回避するような行動形態である。いずれの協調動作においてもロボット同士のインタ

[†]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

^{††}山形大学 大学院理工学研究科 システム情報工学専攻
Graduate School of Science and Engineering,
Yamagata University

^{†††}山形大学 工学部 情報科学科
Department of Informatics, Yamagata University

^{††††}福岡工業大学 情報工学部 情報通信工学科
Department of Information and Communication
Engineering, Fukuoka Institute of Technology

ラクションが必要となり、その手段としてロボット間通信が不可欠となる²⁾。

特に助け合う協調の一例である図1のような複数台のロボットによる協調搬送作業では、各ロボットは同期を取りながら直線や円弧軌道を移動する必要があり、位置や速度などの軌道情報交換のためのロボット間通信を頻繁に行なわなければならない。また、時々刻々変わる作業状況やロボットのコンディションによっては、協調動作中にロボットの離脱・新規参加が発生することも予想される。このような実時間制御を伴うようなロボット間通信においては同時並行的な通信方式が求められる。そのためにはいかにパケットの衝突を生じさせないか、あるいは衝突したときにどのように対処するかが重要な問題となる。これらの問題に対処するためには、通信の多重アクセスを制御するための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), 4), 5), 6)}。

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⁸⁾。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。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。

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

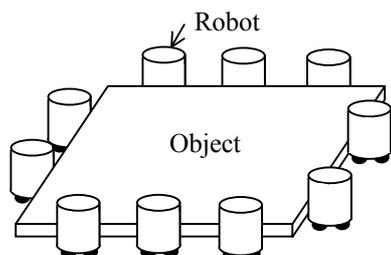


図1. 複数台のロボットによる協調搬送作業

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実時間性を保証できない。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応できない。

そこで本論文では、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、TDMA方式を基本として、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 (Adaptive Reservation-Time Division Multiple Access; 適応予約型TDMA)方式を提案する。

2. 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。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あて先アドレスを参照し自分あてのデータの時は受信し、それ以外のあて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・新規参加するような、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。

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⁶⁾。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

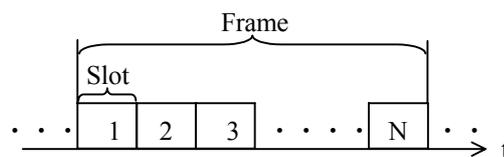


図2. TDMA方式の概念図

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もつ。

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)、送信要求が発生しないノードの割り当てはむだになってしまう。図3においてノード3からの送信要求がないとすると、このスロット割り当てはむだ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、例えば図4のように協調搬送を行う環境内に、前方に柱のよう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、それまで握持していた箇所とは別な箇所に持ち替える必要が生じてくる。このような状況では持ち替え動作を行うロボットが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、静的割り当て方式では実時間制御に適応できなくなってしまう。(2) スロットの割り当て・解除通知およびスロットの拡張・縮小要求受付のすべてをコントロールスロット(図3)で行っているため、パケットの衝突を防ぐために

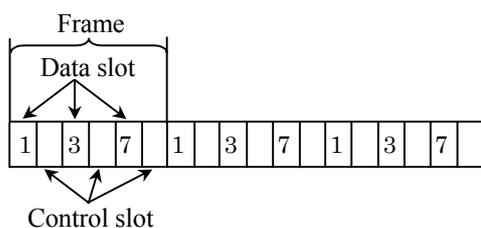


図3. TDMA/TPの静的スロット割り当て方式

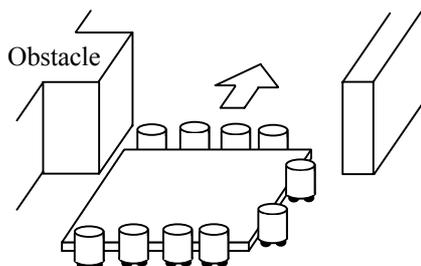


図4. 握持箇所を替えながらの協調搬送作業

スロットの拡張・縮小要求は、スロット割り当てなどの重要な通信が行われている間は送出することができず、柔軟性に欠ける。(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。

3. 提案方式

3.1 AR-TDMA方式の概要

本方式は、複数台の自律移動ロボットによる協調搬送作業のように通信量が多く実時間制御を伴うような環境と、ロボットの離脱・新規参入などノード数が動的に変化するような環境を対象としている。

これらの環境に対応するため以下の点に着目して設計を行う。

- (1) 実時間性を保証するため、TDMA/TP方式の問題点である静的なスロット割り当て方式に代わり、予約機構を取り入れた動的なスロット割り当て方式を採用する。
 - (2) ロボットの新規参入に柔軟に対応するため、専用の予約スロットを設け動的な状況に適応できるようにする。
 - (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パケット衝突対策として、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り当て方式を採用する。
- なお設計にあたっては次の仮定をしている。

- ・ 同一空間内で作業を行うロボット群は、10台~20台の小中規模群とし、ロボットはすべて同一機能をもつものとする。
- ・ 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⁷⁾。
- ・ 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り当てが解放されるものとする。
- ・ 通信の同期方式は屋外であればGPS(Global Positioning System)から、屋内であれば電波時計から基準時間を受信し、自己のローカルクロックとの差を評価して行うこととする。

3.2 予約機構によるタイムスロット割り当て

3.2.1 AR-TDMA方式のフレーム構造

まずAR-TDMA方式の基本的なフレーム構造について述べる。本方式のフレームは、図5のようにリーダーロボット用コントロールスロット、フォロワロボット用予約スロット、新規参入ロボット用予約スロット、フォロワロボット用データスロットより構成される。それぞれ、リーダーロボット用コントロールスロットは予約スロットの割り当ておよび経路情報送信に、フォロワロボット用予約スロットはフォロワロボットからの送信・離脱要求受付に、新規参入ロボット用予約スロット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、フォロワロボット用データスロットは各フォロワロボットの動作状況送信などに使われる。なお、新規参入ロボット用予約スロットは、条件によりミニスロットを加え拡張される。

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。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、静的割り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ことがない。

1サイクルの処理時間 T_{max} は、ロボット台数を n 、リーダーロボット用コントロールスロットを t_{CL} 、フォロワロボット用予約スロットを t_{res} 、新規参入ロボット用予約スロットを t_{join} 、フォロワロボット用データスロットを t_{data} とすると式(1)で表される。

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

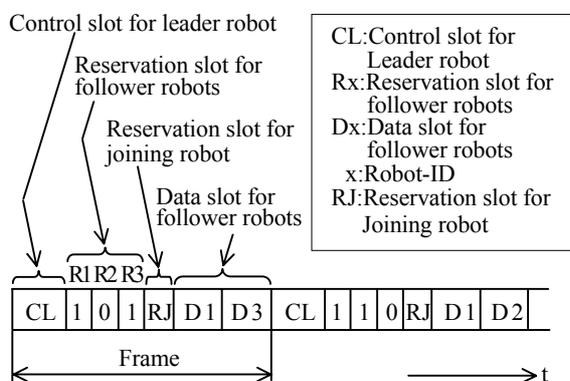


図5. AR-TDMAのスロット割り当て方式

3.2.2 協調動作の流れ

次に複数台のロボットによる協調動作の流れを述べる。

- (1) まず協調動作を要求するロボットはリーダーロボットとなり、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、同期開始時刻が書き込まれている。以後このリーダー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、リーダーロボットから指示された同期開始時刻に合わせて、自己のIDとバッテリー残量を、ID番号の小さい方から時間差をおいて順次応答する。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出する。
- (3) フォロワロボットからの応答を受信したリーダーロボットは、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) リーダー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り当てを行い、リーダーロボット用コントロールスロットでブロードキャストする。予約割り当てはロボットのID順に番号の小さい方から行う。
- (5) 通信要求のあるフォロワロボットはリーダー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:0)をフォロワロボット用予約スロットに書き込み応答する。
- (6) 最後の予約スロットまで処理が進んだ後、自己のデータスロットの割り当て順序に従いデータパケットを送信する。
- (7) 以後フレーム毎にリーダーロボットからの指示をリーダーロボット用コントロールスロットから受信し、送信要求のあるフォロワロボットはフォロワロボット用予約スロット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。

3.3 動的なタイムスロット割り当て

時々刻々変わる作業状況やロボットのコンディションによっては、協調動作中にロボットの離脱・新規参入が発生することが予想される。例えば、協調動作中のあるロボットがバッテリー電圧が低下し動作を継続できないような場合は、全体の協調動作に大きく影響するため離脱せざるを得ない。離脱後は新規に違うロボットが参入して不足を補う必要がある。また、作業効率が思わしくない場合なども新規にロボットを集め協力を求めることが必要になる。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り当てを行う。協調動作から離脱する場合にはフォロワロボット用予約スロットに離脱専用のコードを書き込む。逆に協調動作に新たに加わる場合は、新規参入ロボット用予約スロットに自己のIDを書き込む。図6にロボットの離脱、図7に新規参入の流れを示す。

まず離脱の場合は、(1) 協調動作から離脱したいロボットは、フォロワロボット用予約スロットの自己の割り当てスロットに離脱専用のコード(離脱: 2)を書き込む。(2) リーダロボットはフォロワロボット用予約スロットに離脱コードが書き込まれたことを認識すると、離脱要求があったロボットの予約スロットを消去し予約割り当てをやり直す。そして新たな予約割り当てを次フレームのコントロールスロットでブロードキャストする。(3) 以後新たな予約割

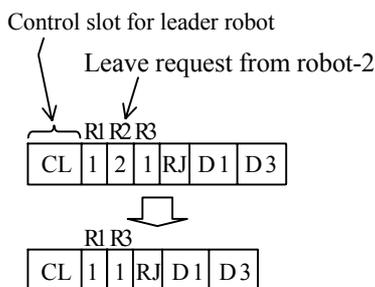


図6. ロボットが離脱する場合

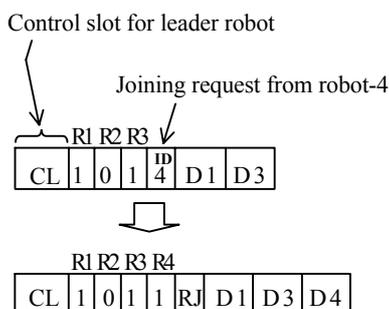


図7. ロボットが新規参入する場合

り当てに従い動作を行う。

次に新規参入の場合は、(1) 協調動作に新たに加わりたいロボットは、新規参入ロボット用予約スロットに自己のIDを書き込む。(2) リーダロボットは新規参入ロボット用予約スロットに新規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り当てをやり直す。そして新たな予約割り当てを次フレームのコントロールスロットでブロードキャストする。(3) 以後新たな予約割り当てに従い動作を行う。

3.4 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もっている場合、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回避するため、以下の手順で処理する。図8に処理の流れを示す。(1) パケット衝突が発生すると、新規参入ロボット用スロットには正式なロボットIDは書き込まれないが、信号レベルは変化する。リーダーロボットはこのキャリアを検知することによりパケット衝突を認識する。(2) パケット衝突を認識したリーダーロボットは、次フレームのコントロールスロットで、同じフレーム内の新規参入ロボット用予約スロットを、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。(3) 新規参入要求をもつロボットは、拡張された新規参入ロボット用予約スロット内のミニスロットに、

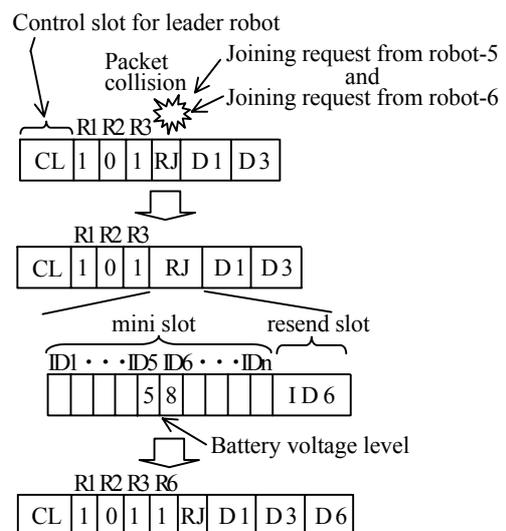


図8. パケット衝突時の処理

10段階に分かれた自己のバッテリー残量を、ID番号の小さい方から時間差をおいて順次書き込む。(4)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をデータ領域に書き込む。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IDを書き込む。

4. 性能評価

提案方式の性能をTDMA/TP方式と比較し定性的に評価する。評価は以下の3つに関する。

- (1) 実時間性：均一な通信量でない環境での実時間性を保証できるか。
- (2) 柔軟性：ロボットの離脱・新規参入に伴うスロット割り当てが柔軟にできるか。
- (3) パケットの衝突回避：複数のロボットから同時に新規参入要求があった場合、パケットの衝突を回避できるか。

比較結果を表1に示す。

まず実時間性に関しては、2節で述べたように、協調動作中に特定のロボットだけ頻繁に通信しなければ動作が継続できないような状況では、TDMA/TP方式のような静的割り当て方式では適応できない。提案方式は予約機構をもたせることにより実時間性を保証する。

次に柔軟性に関しては、TDMA/TP方式はスロット割り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ため、ロボットの離脱・新規参入に伴うスロット割り当ては、他の優先度の高い処理に影響され、任意のタイミングで行うことができず、柔軟性に欠ける。提案方式は処理内容によってスロットが分かれているため、同時並行的に処理することができ、任意のタイミングでロボットの離脱・新規参入が可能である。

パケットの衝突回避に関しては、TDMA/TP方式ではコントロールスロットに、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、その対策はされていない。提案方式は、新規参入ロボット用予約スロットに同時に2台以上のロボットから要求があった場合、1回目は衝突するが、2回目以降はバッテリー残量を指標にしたスロット割り当てによりパケット衝突を回避できる。

表1. 提案方式の性能評価

	Real-time	Adaptivity	Collision avoidance
TDMA/TP	×	△	×
AR-TDMA	○	○	○

以上より、提案方式はTDMA/TP方式に比べ性能が優れていると言える。

5. 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。本方式は予約機構をもたせることにより均一な通信量でない環境での実時間性を保証する。また、動的なタイムスロット割り当てによりロボット数の変化に柔軟に適応できる。さらにロボットのバッテリー残量を指標にしたスロット割り当てにより、パケットの衝突を従来方式より軽減できる。

今後は計算機シミュレーションおよび実装により、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, 浅間, 石田, 松元, 遠藤: 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) J.Wang, S.P.: 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) M.Parnichkun, S.O.: CDCSMA-CD communication method for cooperative robot systems, Advanced Robotics, Vol.11. No.7, pp.669-694 (1998).
- 5) M.Mock, E.N.: Real-Time Communication in Autonomous Robot Systems, Proc.ISADS'99, pp.34-41 (1999).
- 6) 矢向, 岩沢, 安西: 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).
- 7) 井上, 中島: 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).
- 8) A.S.Tanenbaum: Computer Networks, Prentice Hall (2002).