

自律分散型ロボット間通信のための適応予約型TDMAプロトコルの性能評価

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。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、運搬時間に優れていることを確認した。

Performance Evaluation of an AR-TDMA Protocol for Robot 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 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. 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 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。このような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。通信を行うためには、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), 4), 5), 6)}。

これまで筆者らは、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(図1)、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)方式を提案している⁸⁾。

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章で従来方式の問題点について述べる。3章では、AR-

[†]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

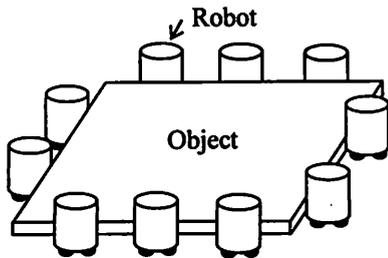


図1. 複数台のロボットによる協調搬送作業

TDMA方式の基本動作について述べる。4章では、AR-TDMA方式の伝送特性等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。5章は本論文のまとめである。

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⁹⁾。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。

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

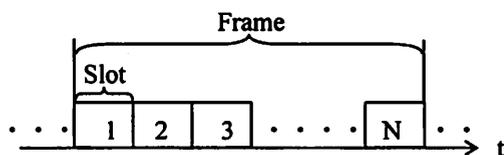


図2. TDMA方式の概念図

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、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。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、静的割り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)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することができず、柔軟性に欠ける。

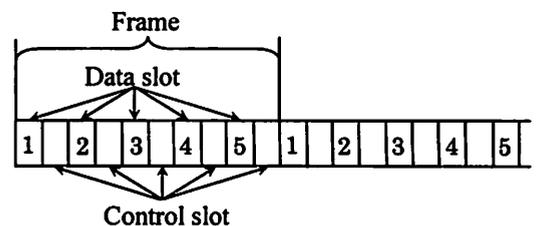


図3. TDMA/TP方式の静的スロット割り当て

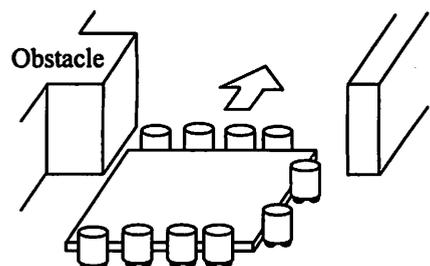


図4. 握持箇所を替えながらの協調搬送作業

(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

均一な通信量でない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) 実時間性を保証するため、TDMA/TP方式の問題点である静的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スロット割り当て方式を採用している。
- (2) ロボットの新規参入に柔軟に適応するため、専用の予約スロットを設けている。
- (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り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ーとなりそれに従うリーダー・フォロワー型とする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 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)、フォロワー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)、フォロワー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。

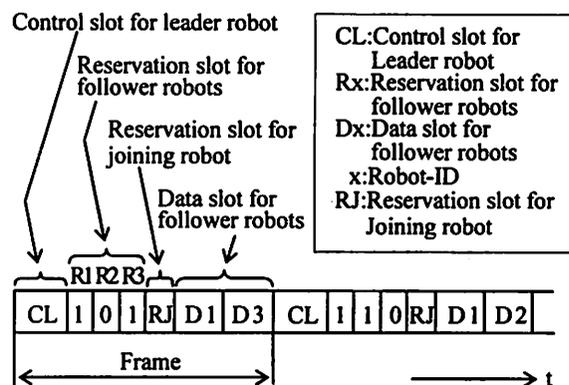


図5. AR-TDMA方式のフレーム構造

それぞれ、CLは予約スロットの割り当ておよび経路情報送信に、Rxはフォロワー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は各フォロワーロボットの動作状況送信などに使われる。なお、RJは条件によりミニスロットを加え拡張される。

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ということはない。

1サイクルの処理時間 T_{max} は、ロボット台数を n 、CLを t_{CL} 、Rxを t_{res} 、RJを t_{join} 、Dxを t_{data} とすると式(1)で表される。

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

3.3 動的なタイムスロット割り当て

ロボットの故障やバッテリー残量不足等により、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。このような状況に柔軟に適応するため、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Rx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には、RJ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。

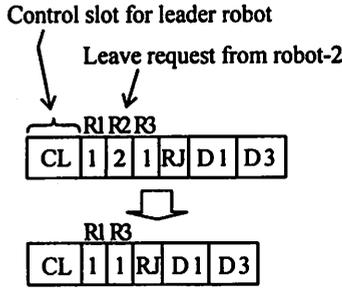


図 6. ロボットが離脱する場合

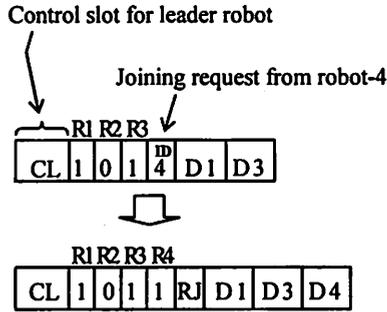


図 7. ロボットが新規参入する場合

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以下の手順で回避する。図8に処理の流れを示す。(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。(2)パケット衝突を認識したリーダロボットは、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

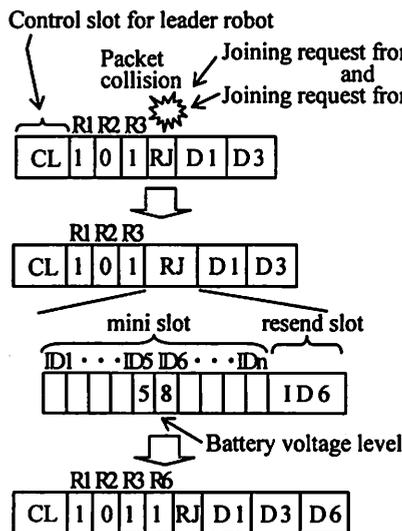


図 8. パケット衝突時の処理

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。(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。

4. 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。さらに運搬時間について行う。ここで、データ発生率とは、各ロボットからの送信要求パケット生成間隔のことである。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、各ロボットの割り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。ロボット数が増加しても通信遅延の増加量が小さいほど、スケラビリティ特性に優れていることになる。運搬時間とは、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時、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、うち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り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0 ~0.1[m/s]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) 協調搬送作業中, 通信の輻輳状態により情報交換ができない場合には, 正常な通信状態に回復するまで, ロボットは一時停止するものとする.
- (9) 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. また, 運搬時間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1200[sec]とする.

4.1 通信遅延特性

図9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すかを計測する.

図9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. これは動的割り当てにより, 送信要求のあるロボットだけにタイムスロットが割り当てられ, フレーム長が短くなるためである. この特性は, 第2章で述べたように障害物回避等により, 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, 均一でない通信環境(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, トラヒックが常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り当てが可能という, 動的割り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方式は均一でない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.

4.2 スケーラビリティ特性

図10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], 2.5[ms]とし, 2つのトラヒック状態を示している.

図10より, 2つのトラヒック状態とも, ロボット数増加に伴い, 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, ロボット数増加に伴う, 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1200[μs]なのに対し, 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.

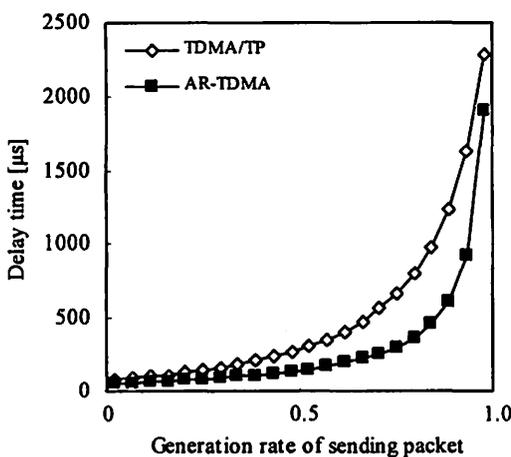


図9. 通信遅延特性

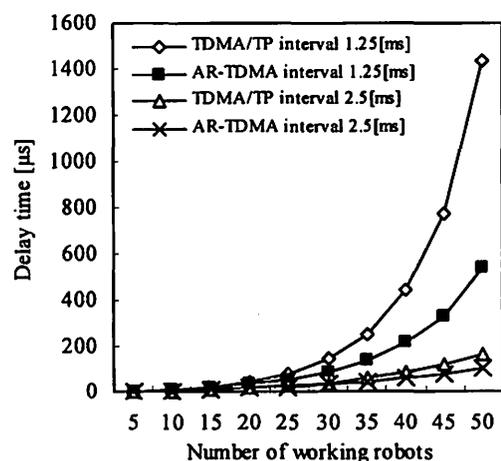


図10. スケーラビリティ特性

4.3 運搬時間

本研究で想定しているロボット間協調動作は、各ロボットが常に通信を行い、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上で、運搬時間は重要となる。運搬時間を示す搬送距離と所要時間の関係を図11に示す。横軸は協調搬送を開始してからの搬送距離、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無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11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1015[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わかる。したがってAR-TDMA方式は実時間性に優れていると言える。一方TDMA/TP方式は約1160[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。

以上より運搬時間においてもAR-TDMA方式の有効性が示された。

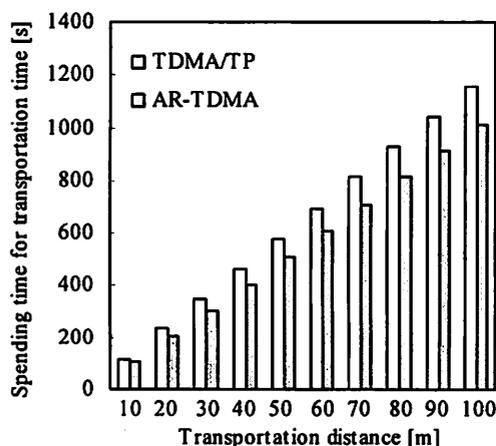


図11. 運搬時間

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。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、障害物回避等により、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均一でない通信環境において、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実時間性を有している。

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, 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.Ozono, “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. of 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) J.Arai, A.Koyama and L.Barolli, “An Adaptive Medium Access Control Protocol for Robot Inter-communication in Autonomous Distributed Systems,” *Proc. of IEEE Advanced Information Networking and Applications (AINA 2004)*, pp.545-550, 2004.
- 9) A.S.Tanenbaum, *Computer Networks*, Prentice Hall, 2002.