

通信品質の向上を図るロボットアドホックネットワークの 制御方式

王 彪†

大坐 島 智††

川島 幸之助††

東京農工大学大学院工学教育部 †

東京農工大学大学院共生科学技術研究部 ††

あらまし 人が近づけない環境の情報を取得して、センター側に報告させるような状況においては、複数のロボットが無線でアドホックネットワークを形成するのが一つの有用な手段と考えられる。ところが、無線LANでは、いわゆる"さらされ端末問題"や、通信路上の障害物によりスループットの低下が生じる。本稿では、これらの問題に対処するため、ロボットが無線リンクの状態を把握しながらお互いに連携して、通信品質確保の観点から適切な位置に移動し通信を確保する方式を提案し、実験により提案方式の有効性を示す。

キーワード ロボットアドホックネットワーク 監視ネットワーク 利用可能帯域幅推定

A Control Method for Improving Communication Quality of Robot Wireless Ad Hoc Network

Biao Wang†

Satoshi Ohzahata††

Kounosuke Kawashima††

Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology †

Institute of Symbiotic Science and Technology, Tokyo University of Agriculture and
Technology††

Abstract Wireless ad hoc network constructed by robots will be useful to obtain information on the spots where people cannot access by some reasons. However, if we adopt wireless LAN for communication media, so-called "exposed terminal problem" and moreover obstacles on the wireless communication environment may cause the throughput decrease inevitably. This paper proposes a method to obtain good throughput between the spot to be monitored and the center. Robots are estimating the available bandwidth of wireless link by using information contained in the packets and move to appropriate location to realize a good communication route. We make an experimental network and evaluate the proposed method.

Key words Robot Wireless Ad Hoc Network, Monitoring Network, Available Bandwidth Estimation

1. はじめに

近年、その場にある端末が即座にネットワークを構成するアドホックネットワーク(MANET)が注目されている。そして MANET の研究が進み、多様な場面でロボットを用いたネットワークの利用が考えられてい

る。今後、アドホックネットワークにおいて移動ロボット群による監視ネットワークの利用が考えられる。移動ロボットを用いて監視ネットワークを形成する際、ロボットを動かしてある場所の情報を収集、監視したい場合がある。そのために監視対象の映像情報をリア

ルタイムかつスムーズに収集することが重要である。

しかし、IEEE802.11 無線インタフェースが無指向性アンテナを用いることと、電波到達範囲内にあるすべてのノードが同一のチャンネルを使うことによって、不必要な RTS(Request to Send)/CTS(Clear to Send) 交換を傍受してしまう。これにより、それらのノードが他のノードと通信できなくなり、スループットを低下させ、通信遅延を大きくさせる“さらし端末問題”が生じる。

さらに無線マルチホップネットワークにおいては、経路上に障害物が現れることによって信号が弱くなり、各々のリンクの帯域幅が不均一になり、ボトルネックが生じ、スループットの低下による通信遅延が増加する問題点がある。そのためネットワークの利用可能帯域幅を把握する必要がある。

本研究では、まず無線 LAN の“さらし端末問題”に対処するため、ロボットに 2 つの無線 LAN インタフェースを持たせ、それぞれ異なる無線チャンネルを割り当てることによって問題を解消する。加えて各ロボット間のリンクの通信品質を保つために、利用可能帯域幅を測定しながらロボットを移動させるロボットアドホック監視ネットワークの構成方式を提案し、ロボットキット ER 1^[1]への実装、通信品質の評価を行う。

2 . 提案するネットワーク構成方式

2.1 さらし端末問題の解消

ロボットに無線インタフェースを持たせ、アドホックネットワークを用いて監視ネットワークを形成する場合、監視用ロボットからの映像品質が問題となる。図 1 に示すように、1 枚の無線 LAN インタフェースを用いて通信する場合、ロボット B がロボット C にフレームの送信を行っている際、IEEE802.11 の CSMA/CA 制御により、ロボット A からロボット B への通信、及びロボット C からセンター PC への通信が同時にはできない。このさらし端末問題によって監視ロボットから正確な情報を受信することが困難となる。これに対して、ロボット端末が 2 枚の無線インタフェースを用

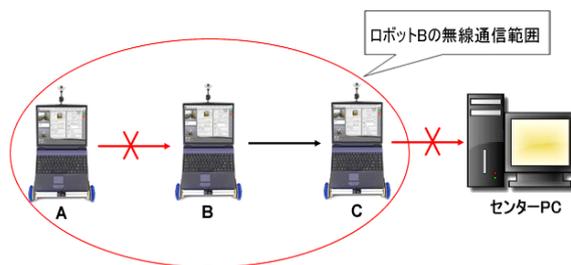


図 1 さらし端末問題

いば、それぞれ異なるチャンネルを使用することによって、端末間の干渉および傍受を解消することができる^[2]。異なるチャンネルでロボット間のリンクを形成するため、チャンネル間の干渉をなくし、さらし端末問題を回避し、通信品質の劣化を抑えることが可能になる。

2.2 利用可能帯域幅の測定

図 1 に示すように複数のロボットでマルチホップネットワークを形成するとき、各リンクにおいて、ロボット間距離や信号の強度によって利用可能な帯域幅が異なる。リンク間の利用可能帯域幅の差が大きい場合、パケット転送遅延が起き、ネットワーク全体の通信品質が低下する。この問題に対して、本研究ではネットワークの通信品質を保つために、各リンクの利用可能帯域幅を測定しながら、ロボットを移動させることにより、リンク間の帯域幅の格差を減らし、エンド・ツー・エンドでのスループット低下を抑える方式を提案する。

ネットワーク状況を知るためのトラヒック計測に関する研究が多く行われてきた。その計測方法は、アクティブ計測^{[3], [4]}とパッシブ計測^[5]に大別される。

アクティブ計測：計測対象ネットワークにプローブと呼ばれる計測用パケットを注入し、プローブの転送遅延や到着間隔の分散などを利用してネットワーク状態を推定する計測方式である。この計測方式では、注入するプローブ量が少ないと推定精度が低くなり、プローブ量を多くすると対象ネットワークの状態を乱し推定精度が劣化するという問題がある。このようにプローブ量と推定精度にはトレードオフが生じる。

パッシブ計測：計測対象ネットワーク内のいくつかの地点に計測用装置を設置し、計測地点を通過するパケットの情報を収集して遅延時間等を計測する方式である。この方式では、通信経路上の多地点での計測による多大なコストがかかるという難点がある。

2.3 提案利用可能帯域幅測定方式

本論文ではアクティブ、パッシブ計測の2つの計測方式の利点をとってロボット監視ネットワークに適した計測方式を提案する。

まず、ロボットの映像送信が始まるまではバックグラウンドトラフィックがほとんどないため、計測用パケットを送出しても計測対象ネットワークに影響がない。従って、この段階ではアクティブ計測方式を用いる。すなわち計測用パケットを送出し、それにより得られる情報を用いてネットワーク状態を推定する。アクティブ計測において利用可能帯域幅を推定する方法としてよく用いられるのは、パケットトレインあるいはパケットペアによる片道パケット到着間隔を測定する方法である^{[3], [4]}が、今回はプローブパケットのバルク転送^[6]による利用可能帯域幅推定方式を用いる。無線LANは半二重通信(Half Duplex)であり、送信と受信は同一チャネルを使用する。片方向1回の測定の場合、信頼性が低いと考えられる、そこで提案方式では図2に示すように双方向2回測定を行う。

しかし、監視映像送信が始まってから計測用パケットをネットワークに流すと、通常の映像トラフィックに影響を与え無用な遅延が生じてしまう。この影響を無くすため、RTP映像通信を行っているときに、ネットワーク上に流れているRTPパケットを利用して、ネットワークの利用可能帯域幅を推定する。利用可能帯域幅を測定するためには測定に使用できるパケットトレインをフローの中から見つけ出す必要がある。

そこで、IPパケットのIDフィールド(IPID)を利用する。IPIDフィールドは、IPフラグメンテーションにおいて利用され、IPパケットを識別するための数値である。同一ホストからIPパケットが送信されるとき、

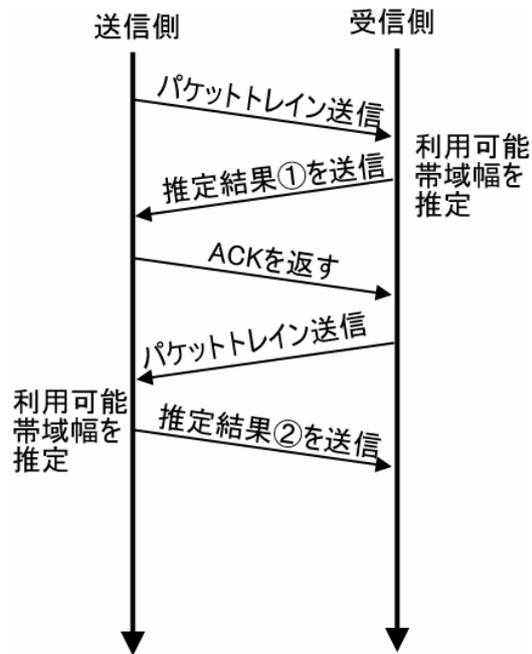


図2 利用可能帯域幅推定法

IPID値は連続した値がふられる。ネットワークに一度に複数のパケットが送出される時、IPID値が連続することになる^[7]。このIPIDが連続する部分をパケットトレインとして扱うことができる。しかしながら、本実験のような環境では、監視ロボットにはRTPストリーミング以外の通信が少ないため、1つのUDPコネクションしか使用しないため、常にIPIDが連続になる場合がある。そのため受信側ではIPIDの値だけでパケットトレインを判別することができない。

この問題を解決するためにRTPフレームのパケットフラグメンテーションの特性を利用する。RTPは、時間単位でフレームをパケットに分割して(Ethernetのフレーム最大サイズ:1500Byte)、送信する。つまり図3のようにデータが分割される。1つのパケットトレイン中、一般的には最後のパケットのサイズは他のパケットと異なる。そこでIPID情報にこのパケットサイズの情報を加えることにより、パケットトレインを見分けることが可能となる。そのパケットトレインを用いて、実質的にアクティブ測定と同様に利用可能帯域幅を推定する。



図3 RTP フレームの IP パケット化

2.4 ロボットの移動アルゴリズム

ロボットを“監視ロボット”と“中継ロボット”の2種類に分類する。監視ロボットはロボットに指令を出せるセンターPC から目的地の座標情報を受け取ると、その目的地に移動する。中継ロボットは監視ロボットが動き出したら、1分毎にリンクの帯域幅を測定する。帯域幅の差が平均の30%を超えた場合、ロボットが移動する。最高移動速度は18cm/sであり、調節のためのロボットの1回の移動幅は50cmとした。

3. 実験

本実験で使用するロボット ER1 は、米国 EvolutionRobotics 社が開発したパーソナルロボットのプラットフォームキットで、ノートパソコンを搭載することで、実験室レベルの移動ロボットにすることができる。コマンドラインインタフェースを提供しているので、TCP/IP ソケットからポート番号を指定してテキストコマンドを送ることによって、API にアクセスできる。本実験では API コマンドラインインタフェースを用いてロボット間の協調制御を行う。Java^{[8], [9]}を用いて、提案方式を無線 LAN インタフェース搭載の ER1 ロボットキットに実装する。実験ネットワークはセンターPC1台、ロボット2台で構成した。(図4)

3.1 利用可能帯域幅推定によるエンド・トゥ・エンド通信品質評価

無線 LAN インタフェースを2枚使用する場合と1枚使用する場合のスループットおよびパケット遅延の

比較、評価を行う。図4に示す実験ネットワークを用い、ロボットA(監視ロボット)にある目的地の座標情報を与える。その目的地の情報を収集するために、ロボットは目的地に行ってリアルタイム映像を撮ってセンターPCに送信する。ロボットB(中継ロボット)は1分毎にリンク①とリンク②の空き帯域幅を測定しながら位置を調節してロボットAをサポートする。利用可能帯域幅の計測に用いたパケットトレインのパラメータを表1に示す。

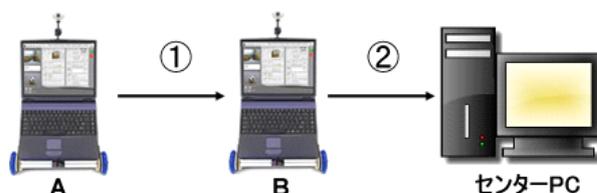


図4 実験ネットワーク

表1 計測用パケットトレインのパラメータ

パケットサイズ	パケット数	プロトコル
500Byte	100	UDP

実験結果

利用可能帯域幅情報に基づいてロボットBの位置を調節する場合とロボットAとセンターPCの中間位置に直接ロボットBを置く場合の2つのリンクの平均利用可能帯域幅を図5に示す。X軸はロボットAからセンターPCまでの距離である。1枚の場合はそれほど違いはないが、2枚の場合は提案方式によって平均利用可能帯域幅が向上していることが分かる。また、無線LANインタフェースを2枚使用した場合のスループットが1枚の場合の2倍以上に達した。2枚の場合の方がより、提案方式による効果大きい

図6はロボットAが目的地に到着してからビットレートが1.5MbpsのRTP^[6]映像を送信した場合の片方向のパケット遅延の結果を示す。2枚の場合と比べ、1枚の場合には顕著な遅延が生じた、これは“さらし端末問題”の影響で2つのリンクが交互にデータ送信を行うので、送信待ち時間が生じたためと考えられる。

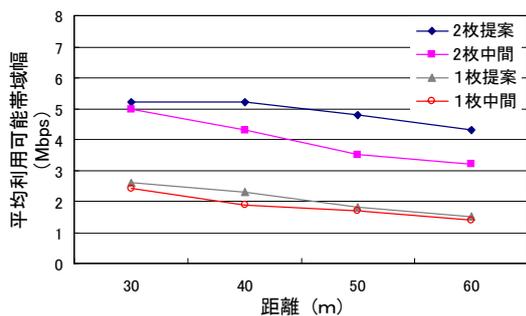


図5 平均利用可能帯域幅

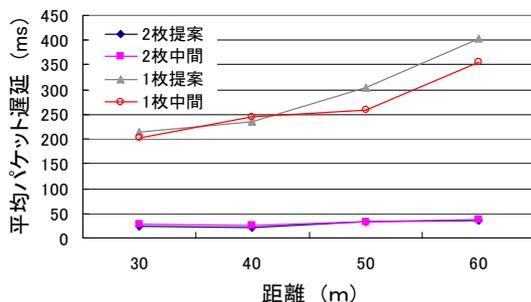


図6 平均パケット遅延

3.2 RTP 通信を用いた利用可能帯域幅推定法の評価

図4に示す実験ネットワークを用い、無線LANインタフェースを2枚使用する場合、実験1で位置を固定してから計測用パケットを用いて利用可能帯域幅を推定する方法と、映像RTPパケットを用いて測定する方法による結果を比較する。ロボットAからセンターPCまでの距離は60mとした。計測に用いたパケットトレインのパラメータは実験1と同様で、計測用パケットを用いた方法ではバックグラウンドの映像トラフィックがなく、そして映像RTPパケットを用いた方法ではRTPのビットレートは1.5Mbpsである。

実験結果

計測用パケットを用いた方法では計測回数20回、パケットトレイン数は40である。図7、8に示すように、計測用パケットを用いた計測法では計測結果に影響を与えるバックグラウンドトラフィックがないため、ある一定の量の計測用パケットがあれば、安定した結

果が得られる。一方RTPパケットを用いた推定法では計測に利用可能なRTPパケットトレインの平均パケット数は7個で、パケットサイズは980Byteであった。パケットトレインのパケット数およびパケットの総サイズが変動するため、計測結果に多少の変動が起きたが、平均値を取ることで計測パケットを用いた方法と近い推定値が得られた。

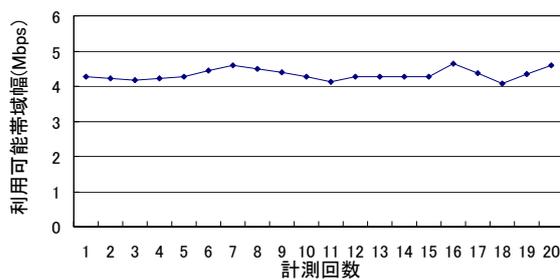


図7 計測用パケットを用いた利用可能帯域幅推定法

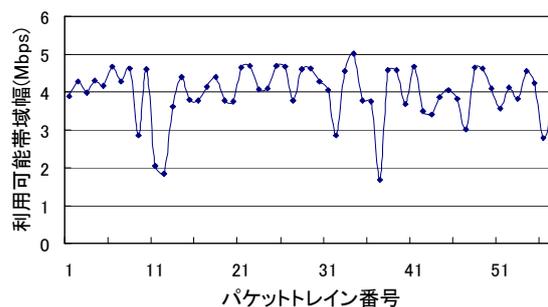


図8 RTPパケットを用いた利用可能帯域幅推定法

3.3 計測用パケットによるRTP通信パケット遅延への影響評価

計測用パケットを用いた方法でバックグラウンドの映像トラフィックが存在する場合、計測用パケットがRTPパケットに及ぼす影響をセンターPC側で到着したRTPパケットの遅延で測定する。計測に用いたパケットトレインのパラメータは実験1と同様で、バックグラウンドの映像トラフィックのビットレートは1.5Mbpsである。

実験結果

5分間の実験結果を図9と図10に示す。計測用パケ

ットを使用しない場合、RTP パケットには平均 40ms の遅延が発生する。一方計測用パケットを使用する場合は RTP パケットに断続的に大きな遅延を発生させる結果になった。それは計測用パケットを用いた計測法ではある一定の量のプローブがネットワークに送出されるため、バックグラウンドの RTP パケットに影響を与えたためと言える。

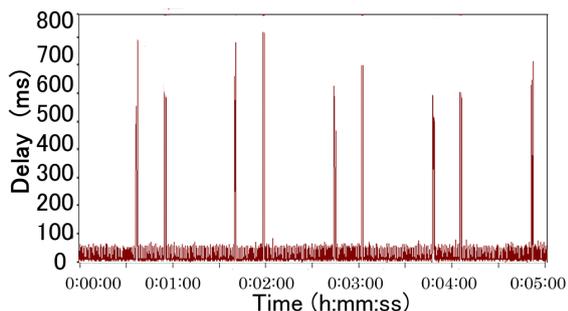


図 9 計測用パケットを使用する場合の RTP パケット遅延

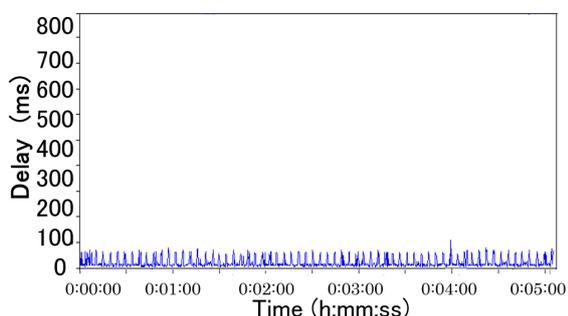


図 10 計測用パケットを使用しない場合の RTP パケット遅延

4. おわりに

本研究ではロボットに2つの無線LANインタフェースを持たせ、各ロボット間のリンクの通信品質を向上させるために、アクティブ計測とパッシブ計測を組み合わせてネットワークの利用可能帯域幅を測定しながらロボットを移動させる、ロボットアドホック監視ネットワークの構成方式を提案した。ロボットキット ER1 に実装し、通信品質の評価を行い、提案方式の有用性を示した。今後の課題として、複数箇所からの映

像通信がある場合に、映像品質の面からパケット遅延や RTP ビットレートなどを考慮する制御方式を研究することがあげられる。

参考文献

- [1] 米国 EvolutionRobotics 社,
<http://www.evolution.com/> .
- [2] 王彪, 大坐阜智, 川島幸之助, “複数の無線 LAN インタフェースを用いた監視用ロボット・アドホックネットワークの構築方式,” 情報処理学会 全国大会 2005.
- [3] Manish Jain, Constantinos Dovrolis, “End-to- End Available Bandwidth: Measurement Methodology, Dynamics, and Relation with TCP Throughput,” Proc. of SIGCOMM2002, pp. 537-549, 2002.
- [4] Ningning Hu, Peter Steenkiste, “Evaluation and Characterization of Available Bandwidth Probing Techniques,” IEEE JSAC, Vol.21, No.6, pp. 879-894, 2003.
- [5] MRTG,
<http://people.ee.ethz.ch/~oetiker/webtools/mrtg/>.
- [6] Iperf, <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>.
- [7] S.M.Bellovin, “A Technique for Counting NATED Host,” Proc. of ACM IMW’02, pp.267-272, 2002.
- [8] JPCAP network packet capture library,
<http://netresearch.ics.uci.edu/kfujii/jpcap>.
- [9] Java Media Framework API (JMF),
<http://java.sun.com/products/java-media/jmf>.