

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330114

研究課題名(和文)隣接ノード間干渉を考慮した無線アドホックネットワークのための通信容量予約手法

研究課題名(英文)Capacity Reservation Method for Wireless Ad-Hoc Networks

研究代表者

桧垣 博章(Higaki, Hiroaki)

東京電機大学・未来科学部・教授

研究者番号：70287431

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：無線アドホックネットワークにおいて、通信容量を予約したデータメッセージ配送をおこなうための、複数経路探索および通信容量予約のためのプロトコルを考案し、シミュレーション実験による評価および移動無線ノードへの実装を行った。各無線リンクの容量が比較的小さい無線アドホックネットワークにおいて、要求される通信容量の予約成功率を高めるために、合流や分流のある複数の無線マルチホップ配送経路に含まれる無線リンクに対して通信容量を予約する。提案手法は、従来の有線ネットワークを対象とした手法と異なり、無線ネットワークでは隣接無線ノード間で干渉が発生するために通信容量予約がより困難となる問題を解決している。

研究成果の概要(英文)：A novel capacity reservation protocol for wireless multi-hop networks is proposed. In addition, its performance is evaluated in simulation experiments and the protocol is implemented in mobile wireless nodes.

Due to lower capacity in wireless communication links, it is difficult to reserve the required capacity along a wireless multi hop transmission routes in wireless ad-hoc networks. In order to improve the successful ratio of the capacity reservation, the proposed method reserves capacity of wireless communication links along multiple multi-hop wireless transmission routes with joins and branches. Different from the conventional capacity reservation method for wired networks, the proposed protocol is designed under consideration of interference between wireless signals transmitted from neighbor wireless nodes.

研究分野：情報工学

キーワード：移動無線ネットワーク アドホックネットワーク 通信容量予約 通信品質 プロトコル マルチメディア 隠れ端末問題

1. 研究開始当初の背景

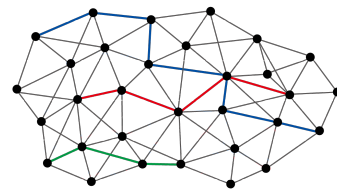
無線アドホックネットワークは、無線通信機能を備えた多数のノードから構成される。各ノードは、無線信号到達範囲にある隣接ノードとのみ直接通信可能であるが、それぞれが中継ノードとして機能する無線マルチホップ配送により、ネットワーク内の他のノードにデータメッセージを配送することができる。ネットワーク構成の柔軟性から、構成ノードの増減やその位置の経時的変化を前提とする車輜ネットワークや災害救済ネットワーク、防災/減災ネットワーク、防衛ネットワーク、センサネットワーク等への応用が期待されている。特に、データメッセージ配送経路を決定するルーティングプロトコルの研究が活発であり、研究代表者も多様なプロトコルを提案している。

ここで、隣接ノード間の無線通信は、大容量光通信技術などに支えられた有線ネットワークよりも容量が小さい。このため、高速大容量のインターネットアクセスを前提に開発されたアプリケーションの適用が困難であるばかりでなく、移動や障害に対して柔軟であるアドホックネットワークの特性を活かしたアプリケーション(例えば、多種多様なロボット群の分散協調作業など)の開発、普及をも妨げている。これは、無線アドホックネットワークの特性に対応した通信容量予約手法が確立されていないことによるものである。

高度なネットワークアプリケーションの実現には、配送遅延、到達率、スループット等の配送性能を保証したネットワークの提供が求められる。これまでに、有線ネットワークを前提として、通信容量予約手法や品質保証配送手法が開発されている。これらの手法は、Ford-Fulkerson アルゴリズムなどの最大流量問題解法として理論的にその正当性が裏付けられている。一方、無線アドホックネットワークを対象とした通信容量予約手法は十分に検討されていない。これは、有線ネットワークの通信リンク間には相互干渉がなく、各々を独立に扱うことが可能であるのに対して、無線アドホックネットワークの各ノードは相互に干渉するためである。ある無線ノード N_s が隣接ノード N_r へデータメッセージを転送すると、この間は N_r 以外の N_s の隣接ノード N_n も自身の隣接ノードとの間のデータメッセージ送受信が許されない。すなわち、 N_s から N_r への通信の存在によって、 N_s と N_r に加えて N_n の通信容量も削減される。このような複雑な特性に加えて、各リンクの容量が小さな無線ネットワークでは、アプリケーションが要求する通信容量を確保するためには、複数の配送経路を柔軟に組み合わせる必要がある。

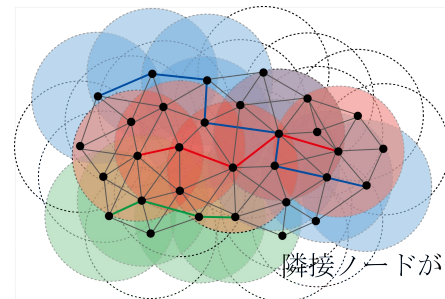
これまでも、無線アドホックネットワークでマルチメディアデータ配送を試みる研究開発はなされてきているが、その多くはヒ

ューリスティック技法の提案に留まっている。そのため、理論的に裏付けされた広く適用可能な手法を提案することが必要である。



独立した通信リンク

図1 有線ネットワーク



隣接ノードが干渉

図2 無線アドホックネットワーク

2. 研究の目的

隣接無線ノード間の転送の組み合わせでデータメッセージを配送する無線アドホックネットワークが多様なアプリケーションで適用されるためには、配送遅延、到達率、スループットといった配送性能の保証が必要である。本研究課題では、各無線ノードの通信容量を超えない範囲での配送経路に沿った通信容量予約を実現する手法の確立を目的とする。特に、隣接無線ノード間干渉の取り扱いの困難さからヒューリスティック技法の適用に留まっていた従来手法に対して、理論的に導出された最大容量導出方法に基づいた手法を考案することを特徴とする。また、この結果に基づいた通信容量予約プロトコルを設計する。そして、シミュレーション実験、移動無線ノード実機群に対する実装実験により本手法の有効性を評価する。

3. 研究の方法

本研究の期間は3年間とする。平成25年度および平成26年度前半は理論的検討を中心とした研究、平成26年度後半以降を実践的、実証的研究とする。理論的検討では、無線アドホックネットワークにおける最大流量問題の解を与えるアルゴリズムの構築とそれに基づいた通信容量予約プロトコルの設計を行う。予約プロトコルの設計においては、無線通信がブロードキャストを基礎としている点を活かし、隣接ノードとの干渉による性能低下を回避するための制御メッセージ

交換を削減したものとする。また、実証的研究では、シミュレーション実験に加え、試作機を開発済みである移動無線ノード数十台からなる無線アドホックネットワークに対して提案プロトコルを実装し、性能評価実験を行う。

4. 研究成果

(1) 無線アドホックネットワークにおける最大流量問題の理論的検討を行い、各無線ノードの残容量が与えられていることを前提として、送信元無線ノードから送信先無線ノードまでの最大流量を算出する方法を考案した。ここでは、中継ノードで複数の経路が分流、合流することを許している。

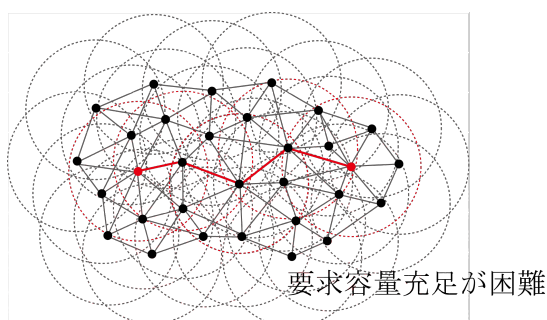


図3 単一経路配送

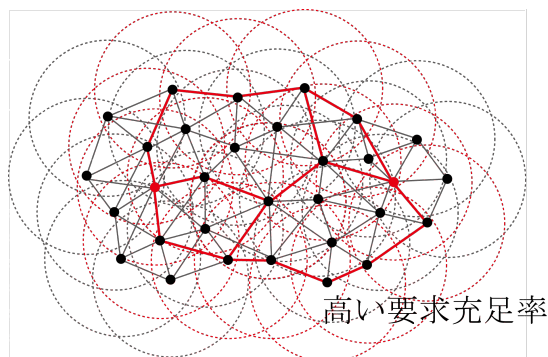
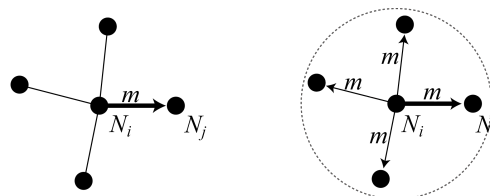


図4 合分流のある複数経路配送

ブロードキャストを基礎として隣接ノードとの通信を行うアドホックネットワークでは、各無線リンクの通信容量を他の無線リンクとは独立に使用することはできない。そこで、隠れ端末や晒し端末の関係にある隣接ノードとの関係を考慮しつつ、残容量制約条件を充足する最大流量計算手法を考案した。従来の有線ネットワークモデルにおいては、各無線リンクに対して残容量と予約容量を規定していたのに対して、提案手法では、残容量は無線ノードに対して、予約容量は無線リンクに対して規定する新しいモデルを導入した。このモデルを対象として、各無線リンクに対して予約可能な容量は、その両端の無線ノードの残容量のみではなく、その隣接無線ノードの残容量にも制約されることを示し、予約可能容量の計算方法を考案した。



有線モデルネットワーク 無線モデルネットワーク

図5 アドホックネットワークモデル

に基づき、送信元無線ノードから送信先無線ノードまでの流量を増加する無線マルチホップ配送経路（以下、流量増加路と呼ぶ）を検出した場合における、各無線ノードの残容量計算手法を考案した。と同様に、無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードのみでなく、これらの隣接無線ノードの残容量も更新する必要がある。また、単一の中継無線ノードに隣接する場合のみでなく、複数の中継無線ノードに隣接する無線ノードも存在することから、これらに対する残容量も正しく計算できるようにしている。

の残容量/予約容量割り当てモデルとの残容量更新手法に基づいて、流量増加路を探索する手法を考案した。基本的には、中継無線ノードを順次接続する無線リンクのすべてに追加で予約可能な容量が存在するのであれば、この無線マルチホップ配送経路は流量増加路であり、これを構成する無線リンク列の予約可能容量の最小値が経路に対する予約可能容量となる。

ただし、有線ネットワークを対象とした従来手法である Ford-Fulkerson 法と同様に、既に予約済みである容量を削減することによって、新たな流量増加路を構成することで、合流/分流を追加し、全体としての流量を増加させることができる。これを無線アドホックネットワークに対しても適用可能とする手法を考案した。結果として、有線ネットワークの場合と同様の流量増加に加えて、残容量が0である無線ノードを隣接無線ノードに含む中継無線ノードを経由する流量増加路が構成可能であることが明らかになった。このとき、追加の流量増加路による総流量の増加に加えて、無線ノードの残容量も増加するため、総流量をさらに増加させることに貢献することとなる。

(2) (1)の成果に基づいて、ネットワークアプリケーションから要求される通信容量の予約の可否を検証し、可能であれば通信路に含まれるすべての無線リンクに対して必要な容量の確保を行う通信プロトコルを構成した。

通信プロトコルの構成にあたっては、従来手法である Ford-Fulkerson 法の分散的実装手法のひとつであるラベリング法を参考とした。ラベリング法では、各ノードがそれに接続する通信リンクの残容量と予約容量を管理する方法を採用している。これに対

して、本研究課題で提案する無線アドホックネットワークを対象とする通信容量予約手法では、(1) で提案したモデルを採用していること、ある無線リンクの予約可能容量はこの両端ノードの隣接無線ノードの残容量に拘束されることから、各無線ノードは、直接接続するすべての無線リンクの予約容量とそのすべての2ホップ隣接無線ノードの残容量とを管理する方法とした。したがって、ひとつの流量増加路を検出し、その予約容量が決定されたならば、そのすべての中継ノード、その隣接ノードに加え、その2ホップ隣接無線ノードにも予約の完了を通知し、残容量を更新する。

ラベリング法を応用した手法を無線アドホックネットワークに適用した場合、特に多数の無線ノードから構成されるアドホックネットワークにおいては、流量増加路の探索に長時間を要し、データメッセージの配送開始が遅延する問題がある。そこで、探索空間を削減する手法を考案した。ある中継ノードが流量増加路の次ホップとなる中継ノードを探索する際に、これまでに選択された中継無線ノードの隣接ノードは選択されないという性質を見出し、これを探索空間の削減に応用することとした。これは、もし、この隣接ノードを次ホップ中継ノードに選択するならば、冗長な迂回路が構成されていることになるため、同一の流量増加を実現するために過剰な残容量を消費していることになるためである。

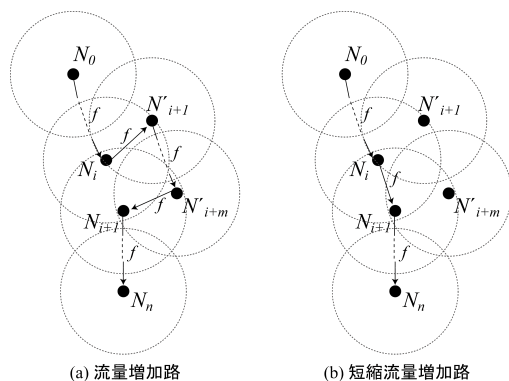


図6 探索空間の削減

(3) シミュレーション実験

提案手法を実現するプロトコルをネットワークシミュレータに実装し、性能評価を行った。ネットワークシミュレータには Qualnet シミュレータを用いた。ここでは、600m x 600m の正方形領域に一様分布乱数によって通信距離 100m、通信容量 54Mbps の無線ノード 40~70 台をランダムに配置した。また、送信元無線ノード、送信先無線ノードもランダムに決定し、これらのノード間の最大流量および各無線リンクへの予約容量を計算した。(2) の探索空間削減手法は有効に機能し、これを含まない手法では無線ノード数 40 の時に 130 時間あまりを要し、50 以上では事実上計算できなかったのに対し、削

減手法を含めることによって無線ノード数 40 のとき 0.2 秒、無線ノード数 70 の場合でも 170 秒程度で計算することが可能となった。

(4) 実機への実装

シミュレーション実験によって、提案手法によって無線アドホックネットワークにおいて通信容量が正しく予約することができること、実用的な計算時間で予約容量の決定と予約が完了することが確認できたのを受け、研究代表者らのこれまでの成果である球型移動無線ノードに対して、提案手法を実装した。本研究課題実施期間に安価な小型マイコンボードが普及したことから、Raspberry Pi 2 を用いた 30 台の移動無線ノードを作製し、提案プロトコルを実装した。移動無線ノード間で通信容量予約の制御メッセージを相互に交換し、通信容量を正しく予約することができたが、隣接無線ノード間の無線信号の干渉により予約容量を用いた通信が正しく行えることは確認できなかった。予約容量に従った通信機能の実現には課題が残ったため、今後の解決を目指す。



図7 球型移動無線ノード

5. 主な発表論文等

[学会発表](計4件)

Higaki, H., "A Heuristic for Maximum Flow in Wireless Ad Hoc Networks," Proceedings of the International Conference on Communication, Information Technology and Robotics, 2015年8月13日, ドバイ, アラブ首長国連邦.

Kubo, Y. and Higaki, H., "A Heuristic for Maximum Flow in Wireless Ad Hoc Networks," Proceedings of the International Conference on Advances in Telecommunication, Broadcasting and Satellite, 2015年9月26日, ジャカルタ, インドネシア.

Kubo Y. and Higaki, H., "Maximum Capacity Reservation Method in Wireless Multihop Networks," Proceedings of the International Conference on Signal Processing and Communication Systems, 2015年12月14日, ケアンズ, オーストラリア.

Nakagawa, T. and Higaki, H., “Method for Flow Reservation in Wireless Ad Hoc Networks,” 電子情報通信学会技術報告, 2015年3月2日, 沖縄コンベンションセンター (沖縄県, 宜野湾市).

6 . 研究組織

(1)研究代表者

桧垣 博章 (HIGAKI, Hiroaki)

東京電機大学・未来科学部・教授

研究者番号： 70287431