

平成22年5月14日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19560373

研究課題名（和文） 移動体流の情報運搬能力を利用したマルチホップ無線の高性能化

研究課題名（英文） Improvement of multi-hop radio by using capability of mobile nodes to deliver information

研究代表者

中野 敬介（NAKANO KEISUKE）

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：80269547

研究成果の概要（和文）：マルチホップ無線ネットワークは、移動ノードから構成されるため常に連結である訳ではなく、始点、終点間の経路を形成するまでの時間が極端に長くなる場合がある。本研究では、このような本質的な問題点を改善するために、移動体流の情報運搬能力を最大限に利用することを考え、マルチホップ無線伝送、エピデミック伝送、これらを併用したハイブリッド伝送を開発し、理論性能評価を様々な状況を想定して行った。

研究成果の概要（英文）：A multi-hop wireless network is not always connected because it consists of mobile nodes. Then, we sometimes encounter a situation where source and destination need a long time to construct a multi-hop path between them. In this research, we utilize capability of mobility of nodes to deliver information to overcome this problem, and develop and theoretically analyze multi-hop transmission, epidemic transmission and hybrid transmission considering various situations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：マルチホップ無線ネットワーク、アドホックネットワーク、連結性、エピデミック伝送、マルチホップ伝送、移動体流、理論解析、通信品質

## 1. 研究開始当初の背景

従来の移動通信方式であるセルラ方式では、固定的に設置された基地局を有線で接続することによりバックボーンを形成し、無線

端末は基地局経由で目的の通信相手と通信する。一方、マルチホップ無線ネットワークにおいては、無線ノード（端末）同士は無線回線を介して直接通信できる。また、他のノード群の中継により形成される無線マルチ

ホップ経路を経由して通信を行うこともできる。このマルチホップ経路は自律分散的に構成される。マルチホップ無線ネットワークは、技術的に興味深い研究対象であると同時に、センサネットワーク、コミュニティネットワーク、自動車ネットワークへの応用等、想定される応用分野のユニークさから大きな注目を集めている。

マルチホップ無線ネットワークにおける大きな技術的課題として、中継ノードの移動に伴うネットワーク構造の変動への対処がある。情報伝送の始点ノードを  $S$ 、終点ノードを  $D$  とし、 $S$  から  $D$  へデータを送ることを考える。もし、 $S$  と  $D$  の間に他のノードからなるマルチホップ経路が存在すれば、 $S$  から  $D$  へのデータ伝送は成功する。しかし、データ送信中に中継を行っているノードが移動することにより、使用していたマルチホップ経路が非連結になり使用できなくなる場合がある。このときには、ルーティングアルゴリズムにより代替マルチホップ経路を探し、この代替経路によりデータ送信を継続する。

代替経路が存在する場合にはルーティングアルゴリズムを実行することで、経路の切り換えが行われデータ送信が継続して行われる。しかし、 $S$  と  $D$  の間に代替経路が全く存在しないことも起こりうる。このような場合には、いくらルーティングアルゴリズムを実行しても、マルチホップ経路が存在しないのでデータ伝送を行うことはできない。

しかし、このような場合でも、中継ノードの移動に伴うネットワーク構造の時間変化により、再び  $S$  と  $D$  をつなぐマルチホップ経路が現れることもあり、 $S$  は  $D$  へのマルチホップ経路が出現するまでデータ送信を待たばデータ伝送を行うことができるようになる。このような伝送手法をマルチホップ伝送と呼ぶことにする。では、マルチホップ経路が現れ、伝送可能になるまでの待ち時間（情報伝達遅延時間）はどの程度になるのだろうか？

ルーティングアルゴリズムの評価を行う際にはマルチホップ無線ネットワークの連結度が比較的高く、上記の情報伝達遅延時間がそれほど長くないことが予想される状況を想定して性能評価が行われることが多い。そのため、従来、上記のような情報伝達遅延時間はあまり注目されていなかった。しかし、現実のマルチホップ無線ネットワークにおいて移動ノード群は自由意志に基づき移動するのであって、常に高い連結度が保証されることはあり得ない。つまり、経路が現れるまでの待ち時間が長くなり、場合によっては数十秒以上の情報伝達遅延時間を必要とする場合もあり、その間には  $S$  と  $D$  が長時間に渡りデータ通信を行うことができない

いという状況も十分に起こりうる。これは、マルチホップ無線ネットワークの本質的な大きな問題である。

一方、シミュレーション等で上記の状況をよく観察すると、おもしろい現象を発見できる。 $S$  と  $D$  の周辺を移動するノード群が、 $S$  と  $D$  をつなぐマルチホップ経路は作れなくとも、 $S$  の周辺にいたノードが  $S$  からデータを直接受け取り、 $D$  の周辺に移動し  $D$  に直接データを届けることができる場合があるのである。このような移動体流が直接データを運搬するような情報伝達手法をエピデミック伝送と呼ぶことにする。上記の例は、移動体流の流れによるデータ伝送がマルチホップ伝送よりも速く  $S$  から  $D$  へ情報を届けることができる場合があるということを示している。逆に、上記の現象は、マルチホップ伝送だけによるデータ伝送が、ノードがつくる移動体流が元々もっている情報運搬能力を最大限に利用していないことを示しているとも言える。つまり、マルチホップ伝送だけを用いてデータ伝送を行うのではなく、連結度が低い場合には、エピデミック伝送のように移動体流の情報運搬能力も積極的に利用すべきである。

また、上記のような伝送手法を考えたときに情報伝達遅延時間の解析・評価も重要な課題である。ここでの情報伝達遅延時間は、見方を変えると、マルチホップ無線ネットワークの連結性の評価指標として捉えることもできる。連結性の理論解析は、マルチホップ無線ネットワークに関する諸課題の中で重要な研究課題となっている。

## 2. 研究の目的

上記の通り、マルチホップ無線ネットワークにおいては、中継ノード群の密度、振る舞いの影響により、連結度が極端に低くなることもある。そのため、始点  $S$  から終点  $D$  の間にマルチホップ経路が現れるまでの待ち時間（情報伝達遅延時間）が極端に長くなる場合がある。本研究では、このようなマルチホップ無線網の本質的な大きな問題を改善するために、連結度が低い場合には移動体流の情報運搬能力を最大限に利用し、マルチホップ無線伝送とエピデミック伝送を併用したハイブリッドデータ伝送手法を用いることを考える。マルチホップ無線伝送、エピデミック伝送、ハイブリッド伝送の情報伝達遅延時間の特性を、理論解析とシミュレーションにより明らかにしながら、これらの伝送手法の開発を行うことを目的とする。

- (1) マルチホップ無線伝送におけるデータ送信要求発生時に、始点  $S$  と終点  $D$  の間にマルチホップ経路が存在しない場合にお

いて、マルチホップ経路が現れるまでの待ち時間（情報伝達遅延時間）を詳細に解析しモデル化する。同様にエピデミック伝送の情報伝達遅延時間の解析を行いモデル化する。

- (2) マルチホップ伝送とエピデミック伝送を併用することにより、移動体流の情報運搬能力を最大限に利用して情報伝送遅延を削減するためのハイブリッド伝送を開発する。ここでは、上記の情報伝達遅延時間の特徴づけを利用する。
- (3) ハイブリッド伝送はSとDの間の移動体流の速度、移動体流が流れる経路の構造、シャドウイング等、様々な要因に依存するため、これらを考慮に入れた場合におけるハイブリッドデータ伝送の性質を明らかにする。
- (4) 開発した手法の評価、改良を繰り返し、研究成果をまとめる。

### 3. 研究の方法

以下のように研究を実施する。

- (1) マルチホップ無線ネットワークにおけるデータ送信要求発生時に、始点Sと終点Dの間にマルチホップ経路が存在しない場合におけるマルチホップ経路が現れるまでの時間を詳細に解析しモデル化する。ここでは、歩行者を想定した単純な移動体流モデルにおいて情報伝達遅延時間を理論解析する。同様のモデルにおいて、エピデミック伝送、ハイブリッド伝送の理論解析を行う。
- (2) また、マルチホップ伝送の高度化のため、情報伝達遅延時間以外の指標として通信品質を考慮した評価指標について考え、これらの指標を用いてマルチホップ伝送の性能評価及び最適化を行うために、理論解析を行う。性能評価指標として、Expected Transmission Count や Medium Time Metric 等を用いる。
- (3) 理論計算手法の開発と並行してシミュレータを開発し、計算機シミュレーションによる解析も並行して行う。
- (4) 1次元ネットワークにおいて、道路が曲がっており、曲がり角部分でシャドウイングが発生する場合や、交通の流入の影響がある場合におけるエピデミック伝送やハイブリッド伝送の情報伝達遅延時間の解析及び情報が流れる速度の解析を行う。
- (5) 1次元ネットワークにおける解析結果を拡張し、2次元ネットワークにおけるエピデミック伝送やハイブリッド伝送の性能評価を行う。2次元の拡張を行うにあたり、シャドウイングに関してもシャド

ウイングの影響が大きい場合、それほど大きくない場合など、シャドウイングの程度を考慮に入れて解析を行う。また、2次元ネットワークにおいては、移動体流としても様々なものが考えられるので、これらを考慮に入れて解析を行い、移動体流の違いが情報伝達遅延時間に与える影響を明らかにする。

- (6) 上記の結果を用いながら、マルチホップ無線ネットワークにおいて、始点Sから終点Dにデータを送る場合におけるマルチホップ伝送、エピデミック伝送手法、ハイブリッド型データ伝送手法の開発、評価を繰り返す。その際に送信回数、送信間隔、送信電力等の様々なパラメータの制御、最適化についても検討する。
- (7) 研究のまとめを行う。

### 4. 研究成果

下記のような成果を得た。

- (1) 1次元マルチホップ無線ネットワークにおいてマルチホップ伝送を考え、データ送信要求発生時に、始点Sと終点Dの間にマルチホップ経路が存在しない場合におけるマルチホップ経路が現れるまでの平均時間を近似理論解析し、理論的な特徴づけを行った。
- (2) 1次元ネットワークにおいて、エピデミック伝送、ハイブリッド伝送の情報伝達遅延時間の理論解析を行い、マルチホップ伝送の情報伝達遅延時間と比較し、これらの手法が有効に働く状況を明らかにした。見方を変えると、情報伝達遅延時間はマルチホップ無線ネットワークの連結性の評価指標として捉えることもでき、ここでの成果はマルチホップ無線ネットワークの連結性に関するものとも考えることもできる。
- (3) 1次元ネットワークにおいて、シャドウイングや移動体の流入出の影響が情報伝達遅延時間に与える影響及びそのメカニズムを理論解析により明らかにした。
- (4) 1次元ネットワークにおける解析結果を拡張し、2次元格子状道路ネットワークを移動体が移動する状況を考え、このような2次元ネットワークにおいて、エピデミック伝送、ハイブリッド伝送の情報伝達遅延時間の解析を行った。2次元の拡張を行うにあたり、シャドウイングに関してもシャドウイングの影響が大きい場合、それほど大きくない場合など、シャドウイングの程度を考慮に入れて解析を行った。また、移動体流としても様々なものを考慮に入れて解析を行った。解析では、開発した理論計算手法、シミュ

レーションを用いた。これらの解析結果より、シャドウイングの程度や、移動体流の違いが情報伝達遅延時間に与える影響を明らかにした。

- (5) また、2次元ネットワークにおいては、1次元ネットワークとは異なり、様々な経路を流れて情報が届けられるが、情報が流れる経路についてもその性質を明らかにした。
- (6) 情報伝達待ち時間の解析結果を基にして、マルチホップ無線伝送とエビデミックアルゴリズムを併用することにより、移動体流の効果を最大限に利用して情報伝達遅延を削減するためのハイブリッド型データ伝送手法の開発を行った。送信間隔、送信回数、送信電力等のパラメータの制御手法について検討し、その有効性を確認した。
- (7) マルチホップ伝送の高度化のため、通信品質を考慮するために Expected Transmission Count や Medium Time Metric を使い、マルチホップ伝送の通信品質の理論性能解析を行った。この解析は、1次元ネットワークと2次元ネットワークにおいて行い、端末の分布が規則的である場合とランダムである場合について、様々な性質を示し、最適な経路の特徴づけを行った。
- (8) 研究のまとめを行った。

上記の研究から、マルチホップ伝送がうまく機能しないような、連結度が低い状況における無線伝送を行うためには、ハイブリッド伝送が有効であることを示した。これにより、本質的にマルチホップ伝送が機能しない状況においても、柔軟に対応することが可能になると考えられる。また、2次元道路ネットワークにおけるハイブリッド伝送の情報伝達遅延時間の様々な性質を理論解析により明らかにすることができたが、これは従来行われておらず、新しい成果である。

ハイブリッド伝送に関しては、まだ課題も多く残っており、引き続き開発を行う必要がある。ハイブリッド伝送は特に災害時における有効な通信手段になり得ると考えられるので、この分野の研究は今後の重要な課題であると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件)

- ① Kazuyuki Miyakita, Keisuke Nakano, Masakazu Sengoku and Shoji Shinoda, Theoretical Analysis of Minimum Route ETX in Two-Dimensional Random

Multi-Hop Wireless Networks, Proceedings of IEEE ISCT, 2009, 査読有, pp. 1189-1194.

- ② Kazuyuki Miyakita, Keisuke Nakano, Masakazu Sengoku and Shoji Shinoda, Characterization of Minimum Route MTM in One-dimensional Multi-hop Wireless Networks, IEICE Trans. Fundamentals, 査読有, Vol. E92-A, No. 9. 2009, pp. 2227-2235.
- ③ Keisuke Nakano, Kazuyuki Miyakita, Akira Otsuka, Masakazu Sengoku and Shoji Shinoda, Analysis of Mean Waiting Time for Delivery of a Message in Mobile Multi-Hop Networks, IEICE Trans. Fundamentals, 査読有, Vol. E92-A, No. 9, 2009, pp. 2236-2247.
- ④ Kazuyuki Miyakita, Keisuke Nakano, Masakazu Sengoku and Shoji Shinoda, Theoretical Identification of the Best Path in Lattice Multi-Hop Wireless Networks, Proceedings of IEEE APWCS2009, 査読有, 2009, pp. 318-322.
- ⑤ Keisuke Nakano, Akira Otsuka, Kazuyuki Miyakita, Masakazu Sengoku and Shoji Shinoda, Analysis of Mean Waiting Time for Message Delivery in Street Ad Hoc Networks, Proceedings of ITC-CSCC 2009, 査読有, 2009, pp. 30-33
- ⑥ Kazuyuki Miyakita, Keisuke Nakano, Yusuke Morioka, Masakazu Sengoku and Shoji Shinoda, Characterization of Minimum Route ETX in Multi-Hop Wireless Networks, IEICE Transactions on Communications, 査読有, Vol. E92-B, No. 3, 2009, pp. 745-754.
- ⑦ 中野敬介, 宮北和之, 仙石正和, 篠田庄司, マルチホップ無線網における移動体流の情報運搬能力に関する考察, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, CAS2008-42, 2008, pp. 47-52.
- ⑧ Kazuyuki Miyakita, Keisuke Nakano, Masakazu Sengoku and Shoji Shinoda, Theoretical Computation of the Minimum Route ETX in Lattice Multi-Hop Wireless Networks, The 5th IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium Proceedings, 査読有, 2008, CD-ROM.
- ⑨ Kazuyuki MIYAKITA, Keisuke Nakano, Masakazu Sengoku and Shoji Shinoda, Theoretical Analysis of Route Expected Transmission Count in Multi-Hop Wireless Networks, IEICE Transactions on Communications, 査読

有, Vol.E91-B, No.8, 2008, pp. 2533-2544.

- ⑩ Keisuke Nakano, Kazuyuki Miyakita, Masakazu Sengoku and Shoji Shinoda, Analysis and Relative Evaluation of Connectivity of a Mobile Multi-Hop Network, IEICE Transactions on Communications, 査読有, Vol.E91-B, No.6, 2008, pp. 1874-1885.
- ⑪ Kazuyuki Miyakita, Keisuke Nakano, Yusuke Morioka, Masakazu Sengoku and Shoji Shinoda, On Relation between Routing Strategy and Communication Quality in Wireless Multi-hop Networks, Proceedings of the 2007 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, 査読有, 2007, pp. 305-308.

[学会発表] (計2件)

- ① 松田悠也, 中野敬介, 宮北和之, 仙石正和, 篠田庄司, 1次元マルチホップ無線網における経路選択手法のETXの近似解析手法の評価, 日本シミュレーション学会大会, 2008年6月19日, 立命館大学.
- ② 森岡佑介, 宮北和之, 中野敬介, 仙石正和, 篠田庄司, マルチホップ無線ネットワークにおける経路選択とETXの関係に関する考察, 日本シミュレーション学会大会, 2007年6月22日, 東京工業大学.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中野 敬介 (NAKANO KEISUKE)  
新潟大学・自然科学系・准教授  
研究者番号: 80269547