

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月10日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22500070

研究課題名（和文） 広域低密度分布移動無線ノード群のための耐遅延ネットワーク通信手法

研究課題名（英文） Delay-Tolerant Network Communication for Wireless Networks with Wide-Area Sparse Distribution of Mobile Nodes

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

研究成果の概要（和文）：移動無線ノードが疎に分布する無線ネットワークでは、エンドエンドの接続を維持した無線マルチホップ通信を行なうことは困難である。しかし、車載コンピュータを無線ノードとする ITS ネットワーク等の多くのアプリケーション環境では、ノード密度が必ずしも高くないこと、ノード分布が経時変化する場合には偏在することがしばしばであることから、耐遅延ネットワーク(DTN)通信手法の導入が必要となる。しかし、各中継移動無線ノードが隣接ノードを持つ機会が少ないために全域的な状況把握は困難であり、適切なルーティングの実現が求められる。本研究課題では、各無線ノードの変更可能な移動計画を隣接無線ノード間で局所的に交換することによる広告手法の導入による高性能 DTN 通信を実現した。また、これを活用した ITS 支援、広域被災地における安否情報交換、快適な歩行支援といったアプリケーションへの応用を行なった。

研究成果の概要（英文）：In wireless networks with sparse distribution of mobile wireless nodes, it is difficult to establish and maintain stable end-to-end wireless multihop communication. However, various wireless network applications such as ITS systems require higher connectivity and shorter transmission delay even with low density and maldistribution of wireless nodes. DTN communication is expected to be one of the reasonable solutions and its routing method is essential without global view of the whole network system. We have proposed a novel DTN routing method based on advertisement of mobility plans by their exchange among neighboring wireless nodes. It enables high performance DTN networks and supports communications in various applications such as ITS networks, life information exchange in disaster areas and comfort walking support.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：モバイルネットワーク・耐遅延・低密度分布・プロトコル

1. 研究開始当初の背景

自律移動機能を備えた無線ノード群で構成されるアドホックネットワークやセンサネットワークでは、他の無線ノードを中継ノードとする無線マルチホップ通信が用いられる。ここでは、無線ノードの移動速度、移動頻度、分布密度、通信特性に応じて適切な無線マルチホップ通信手法を提供するネットワーク基盤の構築が求められている。本研究では、無線ノードが低密度に分布する環境を対象とし、無線通信と無線ノード移動の組み合わせによるデータメッセージの配送を行なう耐遅延ネットワーク (DTN:

Delay-Tolerant Networks)において、地図情報や近隣無線ノードの移動計画を活用して、低通信オーバーヘッド、高到達性、低遅延の通信を実現することを目的とする。

無線通信機能の普及により、移動性を備えた無線ノードで構成されるネットワークへの期待が高まっている。コンピュータ制御された移動ノードの分散協調動作による高度交通システム (ITS) や群ロボット制御などの高度なアプリケーションの実現が求められている。移動無線ノードで構成されるネットワークにおいては、より頻繁かつ広範にネットワークトポロジが経時的に変化する。無線ノードの移動によって無線ノード間の隣接関係は変化し、バッテリー電源の消耗や故障によって無線ノードがネットワークから離脱する。このような変化に対して頑強な無線マルチホップ通信を実現するために、多種多様な通信プロトコルが考案されてきている[1]。研究代表者も多様な無線マルチホップ通信プロトコルを考案してきた。しかし、これまでに提案されてきた多くのプロトコルは、無線ノードが比較的高密度に分布する環境を前提としている。[2]では、無線信号到達距離

L の無線ノード群からネットワークが構成されているとき、任意の無線ノード間にマルチホップ配送経路を構築するためには、1辺 L の正方形領域あたり 8 台以上の高い密度で無線ノードが分布することが求められることを明らかにしている。

そのため、無線ノード分布密度が比較的低い場合を対象として、DTN の研究開発が始められている。ここでは、無線マルチホップ配送に加え、中継無線ノードがデータメッセージを保持したまま移動する

Store-Carry-Forward の手法を導入する。

つまり、比較的移動頻度、移動速度が高い無線ノードによるネットワーク構成を前提として、無線ノードの移動を次ホップ無線ノード探索あるいはメッセージ配送の一部として利用する手法である。これまでに提案されている DTN 通信プロトコルは、以下の観点から分類することができる。

- ・対象ネットワークの規模
- ・無線ノードの分布と移動に対する拘束条件
- ・無線ノードの移動情報を取得、交換することの可否

Epidemic Routing[3]や Probabilistic Routing[4]等の多くの DTN 通信プロトコルは、全域的フラッディングのコストが比較的小さい小規模ネットワークを対象としている。これらは無線ノードの分布と移動に特別な拘束条件を設けないが、ITS を対象とした通信プロトコルでは、無線ノードの分布と移動が道路上のみという拘束条件を設けている。また、[5]等では隣接無線ノードの位置や速度をデータメッセージ転送の判断に用いている。さらに[6]では広域的あるいは全域的な移動計画の取得が可能であることを前提としている。

2. 研究の目的

本研究では、全域的フラッディングコストが大きい広域ネットワークを対象とし、移動に拘束条件がある ITS 応用を想定した通信プロトコルと、移動に拘束条件がなく近隣無線ノードの移動計画が取得できる場合の通信プロトコルを以下を対象として考案する。

- ・高度交通システム(ITS)における車載コンピュータ群を対象とした、経路探索機能(カーナビゲーションシステム)を活用する、高到達性、低通信オーバーヘッド、低配送遅延の DTN 無線マルチホップ通信機能。
- ・各無線ノードが局所的に広告する移動計画情報を活用する、高到達性、低通信オーバーヘッド、低配送遅延の DTN 無線マルチホップ通信機能。

DTN 無線マルチホップ通信では、無線ノード分布密度が低いことから、無線ノード間の通信機会が少なく、位置情報等の制御情報の頻繁な交換を前提とすることができない。本研究でも、限られた情報を最大限に活用することで、より適切な DTN 無線マルチホップ通信を実現することを目指す。

ITS の経路探索機能を活用する通信機能の実現では、車載コンピュータが基本的に道路上にのみ分布し、道路上のみを移動する性質を活用し、送信元無線ノード位置から送信先無線ノード位置までの道路上の経路を経路探索機能によって検索し、検索された経路に(可能な限り)沿ってデータメッセージを転送、移送する。探索経路を移動情報として活用する手法は提案されているものの、データメッセージ配送経路として活用する手法は提案されていない。

また、無線ノードの移動計画が隣接無線ノードのみで活用される方法[5]や、あらかじめ全域的に周知された一部の無線ノードの

移動計画を活用する方法[6]が提案されている。しかし、無線ノードの移動計画をも無線マルチホップ配送で局所的に広告し、中継無線ノードが取得済みの移動計画のみを用いてデータメッセージの配送、移送計画を構成する手法は新規性が高い。移動計画を全域的に広告しないことで通信オーバーヘッドも削減され、有効性の高い手法でもある。

3. 研究の方法

本研究期間の3年のうち前半の1年半では、理論的検討を中心として研究を進めた。関連研究の調査、高密度分布を前提として設計した通信プロトコルの問題点と密度に依らず優れた性質を示す部分との見極めのための再検証、対象問題の解決法の考案とその正当性の証明を行なった。後半の1年半では、実装、実験によって提案手法の有効性を検証した。コンピュータシミュレーション実験によって、提案手法の妥当性を検証し、小型移動ロボットへの実装を行い、実用性を検証した。

(1) ITS を対象とした広域 DTN 無線マルチホップ通信

ITS では車載コンピュータの分布と移動は道路上に拘束されるが、データメッセージの転送は従来の DTN 通信プロトコルでは、道路とは無関係に行われる。このため、次ホップ車載コンピュータの検出に失敗し、データメッセージを保持して移動する車載コンピュータの移動特性によっては、データメッセージが必ずしも送信先無線ノードとは異なる方向へ転送、移送されることもあり、到達性の低下と配送遅延の拡大を招いた。

この問題を解決するために、車載コンピュータの経路探索機能によって検出された経路(部分道路列)に原則として沿ったデータメッセージ転送のみを可とする方法を検討

した。

(2) 局所的移動計画広告に基づいた DTN 無線マルチホップ通信

DTN 通信では、無線ノードの移動が通信性能に影響を与える。データメッセージを保持する移動無線ノードは、その無線信号到達範囲に存在する隣接無線ノードにそのデータメッセージを転送するか否か、するならばどの隣接無線ノードへと転送するか、を実時間的に決定しなければならない。隣接無線ノードの現在位置や移動速度の情報を得て転送先無線ノードを決定する手法は提案されているが、転送先無線ノードが保持した情報をさらに転送、移送することの効果はこの決定には考慮されていない。

もし、無線信号到達範囲外の無線ノードの移動計画が取得可能であるならば、複数ホップの転送をも考慮した次ホップ選択が可能になり、デッドエンドの抑止による到達性の向上や配送遅延の短縮などの効果が期待できる。ただし、無線ノードの移動計画の交換(広告)にも通信コストを要することから、広域的ではなく局所的な移動計画広告、すなわちホップ数の制約が付与された無線マルチホップ配送の適用が妥当である。そこで、具体的に以下を検討した。

- (a) 移動計画の広告基準の策定。
 - (b) 複数の近隣無線ノードの移動計画に基づいた転送、移送計画の策定手法。
 - (c) 保持する近隣無線ノードの移動計画の破棄基準の策定。
 - (d) 移動計画に対する実移動の時間的、空間的誤差による影響の吸収手法。
- ### (3) コンピュータシミュレーション実験/実機実験

提案する DTN 通信プロトコルの有効性、妥当性の検証は、コンピュータシミュレーション実験によって行なった。特に移動計画広

告に基づく DTN 通信手法の検討においては、移動計画からデータメッセージの到達位置を求めるためにデータメッセージ転送のタイミングと転送先に関する組合せの計算が必要となる。性能評価にあたっては通信コストとの関係も明らかにする必要があることから、移動計画の転送条件、破棄条件を変化させた場合の性能評価も必要である。また、ITS を対象とする DTN 通信手法の検討においては、車載コンピュータを想定した移動モデルを導入した実験を行なった。また、局所的な移動計画広告に基づく DTN 通信手法の検討においては、各移動無線ノードの性能、特に搭載メモリ容量と予測経路計算に要する計算量とプロセッサ性能との関係が重要となる。多様な性能を想定することで、最終的な実用適用に対して有意な実験データを取得することを目標とした。

(4) DTN アプリケーションの開発

提案する DTN 通信プロトコルは、コンピュータシミュレーション実験によってその妥当性を検証した後、実機実験によって性能を評価し、実装上の問題点、現実環境に適用した場合の問題点を明らかにした。このための実験用移動無線ノードを開発した。

4. 研究成果

比較的疎に分布する移動無線ノードで構成される無線マルチホップネットワークにおける耐遅延ネットワーク通信(DTN)手法に関する本研究課題の成果を前節の各項目に対応させて簡潔に説明する。

(1) ITS を対象とした広域 DTN 無線マルチホップ通信

車載コンピュータ間の1対1通信を実現する手法を考案した。道路上に移動範囲が拘束され、交差点でのみ移動方向を転換可能な車載コンピュータの特性を考慮して、これを中継ノードとすることで車輛の移動を

配送と次ホップ隣接無線車載コンピュータの探索に活用することで、データメッセージをルーティングする手法を考案した。また、この技術をソフトウェア/ネットワーク協調型仮想信号機を車載コンピュータ間協調で実現するための通信手法を考案した。さらに、サーバレス地理情報保持手法との組合せにより歩行者の快適支援のためのDTN 無線マルチホップネットワークアプリケーションを実現した。

(2) 局所的移動計画広告に基づいた DTN 無線マルチホップ通信

DTN による無線マルチホップ通信手法では、各中継無線ノードの隣接無線ノードへのデータメッセージ転送の実現可能性が予測不能であるために、データメッセージ配送性能が保証されず、その問題解決には複製活用という通信オーバーヘッドの大きな手法しか存在しない。この問題に対して、各移動無線ノードが変更可能な移動計画を策定し、隣接無線ノード間で局所的にこれを交換し、各中継無線ノードは中継データメッセージの配送予測に基づいて次ホップ隣接無線ノードを選択し、データメッセージを転送する手法を考案した。ここでは、各移動無線ノードの移動計画を交換、広告する手法、これらの変更に対応する手法、これに基づいてデータメッセージのルーティングを行なう手法が必要となり、本研究課題で解決した。特に、移動無線ノードの広域疎密度分布環境においては、移動計画の広告機会が少ないことが問題であり、送信先移動無線ノードの移動計画拡散の不調はシステムの性能を著しく低下することを明らかにした。その上で、この移動計画広告を基地局を相互接続する(有線)高性能ネットワークに委ねることによって、移動計画の拡散度を著しく向上した。また、中継無

線ノードが送信先無線ノードの移動計画を入手していない場合には、基地局を仮の送信先として配送することで大きく性能改善することに成功した。

(3) コンピュータシミュレーション実験/実機実験

本研究課題で考案された DTN 通信プロトコルをシミュレーション実験により性能評価を行ない、いずれも従来手法の主たる問題点を解決した。また、実機による提案プロトコル性能評価のために、安定走行と迅速な移動を可能とする中継無線機能を備えた簡易移動ノードを作成した。この移動無線ノードは、指向性アンテナを備えることで隣接無線ノードの相対的位置(方向と距離)を検出し、球形の筐体に装置を収めることで最小回転半径 0 の移動を実現する。多数の本移動無線ノードの協調により高性能 DTN 通信が実現できることを確認した。

(4) DTN アプリケーションの開発

本研究課題の提案手法を活用するアプリケーションの開発を行なった。広域に被害が広がる大規模災害現場においては、被災者間での安否情報交換が重要な課題であるが、通信インフラが壊滅的な被害を受けた場合にはその実現が困難である。そこで、被災者が避難時に携帯する無線携帯端末の協調と避難所間の DTN 通信によって、罹災初期における安否情報交換を実現するアプリケーションを開発した。また、信号による一時停止をできるだけ回避する快適歩行支援システムを考案し、信号周期の取得とその伝達を行なう DTN アプリケーションを開発した。

なお、(1)~(4)の各項目については、国内学会発表、国際会議論文発表などを通じて国内外の研究者に成果を公開し、さらに発展的な成果を挙げるために活発に議論を行

なった.

[参考文献]

- [1] Perkins, C.E., "Ad Hoc Networking," Addison Wesley (2000).
- [2] 渡邊, 坂本, 沼田, 小野, 桧垣, "Greedyルーティングプロトコルの性能評価," 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会論文集, p.393 (2006).
- [3] Vahdat, A. and Becker, D., "Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks," Technical Report CS- 200006, Duke University (2000).
- [4] Lindgren, A., Doria, A and Schelen, O., "Probabilistic Routing in Intermittently Connected Networks," Lecture Notes in Computer Science, No. 3126, pp. 239-254 (2004).
- [5] Burgess, J., et al., "MaxProp: Routing for Vehicle-Based Disruption-Tolerant Networking," Proceedings of the IEEE INFOCOM (2006).
- [6] Becker, C. and Schiele, G., "New Mechanisms for Routing in Ad Hoc Networks," Proceeding of the 4th Plenary Cabernet Workshop (2001).

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(査読有)] (計 5 件)

- (1) Higaki, H., "Network Platform for Location-Based Network Applications in MANETs," Proceedings of the 11th International Conference on Wireless Networks, pp.24-28 (2012).
- (2) Chigira, Y. and Higaki, H., "DTN Routing of Data Messages with Epidemic Distribution of Mobility Plans of Mobile Wireless Nodes," Proceedings of the 10th International Conference on Parallel and Distributed Computing and Networks, pp.163-169 (2011).

- (3) Higaki, H., "Navigation System based DTN Routing in Sparse Vehicular Networks," Proceedings of the IEEE International Conference on Communications and Information Technology, pp.171-175 (2011).

- (4) Chigira, Y. and Higaki, H., "DTN Routing with Localized Distribution of Mobility Plans," Proceedings of the 10th International Conference on Wireless Networks, pp.310-316 (2011).

- (5) Higaki, H., "Location-Based Information Management without Stationary Server Nodes," Proceedings of the 23rd International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems, pp.361-364 (2011).

[学会発表] (計 21 件)

- (1) 阿部, 丹野, 佐川, 桧垣, "DTN 通信を用いた歩行支援ツール," 情報処理学会第 75 回全国大会論文集, No.3, pp.275-276 (2013).
- (2) 川田, 桧垣, "被災地域内安否情報交換のための DTN," 情報処理学会第 75 回全国大会論文集, No.3, pp.273-274 (2013).
- (3) 岩井, 桧垣, "移動計画に基づく DTN 通信における送信先移動計画未取得時のルーティング手法," 情報処理学会研究報告, Vol.2013-DPS-154, No.38, pp.1-8 (2013).
- (4) 鶴巻, 桧垣, "移動シンクノード群へのセンサデータ配送手法," 電子情報通信学会技術報告, Vol.111, No.385, pp.59-64 (2012).
- (5) 阿部, 桧垣, "移動ノード間協調による仮想信号機の実現手法," 情報処理学会研究報告, Vol.2011-DPS-149, No.2, pp.1-7 (2011).
- (6) 内田, 桧垣, "MANET における位置依存情報保持手法の提案," 情報処理学会研究報告, Vol.2010-DPS-145, No.37, pp.1-7 (2010).
- (7) 千明, 桧垣, "移動速度変動を考慮した DTN ルーティング手法," 情報処理学会研究報告, Vol.2010-MBL-55, No.13, pp.1-8 (2010).

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 : 7 0 2 8 7 4 3 1