

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：10103

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25880002

研究課題名(和文)次世代高度交通システムのための高機能データフォワーディングアルゴリズム

研究課題名(英文)Data forwarding algorithms for next generation ITS

研究代表者

太田 香(OTA, Kaoru)

室蘭工業大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50713971

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：安全安心、省エネ快適な交通社会には高度道路交通システムの構築が課題とされ、近年車両ネットワークが注目されている。車両ネットワークで様々なサービスを展開するためには、新たなデータ通信プロトコルの開発が必須である。本研究では、多種多様なサービスを提供する車両ネットワークにおいて通信効率や通信品質制御に優れたフォワーディングアルゴリズムを考案し、シミュレーションによりその有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：With the rapid advance of wireless communication technologies, vehicular networks are emerging as a new landscape of mobile ad hoc networks, aiming to provide a wide spectrum of safety and comfort applications to drivers and passengers. In this research, we focus on effective data forwarding algorithms for the vehicular networks, which improve network performance such as minimizing an average delivery delay and maximizing throughput of the network. Extensive computer simulations evaluate the performance of our proposed algorithms and show the efficacy of the algorithms.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：車両ネットワーク 通信効率 通信品質

1. 研究開始当初の背景

日本の ITS 分野の研究開発は 1970 年代初頭に始まり、カーナビ、VICS (道路交通情報通信システム)、ETC (電子料金収受システム)、ASV (先進安全自動車) 等、ITS 個別要素技術の研究開発が推進され、これらはカーナビ市場の成長とともに着実な展開・実用化が進んできた。第一ステージの実用化・普及に係る残された課題に関し、産官学の関係者がこれまでの成果を評価し、第二ステージの取り組みの方向性として、「安全・安心」「環境・効率」「快適・利便」を基本概念とする「ITS 推進の指針」が、日本 ITS 推進会議により取りまとめられている。車両ネットワークは、それらの安全・環境・利便達成に貢献する技術として注目され、近年国内外を問わず様々な研究が行われてきている。

車両ネットワークでは、車両に無線装置やセンサを搭載することによって、車両による周辺観測や、車両間・車両路側機間通信によるデータ共有を実現する。アプリケーション例は多岐にわたるが、主に次の 3 つに分類される。第一に交通安全：衝突回避など、事故を未然に防ぐ目的、第二に交通効率・管理：交通流管理など、渋滞緩和や排気量を低減する目的、第三にインフォテイメント：動画コンテンツダウンロードなど、情報や娯楽サービスを提供する目的としている。そのアプリケーションの多様性から達成すべき研究課題も、アドレス割当 (GPS アドレス・IP アドレス間の変換)、クロスレイヤー制御、データ通信プロトコル、セキュリティ・プライバシー問題等と多岐にわたる。それらの中でもデータ通信プロトコルに関する研究課題は、車両ネットワークを実現するための根幹技術となっているため、特に注目されている。

車両ネットワークにおけるデータ通信プロトコルと一言でいっても、インターネット通信の例でも分かる通り、MAC (媒体アクセス制御) プロトコルやルーティングアルゴリズムといった複数のプロトコルやアルゴリズムから構成されており、それぞれの設計が必要となる。特に車両ネットワークは、これまで研究されてきたモバイルアドホックネットワーク (MANET) や遅延許容ネットワーク (DTN) とは異なり、その独自の特性によって問題をより複雑にしている。車両の高可動性や移動範囲の制限、アプリケーションの即時性が例として挙げられる。以上の点から、まず本研究では、通信プロトコル中のフォワーディングアルゴリズムに着目し、研究を進めた。ルーティングアルゴリズムは送信ノード (車両または路側機) から宛先ノードへデータを送信する際、最適なルートを選定するのに対し、フォワーディングアルゴリズムは、ルート上の各ノード間でどのようにデータを受け渡しすれば最良かを決定する方法である。前述の通り、車両の高可動性からノード間のリンクは非常に不安定であり、フォワーディングアルゴリズムは重要な要素

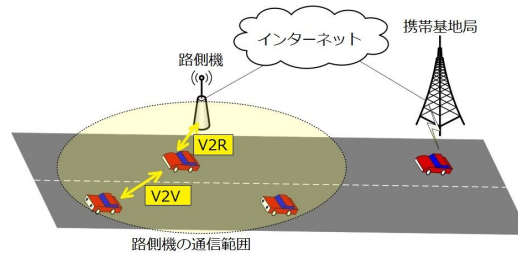


図1：車両ネットワークのモデル

技術である。安定したデータ転送を実現すると共に、転送遅延の最小化、スループットの最大化、通信オーバーヘッドの低減化、通信品質 (QoS: Quality of Service) の保持、プライバシーの保護、といった要件を満たす設計が理想とされている。

これまでに、地理学的アプローチや確率論的アプローチなど様々な手法が提案されてきた。しかし、これらの手法は、特定の環境を想定して設計されているものが多く、車両ネットワークで実現が期待される多種多様なサービスやアプリケーションに対応するためには、新たなフォワーディングアルゴリズムの開発が必須である。

2. 研究の目的

図1は、車両間 (V2V: Vehicle-to-Vehicle) や車両路側機間 (V2R: Vehicle-to-Roadside) 通信を介してサービス (衝突警告、速度管理、動画配信など) を利用する一般的な車両ネットワークのモデルである。本研究では車両間通信のデータフォワーディングアルゴリズムを開発する。

本研究ではまず、これまでの既存アルゴリズムを融合させることにより、それぞれの欠点を補い、機能面に優れたアルゴリズムの創出を目指した。しかし当然ながら、既存アルゴリズムはそれぞれでターゲットとしている要件が全く異なるものであるため、単純に併用または組み合わせるだけでは効果が期待できず、むしろ長所を打ち消し合ってしまう可能性さえもある。それぞれのアルゴリズムの長所を活かしながら設計・融合させる必要があり、いかなる環境設定下にも対応できるアルゴリズムの創出を目指す。

また既存アルゴリズムでは、MANET や DTN のために設計されたアルゴリズムを改良して、車両ネットワークに適用させているものも少なくない。一方、車両ネットワークには独自の性質があるため、その性質を生かすことによって優れたアルゴリズムの開発が期待できる。そこで、車両ネットワーク固有の特徴 (車両の移動モデル、車両間のコンタクトモデル、車両密度の時間的および位置的な変化、など) を考察し、新たなアルゴリズムを設計する。

本研究はこれらのアプローチにより、多種多様なサービスを提供する車両ネットワークにおいて優れた性能を発揮する新たなフ

オーディングアルゴリズムの創出を目指すものである。

3. 研究の方法

既存のアルゴリズムを融合させ、より優れたオーディングアルゴリズムを設計するためには、これまで提案されてきた様々な転送制御理論について網羅的に知る必要がある。そのためまず、学術論文誌、書籍、IEEE及び電気電子情報通信学会などの各学会誌などで幅広い調査を行った。どのような制御理論がどのような機能・性能の実現に利用できるのかを検討するとともに、各制御理論の長所と短所を分析した。また、特定のアプリケーションや環境条件に依存しないよう工夫しアルゴリズムの設計に取り組んだ。動作確認及び性能評価をシミュレーションによって行い、代表的な既存アルゴリズムとの性能を比較した。本研究が目的とする高効率性及びQoS保証について、提案アルゴリズムの優位性を明らかにした。

次に、車両ネットワーク固有の特徴を用いてアルゴリズムを開発し、車両ネットワークにおける高機能なメッセージ伝送手法を提案した。低遅延かつプライバシー保護の実現が可能になるようメッセージ伝送手法を設計した。提案手法は、実際に運行する公共交通機関から得られた実データを用いたシミュレーションによってその性能を評価し、有効性を確認した。

以上のアプローチによる提案手法の技術的な詳細事項や性能評価実験の結果をまとめて、国際会議や国際的な学術論文誌へ投稿し、研究成果を発表した。

4. 研究成果

本研究で得られた主な研究成果を以下に述べる。

(1) ドライブスルーインターネットのための車両間協調ダウンロード

車両が路側機を通じてインターネットに接続する「ドライブスルーインターネット」は、車両ネットワークで展開されるサービスの一つだ。携帯端末の普及によりその通信範囲は年々拡大し、いつでもどこでもインターネットへアクセス可能となった。その一方で、ネットワークの帯域枯渇が問題視され、今後ますます増加する携帯端末利用者と通信データ量への対応に通信事業者は日々頭を悩ませている。また、携帯端末利用者にとってもデータ通信料は決して安価ではないため、ドライブスルーインターネットの利用は、大変魅力的である。

しかし、ドライブスルーインターネットは、基本的に路側機の通信範囲内のみで利用可能であり、車両が路側機の側を通過しないと利用できない。よって、車両間のアクセス競合による輻輳も発生してしまう。また競合が発生しないよう路側機を密に配置すれば、コストがかかり、その分利用者への負担となる

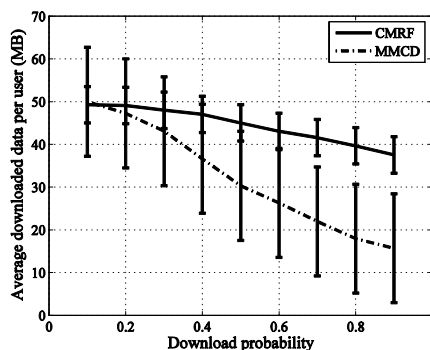


図2：スループットの比較

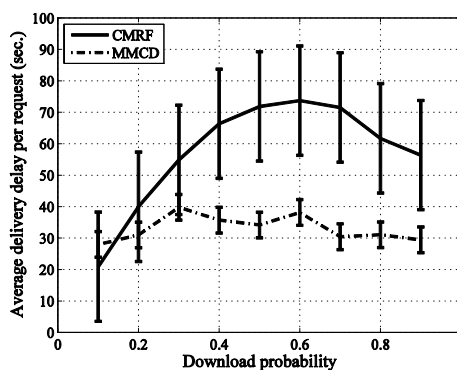


図3：通信遅延の比較

可能性がある。そこで本研究では、V2V通信による協調ダウンロードを用いて、V2R通信のスループットを最大化し、できるだけ多くの利用者がドライブスルーインターネットを利用してデータをダウンロードできる仕組みを提案した。具体的には、路側機との距離と比例してスループットが増加する特性（例：路側機に近い車両ほど、通信効率が高い）を利用して、路側機周辺を走る車両がプロキシとなり、他の車両のダウンロードを手助けする。ダウンロードされたデータはV2V通信によって目的の車両に届けられる。

同時に、QoS要求に対応するため、アプリケーションに応じて通信遅延を最小化するようにアルゴリズムを設計した。例えば、メールやニュース閲覧など比較的遅延が許容されるデータは優先順位を低く、通話やビデオ配信など即時性を求められるデータは優先順位を高くし、V2R通信およびV2V通信のスケジューリングを決定する。以上の2つの要件であるスループット最大化および通信遅延最小化を同時に満たすように、MMCD (Max-throughput and Min-delay Cooperative Downloading for Drive-thru Internet Systems)を開発した。

提案アルゴリズムMMCDの有効性はシミュレーションによって検証された。最先端の手法と比較して、スループットは路側機からのダウンロード数が増える程減少する（図2）。一方、平均通信遅延は一定に低く保たれている（図3）。ダウンロード数が比較的

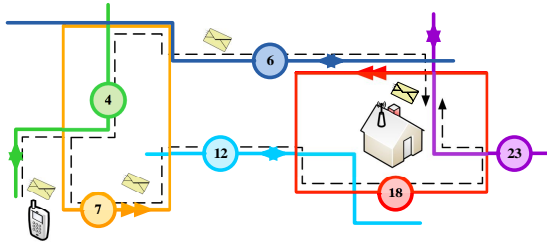


図4：バスを利用したメッセージ転送の例

少ない場合に、MMCD は有効であることが分かった。

(2) バスネットワークを利用した安全なメッセージ転送

本研究では、車両ネットワークの特徴の一つである車両の移動モデル（時間的および空間的移動パターン）および接触モデル（車両同士の出会いのパターン）を利用したメッセージ転送のしくみ BusCast を開発した。車両ネットワークには一般車両だけでなく、バスやタクシーなどの公共交通機関も含まれる。本研究では、路線バスの移動モデルと接触モデルを用いて、メッセージ転送を実現する手法を提案した。図4は、バスネットワークを利用したメッセージ転送の例である。転送サービス利用者は近くを通過するバスへメッセージを送信し、バスはメッセージを蓄積して、目的地に応じて経路上ですれ違う他のバスへメッセージを渡す。メッセージはバスからバスへと転送され、最終的に目的地の宛先に届けられる。路線バスは、一定の経路を決められた時間に運行するため、図4に示すようにメッセージの経路を予め決めることは可能であるが、解決すべき課題が2つあった。

1つ目は、バスの運行は交通状況や乗客数等に左右されるため、常に一定であるとは限らない。1台のバスが交通渋滞に巻き込まれただけで、End-to-end 遅延が大きくなる恐れがある。また、エピデミックルーティングのように、メッセージを次々に複製しバスネットワーク上に流せば到達率は上がるが、サービス利用者が増加するほどネットワークトラフィック（ネットワーク上を流れるデータ量）も増加し効率的ではない。本研究では、グラフ理論を用いて動的なメッセージ転送の経路選択方法を考案した。各バスルートをノードとし、バスルートに共通の経路を持つルート同士をエッジで連結したグラフを作成する。利用者の要求に応じて、最適なメッセージ転送経路（例：距離的または時間的最短経路）が動的に選択される。

2つ目は、プライバシー漏洩の問題である。メッセージには送信元と宛先の位置情報や利用者の個人情報が含まれるため、バスネットワーク上で悪意のある利用者にそれらの情報が漏洩するリスクがある。ロケーションプライバシーを保護するために、ARS (Anonymous Routing Structure) を設計した。

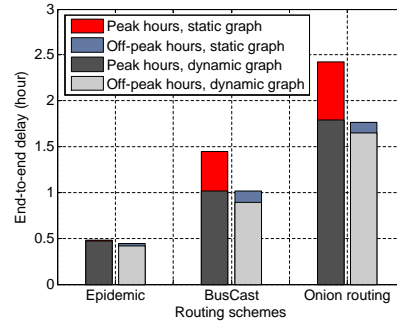


図5：End-to-end 遅延の比較

ARS により、メッセージに添付されている転送経路から、各バスは次にメッセージ渡すバスの情報だけを見ることができ、つまり、各バスは全経路を見ることができないため、メッセージの送信元を辿ったり、送信先を確認したりすることが不可能となる。また、公開鍵を必要としない一般的な暗号化方式を適用しメッセージ本体を暗号化することで、通信オーバーヘッドを抑えつつ安全にメッセージを転送することが可能となった。

提案した BusCast は、シミュレーション実験によってその性能を評価した。シミュレーションは実際に運行する路線バス約 2000 台から収集された実測データを用いて行われた。図5は、BusCast と既存手法 (Onion Routing, Epidemic) の End-to-end 遅延を比較したものである。Epidemic は最も遅延を抑えることができるが、前述の通りネットワークトラフィックが多く非効率的である。一方 BusCast では、1つのメッセージを送信すると平均 9.3 台のバスでメッセージの送受信が行われ、トラフィックを抑えることができる。

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18件)

- [1] Mianxiong Dong, He Li, Kaoru Ota, Jiang Xiao, "SDN Rule Caching in Mobile Access Networks," IEEE Network, 査読有, 印刷中
- [2] Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Anfeng Liu, Minyi Guo, "Joint Optimization of Lifetime and Transport Delay under Reliability Constraint Wireless Sensor Networks," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (TPDS), 査読有, 印刷中
- [3] Kaimin Wei, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Ke Xu, "CAMF: Context-aware Message Forwarding in Selfish Mobile Social Networks," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (TPDS), 査読有, 印刷中

- [4] Yanliang Hu, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Anfeng Liu, Minyi Guo, "Mobile Target Detection in Wireless Sensor Networks with Adjustable Sensing Frequency," IEEE Systems Journal, 査読有, 印刷中
- [5] Kaoru Ota, Mianxiong Dong, Shan Chang, Hongzi Zhu, "MMCD: Cooperative Downloading for Highway VANETs," IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing (TETC), 査読有, vol.3, issue 1, pp.34-43, 2015年
- [6] Zhenyu Zhou, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Ruifeng Shi, Zhiheng Liu, Takuro Sato, "A Game-Theoretic Approach to Energy-Efficient Resource Allocation in Device-to-Device Underlay Communications," IET communications, 査読有, vol.9, no.3, pp.375-385, 2015年
- [7] Mianxiong Dong, He Li, Kaoru Ota, Laurence T. Yang, Haojin Zhu, "Multicloud-Based Evacuation Services for Emergency Management," IEEE Cloud Computing, 査読有, vol.1, no.4, pp.50-59, 2014年
- [8] Zhenyu Zhou, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Jun Wu, Takuro Sato, "Energy Efficiency and Spectral Efficiency Tradeoff in Device-to-Device (D2D) Communications," IEEE Wireless Communications Letters, 査読有, vol.3, no.5, pp.485-488, 2014年
- [9] Jun Long, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Anfeng Liu, "Achieving Source Location Privacy and Network Lifetime Maximization through Tree-based Diversionsary Routing in WSNs," IEEE Access, 査読有, vol.2, pp.633-651, 2014年
- [学会発表](計12件)
- [1] Shan Chang, Hongzi Zhu, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Xiaoqiang Liu, Xuemin Shen, "BusCast: Flexible and Privacy Preserving Message Delivery Using Urban Buses," The 20th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS 2014), 新竹市(台湾), 2014年12月16日~19日
- [2] Teerawat Kumrai, Kaoru Ota, Mianxiong Dong, Paskorn Champrasert, "An incentive-based evolutionary algorithm for participatory sensing," IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM 2014), pp. 5021-5025, オースチン(アメリカ), 2014年12月8日~12日
- [3] Zhenyu Zhou, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Jun Wu, Takuro Sato, "Distributed Interference-Aware Energy-Efficient Resource Allocation for Device-to-Device Communications Underlying Cellular Networks," in Proc. of IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM 2014), pp. 4454-4459, オースチン(アメリカ), 2014年12月8日~12日
- [4] Kaoru Ota, Mianxiong Dong, Shan Chang, Hongzi Zhu, "MMCD: Max-throughput and Min-delay Cooperative Downloading for Drive-thru Internet Systems," in Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 83-87, シドニー(オーストラリア), 2014年6月10日~14日
- [5] Zhenyu Zhou, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Zhiheng Liu, Jun Wu, Takuro Sato, "Error Probability Analysis of Joint Signal Detection with Base Station Sleeping and Cooperation," in Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 2443-2448, シドニー(オーストラリア), 2014年6月10日~14日
- [6] Teerawat Kumrai, Kaoru Ota, Mianxiong Dong, Paskorn Champrasert, "RSU Placement Optimization in Vehicular Participatory Sensing Networks," in Proc. of 2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM Student Workshop), pp.207-208, トロント(カナダ), 2014年4月27日~5月2日
- [7] Mianxiong Dong, He Li, Kaoru Ota, Haojin Zhu, "HVSTO: Efficient Privacy Preserving Hybrid Storage in Cloud Data Center," in Proc. of 2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM Workshop on Bigdata Security), pp.529-534, トロント(カナダ), 2014年4月27日~5月2日
- [8] Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Motoki Sakai, "A Novel Information Dissemination System for Vehicle-to-RSU Communication Networks," in Proc. of the 2013 International Conference on Connected Vehicles & Expo. (ICCVE 2013), pp. 918-919, ラスベガス(アメリカ), 2013年12月2日~6日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 香 (OTA, Kaoru)

室蘭工業大学・工学研究科・助教

研究者番号: 50713971