

NAIST-IS-MT1351113

修士論文

車車間通信を用いた情報伝播のための
車両クラスタリング手法の提案

鷺尾 直大

2015年3月10日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

鷲尾 直大

審査委員：

藤川 和利 教授 (主指導教員)

伊藤 実 教授 (副指導教員)

安本 慶一 教授 (副指導教員)

猪俣 敦夫 准教授 (副指導教員)

車車間通信を用いた情報伝播のための 車両クラスタリング手法の提案*

鷺尾 直大

内容梗概

車車間通信を利用して広域での情報伝播を行う場合，車両密度が不均一であるためにエンドツーエンドの通信経路が存在しない場合がある．このような環境における車車間でのメッセージ配送方式に Delay Tolerant Network (DTN) を利用する事が考えられる．しかしながら，既存の DTN ルーティング手法では対向車両とのすれ違い時のメッセージ転送効率を考慮しておらず，結果として伝播効率の低下に伴う情報損失が発生する．そこで，この問題を解決するため，地理位置と走行軌跡の類似性に基づき車両を分類することで，すれ違い時のメッセージ転送を効率化する手法を提案する．本稿ではシミュレータによる実験から，提案手法を用いることで，既存手法に比べて高い通信帯域利用効率と伝播効率を得られることを示した．

キーワード

車車間通信，情報伝播，遅延耐性ネットワーク，ルーティング，クラスタリング

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT1351113, 2015年3月10日.

A Vehicle Clustering Algorithm for Traffic Information Propagation by Inter-Vehicle Communications*

Naohiro Washio

Abstract

There are some cases regarding information propagation over a wide area such as Vehicle-to-Vehicle (V2V) communications, in which an end-to-end path does not exist due to a non-uniform density of vehicles. In order to solve this problem, Delay Tolerant Network (DTN) architectures have been studied to facilitate message delivery in V2V communications. However, existing message delivery methods for sharing the information do not consider the efficiency of message passing communications. As a result, the information can be lost by a decrease in the efficiency of the propagation. In order to increase the efficiency of information propagation, we propose a novel vehicle clustering algorithm, based on the similarity of geographic locations and trajectories. Furthermore, we describe a simulation to evaluate the message reachability and showed that our proposed method provides higher message reachability, and utilizes bandwidth more efficiency than existing methods. In order to evaluate our proposal, we carry out a simulation. This contributes to efficient message passing communication.

Keywords:

Inter-vehicle communications, Information propagation, DTN, Routing, Clustering

*Master's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1351113, March 10, 2015.

目次

1. 序論	1
1.1 高度交通システムの背景	1
1.2 ITSにおける無線通信システム	4
1.2.1 路車間通信	5
1.2.2 車車間通信	5
1.3 研究目的	6
2. 関連研究	7
2.1 既存の交通情報配信サービス	7
2.1.1 VICS	7
2.1.2 Google Map	8
2.1.3 既存の交通情報配信の課題	8
2.2 アドホックネットワークにおける Geocast 手法	8
2.2.1 フラッディングベース Geocast	9
2.2.2 ルーティングベース Geocast	10
2.2.3 Geocast 手法による交通情報伝播	12
2.3 Delay Tolerant Network (DTN)	12
2.4 DTN アーキテクチャ	13
2.5 DTN ルーティング手法の分類	14
2.6 DTN ルーティング手法の車車間通信への利用	15
2.6.1 Epidemic routing	15
2.6.2 Spray and Wait routing	16
2.6.3 MaxProp routing	16
2.6.4 Epidemic 型ルーティングの比較	18
2.7 DTN ルーティング手法の性能評価	18
2.8 クラスタリングにおける既存手法	20
2.8.1 NEAT: Road Network Aware Trajectory Clustering	21
2.8.2 Dual-Locality Ratio (DLR)	21

2.8.3	Aggregate Local Mobility (ALM)	22
2.8.4	QuickSilver	23
2.8.5	Vehicular Multi-hop algorithm for Stable Clustering (VMaSC)	24
2.8.6	FairAD	25
2.8.7	CASCADE	25
2.8.8	渋滞情報共有のためのクラスタリング	26
2.9	クラスタリング既存手法のまとめ	26
3.	DTN ルーティングのための車両クラスタリング手法	28
3.1	想定環境	28
3.2	提案手法の目的	28
3.3	クラスタ管理	28
3.3.1	Quadkey を用いた地理的・階層的分割	29
3.3.2	Quadkey を用いた軌跡の抽象化	30
3.4	軌跡の補間	32
3.5	軌跡の比較に関する考察	34
3.6	クラスタの構成手順	35
3.7	クラスタを利用したメッセージ配送	35
4.	評価実験	37
4.1	実験における評価項目	37
4.2	すれ違い通信実験	38
4.2.1	実験環境	38
4.2.2	実験結果	39
4.3	情報伝播性能評価実験	43
4.3.1	情報伝播性能評価実験における評価	43
4.3.2	実験環境	44
4.3.3	実験結果	44
4.4	評価実験を通しての考察	46
4.4.1	すれ違い通信実験の考察	46

4.4.2	情報伝播性能評価実験の考察	46
4.4.3	全体を通じた考察	47
4.5	今後解決すべき課題	48
5.	結論	49

目 次

1	すれ違い通信を利用したメッセージ配送	7
2	GeoGRID を用いた Geocast の一例	10
3	フェルマー点に基づく GGP を用いた Geocast	12
4	Helsinki City Scenario(HCS) におけるマップ	19
5	MaxProp routing におけるメッセージサイズの増加に伴うメッセー ジ到達率の推移	20
6	コンテンション方式を利用した状態遷移	22
7	QuickSilver におけるシステムアーキテクチャ	24
8	Quadkey の階層構造と包含関係	30
9	Identifying similar trajectories by Quadkey	32
10	軌跡の補間を必要としない例	34
11	軌跡の補間が必要な例 1	34
12	軌跡の補間が必要な例 2	34
13	メッセージ生成エリアとメッセージが必要となるエリア	38
14	すれ違い通信実験におけるすれ違い通信の概要	40
15	メッセージサイズを増加させた際のメッセージ到達率 (すれ違い車 両台数 20 台)	42
16	すれ違い車両台数の増加させた際のメッセージ転送量 (メッセージ サイズ 3 MB)	42
17	すれ違い車両台数を増加させた際のメッセージ到達率 (メッセージ サイズ 3 MB)	43
18	ターゲット車両から 500m, 800m, 1000m 離れた地点で生成された メッセージの到達率	45
19	通信可能距離の変化に伴うシミュレーションエリア内で生成及び 転送されたメッセージ数	45

表 目 次

1	Epidemic 型ルーティング	18
2	クラスタリング既存研究のまとめ	27
3	クラスタ管理テーブルの例	29
4	edge length of Quadkey	32
5	すれ違い通信実験に関するパラメータ	39
6	想定する伝送方式	40

1. 序論

1.1 高度交通システムの背景

近年、世界的に自動車台数は増加しており、交通手段として自動車が大幅に普及したことに伴い、交通事故による多数の死傷者の発生、都市部を中心として発生する慢性的な交通渋滞、交通の振動騒音、排気ガスによる環境汚染など、社会問題も深刻化している。このような様々な社会問題を最先端の情報通信技術やセンシング技術を用いて解決し、道路交通の安全性、快適性、環境保全等を向上する試みとして、高度道路交通システム（ITS: Intelligent Transport System）があり、世界各国で研究開発が盛んに行われている。我が国においては、1970年前後から当時の通商産業省、建設省、警察庁等の省庁と民間企業が共同して研究を行ってきた。1995年、政府の高度情報通信社会推進本部が「高度情報通信社会推進に向けた基本方針」を策定し、公共分野の一分野としてITSは位置づけられた[1]。その後、同年8月に、旧建設省をはじめとする関係5省庁で、「道路・交通・車両分野における情報化実施指針」を作成し、この中で9つの開発分野を明示した[2]。さらに、1996年7月には関係5省庁で「ITS推進に関する全体構想」を策定し、この中でITSが目標とする機能・開発・展開に関わる基本的な考え方を今後20年間の長期ビジョンとして取りまとめ20種類のITS利用者サービスを定義した[3]。20種類の利用者サービスは、「道路・交通・車両分野における情報化実施指針」に示した9つの開発分野ごとに設定されており、今後ITSとして提供していくべきサービスを提示したものである。ここで、「道路・交通・車両分野における情報化実施指針」に示される9つの開発分野を挙げる。

ナビゲーションシステムの高度化

我が国においてはナビゲーションシステムが急速に普及しつつあるが、さらに渋滞情報、所要時間、交通規制、サービス情報等をリアルタイムに収集・提供するシステムを構築し、ナビゲーションシステムの高度化を図ることにより、目的地までのより快適な移動を実現し、利用者の利便性の向上を図る。

自動料金収受システム

自動料金収受システムは、高速自動車国道等の有料道路の料金所等で一旦停止することなく自動的に料金の支払いを可能とするものであり、料金所でのノンストップ化による渋滞の解消、近年のキャッシュレス化に対応した一層の利用者サービス向上、料金収受の自動化による管理コストの低減等を図る。

安全運転の支援

各種センサにより道路・交通の状況や周辺車両の状況を把握するとともに、道路等のインフラと車、車と車間の情報通信等により、周辺車両の状況、突発事象等をリアルタイムに把握し、ドライバーに対する警告、運転制御による運転補助、さらには自動運転を可能とするシステムの構築により、交通事故の発生・拡大の防止等による安全性の向上を図る。

交通管理の最適化

交通流そのものの発生にまで踏み込んだ交通管理を行い、交通の安全性・快適性の向上と環境の改善として、以下の研究開発がある。

1. 交差点での効率的な信号制御を行う最適制御アルゴリズムの研究開発
2. 交通流の分散等を目標として、車載装置等へ交通情報を提供するシステムの研究開発
3. 公共車両優先信号制御手法等の改善
4. 目的地情報の活用による最適な車両配分を考慮した動的経路誘導の研究開発
5. 車両の動態的把握等による業務車両等の効率的運用を支援する手法の研究開発
6. 交通公害の低減を目指す迂回情報提供や信号制御手法の研究開発

道路管理の効率化

路面状況、工事実施状況等の情報を収集・提供するシステムの構築による道路利用者への工事情報等の迅速な提供及び道路管理の迅速かつ的確な対

応を図るとともに、特殊車両通行許可申請・事務処理の電子化、通行許可経路のデータベース化、許可車両の実際の通行経路や積載量等を自動的に把握可能なシステムの構築等による特殊車両の許可手続きの迅速化、通行許可の一層の適正化等により利用者サービスの向上、物流コストの低減等を図る。

公共交通の支援

公共交通機関の運行状況を把握し事業者及びその利用者に情報を提供するシステム、公共交通機関の円滑な運行を確保するシステム等の構築を通じ、事業運営の効率化、利用者の利便性の向上を図るとともに、交通機関の最適な利用分担の実現を図る。

商用車の効率化

トラック、観光バス等の運行状況を収集し、輸送事業者等に提供するシステム、高度化・自動化・システム化された物流センター、共同配送・帰り荷情報提供システムの整備、商用車の連続運転を可能とする自動運転システムの整備により、集配業務の効率化、業務交通量の低減、輸送効率の飛躍的な向上による環境の改善を図る。

歩行者等の支援

携帯用の情報提供装置等を用いた歩行者・自転車利用者への経路・施設案内等を提供するシステム、磁気、音声等を利用した視覚障害者向けの経路案内、誘導を行うシステム及び携帯用発信機による歩行者用信号の青時間の延長システム等の構築により、高齢者、身障者等の交通弱者も安心して利用できる安全で快適な道路交通環境の形成を図る。

緊急車両の運行支援

災害発生時における交通状況及び道路の被災状況等をリアルタイムに収集し、関係機関への伝達、復旧用車両等の現場への案内等を迅速に行うとともに、交通管理等に活用するシステムの構築により、災害等にもなう迅速かつ的確な復旧・救援活動の実現を図るものである。

現在，これらの分野に関して様々な研究がなされているが，既に我が国で実用化されている技術もある．その一例として，ETC(Electronic Toll Collection System)は有料道路の料金所において，通行車両の車載機器と料金ゲートに設置された路側システムとの間で，料金に関する情報を双方向無線通信し，通行車両が一旦停止することなく，自動的に料金を収受するシステムである．これにより，料金所における渋滞を解消し，キャッシュレスによる利用者サービスの向上及び道路管理コストの低減などを実現している．

また，道路交通情報通信システム (VICS: Vehicle Information and Communication System)[4] は，電波ビーコン，光ビーコン及びFM多重放送の3種類のメディアを用いて，渋滞情報や所要時間，工事・道路規制情報，駐車場情報などの道路交通情報をドライバに提供する．1966年4月に世界に先駆けて実用化され，2003年には主要道路におけるサービスの全国展開を完了した．VICSによる交通情報を利用することにより，道路環境に追従した動的な経路案内が可能となった．

近年では，2013年，IT総合戦略本部にて，「世界最先端IT国家創造宣言 [5]」が決定され，世界で最も安全で環境にやさしく経済的な道路交通社会の実現を目指し，交通インフラ整備や車載機器の開発・実用化を行い，安全運転支援システムの早期実用化の加速を図っている．

1.2 ITSにおける無線通信システム

ITSにおける各種サービスを利用する場合，他車両や情報センターなどとの情報交換が必要となる．そのため，情報通信技術はITSにおける重要な技術の一つと位置づけられている．ITSにおける情報通信は，路上に設置された装置と車両との間で行われる路車間通信と，車両同士で行われる車車間通信の二つに大別することができる．本節では，路車間通信と車車間通信それぞれの特徴と実用例を示す．

1.2.1 路車間通信

路車間通信は、道路上に設置される基地局と車両に搭載される通信機との間の通信である。路車間通信を大きく分けると、スポット通信と連続通信に分けることができる。スポット通信は、1つの路側機で数10m範囲のカバーエリアを持つ通信であり、通信できる時間は非常に短いため、やり取りできる情報は比較的小さい。ETCは5.8GHz帯の周波数を用いた専用狭帯域(DSRC: Dedicated Short Range Communication)が利用されているが、これはスポット通信に相当する。ETC車載器を搭載した車両台数は、2010年に累計約4050万台となっている。ETCを利用することによって、料金所周辺における交通渋滞を緩和し、環境への負荷を軽減できる。

路車間通信における通信方式である専用狭帯域について、その特徴を述べる。専用狭帯域通信は、一般社団法人電波産業会(ARIB: Association of Radio Industries and Businesses)のARIB STD-T75及びARIB STD-T88で規格化された方式であり、道路側に設置された無線通信装置(RSU: Road Side Unit)と、車載無線通信装置により構成される。ここで、専用狭帯域通信は5.8GHz帯の無線周波数を用いて1Mbpsの双方向通信を実現しており、変調方式として、ASK(Amplitude Shift Keying)またはQPSK(Quarterary Phase Shift Keying)を想定し、アクセス多重方式として時間分割多重方式(TDMA: Time Division Multiple Access)が利用される。

一方、連続通信は、道路に沿ったカバーエリアを持つ通信であり、連続的に通信でスポット通信と比較して容量の大きいデータのやり取りを行えるが、基地局のハンドオーバーに伴う問題などがあり、実用化への課題が残されている。

1.2.2 車車間通信

開発分野における安全運転支援や交通管理の最適化を考えると、車両間で交通情報のやり取りを行う必要がある。特に、安全運転支援に関しては、路車間通信のみを用いると、路側機を経由した通信となるため、車両間で通信を行う場合に比べ、遅延が発生する。安全運転支援を想定したアプリケーションでは、即時性が要求されるため、車両同士で情報の交換を行う車車間通信が必要となる。さら

に、交通管理の最適化を実現するために、道路上のセンサや車両から収集した交通情報を、周辺車両に配信するといった利用が考えられている。

1.3 研究目的

携帯電話網や路側機を用いて一度情報を集約してから配送するアプリケーションでは、情報伝播の遅延が生じるため、リアルタイム情報を取得できない問題がある。このような環境を克服するために、車車間通信を利用して情報伝播を行うことが考えられる。車車間での情報伝播を利用したアプリケーションとして、車両アドホックネットワークを用いたすれ違い通信による情報共有が挙げられる。一般に、対向車両とのすれ違い通信を用いることによって、後方の車両へ先行車両の持つ情報を伝播させることができる。図1のように対向車両を介した情報伝播によって、通信範囲に存在しない先行車両が得た情報を後続車両が取得できるため、後続車両は事前に先行経路の道路状況を知ることができる。従って、対向車両から取得できる情報を基にして、交通事故や渋滞が発生している道路を回避して走行することが可能となる。しかしながら、対向車両とのすれ違い通信を利用したアプリケーションでは、車車間のすれ違いにおける限られた通信機会を効率的に利用することが課題と言える。対向車両とのすれ違い時のメッセージ転送効率を考慮しない場合、結果として伝播効率の低下に伴う情報損失を生じることになる。そこで本稿では、車車間でのすれ違い通信における効率的な情報伝播を目指し、地理位置と走行軌跡の類似性に基づく車両クラスタリング手法を提案する。車両クラスタリングを利用することで、高い情報到達性と帯域利用効率の両立を実現することを目指す。

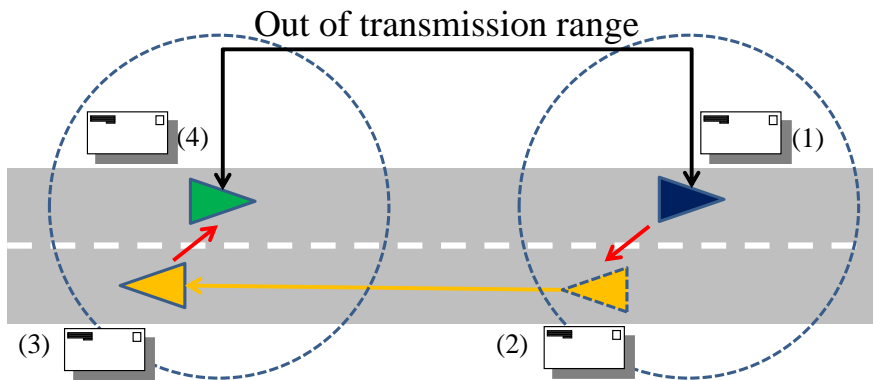


図 1 すれ違い通信を利用したメッセージ配送

2. 関連研究

本章では、車車間での情報共有サービスについて問題点を指摘し、DTN 環境で利用可能な既存ルーティング手法について紹介し、車車間通信への適用性について検討する。さらに、車車間通信における周辺車両との協調を目的とした既存研究に関して説明する。

2.1 既存の交通情報配信サービス

ここでは、現在実用化されている交通情報配信サービスの例を取り上げ、その特徴を紹介し、解決されるべき課題を指摘する。

2.1.1 VICS

日本の主要道路では、交通情報の配信サービスが提供されている。代表的なサービスに VICS (Vehicle Information and Communication System) がある。VICS は、道路管理者や都道府県警察がセンサを用いて収集した交通データをセンタへ送信し、センタが交通情報をビーコンや FM 多重放送を介してドライバーへ提供するサービスである。ドライバーはセンタが配信する交通情報を利用することにより、事故が起きている道路や混雑している道路、さらに目的地までの所要時

間を知ることができる。しかしながら、VICIS では一度センタが全ての交通データを収集しなければならず、交通データを集計してから交通情報を配信するまでにタイムラグが生じる。さらに、多くのユーザが交通情報に基づいて経路選択を行うと、車両の少ない道路に車両が集中してしまい、渋滞が発生する可能性があることが指摘されている [6]。

2.1.2 Google Map

Google Map は、Google Inc. がインターネットを通して提供している地図サービスであり、各種携帯端末からセンサ情報を収集することで交通情報等の提供を実現する。Google への情報提供に同意した利用者が所持する端末の現在地とその速度を定期的にセンタに収集し、収集した情報を解析した上で Google Maps の道路地図上にマッピングする。多数の端末から収集した情報を総合的に判断することで、渋滞情報を生成していることから、多くの端末が通過する道路、すなわち高速道路や国道などの主要道路に関する情報ほど提供される精度が高い傾向がある。

2.1.3 既存の交通情報配信の課題

渋滞情報の共有に関連する既存の研究およびサービスを挙げ、それらの目的とその特徴を述べた。VICIS は道路上に設置したセンサや送信機を利用するため、対応する道路を増やすためには多額のコストが必要となる。Google Maps の渋滞情報提供機能は、スマートフォンから収集した情報を利用するため、通行量が主要道に比べ相対的に少なく、道路情報の精度が低くなる。

2.2 アドホックネットワークにおける Geocast 手法

車両アドホックネットワークでは、車両の移動に伴いネットワークトポロジが頻繁に変化することから、ネットワークのトポロジを用いた従来のアドホックネットワークで利用される制御方式ではなく、端末の位置情報を利用した配信方法が

注目されている。例として、配信地域を設定することで受信対象を選択し、特定の場所に存在する端末だけに情報を配信することが可能となる。ここでは、アドホックネットワークにおける Geocast 手法について、その特徴を述べる。

2.2.1 フラッディングベース Geocast

フラッディングベースは、情報を受信したノードが近隣ノードに対してブロードキャストを行うことで、周辺ノードを介して情報を配信する手法である。代表的なフラッディングベース手法を以下に示す。

Location Based Multicast (LBM)

Location Based Multicast(LBM)[7] は、パケットを配信するエリアを指定して、フラッディングを行う手法である。送信者は自身の現在位置と配信エリアとを含む最小長方形をフォワーディングゾーンと定義し、パケットを送信する。パケットを受信したノードは自身の現在位置を確認し、現在位置がフォワーディングゾーンに含まれていれば、そのノードはフラッディングを行う。現在位置がフォワーディングゾーンに含まれない場合、届いたパケットを破棄する。この手順を繰り返して、配信エリア内のノードまでパケットを配信する。LBM を用いた配信ではパケットの到達性が高いが、通信帯域を大量に消費する問題もある。

GeoGRID

GeoGRID[8] は、2次元グリッドを用いてパケットを転送する手法である。各ノードは予め、現在位置を交換することで位置関係を把握し、グリッドの中央に最も近いノードがゲートウェイノードとして選出される。ゲートウェイノードは転送を行い、非ゲートウェイノードは転送を行わない。GeoGRID ではさらに、転送を行うノードを制限するため、フォワーディングゾーンが利用される。このフォワーディングゾーンは、フォワーディングゾーン外におけるゲートウェイノードへの転送を防止するために用いられる。GeoGRID を用いたパケット転送を図2に示す。送信者は最初にフォワーディングゾーンを決定し、パケットを全ての近隣ノードへと転送する。フォワーディン

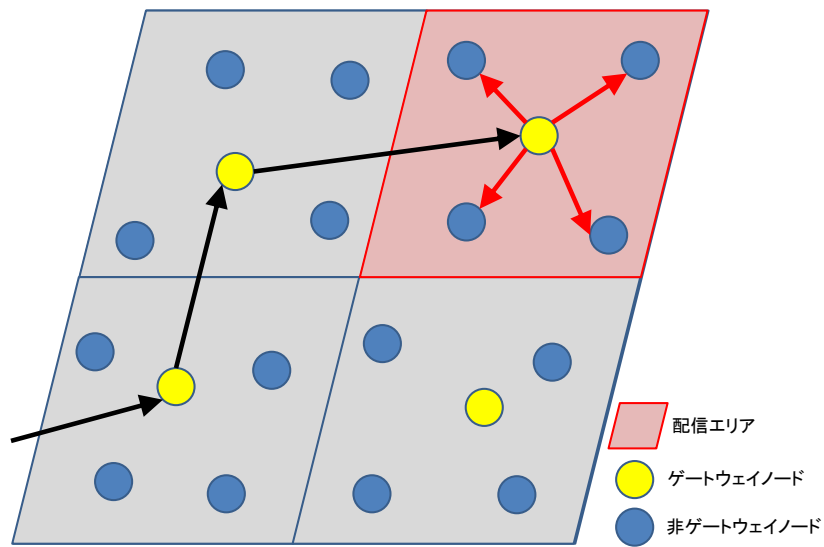


図 2 GeoGRID を用いた Geocast の一例

グゾーンに存在しないノード及び非ゲートウェイノードは，受信したパケットを破棄する．配信エリア内のノードは，ゲートウェイノード，非ゲートウェイノード共にパケットを転送する．グリッドを利用することにより，パケット転送を行うノードを削減することが可能となるが，グリッド構築のためのコストが必要となる．さらに，このグリッドを構築する際，その大きさは Geocast の性能を決定する要因となり得る．

2.2.2 ルーティングベース Geocast

ルーティングベースの Geocast では，ユニキャストを用いて配信エリアにパケットが転送される．代表的なルーティングベースの Geocast 手法を以下に示す．

GeoTORA

GeoTORA[10] は，TORA[9] を用いた Geocast プロトコルである．GeoTORA では，ユニキャストを利用した手法であり，端末のグループに同一のアドレスを割り当てることで，グループ内のいずれかの端末へとパケットを転送する．

Geometry-driven Geocasting Protocol (GGP)

GGP[11] は、複数のエリアに対して効率的な Geocast を実現する手法である。図3に示すように、フェルマー点を利用したツリーを形成する。なお、フェルマー点は三角形の3つの頂点からの距離の合計が最小となる点である。配信エリアが2つある場合、送信者は現在位置と各配信エリアの中心に対するフェルマー点を算出し、算出されたフェルマー点に対し、送信者よりも目的地端末に近い端末を選択して行われる転送(グリーディフォワードイング)を行う。パケットを受け取ったノードは現在位置を確認し、自身よりフェルマー点に近いノードが存在すればそのノードが各配信エリアへグリーディフォワードイングを行う。配信エリアが3つの場合、まず2つの任意の配信エリアを選択し、送信者の現在位置とのフェルマー点を算出する。これを第一フェルマー点とし、この第一フェルマー点と残りの3つ目の配信エリア、そして送信者の現在位置からフェルマー点を算出し、第二フェルマー点とする。送信者は第二フェルマー点に対してグリーディフォワードを行い、第二フェルマー点に最も近いノードがパケットを受信した際、3つ目の配信エリアと第一フェルマー点に対してグリーディフォワードイングを行う。さらに、このパケットを受信した第一フェルマー点に最も近いノードは、第一フェルマー点の算出に用いた2つの配信エリアに対してグリーディフォワードイングを行う。このように、配信エリア数が4以上の場合でも適用可能であるが、正常に機能しない場合があることが示されている。

Geographic-Forwarding-Perimeter-Geocast (GFPG)

従来の Geocast 手法では、何らかの方法で配信エリアに到達したパケットはジオフラッディングされることを前提としていた。しかしながら、ノードの密度が小さくなる場合、パケットの到達率が低下する問題があった。そこで、配信エリアにおいて転送経路が存在しない場合、配信エリア外のノードを利用してパケットを転送する方式 Geographic-Forwarding-Perimeter-Geocast (GFPG) が提案されている。GFPG では、配信エリアにおいてフラッディングを行うだけでなく、最も外側のノードを利用した迂回経路構築を行う

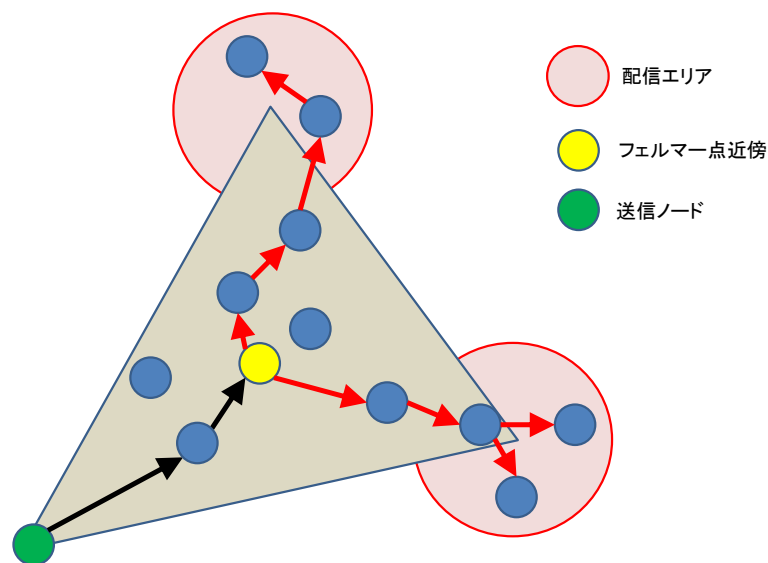


図 3 フェルマー点に基づく GGP を用いた Geocast

ことでパケットの到達性を向上させる。

2.2.3 Geocast 手法による交通情報伝播

特定の地理位置に対して情報を伝播する場合、フラッディングベース、またはルーティングベースの Geocast を用いることは有効である。しかしながら、突発的に発生した事故や渋滞の情報を不特定多数へ伝播するシナリオでは、特定の場所への伝播を目的としないことが多いため、別の手段が必要となる。さらに、車両密度が不均一である場合、無線リンクが断続的となり、情報伝播効率が低下するといった問題もある。

2.3 Delay Tolerant Network (DTN)

車車間通信を利用して情報伝播を行う場合、車両密度が不均一であるためにエンドツーエンドの通信経路が存在しない場合がある。このような環境を克服するアーキテクチャとして Delay Tolerant Network (DTN)[12] があり、DTN を車車

間通信に利用することにより，広域での情報伝播が可能となる．DTN は，アドホックネットワークの1つと見なすことができるが，これまでのネットワーク手法で扱うことが困難な以下の4状態への解決を目指して提案されている．

断続的な接続性

ノード間の位置関係の変化や通信可能距離などの制約によって，ネットワークを構成するためのリンクが断続的に利用不可能となり，ネットワークが分断されるためエンドノード間で通信パスを構築できない状態．

遅延の揺らぎ

リンクの物理的長さの増加が媒体の伝搬する速さを上回るために生じるような伝搬遅延により，エンドノード間で生じる遅延予測が困難となる状態．

非対称な転送速度

片方向のみのリンクや，非対称な転送速度を持つリンクにより，ノード間で一方方向の情報伝達しか行えない状態．

高いエラー発生率

無線リンクなどのエラー発生が避けられないリンクにおいて，ホップ数増加に伴い，エンドノード間での信頼性保証が困難となる状態．

2.4 DTN アーキテクチャ

DTN を用いたメッセージ配送については多くの研究がなされているが，初めにメッセージ配送の概要を述べる．DTN におけるメッセージ配送は，断続的な接続性に耐える必要があるため，中継ノードは受信したメッセージの全部あるいは一部を自身の記憶装置内に蓄積し，次の中継先ノードとのリンクが利用可能な時(ここではコンタクトと定義する)に転送する，ストア・アンド・フォワード方式によって転送を行う．

DTN のアーキテクチャは，ストア・アンド・フォワード方式の通信を行うバンドル層を構築する．バンドル層はトランスポート層上へのオーバーレイによって構築される．バンドル層において，扱われるメッセージはバンドルと呼ばれ，バ

ンドルは任意の長さのデータとバンドル層のヘッダから構成される。すなわち、バンドル層の役割は、ストア・アンド・フォワード方式によりエンドノード間でバンドルを送り届けることである。バンドル層がストア・アンド・フォワード方式の通信を行う層を提供することによって、トランスポート層以下の各層はそのネットワークメディアの特性に応じた通信方式を用いることができる。

2.5 DTN ルーティング手法の分類

DTN ルーティングは、そのアプローチやルーティングに用いる情報、ノードへの要求から Oracle 型、Model-based 型、Epidemic 型、Estimation 型、Coding 型、Node Movement 型の 6 種類に分類することができる [14]。以下に、それぞれの特徴を示す。

Oracle 型

何らかの知見によってコンタクトや遅延がほぼ確実に予測できる場合、その知見から経路計算を行う手法である。衛星との通信や、惑星間通信などのコンタクト時刻やその遅延が、軌道計算から明らかとなる場合における利用が想定されている。ルーティングの例として、バンドル層実装の一つである Inter-planetary Overlay Network (ION) における Contact Graph Routing が挙げられる。

Model-Based 型

群衆行動や社会生活など全体としてモデル化が可能な環境を想定し、モデルを元にルーティングを行う手法である。Model-Based 型ルーティングの例として、Model Based Routing がある。

Estimation 型

近隣ノードとの情報交換を行うことで、現在のネットワークの状況を推測し、メッセージが宛先に到達する見込みが高くなるような制御を行う手法である。この型の代表的な手法として ProPHET[15] がある。

Coding 型

Erasure コーディングやネットワークコーディングなどの符号化手法によりメッセージの伝達を行う手法である。

Node Movement 型

無人探査ロボットの間通信などを想定し、ノードの積極的な移動によってメッセージの運搬を行う手法である。Node Movement 型の例として、MV や Ferry Initiated Message Ferry などが挙げられる。

Epidemic 型

モバイルセンサーネットワークや災害時ネットワークなど、ネットワークの状況が明らかでない場合を想定するルーティング手法である。Epidemic 型の例として、Epidemic[16] や MaxProp[18] などが挙げられる。

2.6 DTN ルーティング手法の車車間通信への利用

本節では、車車間通信への適用が可能な DTN ルーティング手法について検討する。車車間通信における想定環境では、コンタクトやトラフィックの予測は困難なため Oracle 型や Model-Based 型、Estimation 型は適用できない。一方、常に通信範囲内に多数のノードが含まれる環境を想定しないため、Coding 型の手法も適用できない。さらに、ネットワークの要求に基づくノードの制御も困難なため、Node Movement 型の手法も適用できない。従って、想定アプリケーションへの DTN ルーティング手法の適用を考えた場合、Epidemic 型のルーティングが最も適すると判断できる。そこで、Epidemic 型の代表的なルーティングに関して、車車間通信への適用性を検討する。

2.6.1 Epidemic routing

Epidemic 型で最もシンプルなルーティング手法として、2000 年に vahdat[16] らによって提案された Epidemic がある。Epidemic ルーティングでは、コンタクトのあったノードの間で全てのメッセージを複製し、ノードが受信したメッセー

ジを全て蓄積することで、メッセージの複製がネットワーク中に拡散し、宛先へメッセージが届けられる。Epidemic 型のルーティングでは、そのメッセージの複製を持たないノード全てを転送先とする。コンタクトの際の通信帯域が不十分な場合を考慮していないため、転送メッセージの選択機構がなく、単純な First-In-First-Out (FIFO) の原則により、ノードが受信した時刻の古いメッセージより転送を行う。ただし、現在コンタクトしているノードを宛先とするメッセージは優先して転送を行う。保持するメッセージをコンタクトしたノード全てに複製して転送するため、伝播効率は高いが通信帯域を逼迫させる可能性がある。さらに、蓄積可能なメッセージ数はバッファ容量に依存し、バッファ容量の制限を超えるメッセージは蓄積されず破棄される。

2.6.2 Spray and Wait routing

Epidemic ルーティングで問題となる通信帯域の逼迫を防ぐため、2005 年に Spyropoulos らにより Spray and Wait[17] という手法が提案されている。Spray and Wait では、転送開始時にソースノードがメッセージ複製回数の上限を設定して複製し、転送を行う。Spray and Wait によるルーティングでは、メッセージは 2 つの段階を経て転送される。ソースノードで生成されたメッセージは、ある整数 L が与えられる。そして、各ノードによってメッセージはメッセージ複製数をメッセージの生成時に与えた L 回までに制限される。この手法では L を小さく設定することにより通信帯域の逼迫を事前に防ぐことが可能となるが、ノード密度がある程度高い場合、複製されたメッセージが局所的に拡散し、情報伝播効率が低下することになる。

2.6.3 MaxProp routing

2006 年に Burgess らによって MaxProp[18] が提案されている。MaxProp はメッセージの転送先選択を行わず、転送メッセージの選択と破棄メッセージの選択によりメッセージの宛先への到達率向上を狙う手法である。各ノードは保持するメッセージに優先順位を付け、ストレージの容量が不足した場合は優先順位の低

いメッセージから破棄を行い、ノードとコンタクトした際は優先順位の高いメッセージから順に複製を行う。MaxPropにおけるメッセージ優先度は、次のように算出される。まず、MaxPropでは各メッセージがこれまでに複製された回数 hop を記録しており、 $hop < th$ となるメッセージに関して、 hop の少ない順に高い優先度を与える。ここで、 th はノードの過去のコンタクトにおける平均帯域と現在のストレージの使用量から求められる閾値である。 $hop \geq th$ のメッセージに関して、メッセージの宛先へのパスコスト c を求め、パスコストの小さい順にメッセージ優先度を与える。ここで、 c は過去のコンタクト履歴に基づき求められる値である。

次に th の計算手順を述べる。各ノードは過去のコンタクトの平均帯域 x とストレージに蓄積されているメッセージの合計データ容量 b を用いて、容量 p を以下のように求める。

$$p = \begin{cases} x & (x < b/2) \\ \min(x, b - x) & (b/2 \leq x < b) \\ 0 & (b \leq x) \end{cases} \quad (1)$$

$p > 0$ ならば $i = 0$ から順に i の値を 1 ずつ加算し $hop < i$ となるメッセージの合計容量が p を超える最も小さい i を th と見なす。

c の計算手順を述べる。各ノードは、ノード i が存在を知っているノードの集合 s 中のすべてのノード j について、値 f_j^i を与える。まず、すべてのノードについて $f_j^i = 1/(|s| - 1)$ が初期値として与えられる。ノード i がノード j とコンタクトした際に f_j^i は 1 加算され、 f^i の値の合計が 1 となるよう正規化される。さらに、お互いの保持する f を交換し、各要素の更新時刻を比較し、より新しい要素を基に新たな f へと更新する。とする。 $1 - f_j^i$ をノード i からノード j へのリンクコストとし、メッセージの宛先 d についてノード i からの最小のパスコストを求め、その値を c とする。

表 1 Epidemic 型ルーティング

	特徴	到達性	帯域利用
Epidemic	全てのノードに転送	○	×
Spray and Wait	複製回数を制限	×	○
MaxProp	メッセージ優先度を設定	△	○

2.6.4 Epidemic 型ルーティングの比較

ここまで Epidemic 型の代表的なルーティングに関して、車車間通信への適用性を検討してきたが、Epidemic, Spray and Wait, MaxProp について、それぞれの特徴と、情報の到達性、帯域利用効率についてまとめる（表 1）。Epidemic では全てのノードにメッセージを転送するため、高い到達性があるが、帯域利用効率は低い。Spray and Wait では、複製回数を制限するため、到達性は低くなるが、通信帯域を逼迫させないルーティングが可能である。MaxProp ではメッセージ優先度を決定する機構を持ち、通信帯域を逼迫させない状態で、ある程度の到達性を保つことができる。

2.7 DTN ルーティング手法の性能評価

研究に取り組むにあたり、既存の DTN ルーティング手法を用いた車車間通信を利用した情報伝播をシミュレーションした。シミュレーションは DTN シミュレータ The ONE Simulator[29] を用いて行った。The ONE Simulator に付属するマップベースのシナリオとして、図 4 に示す Helsinki City Scenario (HCS) を用いた。HCS では、ヘルシンキ近郊およそ 4km 四方の道路地図において歩行者や車両、路面電車をノードとした DTN シミュレーションが可能である。ここでは、歩行者や路面電車は考慮せず、車両のみから構成されるネットワークを定義し、事前実験を行った。各ノードは、地図上のランダムな 2 点を出発地と目的地として事前に設定し、定められた範囲の速度で目的地まで移動し、再度目的地をランダムに選出して移動を開始する。なお、各ノードは Shortest Path mobility model に従い移動を行うものとする。Shortest Path mobility model では、ノード

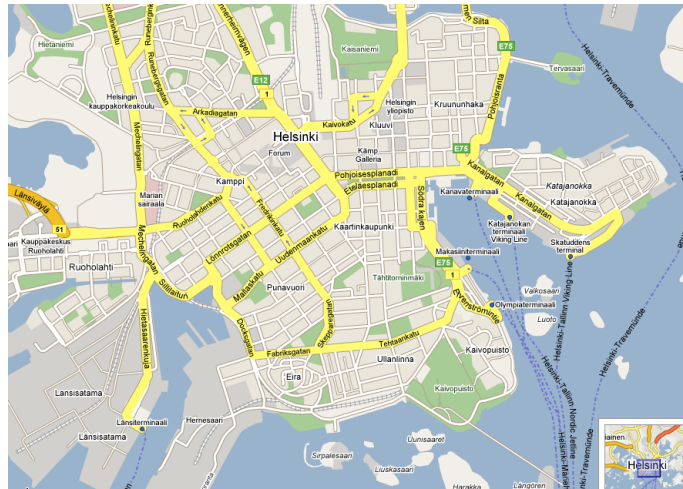


図 4 Helsinki City Scenario(HCS)におけるマップ

は道路地図上の任意の交差点を目的地として選び最短移動距離となる経路を一定速度で移動する。

以上のシナリオにおいて、DTN ルーティング手法の性能評価を行った。車両は走行中に、周辺の交通状況をセンシングし、交通情報をメッセージとして生成すると仮定する。生成されたメッセージを、ランダムに選出した他車両に向けて転送を行い、このメッセージの到達性について検証を行った。ここで、すれ違う車両に対して効率的にメッセージ配送を実現できるかを確認するため、メッセージサイズの増加に伴うメッセージ到達率の推移を検証した。なお、メッセージ到達率とは、生成されたメッセージ数の中で、目的車両に到達したメッセージ数の割合と定義する。今回は指標として、MaxProp におけるメッセージ到達率を図 5 に示した。事前実験の結果、既存 DTN 手法はいずれもメッセージサイズを増加させた場合、コンタクト時に転送できるメッセージ数が制限されるためにメッセージ到達率が低下する現象が見られた。これを改善するため、周辺車両との協調により、すれ違い時の通信を効率化し、伝播効率を向上させることが必要となる。

2.8 クラスタリングにおける既存手法

DTN ルーティング手法を車車間通信環境に利用することを想定した場合、車両の高い移動性や無線通信範囲の制約から、通信可能時間が制限されるため、限られた通信帯域を効率的に利用できない可能性がある。車車間通信においては無線通信が用いられるが、いずれの無線通信技術においても常に十分な通信速度や安定した接続性が得られるとは限らない。既存の DTN ルーティング手法のように頻繁な通信や大容量パケットのやりとりは無線帯域の占有や輻輳を引き起こす可能性もある。緊急性の高い情報とそうでない情報は異なるチャンネルで扱われる場合、緊急性の低い通信が緊急性の高い通信の妨げとなる恐れはない。しかしながら、多数の緊急性の低いアプリケーションが同時に動作している場合、実際に使用できる帯域は少なくなる。そのため、通信量は十分に小さいことが望ましい。そこで、車車間通信において効率的な情報伝播のために、車両の分類や近隣

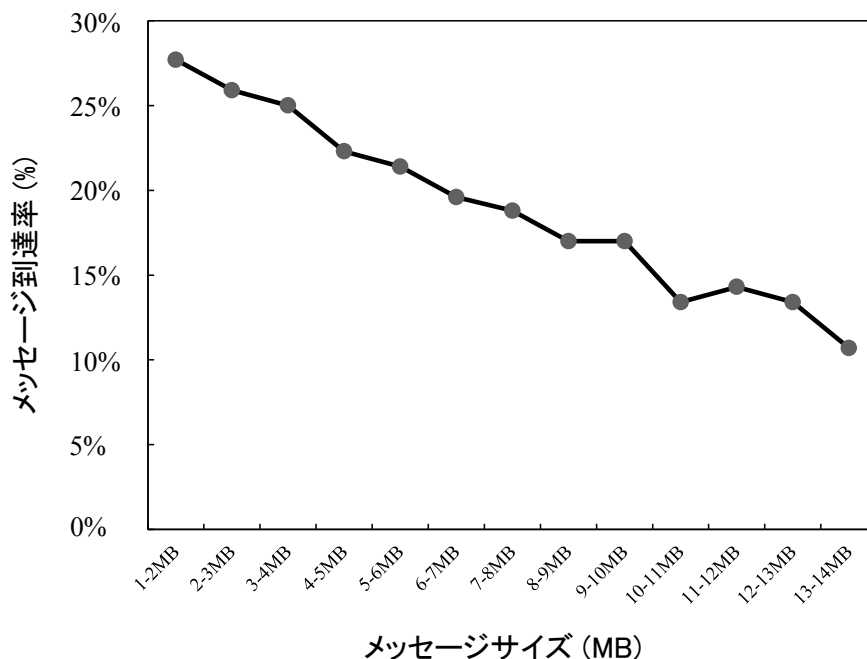


図 5 MaxProp routing におけるメッセージサイズの増加に伴うメッセージ到達率の推移

車両との協調を行うことでメッセージ到達性や通信帯域利用効率を上げる手法が研究されている。

2.8.1 NEAT: Road Network Aware Trajectory Clustering

Han らによる研究 [19] では、車両の走行軌跡データを地図上にクラスタリングすることにより、走行軌跡の傾向を可視化する手法として Road Network Aware Trajectory Clustering (NEAT) が提案されている。これは車両軌跡を用いることで車両を分類するものであるが、地図データを利用することに加え、オフラインでの利用を目的としたものであるため、車車間での情報伝播に直接利用できない。NEAT では、各車両から収集された軌跡データを map-matching した上で、各軌跡を交差点ごとに分割した t-fragment を生成する。ここで、各 t-fragment は、各交差点間のセグメントに一意に割り当てられた segment id を持つ。この segment id をキーとして同一 segment id を持つ t-fragment をクラスタリングし、それを連結することで最終的に一連の大きなクラスタを生成する仕組みである。

2.8.2 Dual-Locality Ratio (DLR)

Li らによる研究 [23] では、地理位置と走行軌跡を利用して車両をクラスタリングする手法が検討されている。DLR では、車両移動の空間的局所性と時間的局所性を扱い、モビリティの相関を定量化する。Li らは、空間的局所性は位置と速度、時間的局所性は社会活動のための移動スケジュール（ある場所へ移動する頻度や順序）によって特徴付けられると仮定している。この空間的局所性と時間的局所性を組み合わせた新たな指標として、Dual-Locality Ratio (DLR) が提案されている。この手法は DTN 環境に適用できる手法であるが、バスやタクシーといった特殊な性質を持つ車両に限定して利用が検証されており、一般的な車両モデルに適用されていない。

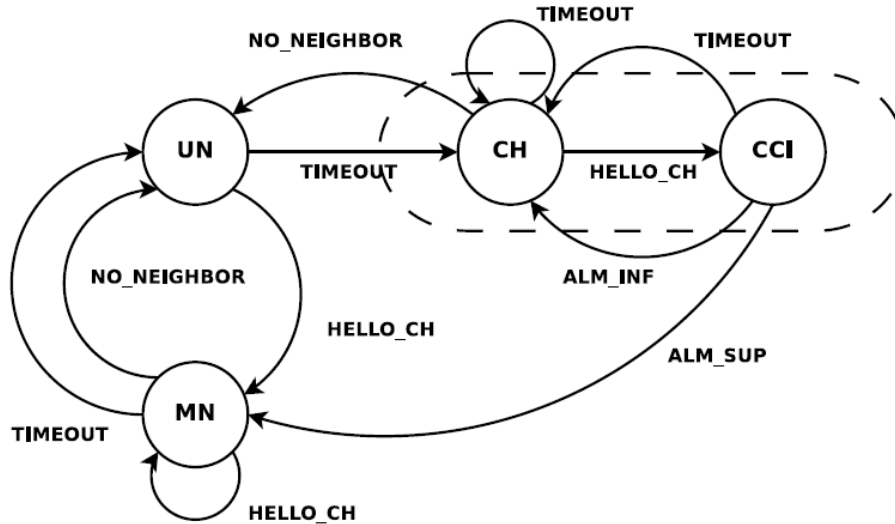


図 6 コンテンション方式を利用した状態遷移

2.8.3 Aggregate Local Mobility (ALM)

Souza らによって、クラスタの持続時間を延長することを目的としたビーコンベースのクラスタリングアルゴリズムとして Aggregate Local Mobility (ALM) が提案されている [20]. ALM ではクラスタの再編成時に利用するローカルモビリティの新たな集約基準を提案しているが、クラスタヘッドが短時間の間に遭遇した際に頻繁なクラスタの再組織を引き起こさないように、コンテンション方式を採用している. (図6)

ノードは無線チャネルを用いて、定期的にその存在をアナウンスする hello パケットを受信する UN 状態で起動する. また, CH がその通信範囲内に現れるまで待機するタイマーを設定する. CH から Hello メッセージを受信すると, ノードは直ちに MN に自身の状態を変化させる. タイムアウトまで CH から Hello メッセージがない場合 (CH が近隣にいない場合), または近隣ノードがいない場合に MN 状態のノードはその状態を遷移する. CH 状態のノードは, 他の CH からパケットを受信しない場合, 現在の状態で継続する. 近隣ノードが存在しない (HELLO

タイムアウト) 状態を検出した場合, CH 状態から UN 状態に遷移する. ここで, 他の CH からパケットを受信した際, CH はコンテンションモード (CCI) に遷移する. これは, 同じ CH から別のパケットを受信したかどうかを確認するため, 一定時間待機することを意味する. コンテンションタイマーが切れる前に, 同じ CH から異なるパケットが到達しない場合, 最初に届いたメッセージは単純に無視され, CH はその状態を継続する. CH から Hello メッセージが再び届いた場合, ノードは CH を継続するか, またはその状態を変更するかどうかを決定しなければならない. この決定は, 次に述べる ALM の重みに基づく.

$$M_Y^{rel}(X) = \log \frac{Dist_{previous}}{Dist_{current}} \quad (2)$$

$$M_Y = \text{var}(M_Y^{rel}(X_i)) \quad (3)$$

ALM の値は近隣ノードとの相対移動度を基にして計算する. 具体的には, ノード Y のノード X に対する相対移動度は (2) 式である. さらに ALM は, (3) 式として, 隣接ノード X_j に対する相対移動度の分散として定義される. すなわち, 低い ALM の値を持つノードは CH 状態を変更せず, 高い ALM の値を持つノードは不安定な CH と見なし MN に変更する. この方式により, 安定的なクラスタの形成を実現しているが, すれ違う車同士でクラスタを形成してしまうといった課題があり, 車車間通信を用いた情報伝播に適するものではない.

2.8.4 QuickSilver

Crepaldi ら [21] は, QuickSilver という手法を提案している. QuickSilver におけるアーキテクチャでは, 直交チャネルを使用して同時通信をサポートするために 2 つの無線インタフェースを利用する. この 2 つの無線インタフェースは, クラスタ内の接続性を維持し, 同時にクラスタ間のコンタクトを可能にするものである. QuickSilver のクラスタ管理は, 安定したリンクを持つ近隣ノードを検出し, 各ノードにクラスタメンバーシップリスト (CML) を構築する. QuickSilver では, 長時間の安定した通信が可能となる類似した速度かつ同じ方向に走行するノード間でクラスタを形成する. クラスタメンバーシップは, 連続的な結合と解

離によって、非常に動的である。クラスタの一貫性を維持することは、各ノード内に最新の CML を維持するための仕組みが必要であり、一定量のオーバーヘッドとなるため、各ノードは独自に CML を維持することで、分散管理を行う。そして、クラスタ間通信用の無線インタフェースを使用し、異なる方向に移動する他のクラスタを探索する。QuickSilver のシステムを図 7 に示す。

2.8.5 Vehicular Multi-hop algorithm for Stable Clustering (VMaSC)

Ucar ら [22] によって、安定したクラスタリングのためのアルゴリズム Vehicular Multi-hop algorithm for Stable Clustering (VMaSC) が提案されている。このクラスタリング手法は、周辺車両との協調によって車両アドホックネットワークのトポロジにおける急速な変化に対処する効果的なメカニズムを提供する。類似の移動パターンを持つ車両を選択することによって、安定したクラスタを構築することがクラスタリングアルゴリズムのオーバーヘッドを減少させるのに不可欠であるが、VMaSC では、マルチホップを介して隣接ノード間の速度差を計算し、最も少ないモビリティを持つノードをクラスタヘッドとして選択する。(4) 式のように、隣接ノードの数を n とし、時刻 t における自身の速度を $S_{current}$, i 番目の

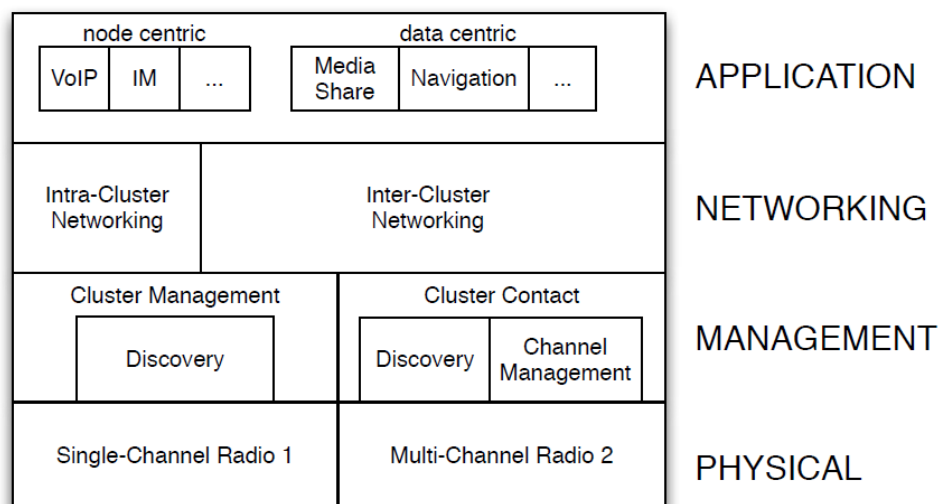


図 7 QuickSilver におけるシステムアーキテクチャ

隣接ノードの速度を S_i として、指標として用いる相対速度平均は (4) 式で与えられる。

$$AVGREL_{speed} = \frac{\sum_{i=1}^n |S_{current}(t) - S_i(t)|}{n} \quad (4)$$

このようなクラスタヘッド選出手法には、先行研究としてパケット遅延を利用する手法があるが、シミュレータを用いた実験により、クラスタヘッド持続時間やクラスタメンバ持続時間、クラスタヘッドの変更回数の観点から既存手法よりも優れていることが示されている。

2.8.6 FairAD

Ramon らによる研究 [24] では、近隣車両間で通信路を分配することで、周辺車両で公平な通信帯域を利用する。Ramon らの手法では、通信帯域の利用効率を高め、メッセージの転送効率の向上を実現している。しかしながら、この通信路分配ではメッセージ優先度が考慮されていないだけでなく、すれ違い通信時の通信帯域利用効率についても考慮されていない問題がある。

2.8.7 CASCADE

車車間通信を用いた交通情報共有のためのクラスタリング手法として、CASCADE[25] が挙げられる。交通情報を共有する際、ある道路やそれに付随する事故情報、渋滞情報などを集約し、それを車車間で共有する手法が考えられている。CASCADE では、既存の交通情報集約手法では情報の精度が損なわれることを指摘し、これを解決するために、自車両の前方空間内に存在する車両をクラスタリングし、クラスタごとに情報を集約する手法を提案している。この手法では、集約された情報に対して、新たに情報を追加することが可能となる。

2.8.8 渋滞情報共有のためのクラスタリング

金丸ら [26] によって、渋滞の原因をその渋滞車列に属する車両で共有するためのクラスタリングが提案されている。提案手法では軌跡を用いた車列の識別および地理位置を用いた先頭車列の識別を行う。これにより、同一車列の車両がクラスタ化され、クラスタ内での渋滞情報共有が実現される。さらに、先頭車両の識別を実現することにより、渋滞先頭車両との間で通信を確立するために必要な情報を得ることが可能になる。

2.9 クラスタリング既存手法のまとめ

これまで、車両を何らかの指標を用いてクラスタリングする研究について述べてきたが、車両アドホックネットワークのように、安定なネットワークに安定した構造を導入する手法として、モバイルノードをクラスタとして自己組織化することは重要である。

NEAT では、車両の特性を分類するために、走行軌跡に着眼しておいるが、オフラインでの利用を目的としたものであるため、リアルタイムに車車間で行われる情報伝播に直接利用することを想定しておらず、DTN 環境に適用することはできない。DLR では、DTN 環境に適用できる手法であるが、バスやタクシーといった特殊な性質を持つ車両に限定した利用を想定しており、一般的な車両移動モデルに適用されない。ALM では、地理的に近い車両でクラスタを編成し、その中で安定したクラスタヘッドを選出するメカニズムを提供するが、情報の伝播性能について議論はされていない。QuickSilver では、移動の異なる車両群での情報交換に着目し、そのアーキテクチャを提案しているが、リンクの安定性に重点を置き、情報の伝播性能について議論はされていない。VMaSC では、類似の移動パターンを持つ車両を選択することで、マルチホップの安定したクラスタを構築することを実現するが、これもクラスタの安定性に着目し、情報の伝播に関して有効なクラスタリングではない。FairAD では、通信帯域の利用効率を高め、メッセージの転送効率の向上を実現しているが、通信路分配ではメッセージ優先度が考慮されていないだけでなく、すれ違い通信時の通信帯域利用効率について

も考慮されていない問題がある。CASCADEでは、情報の集約に着目したクラスタリングを行っており、それらの利用については言及されていない。金丸らの手法では、渋滞の原因をその渋滞車列に属する車両で共有するためのクラスタリングが提案されているが、DTN環境、すなわち渋滞車列外への情報伝播には適していない。従って、DTN環境において情報伝播を目的として、車両を効率的にクラスタリングする手法が必要である（表2）。

表2 クラスタリング既存研究のまとめ

手法	Metric	到達性	帯域利用	DTN適用
NEAT[19]	走行軌跡	-	×	×
DLR[23]	地理位置, 走行軌跡	○	×	×
ALM[20]	地理位置	-	○	○
QuickSilver[21]	地理位置, 進行方向	-	○	○
VMaSC[22]	相対移動度	-	-	○
FairAD[24]	地理位置, 進行方向	×	○	○
CASCADE[25]	自車両の前方	-	-	-
金丸ら [26]	地理位置, 走行軌跡	○	○	×

3. DTNルーティングのための車両クラスタリング手法

本章では、提案する車車間のすれ違い通信の効率化を目的とした車両クラスタリング手法について説明する。

3.1 想定環境

位置測位のために Global Positioning System (GPS) 受信機を搭載し、精度は水平垂直共に 2m 程度が実現されているものとする。この精度は民生用 GPS 受信機であっても準天頂衛星による補完信号及び補強信号を用いることで、十分に満たすことができる範囲である [27]。さらに、クラスタリングのためのメッセージの送受信、および交通情報の共有を行うために、双方向通信に対応した同一規格に準拠する機器を搭載しているものとする。提案手法は特定の通信方式に依存しないが、本論文では標準化の段階にある車車間通信の通信規格のひとつである ITS FORUM RC-006[30] を想定し、700MHz の周波数帯を想定した通信可能距離 100m、通信速度 10Mbps とした。しかしながら、前述の通り提案手法は特定の通信方式に依存しないことから、他の通信方式によって代替可能である。

3.2 提案手法の目的

本研究では、車両をクラスタリングすることによって、周辺車両との協調を図る手法を提案する。提案手法では、車両クラスタリングを用いて通信帯域利用の効率化とメッセージ到達性の向上を実現する。具体的には、すれ違い通信時にクラスタ間通信を利用してメッセージ転送の効率化を実現する。

3.3 クラスタ管理

クラスタは各車両が表 3 のようにクラスタ管理テーブルを自律分散的に管理する。クラスタ管理テーブルは、周辺車両の ID について走行軌跡及び走行軌跡か

表 3 クラスタ管理テーブルの例

車両 ID	走行軌跡	クラスタ ID
Vehicle1	0000 - 0001 - 0002 - 0003	ClusterA
Vehicle2	0000 - 0001 - 0002 - 0003	ClusterA
Vehicle3	0006 - 0005 - 0004 - 0003	ClusterB

ら導かれるクラスタ ID を保持する。なお、各車両は走行軌跡が閾値より多く一致している車両を同一クラスタと識別する機構を備える。

このように、提案手法では各車両の軌跡の共通点を利用してクラスタ ID を与える。ここで軌跡とは、時刻ごとに記録される緯度・経度の組の列であるが、軌跡の比較照合を行う上で GPS に起因する問題が発生する。各車両が一定時間ごとに GPS 受信機で自車両の位置を測位し、それを記録することを考える。この時、同一道路上を走行する 2 車両であっても、それらの軌跡が一致する可能性は非常に低い。この理由は、測位タイミングが車両ごとに異なり、さらにアンテナ設置位置の差や測位誤差が存在するからである。従って、軌跡上の緯度・経度を単純に比較することで判定できない。この問題を解決するために、本提案では Quadkey[28] による緯度・経度の抽象化を行うことにより、抽象化された軌跡を比較する。

3.3.1 Quadkey を用いた地理的・階層的分割

Quadkey は、2次元座標である緯度・経度を 1次元の一意的な文字列で表現することを可能にする Geocoding 手法の一つである。Geocoding は地図を何らかの法則に従って分割した上で、分割された各メッシュに一意的な ID (メッシュID) を割り当て、各メッシュの領域に含まれる緯度・経度をメッシュID で抽象的に表現する。ここで、メッシュID は、あるメッシュの領域内に含まれるより抽象度の低いメッシュID のプレフィックスとなるよう設計される。これにより、メッシュの内包関係を単純な文字列の前方一致検索で知ることができる。さらに Quadkey では、地図中のある粒度における任意のメッシュは、そのメッシュを 4 分割した小さなメッシュを内包する階層構造を成す。このような地理的分割により、地球上

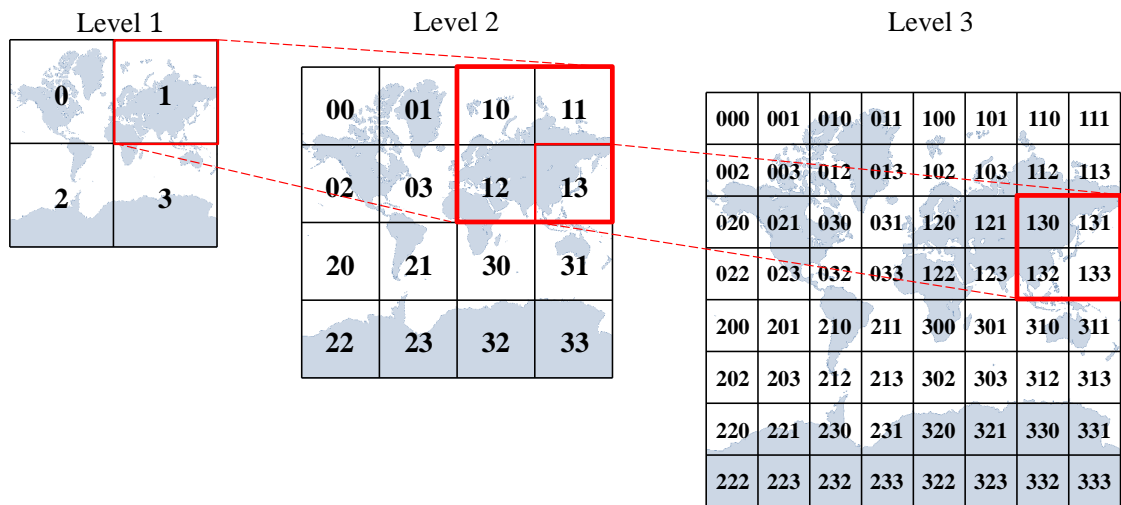


図 8 Quadkey の階層構造と包含関係

の任意の点を任意の抽象度で一意に表現することを可能にする (図 8)。

3.3.2 Quadkey を用いた軌跡の抽象化

前述したように, Quadkey は与えられた緯度・経度を任意の抽象度で抽象化し, 一意な文字列として出力する. これを利用し, 各車両の軌跡を同一の抽象度で抽象化した上で比較することにより, 類似軌跡を識別することが可能となる.

提案手法は, 2つの仮定の下で利用される. まず, 各車両は GPS 受信機などを備え, 緯度・経度を用いて現在の地理位置を高い精度で取得できるものとする. 次に, 各車両は軌跡の情報を内部記憶装置に記録する. この内部記憶装置を軌跡テーブルと定義する. 軌跡テーブルは, 時刻ごとに通過地点を記録するが, 軌跡は Quadkey の形式で抽象化されて記録される. Quadkey では, "Level of Detail" (LoD) と呼ばれる抽象度を選択することができる. Quadkey は次のようにして計算される. まず, $tileX$ と $tileY$ が式 (6) と (7) により導かれる.

$$S_{lat} = \sin(lat) \quad (5)$$

$$tileX = \left\lfloor \frac{lng + 180}{360} \times 2^l \right\rfloor \quad (6)$$

$$tileY = \left\lfloor 0.5 - \log \left(\frac{(1 + S_{lat}) / (1 - S_{lat})}{4\pi} \right) \times 2^l \right\rfloor \quad (7)$$

ここで、 lat は緯度、 lng は経度、 l は LoD を表す。高い l の値は、細かい粒度を表す。次に、Quadkey が (8) として計算される。

$$quadkey = \text{BASE4}((Y_{l-1}X_{l-1}Y_{l-2}X_{l-2}\dots Y_0X_0)_2) \quad (8)$$

ここで、各 X_n と Y_n はそれぞれ $tileX$ と $tileY$ における n 番目のビットを表し、 $\text{BASE4}()$ は 4 進数への変換関数を表す。緯度 lat において LoD を l とした場合のメッシュの一边の長さ l_e は (9) で求められる。

$$l_e = \frac{\cos(lat) \times C_e}{2^l} = \frac{\cos(lat) \times 2\pi \times 6378137}{2^l} [m] \quad (9)$$

ここで、 C_e は地球の外周の長さである。提案手法では LoD を 22 とし、これを *TrajectoryLevel* と定義し、軌跡テーブルに適用する。この *TrajectoryLevel* は、緯度 $\pm 35.0^\circ$ 付近に置いて各メッシュの 1 辺の長さがおよそ 7.8m となることを示しており、これは一般的な 2 車線道路の幅に合致するよう設定している。

Quadkey を用いたクラスタリングの概要を図 9 に示す。図では車両 $v1$, $v2$, $v3$, $v4$ が走行している。車両は一定以上の軌跡サンプルを記録するものとし、ここでは直前の 3 つのメッシュ ID を保持すると仮定している。図のような状況では、 $v1$ は 0003-0012-0013、 $v2$ は 0002-0003-0012、 $v3$ は 0012-0003-0002、 $v4$ は 0013-0012-0003 となる。このとき、事前に設定したある一定の閾値以上、軌跡として記録しているメッシュ ID に共通点が存在する場合、その車両を同一クラスタとみなす。このようにして、 $v1$ と $v2$ がクラスタ A として識別され、 $v3$ と $v4$ がクラスタ B として識別される。すなわち、地理的に近接する車両であっても、走行履歴に応じて異なるクラスタとして識別することが可能となる。実際には、クラスタ ID はメッシュ ID を連結したものとし、一意のクラスタ ID を保証する。

表 4 edge length of Quadkey

Level of Detail	the lengths of the edge [m]		
	$\pm 0^\circ$	$\pm 35^\circ$	$\pm 70^\circ$
1	20037508.34	16413765.92	6853231.47
2	10018754.17	8206882.96	3426615.74
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
19	76.44	62.61	26.14
20	38.22	31.31	13.07
21	19.11	15.65	6.54
22	9.55	7.83	3.27
23	4.78	3.91	1.63

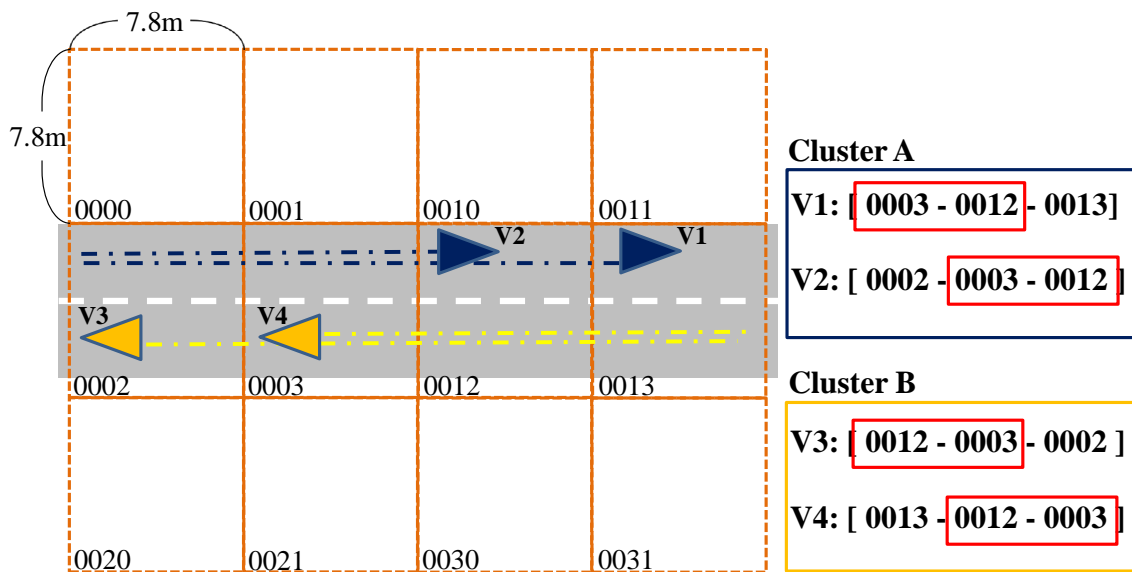


図 9 Identifying similar trajectories by Quadkey

3.4 軌跡の補間

走行中、各車両は常に自身の走行軌跡を記録する。定期的に GPS 受信機で緯度・経度を取得し、緯度・経度を Quadkey によって抽象化した軌跡サンプルと

して保存する。最新の軌跡サンプルを追加する際、前回の GPS 受信との間の時間差によって、連続したメッシュID が得られない場合がある。例として、車両が 50km/h で移動した場合、GPS の受信頻度である 1 秒間に 14m 移動することになるため、*TrajectoryLevel* におけるメッシュサイズを超えることが可能である。このような場合、最新の軌跡サンプルをリストに追加する前に、中間のサンプルを補間した上で追加した後、最新のサンプルを追加する必要がある。

軌跡サンプルの補間は、次の手順で行う。図 10 のように、現在位置に相当するメッシュID が 1、前回取得した位置に相当するメッシュID が 0 である場合を考える。このように、1 つ前に取得した軌跡サンプルのメッシュID と現在地として取得したメッシュID が隣接する場合、そのまま軌跡サンプルをリスト先頭に追加する。この操作により、メッシュID=0 からメッシュID=1 へ移動した軌跡を記録することができる。

次に、図 11 のように、現在位置に相当するメッシュID が 2、前回取得した位置に相当するメッシュID が 0 である場合を考える。このように、1 つ前に取得した軌跡サンプルのメッシュID と現在地として取得したメッシュID が隣接しない場合、GPS 受信地点の地理位置を直線で結び、この直線とメッシュとの交点から通過したと予測されるメッシュID=1 を軌跡サンプルとしてリストに追加した上で、現在のメッシュID=2 を加える。このようにすることで、連続した軌跡として補間することが可能であり、比較する際に、同じ経路を通過した車両を誤って別クラスタとして識別することを防ぐ。

最後に、図 12 のように、現在位置に相当するメッシュID が 8、前回取得した位置に相当するメッシュID が 0 である場合を考える。このように、1 つ前に取得した軌跡サンプルのメッシュID と現在地として取得したメッシュID が隣接しない場合、図 11 と同様、GPS 受信地点の地理位置を直線で結び、この直線とメッシュとの交点から通過したと予測されるメッシュID=1, 4, 5 を軌跡サンプルとしてリストに追加した上で、現在のメッシュID=8 を加える。

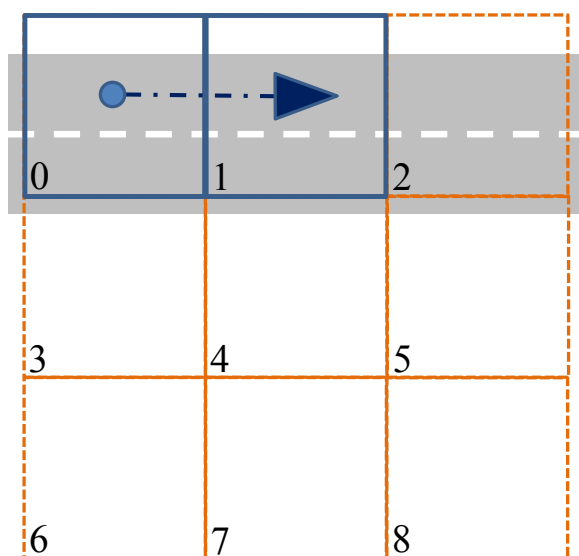


図 10 軌跡の補間を必要としない例

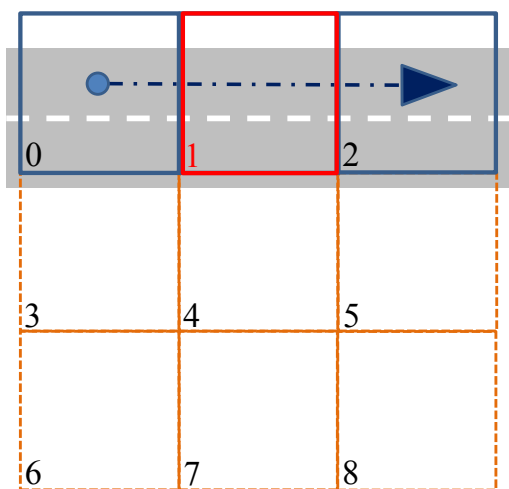


図 11 軌跡の補間が必要な例 1

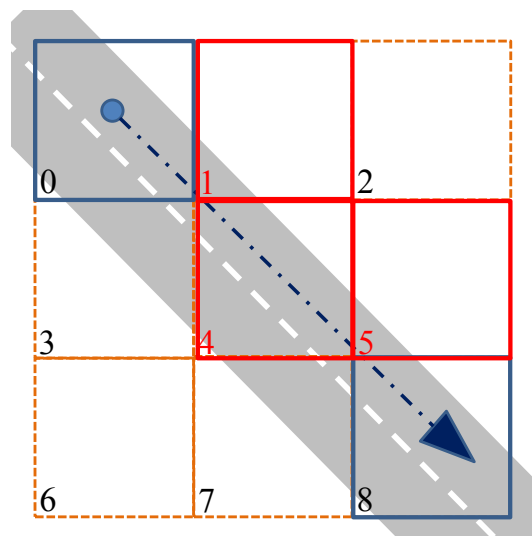


図 12 軌跡の補間が必要な例 2

3.5 軌跡の比較に関する考察

我が国における法定最高速度は、高速自動車国道の本線車道（高速自動車国道または自動車専用道路の本線車線によって構成される車道）のうち、対面通行

でない区間は 100km/h である。それ以外の道路では、緊急自動車を除く自動車または自動二輪車の法定最高速度は 60km/h である。高速自動車国道のような主要道路においては、VICS 等のインフラサービスを用いた十分な交通情報が取得できるため、それ以外の道路において提案手法を導入すべき車車間通信の需要が見込まれる。GPS 位置情報の更新レートは通常 1 秒であるため、直線道路を 60km/h で移動する車両は 16.7m 程度進行することになる。さらに、測位最大誤差 2m を含めると、GPS の記録は最大で 18.7m 程度の間隔が見込まれる。この間隔は *TrajectoryLevel* におけるメッシュサイズ 2 つ分を超えることが可能であるが、3 メッシュ × 3 メッシュのエリア内に収まる距離であり、前節で示した補間を行うことで、妥当な軌跡を比較することが可能であると考えられる。

3.6 クラスタの構成手順

各車両は数秒程度の一定間隔 T_{HELLO} で HELLO メッセージを 1hop ブロードキャストする。ここで、HELLO メッセージには自身のクラスタ管理テーブルを含む。周辺に存在する新たな車両から HELLO メッセージを受け取った際、HELLO メッセージへの応答メッセージを送信した上で、新たな車両を自身のクラスタ管理テーブルに加える。HELLO メッセージへの応答メッセージが一定時間 T_{th} なかった場合、その車両をクラスタ管理テーブルから削除する。このように、クラスタ管理テーブルにおいて過去に同一経路を走行した車両を識別することが可能となり、メッセージ配送効率を向上することが可能となる。

3.7 クラスタを利用したメッセージ配送

車両はクラスタ管理テーブルにおいて同一クラスタとして識別されている車両に対して、道路情報に関するメッセージを送信しない。このようにして、同一軌跡を持つ車両以外に対して道路情報を送信することで、情報の伝播効率を向上できる。さらに、クラスタ内でのメッセージ転送を抑えることにより、通信帯域を逼迫させる問題を解消できる。なお、同一クラスタ内の車両間は 1hop ブロードキャストが可能であり、かつ比較的長時間のコネクションが可能であることから、

必要な情報はリクエストを送信し，これに対してクラスタ内の当該車両がレスポンスを返すことを想定できる．従って，クラスタ形成によってメッセージを削減し，効率的な通信を可能にする．

4. 評価実験

提案手法の基礎的な効果を確認するために、DTN シミュレータ The ONE Simulator[29] を用いて、すれ違い通信実験を行った。さらに、提案手法を用いた際の有用性に関する情報伝播実験をシミュレータ上で行った。本章ではそれぞれの実験の内容及び、検証実験の内容を説明し、さらにそれぞれの実験結果について述べる。

4.1 実験における評価項目

クラスタリングによるメッセージ配送効率を評価するため、直線道路を隊列走行する車両のすれ違い通信時におけるメッセージ転送を評価した。実験における2つの評価項目を以下に示す。

メッセージ到達率

車両が走行中に何らかの形でセンシングした交通情報を、メッセージとして拡散するアプリケーションを想定する。このメッセージが対向車両を介して後続車両へと伝播されると、後続車両は走行中、走行する予定の道路における交通情報を事前に知ることができ、運転に利用することができる。そこで、車両が生成したメッセージの中で、対向車両を介して後続車両へと伝播したメッセージの割合をメッセージ到達率と定義し、これを伝播性能の指標とする。高いメッセージ到達率は、後続車両が事前に交通情報を受け取る可能性が高くなることを意味する。

メッセージ転送量

車両が走行中に何らかの形でセンシングする交通情報は、同一エリアに存在する車両にとって不要であると想定できる。すなわち、異なるエリアにおける車両へ交通情報を伝播できることが、想定アプリケーションにおいて必要となる(図13)。図13のように、メッセージが生成された地点を今後通過予定の車両群はメッセージに関心があり、これらの車両へメッセージが到達することが必要である。一方で、フラッディングを必要とする情報伝播ではメッセージによる輻輳が発生する可能性もあり、必要となるエ

リア以外への伝播を抑え、メッセージを伝播することが求められる。そこで、生成したメッセージを転送した量をメッセージ転送量と定義し、これを帯域利用率の指標とする。低いメッセージ転送量は、通信帯域の逼迫を防ぐ低負荷な状態を意味する。

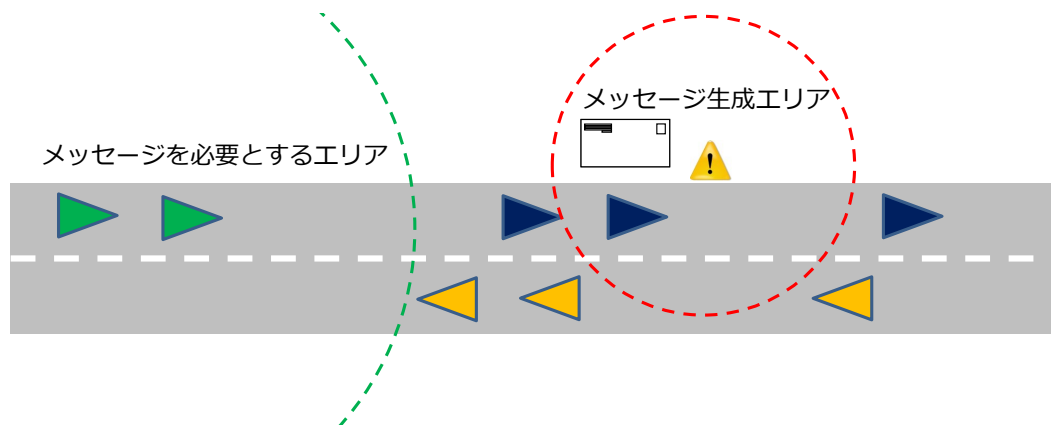


図 13 メッセージ生成エリアとメッセージが必要となるエリア

4.2 すれ違い通信実験

すれ違い通信によるメッセージ配送効率を評価するため、直線道路を隊列走行する車両によるすれ違い通信を想定する。メッセージ生成車両群と後続車両は通信可能な範囲に存在せず、メッセージ生成車両群は中継車両群を介して後続車両へメッセージを転送する。従って、メッセージ到達性を確保しつつ、メッセージ転送量を制御することが要求される。

4.2.1 実験環境

図 14 のようにメッセージ生成車両群、メッセージ中継車両群、後続車両を定義する。メッセージ生成車両は、周辺道路状況のセンシングを仮定し、メッセージを生成する。メッセージ生成頻度は、すれ違い通信が発生するまでに 40 個のメッセージを発生させるものとする。これは、各メッセージ生成車両が 1 つ以上のメッセージを生成することを想定した個数である。さらに後続車両はメッセージ生成

車両群と直接通信することはできない距離を走行するものとする。従って、メッセージ生成車両群が生成したメッセージは、後続車両を宛先として、対向車線を隊列走行する中継車両群を介して配送される。実験に関するパラメータを表5に示す。移動速度は、直線道路を想定しており、すれ違い時の相対速度が100km/hとなる。通信方式はITS FORUM RC-006[30]、700MHzの周波数帯を想定した通信可能距離100m、通信速度10Mbpsとした。本国における車車間通信の通信規格は、周波数帯の異なる2つの規格が提案され実用化に向けて開発研究が行われている。当初は5.8GHz帯の無線通信規格を利用する方針であったが、2007年に総務省が700MHzの帯域を車車間通信での利用に割り当てることを決めたためである。想定する伝送方式について、表6に示す。なお、今回は各車両がメッセージをストアするために持つバッファ容量を十分に確保し、メッセージの破棄を行わないものとする。ここで、メッセージ生成車両群と中継車両群を合わせた車両台数をすれ違い車両台数と定義する。すれ違い車両台数は市街地を想定し、20台から50台まで変化させる。すれ違い通信実験では、メッセージサイズとすれ違い車両台数を変化させ、メッセージ到達率と転送量について、提案手法と既存手法(Epidemic, MaxProp)を比較した。なお、メッセージ生成車両群と中継車両群を同じ車両台数とし、中継車両群は新たにメッセージを生成しないことを前提とする。

表5 すれ違い通信実験に関するパラメータ

移動速度	通信速度	通信可能距離	バッファ容量	メッセージ数
50km/h	10Mbps	100m	1024MB	40

4.2.2 実験結果

メッセージ到達率について図15に示す。Epidemic, MaxProp, 提案手法それぞれの手法で、メッセージサイズの増加に伴いメッセージ到達率は低下した。これは、通信速度の制約によって、すれ違い通信時に転送できるメッセージ数が減少したことが原因であると考えられる。通信帯域を考慮せずに、全てのメッセージをコンタクトした全てのノードに転送するEpidemicは高いメッセージ到達率

表 6 想定する伝送方式

項目	諸元
無線周波数	700MHz 帯の単一周波数
データフレーム長	0[Octets] から 1500[Octets] まで任意
周波数選定	不要（固定）
スクランブル	ARIB STD-T71 準拠
誤り訂正	畳み込み FEC R=1/2, 3/4
変調	BPSK OFDM / QPSK OFDM / 16QAM OFDM
送信出力制御	実験レベルで対応
PHY ヘッダ	ARIB STD-T71 準拠
媒体アクセス方式	CSMA/CA 方式

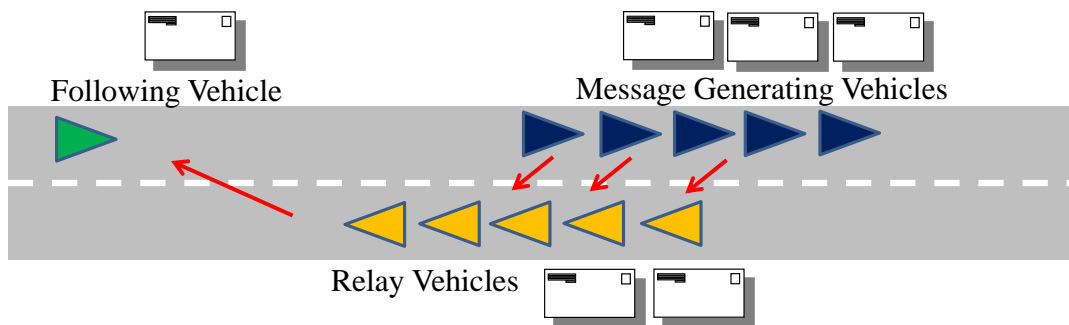


図 14 すれ違い通信実験におけるすれ違い通信の概要

を示しているが、提案手法も同程度のメッセージ到達率を実現している。次に、メッセージ転送量について図 16 に示す。高い到達率を示す Epidemic では、すれ違い車両台数の増加に伴いメッセージ転送量が増大した。MaxProp は Epidemic に対して少ないメッセージ転送量であったが、同様にすれ違い車両台数の増加に伴いメッセージ転送量が増大している。一方、提案手法はクラスタ内のメッセージ複製を削減することにより、メッセージ転送量が大幅に削減された。従って、

提案手法は Epidemic と同程度のメッセージ到達率を保ちつつ，同時にメッセージ転送量を抑えるルーティングを実現している．さらに，すれ違い車両台数が増加した際にも，メッセージの到達率が十分に維持されることを示すため，メッセージサイズは 3MB として，すれ違い車両台数を増加させた際のメッセージ到達率の推移を確認した．これを図 17 に示す．図 17 の結果から，ノード密度が低い環境から高い環境まで，提案手法は Epidemic と同程度のメッセージ到達率を示している．

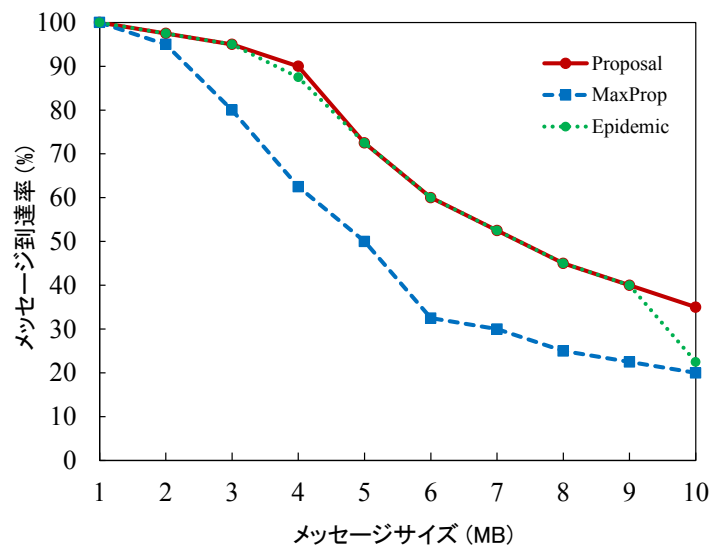


図 15 メッセージサイズを増加させた際のメッセージ到達率 (すれ違い車両台数 20 台)

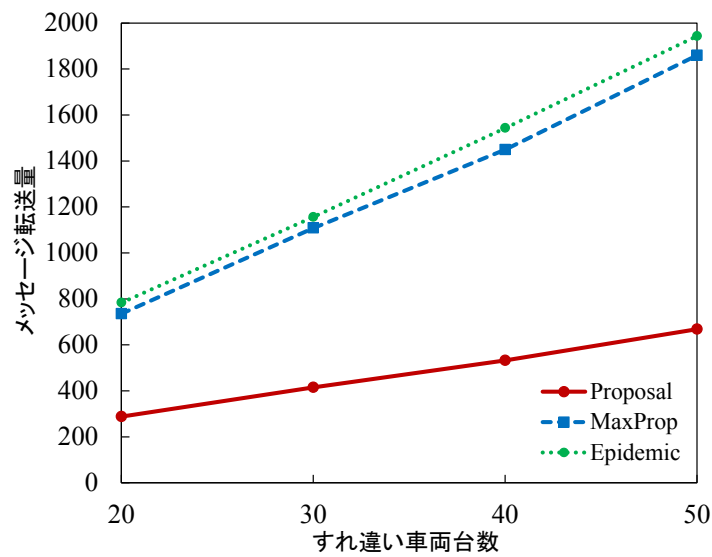


図 16 すれ違い車両台数の増加させた際のメッセージ転送量 (メッセージサイズ 3 MB)

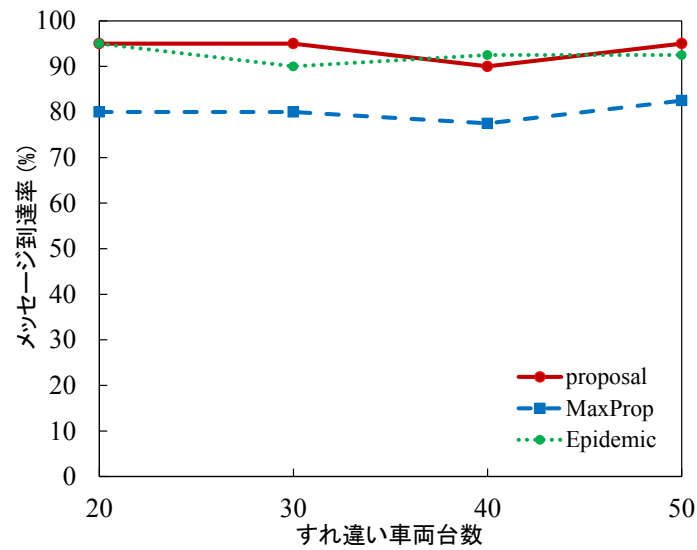


図 17 すれ違い車両台数を増加させた際のメッセージ到達率 (メッセージサイズ 3 MB)

4.3 情報伝播性能評価実験

広域なエリアにおいて、提案手法の評価を行うため、情報伝播性能を評価する実験を行った。

4.3.1 情報伝播性能評価実験における評価

クラスタリングによるすれ違い通信時におけるメッセージ配送効率を評価するため、格子状道路をランダムに走行する車両のメッセージ転送を評価した。この実験における評価項目は、すれ違い通信実験と同様、メッセージ到達率とメッセージ転送量とする。なお、すれ違い通信実験では後続車両への到達性であったが、ここでは車両が生成したメッセージの中で、ランダムに選出されるターゲット車両へと伝播したメッセージの割合をメッセージ到達率と定義し、これを伝播性能の指標とする。

4.3.2 実験環境

情報の伝播効率を検証するため、提案手法と既存手法（Epidemic, MaxProp）を比較した。シミュレーションは $2\text{km} \times 2\text{km}$ の格子状道路で行い、市街地の道路環境を想定し、エリア内には平均速度 50km/h で移動する300台の車両が存在する。なお、車両ノードはShortest Path mobility modelに従い移動する。Shortest Path mobility modelでは、ノードは道路地図上の任意の交差点を目的地として選び、最短移動距離となる経路を一定速度で移動し、目的地で一定時間停止する。移動速度と停止時間は各ノードに値域を設定でき、停止毎に正規分布に従い、新たな値が選出される。まず、 2km 先の目的地まで走行するターゲット車両に対して、 500m , 800m , 1000m 離れた地点で車両が生成するメッセージに対するメッセージ到達率を評価する。さらに、すれ違い通信実験と同様、メッセージ転送量に関しても評価を行う。ここで、各ノードの通信可能距離は、すれ違い通信実験と同様に 100m の場合を用いたが、障害物等が存在しない場合、 100m 以上の通信可能距離が想定される。従って、 100m , 150m , 200m と通信範囲を変化させ、その際にシミュレーションエリア内で生成及び転送されるメッセージの量を評価する。

4.3.3 実験結果

任意に選出されるターゲット車両から、各距離（ 500m , 800m , 1000m ）離れた地点の車両が生成したメッセージについて、ターゲット車両へのメッセージ到達率を図18に示す。図18から、既存手法、提案手法のいずれも、メッセージ生成地点からの距離の増加に伴い、メッセージ到達率は低下した。しかしながら、クラスタリングを用いた提案手法では、Epidemicと同程度のメッセージ到達率を実現している。このとき、各ノードの通信可能距離の変化に対してシミュレーションエリア内で生成及び転送されたメッセージの総数を図19に示す。

通信可能距離が増加すると、生成及び転送されるメッセージ数は増加するが、いずれの通信距離に対しても図19から、すれ違い通信実験と同様、提案手法はクラスタ内のメッセージ複製を削減することにより、メッセージ転送量が大幅に削減されていることを示した。

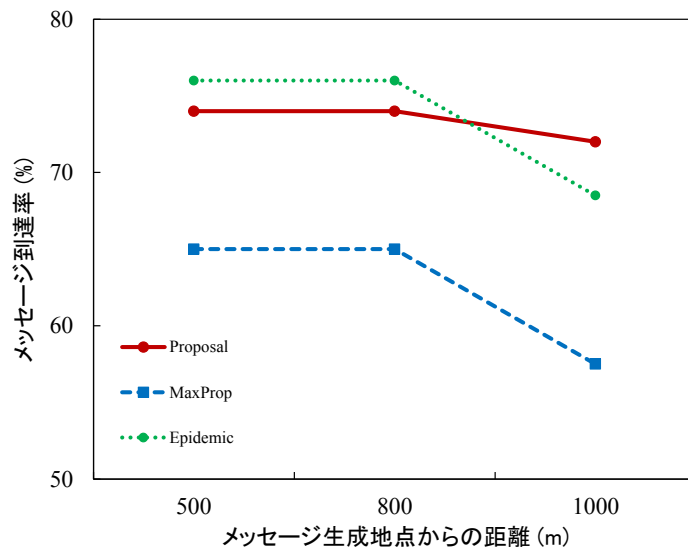


図 18 ターゲット車両から 500m, 800m, 1000m 離れた地点で生成されたメッセージの到達率

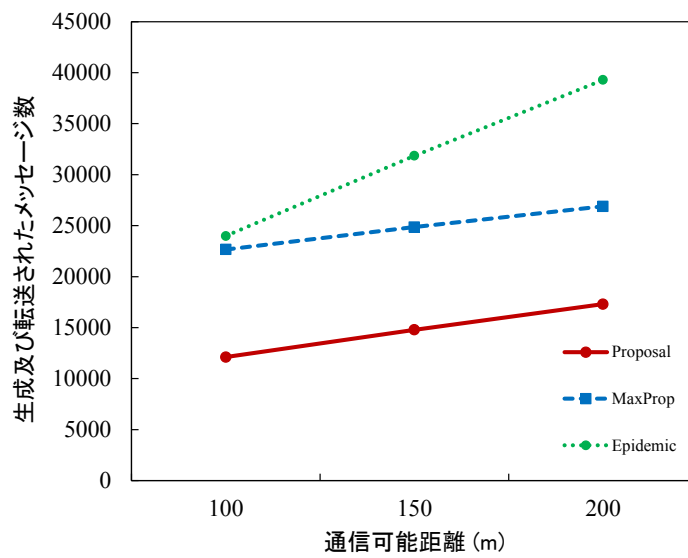


図 19 通信可能距離の変化に伴うシミュレーションエリア内で生成及び転送されたメッセージ数

4.4 評価実験を通しての考察

本節では、すれ違い通信実験及び情報伝播性能評価実験の結果について、その考察を述べる。

4.4.1 すれ違い通信実験の考察

すれ違い通信実験では、DTN 環境におけるメッセージ配送をシミュレーションによって検証し、既存の DTN ルーティング手法である Epidemic と MaxProp を比較対象として提案クラスタリング手法を評価した。なお、すれ違い通信実験では、直線道路でのすれ違い通信時におけるメッセージ転送を検証したが、評価指標のメッセージ到達率は、Epidemic と提案手法が同程度、MaxProp は低い値となった。MaxProp はノードのコンタクト履歴を利用したルーティングであり、コンタクトが存在しない場合に効果が殆ど見られない。通信量を抑制した分、メッセージ到達率の低下につながったと考えられる。一方、クラスタリングを行う手法では、後続車両に対して Epidemic と同程度のメッセージ到達性を示し、さらに評価指標であるメッセージ転送量について、Epidemic, MaxProp と比較して大幅に削減できることを示した。さらに、車両台数に対しても高いスケーラビリティが示された。

Epidemic はメッセージ総量を考慮しないものであるため、最も到達性の高いルーティングである場合が多い。しかしながら、実環境では車両のすれ違う時間的な制約から、メッセージのタイプに応じて取捨選択を強いられる状況が想定できる。このような場合、車両の走行履歴をクラスタリングを用いて表現することにより、重複情報の削減によるメッセージの情報量増加が期待できる。

4.4.2 情報伝播性能評価実験の考察

情報伝播性能評価では、広域な道路を想定し、情報伝播性能について、すれ違い通信実験と同様に既存の DTN ルーティング手法である Epidemic と MaxProp を比較対象として提案クラスタリング手法を評価した。評価指標のメッセージ到達率は、Epidemic と提案手法が同程度、MaxProp は低い値となった。MaxProp

はノードのコンタクト履歴を利用したルーティングであるため、コンタクトが存在しない環境で効果が見られなかったと考えられる。そして、通信量を抑制した分、メッセージ到達率の低下につながったと考えられる。一方、すれ違い通信実験と同様に、クラスタリングを行う手法では、後続車両に対して Epidemic と同程度のメッセージ到達性を示し、

加えて、評価指標であるメッセージ転送量について、各ノードの通信可能距離を変化させて検証を行ったが、いずれの手法においても、各ノードの通信可能距離の増加に伴い、メッセージ転送量は増加した。これは、ノードの通信可能距離が増加したことで、転送可能となる時間が増加し、コンタクト時にメッセージを多く転送できるためであると考えられる。通信可能距離が変化した際、いずれの通信可能距離であっても、Epidemic, MaxProp と比較して提案手法はメッセージ転送量を大幅に削減できることを示した。以上から、クラスタリングを行う提案手法では、任意の車両に対して Epidemic と同程度のメッセージ到達性を示し、同時にメッセージ転送量を大幅に削減できることを示した。これはすれ違い通信実験結果から裏付けることができる。

4.4.3 全体を通じた考察

走行中にセンシングした交通情報を、対向車両を介して後方車両群へ伝播することを考えた際、地理的に近く、かつ同一の走行履歴を持つ車両でクラスタを形成し、クラスタ外への情報伝播を優先することによって、車両移動による限られた通信可能時間を有効に活用し、メッセージを広域に伝播できることを明らかにした。今回提案した手法は、自律分散的に個々のノードがクラスタを識別するものであり、クラスタ内で共有する情報については言及していない。提案したクラスタリング手法は、地理位置と走行履歴を用いているため、その性質上、安定したクラスタの構築が可能であると予想される。そこで、クラスタ内で何らかの形でメッセージをやり取りし、クラスタ内で役割を共有するといった用途への拡張も考えられる。例えば現在普及している携帯電話網（3G/LTE）を広域な通信に利用する場合、クラスタ内でクラスタヘッドの役割を持たせるノードに関する情報を共有することで、通信負荷の改善につながると考えられる。従って、車両群

をクラスタとして識別する手法は、インフラネットワークとの協調に利用できるため、幅広い活用が見込まれると考えられる。

4.5 今後解決すべき課題

実環境での利用を考えた場合、クラスタ形成時における電波干渉や通信量を評価した上で、一般道路環境でのシミュレーションを行うことが必要である。そこで、車両密度や道路形状といった環境に応じて、クラスタを形成する際に扱う軌跡を動的に変更する機構も必要となる。すなわち、保持及び一致判定に利用する軌跡（メッシュIDのリスト）の長さ、Quadkeyにおける抽象度を変更することにより、クラスタ形成の最適化を行うことである。さらに、本研究では1ホップのクラスタリングであるが、アプリケーションに応じてマルチホップへの拡張も検討すべきである。そのうえで、突発的な事故や渋滞が発生したシナリオを想定し、そのような場合にどの程度情報伝播が行われるかを検証し、得られた情報から交通流がどのように改善されるかを検証する必要がある。また、現在普及している携帯電話網（3G/LTE）を広域な通信に利用する場合、クラスタ内でクラスタヘッドの役割を持たせるノードに関する情報を共有することで、インフラネットワークとの協調に利用できるため、幅広い活用が見込まれると考えられる。

5. 結論

車車間通信を利用して広域での情報伝播を行う場合、車両密度が不均一であるためにエンドツーエンドの通信経路が存在しない場合がある。このような環境における車車間でのメッセージ配送方式に Delay Tolerant Network (DTN) を利用する事が考えられる。しかしながら、既存の DTN ルーティング手法では対向車両とのすれ違い時のメッセージ転送効率を考慮しておらず、結果として伝播効率の低下に伴う情報損失が発生する。そこで本論文では、地理位置と走行軌跡の類似性に基づき車両を分類することで、すれ違い時のメッセージ転送を効率化する手法を提案した。シミュレータによる実験から、提案手法を用いることで、既存手法に比べて高い通信帯域利用効率と伝播効率を得られることを示した。走行中にセンシングした交通情報を、対向車両を介して後方車両群へ伝播することを考えた際、提案手法を用いることで、地理的に近く、かつ同一の走行履歴を持つ車両でクラスタを形成し、クラスタ外への情報伝播を優先することによって、車両移動による限られた通信可能時間を有効に活用し、メッセージを広域に伝播できることを明らかにした。実環境での利用を考えた場合、クラスタ形成時における電波干渉や通信量を評価した上で、一般道路環境でのシミュレーションを行うことが必要である。そこで、車両密度や道路形状といった環境に応じて、クラスタを形成する際に扱う軌跡を動的に変更する機構も必要となる。すなわち、保持及び一致判定に利用する軌跡（メッシュID のリスト）の長さ、Quadkey における抽象度を変更することにより、クラスタ形成の最適化を行うことである。さらに、本研究では1ホップのクラスタリングであるが、アプリケーションに応じてマルチホップへの拡張も検討すべきである。

謝辞

主指導教員であり、本研究を行う上で、適切な研究指導をしていただいた上、海外発表の機会を与えていただくなど、多くの御支援を賜りました、本学情報基盤システム学研究室の藤川和利教授に深く御礼申し上げます。副指導教員であり、研究の方向性についての貴重なご意見をくださいました本学ソフトウェア基礎学研究室の伊藤実教授に深く感謝の意を表します。副指導教員であり、研究における手法の内容について、的確な助言をくださいました本学ユビキタスコンピューティング研究室の安本慶一教授に深く感謝の意を表します。副指導教員であり、研究方針や論文執筆に関して数々のご助言をくださいました本学情報基盤システム学研究室の猪俣敦夫准教授に深く感謝申し上げます。研究の方針に関して的確なご指導をして頂いた上、研究以外の様々な面においてもご支援をいただきました東京工業大学学術国際情報センターの松浦知史准教授に深く御礼申し上げます。研究活動に関して有益なご助言を下さいました、本学情報基盤システム学研究室の垣内正年助教に深く感謝致します。研究活動や論文執筆に関してご指導を戴きました、本学情報基盤システム学研究室の大平健司特任助教、油谷暁助教に深く感謝致します。研究・学生生活の両面において様々なご支援を戴きました博士後期課程の石井将大氏に深く感謝致します。また、様々な面から研究活動を支援してくださいました本学総合情報基盤センターの田村多佳子女史、辻元理恵女史に心より感謝致します。そして、様々な面から研究活動を支えていただいた本学情報基盤システム学研究室の皆様にも心より感謝致します。最後に、経済面や生活面で支えていただきました家族に心より感謝致します。

参考文献

- [1] 高度情報通信社会推進本部, “高度情報通信社会推進に向けた基本方針,” 1998.
- [2] 警察庁, 通商産業省, 運輸省, 郵政省, 建設省, “道路・交通・車両分野における情報化実施指針,” 1995.
- [3] 警察庁, 通商産業省, 運輸省, 郵政省, 建設省, “ITS 推進に関する全体構想,” 1996.
- [4] 一般財団法人 道路交通情報通信システムセンター, “Vehicle Information and Communication System (VICS).” [Online]. Available: <http://www.vics.or.jp/english/vics/index.html>
- [5] 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部, “世界最先端 it 国家創造宣言,” 2013.
- [6] Mahmassani H. S. and Jayakrishnan, “System performance and user response under real-time information in a congested traffic corridor,” *Transportation Research*, Vol. 25A, No. 5, pp. 293–307, 1991.
- [7] Y. B. Ko, and N. H. Vaidya, “Flooding-based Geocasting Protocols for Mobile Ad Hoc Networks,” *ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications (MONET) journal*, Vol.7, pp. 471–480, 2002.
- [8] W. Liao, Y. Tseng, and J. Shen, “GeoGrid: A Geocasting Protocol for Mobile Ad Hoc Networks Based in GRID,” *Journal of Internet Technology*, Vol.1, pp. 23–32, 2000.
- [9] V. D. Park, and M. S. Corson, “A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks,” *IEEE INFOCOM*, April 1997.
- [10] Y. B. Ko, and N. H. Baidya, “GeoTORA: A Protocol for Geocasting in Mobile Ad Hoc Networks,” *8th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP)*, 2000.

- [11] S. Lee, and Y. B. Ko, “Geometry-driven Scheme for Geocast Routing in Mobile Ad Hoc Networks,” Vehicular Technology Conference, Vol. 2, pp. 638–642, 2006.
- [12] V. Cerf, “Delay-Tolerant Networking Architecture.” RFC 4838, Internet Engineering Task Force, April 2007. [Online]. Available: <http://www.ietf.org/rfc/rfc4838.txt>
- [13] Google, “Google Maps.” [Online]. Available: <https://maps.google.com/>
- [14] Z. Zhang, “Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: overview and challenges,” IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 8(1), pp. 24–37, 2006.
- [15] A. Lindgren, A. Doria, and O. Schelen, “Probabilistic routing in intermittently connected networks,” Lecture Notes in Computer Science, pp. 239–254, 2004.
- [16] A. Vahdat, D. Becker, “Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks,” Duke Tech Report CS-2000-06, Jun. 2000.
- [17] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C.S. Raghavendra, “Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks,” In Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking, 2005.
- [18] J. Burgess, B. Gallagher, D. Jensen, and B. N. Levine, “MaxProp: Routing for vehicle-based disruption tolerant networks,” In Proc. 25th IEEE INFOCOM 2006.
- [19] B. Han, L. Liu, and E. Omiecinski, “NEAT: Road Network Aware Trajectory Clustering,” 2012 IEEE 32nd International Conference on Distributed Computing Systems, 2012.

- [20] E. Souza, I. Nikolaidis, P. Gburzynski, “A New Aggregate Local Mobility (ALM) Clustering Algorithm for VANETs,” 2010 IEEE International Conference on Communication (ICC), 2010.
- [21] R. Crepaldi, M. Bakht, and R. Kravets, “QuickSilver: Application-driven Inter- and Intra-cluster Communication in VANETs,” The Third ACM/SIGMOBILE International Workshop on Mobile Opportunistic Networking (MobiOpp), 2012.
- [22] S. Ucar, S. C. Ergen, and O. Ozkasap, “VMaSC: Vehicular Multi-hop algorithm for Stable Clustering in Vehicular Ad Hoc Networks,” 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2013.
- [23] Y. Li, M. Zhao, and W. Wang, “Internode Mobility Correlation for Group Detection and Analysis in VANETs,” IEEE Transaction on Vehicular Technology, Nov. 2013.
- [24] R. S. Schwartz, A. E. Ohazulike, C. Sommerz, “Fair and Adaptive Data Dissemination,” 2012 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), 2012.
- [25] K. Ibrahim, and M.C. Weigle, “CASCADE: Cluster-Based Accurate Syntactic Compression of Aggregated Data in VANETs,” In Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conference Workshops (GLOBECOM 2008), pp.1–10, 2008.
- [26] Y. Kanemaru, S. Matsuura, M. Kakiuchi, S. Noguchi, A. Inomata and K. Fujikawa. “Vehicle Clustering Algorithm for Sharing Information on Traffic Congestion,” IEEE 13th ITS Telecommunications (ITST) 2013.
- [27] 内閣府, “準天頂衛星システムの運用等事業業務要求水準書 (案),” 2014.
- [28] Microsoft corp, “Quadkey: Bing Maps Tile System,” [Online]. Available: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb259689.aspx>

- [29] A. Keranen, J. Ott, and T. Karkkainen, "The ONE simulator for DTN protocol evaluation," Simutools 2009 Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques, 2009.
- [30] The ITS Info-communications Forum, "ITS FORUM RC-006 version 1.0," 2009.

Achievements

International conference

Naohiro Washio, Satoshi Matsuura, Masatoshi Kakiuchi, Atsuo Inomata and Kazutoshi Fujikawa: “A Vehicle Clustering Algorithm for Information Propagation by Inter-Vehicle Communications,” The 12th IEEE Int’l Workshop on Managing Ubiquitous Communications and Services, St Louis, USA, Mar. 2015 (Accepted).

National conference

鷺尾直大, 松浦知史, 垣内正年, 猪俣敦夫, 藤川和利: “車車間通信を用いた情報伝播のための車両クラスタリング手法,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 114, no. 374, IA2014-72, pp. 19–24, 2014年12月, 学生研究奨励賞.