

車車間通信による道路固定型ネットワークの構築

成 田 干 城[†] 春 名 恒 臣[†]
重 野 寛[†] 岡 田 謙 一[†]

リアルタイム走行支援を実現するには道路上に車車間通信のネットワーク環境を構築することが不可欠である。しかしこれにアドホックネットワークのルート構築方式を適用する際に、構成したネットワークは車両とともに移動してしまうことが問題となる。走行支援システムは位置に依存したサービスも多いことに着目すると、特定道路区間にとどまるような道路固定型のネットワークも必要であると考えられる。そこで本稿では車両間ではなく設定エリア内に維持される通信ルートの構築方式を提案する。本方式は、まず速度の小さい車両をリーダーとした車両グループを形成しグループごとに通信ルートを構築する。またグループ間でのルート発見において、ルート上の各車両の走行特性データ（前ホップ相対速度+加速度）の累積値をメトリックとして利用する。計算機シミュレーションによって評価を行い、サービスエリア長の拡大に対して既存方式ではバケット到着率が80-20%まで大幅に低下するのに対し、提案方式では80-70%と高い値を保つことが可能であると示された。

A Construction Method of Network Fixed on a Road with Vehicular Networks

TATEKI NARITA,[†] TSUNEOMI HARUNA,[†] HIROSHI SHIGENO[†]
and KEN-ICHI OKADA[†]

It is indispensable for real-time Cruise-Assist to construct the network environment with vehicle-to-vehicle communications on a road. On a routing of ad hoc networks, however, the network moves with vehicles. This paper proposes the routing method which maintains the communication route not between vehicles but in the setting area, since Cruise-Assist service depends on a position. This paper proposes two phases that is the routing method using Grouping Network Composition and Drive Characteristic Route Selection. I evaluate these proposals by the computer simulation. I verified the effectiveness of the proposal method in accordance with the packet arrival rate. The proposal shows the rate of 80-70% while the existing shows 80-20%, when the service area scale is 200-1,200 m.

1. はじめに

ユビキタス社会の到来によってモバイル通信技術が注目され、ITS (Intelligent Transport Systems: 高度交通システム) への取り組みがさかんに行われている。

ITS では事故情報や渋滞情報を車車間通信によって伝達・配信することで詳細でリアルタイム性の高い情報を取得する方式の検討などが行われている。しかし安全運転を実現する走行支援システムのためには、サービスを提供する道路上に信頼性が高く恒常的に利用可能なネットワークを車車間通信によって構築する

必要がある。そこで移動端末のみで自律的に構成されるアドホックネットワークの研究成果を車車間通信に適用することがさかんに検討されている。

従来検討されてきた車車間通信へのアドホックネットワークの適用では情報散布や車両間コミュニケーションを目的とし、車両間で通信ルートを構築し、車両の移動にともない通信ルートも移動しながら利用するものである。つまりある位置で構成したネットワークは車両の移動とともにその位置から移動してしまうことを意味する。しかし走行支援システムが特に必要とされるのは、事故多発地点や高速道路の分・合流地点など危険性の高い特定の道路区間である。そのため特定地点に設置された路側ユニットとの協調型のシステムが想定され、その地点に固定的に車車間ネットワークを構築する必要がある。

特定の道路区間における走行支援システムでは、道

[†] 慶應義塾大学大学院理工学研究科開放科学専攻
School of Science for Open and Environmental Systems,
Graduate School of Science and Technology, Keio University

路固定型のネットワークを構築する必要がある。そこで本稿では、ノード(車両)間ではなく設定エリア内に維持される通信ルートの構築方式を提案する。本方式は、速度の小さい車両をリーダーとして車両をグループ化しそのグループ間ごとにルートを構築することでエリア内にルートをより長くとどめ、また各ルート構築において車両の走行特性(相対速度・加速度)を利用することでルート維持時間を向上させる。これにより特定道路区間に対する恒久的な車車間通信ネットワーク環境の実現を目指す。

以下、2章では車車間通信へのアドホックネットワークの適用に関して現在行われている研究について述べる。3章では道路固定型ネットワークの定義や要求条件について述べ、4章では提案方式についてグループ化ネットワーク構成、走行特性ルート選択、データ転送の3点から述べる。5章では計算機シミュレーションによる結果を示し、その有効性を評価し、6章で結論とする。

2. アドホックネットワークの適用

車車間通信でのプロトコルについて様々な研究が行われており、アドホックネットワークのルーティング方式の適用が検討されている。アドホックのルーティングにはリアクティブ型、プロアクティブ型、さらに位置情報を利用した位置ベース型⁶⁾がある。ノードの移動性の高いITSではリアクティブ型や位置ベース型の適用が主に考えられている。

文献1)では市街地の環境において、位置情報を利用した方式GSRを提案し代表的なリアクティブ型プロトコルであるDSR(Dynamic Source Routing)やAODV(Ad hoc On-Demand Distance Vector routing)と比較し、パケット伝送率についてGSRやAODVが有利であることや伝送遅延についてはGSRが有利であることなどを示している。文献2)では建物など障害物のある交差点において効率的にルーティングを行うために、交差点上にいることを周辺車両の情報から検知し、中継ノードとして優先的に利用することを提案しパケット伝送率を向上させている。

文献8)では、車車間ネットワークにおける相対速度を考慮したリアクティブルート構築方式が提案されている。車車間での音声や画像データの伝送を目的としており、高速移動する車車間ネットワークではトポロジの動的変化が激しく、ルート維持変更にとまらぬ制御パケットの増大が通信帯域を圧迫することが問題であるとしている。そこで安定性の高いルート構築方式の提案として、アドホックネットワークのリアクティ

ブルート構築方式のAODVのルート検索処理に車両の相対速度情報を付加した方式が提案されている。

文献3)では離れた領域へのデータ散布の方式として、データのルーティング先に適したノードがいる場合に転送するOpportunistic Forwarding⁵⁾を適用し、転送ノードを複数にすることを提案しパケット伝送率を向上させている。

文献7)では各車両が取得する道路情報を一定周期でブロードキャストし順次伝搬させることで、行き先道路の情報を取得するための散布プロトコルが提案されている。車両の速度に応じて散布間隔を変化させることで重複する情報を抑制し、効率的に散布伝搬を行うことができると示されている。

またインターネットなど他のネットワークへの接続の通信補完に車車間ネットワークを利用することも研究されている。文献4)では第3世代のセルラーネットワークのゲートウェイ車両へ車車間通信を用いて接続するモデルを提案し、ルーティング方式としてAODVの適用性について評価をしている。

以上のように現在車車間ネットワークに対して様々な研究が行われているが、これらの研究のコンセプトとしては車車間通信による情報散布と車車間ネットワークにおける通信ルート構築という2つに大きく分類することができる。文献3)、7)は前者の例であり、文献2)、4)、8)は後者の例である。車車間通信による情報散布においては、各車両の持つ道路情報や交通情報を道路の後方エリアまたは遠隔のエリアを走行中の車両へ伝搬する方式が提案されている。また車車間ネットワークにおける通信ルート構築においては、アドホックネットワークのルート構築方式の適用と改良が提案されている。

このように車車間通信を用いた情報散布や車車間ネットワークの構築が検討されているが、車両によるアドホックネットワークでは、車両の移動とともにネットワークも移動してしまいサービスエリアを地理的に固定することはできない。しかし、ITSにおける安全運転支援システムでは、事故多発地点や分合流地点など道路上の地点に依存してサービスを提供するようなアプリケーションが数多く存在する。また、このようなエリアが、事故車両や工事車両などによって一時的に必要となる場合や、路車間通信システムなどでカバーされていない道路区間で必要となる可能性もある。したがって、車車間ネットワークを用いて道路上に固定的なサービスエリアを提供することに対応した通信プロトコルが必要である。

3. ネットワーク道路

本研究では車車間ネットワークの利用形態として、事故多発地点や高速道路の分合流地点といった特定地点における走行支援システムを想定している。こうしたシステムは、あらかじめ設置された路側ユニットや特定の車両からの補助を受けるなどして、道路上の固定エリアでサービスを提供する。このように特定道路区間に車車間通信による道路固定型アドホックネットワークが構成維持され、走行支援サービスを利用できる道路を本研究ではネットワーク道路と呼ぶ。

3.1 ネットワーク道路の定義とその特徴

本稿ではネットワーク道路とは、設定されたサービスエリア全体において信頼性の高いネットワークが構成されており、そこに入った車両が走行支援システムを利用できる道路と定義する。その特徴として以下の4つがある。

サービスエリアの設定

サービスエリアは道路の固定的なエリアに設定される。サービスエリアの定義は、あらかじめ設置された路側ユニットや停止した車両によって与えられることが想定される。

サービスエリアの検知

車両がサービスエリアの境界を検知できる必要がある。路側ユニットが設置されている場合は、各車両は路側ユニットのビーコンなどによりエリアを検知しサービスの利用を開始する。このほかに、放送や他のITSサービスなどでサービスエリアの座標情報をもとにエリアを検知する方法も考えられる。

車両のみによって構成

上記のサービスエリアの設定と検知に関するものを除いて、基本的に車両のみによってネットワークを構築する。アプリケーションによっては基地局と通信することがおおいに考えられるが、必ずしもその存在を前提としない。

通信ルート

エリアへの流出入が次々に発生する中で各車両に対し、即座に走行支援サービスを利用可能にする必要がある。そこでエリア全体をカバーする最も安定な通信ルートを構築する。

以下、本稿を通じて、サービスエリアの設定と検知に関して、最も単純なケースとして路側ユニットが存在することを想定する。しかし、上記のように路側ユニットの役割は、サービスエリアの位置を規定することであり、インターネットなどの通信上のゲートウエ

イとしての役割とは異なる。したがって、位置の規定さえできれば、停止した車両、たとえば、事故車両や工事車両でも同様の役割を果たすことができる。

3.2 想定される利用形態

高速道路の分合流や交通事故の発生しやすい地点など、あらかじめ特定できる場所については、路側ユニットによりサービスエリアの位置を指定し、提案手法を用いて走行支援を行うことが考えられる。各車両は自車両の走行データ（位置、速度、加速度など）をセンシングして、車車間通信を用いて路側ユニットに送信する。現在の走行状態を取得するだけでなく、これを蓄積することによって統計データとしても利用できる。路側ユニットはこのデータを分析することによって特定の車両に対して走行制御の指示を送信することができる。

また、交通事故や道路工事のように車両間で情報伝達が必要となる場合、その近傍に一時的にサービスエリアを形成し、提案手法を用いて情報伝達を行うことが考えられる。このような場合、事故車両や工事車両を先頭として、道路上の特定の位置に固定したアドホックネットワークが必要となる。

3.3 要求条件と問題点

以下に、ネットワーク道路の構築における要求条件をあげる。

1. サービスエリア規模

1対1の局所的な衝突防止のみではなく、エリア全体としてサービスを行うためには路側ユニットから数百メートル以上をサービスエリアとしてカバーすることが要求される。

2. 位置に固定したアドホックネットワーク

通常アドホックネットワークで構成された通信ルートは、そのノードの移動とともに位置が移動する。車車間ネットワークのようにノードの速度が大きい場合それはより顕著になると考えられる。ネットワーク道路のように位置に固定したネットワーク構成ではルータとなっている車両がサービスエリアから流出する可能性がある。そこで、サービスエリアが車群とともに移動しないように制御し、地理的にあらかじめ設定したサービスエリアにネットワークがより長くとどまるようなネットワーク構成が要求される。すなわち、地理的にいかに固定されているかに着目した要求条件である。

3. 安定性の高い通信ルート構築

車両という移動性の高いノードにおいて安全運転支援や情報伝達を行うためには、通信ルートの維持時間の大きい安定したルート選択を行うことが

要求される．すなわち，車両の移動の影響を受けないルートの安定性に着目した要求条件である．

3. の条件については前章で紹介したような従来の車車間ネットワークに関する研究でも検討が行われている^{4),8)}．しかし 1. と 2. の条件についてはネットワーク道路という利用形態に特徴付けられる条件である．そのため従来のルート構築方式では考慮されておらず，ネットワーク道路構築における問題点と考えられる．

4. ネットワーク道路構築手法の提案

4.1 ネットワークモデルと提案概要

図 1 に本提案におけるネットワークのモデルを示す．まず道路上の各車両をほぼ一定間隔ごとにグループリーダ車両を設定しグループ化する．さらに各グループリーダ間でルート構築を行い，サービスエリア全体をカバーする通信ルートを確保する．このルートがサービスエリア全体の最も安定したルートであるとし，走行支援システムのネットワークとして各車両へのデータ転送に利用する．またグループ間ごとにルート構築されているため，車両とともにネットワークが移動しルート上のある車両がサービスエリアから流出しても，ルートの一部のみ再構築すれば十分である．したがって，ネットワークの移動によるルート再構築を低減し，サービスエリア内にとどまるようなネットワーク構成となっている．

このようなネットワークモデルで，前章の要求条件を満たす車車間ネットワークのルート構築方式を提案する．本方式はグループ化ネットワーク構成と走行特性ルート選択を組み合わせた方式となっている．

グループ化ネットワーク構成では，まず周辺車両とグループを形成する．図 1 のように車両グループはほぼ一定間隔の配置状態に収束する．このグループ間で通信ルートを構築し，データ転送に利用することでエリア規模の拡大に対応することができると考えられる．さらに車両グループを形成する際のリーダの車両として，速度が小さい車両を選択するように制御を行う．これによりサービスエリア内により長くとどまるようなネットワーク構成を実現できると考えられる．

走行特性ルート選択では，動きの安定した車両をルータ車両として選択するという方針で制御を行う．これは車車間の各リンクにおいて切断が起こることを抑え，安定性の高い通信ルートを構築するためである．そこでルート検索処理において車両の走行特性である速度，加速度を利用する．

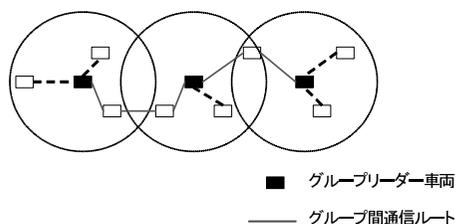


図 1 提案手法による通信ルート構成モデル

Fig. 1 Communication model with vehicle groups.

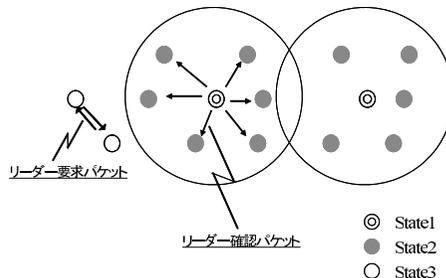


図 2 車両の状態とグループの関係

Fig. 2 State of vehicle and vehicle groups.

4.2 グループ化ネットワーク構成

4.2.1 車両グループ形成方法

本提案では車両は走行中に周辺車両と車車間通信を行い車両グループを形成し，維持する．各車両グループには 1 台のリーダ車両が存在する．以下では，車車間通信を利用し，このような車両グループの形成方法を提案する．図 2 に車両の状態とグループの関係を示す．

各車両は State1, 2, 3 いずれかの状態をとるものとする．State1 は車両グループのリーダ車両の状態を示し，各車両グループに 1 台ずつ存在する．各車両からの通信はリーダ経由で行われ，近隣のリーダ車両や路側ユニットに中継される．State2 はリーダ車両の通信範囲内においてその車両グループに属するメンバ車両の状態を示す．State3 は車両グループにも属さずに孤立している車両の状態を示す．ただし，自分の通信範囲内に State1 のリーダ車両がない場合は，単独で存在する State1 の車両に移行するので，この State3 は車両の初期状態や車両グループ形成における過渡的な状態として生じる．図 3 にグループ形成の際の各車両の状態遷移を示す．

State1 のリーダ車両は定期的に周辺車両にリーダ確認パケットを送信する．リーダ確認パケットがそのリーダ車両のグループに属するメンバ車両に受信されることで車両グループが維持される．State2 のメンバ車両はこのリーダ確認パケットを自分の車両グループ

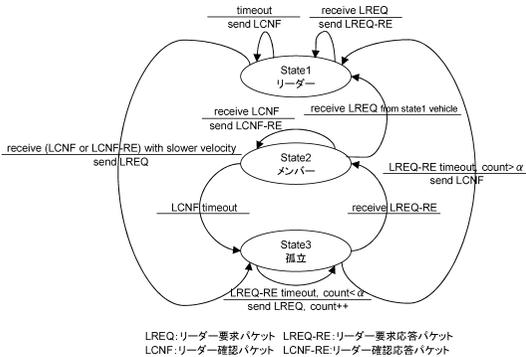


図3 グループ形成の状態遷移図

Fig. 3 State transition diagram.

のリーダーから受信しているかどうかを定期的にチェックする。State3の孤立した車両は定期的に周辺車両にリーダー要求パケットを送信する。これによって孤立している車両は自分をリーダーとする新しい車両グループを形成することを周辺車両に対して要求し、他リーダーからの応答がなければState1へ変化する。このようなリーダー確認パケットやリーダー要求パケットを受信した車両が受信時の自分の車両の状態に基づいて処理を行うことで車両グループ形成が行われていく。

本提案では形成した車両グループ間で通信ルートを構築し利用する。この通信ルートがサービスエリア内により長くとどまり利用時間が大きくなるように、車両グループのリーダー車両は速度が小さいものが選択されるように制御を行う。State1のリーダー車両はリーダー確認パケットを定期的にブロードキャストし、その確認応答からメンバ車両の把握を行っている。このメンバ車両からの確認応答には速度情報が含まれている。確認応答を受信したリーダー車両は、自車両より速度の小さい車両を検知すると、その車両にリーダー要求パケットを送り、リーダーの交代を要求する。リーダー要求パケットを受信した車両は、リーダー交代の処理であると判断しState1の状態に移行し新規のリーダー車両となる。

リーダー車両どうし、すなわちグループどうしが接近した場合は、一方のリーダーを選択し他方はそのメンバへ変化しグループを再構成する。このとき速度の小さい方を優先してリーダー車両に選択する。

State1のリーダー車両がサービスエリアから流出した場合、流出したリーダー車両、残されたState2のメンバ車両とともに、一時的にパケット散布ができない状態になる。流出したリーダー車両はState1を維持するがサービスエリアの外にいるため、パケットの送受信は行えなくなり、残されたメンバ車両はリーダー車両と

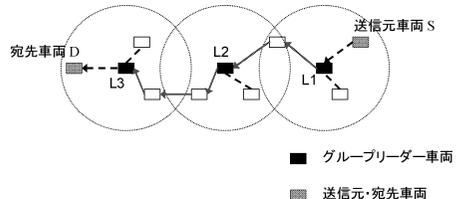


図4 データ転送方式

Fig. 4 Data transfer method.

通信できないため一時的にパケット散布ができない状態になる。ただし、リーダー確認パケットのタイムアウトにより、State3に移行し、そこから再びリーダーを選択するプロセスに入る。

同時に複数の車両がリーダーになった場合、お互いのリーダー確認パケットもしくはリーダー確認応答パケットを受信し、速度が最も小さい車両の車両はリーダーのまま、それ以外の車両はState3に移行する。

また、リーダー要求パケットの送出契機は、State3の孤立した車両が定期的に周辺車両に送信する場合と、State1のリーダー車両の速度が小さい車両とのリーダー交代の場合の2つある。

4.2.2 データ転送方式

上記のような形成方法によって、道路上に分布する速度の小さい車両をリーダーとするグループに収束する。グループリーダーとなった車両はまず近接のリーダー車両への通信ルートを構築し、またその後リンク切断を検知した場合などは再構築を行い、グループ間の通信ルートを維持する。このグループリーダー間のルート構築方式については次節で述べる。また、リーダー車両はグループ形成におけるリーダー確認パケットの送信によってメンバ車両を把握しており通信可能な状態である。図4のように車両グループが形成され、そのグループリーダー間で通信ルートが構築されている状態を考える。従来のリアクティブ方式では送信元車両Sは宛先車両Dへの通信ルートを検索し確立したうえでデータ転送を開始するが、本提案ではグループリーダー間で通信ルートが構築されておりこれを利用する。データパケットはグループリーダー間の通信ルートを順に経由させていき途中で宛先車両を発見し次第データパケットを送信するという方針である。これは道路という直線形状のエリアに車両グループが配置されていることから実現可能である。まず車両Sは自分の属するグループのリーダー車両：L1へデータパケットを転送する。これを受信した車両L1は近接のグループリーダー車両：L2へデータパケットを転送する。ここではエリア入口設置の路側ユニットからの走行制御を想定し、前方リーダーへ転送する。転送方向を特定でき

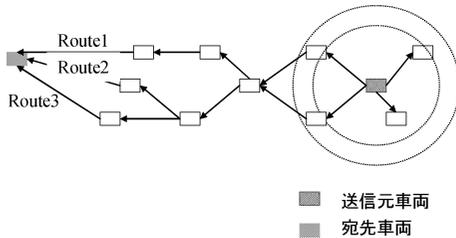


図 5 ルート発見の流れ

Fig. 5 Route discovery process.

ないデータの場合は両方向へ転送する。車両 L2 は自分のメンバ車両の中にデータパケットの宛先である車両 D があれば送信し、いなければさらに近接のグループリーダー車両：L3 ヘデータパケットを転送する。車両 L3 は自分のメンバ車両の中に宛先である車両 D があることを確認し送信し、データパケットの転送が完了する。

このようなデータ転送方式によって各車両は宛先車両への通信ルートを構築せずに即座にデータ転送を開始することが可能である。走行支援システムのようにプライオリティの高いサービスのために、このようにサービスエリア全体に 1 つの信頼性の高い通信ルートを構築し利用する方式が適している。

4.3 走行特性ルート選択

本研究では 2 つの車両間におけるルート構築方式として走行特性ルート選択方式を提案する。これは車両の走行特性である速度および加速度をメトリックとして利用したリアクティブルーティング方式であり、既存のリアクティブ方式である DSR にメトリック情報を付加し、リンク切断の起こりにくい安定したルート選択を制御する方式である。

リアクティブルーティングでは各ノードはルート情報の記載されたルーティングテーブルを保持する。ルート構築の手順は以下のような処理の流れで行われる。また図 5 にルート構築の具体例を示す。

ルート要求パケットの送信

データ送信を行う際送信元ノードはこのルーティングテーブルに宛先へのルート情報があればそれを用いてデータ送信を開始し、なければ新たにルート構築するためにルート要求パケット RREQ (Route REQuest) をブロードキャストする。RREQ を受信したノードはさらにブロードキャストを繰り返す、フラッディングが行われることで宛先ノードを検索する。ここで各ノードは RREQ の ID が記載されたブロードキャストテーブルを保持し、すでに受信済みである RREQ については再ブロードキャストは行わずフラッディ

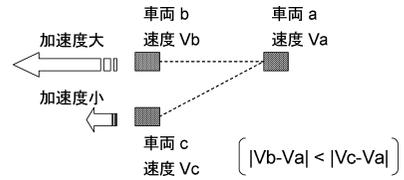


図 6 相対速度と加速度によるルートの安定性

Fig. 6 Route stability estimation using relative velocity and acceleration.

ングの重複を防止する。

ルート応答パケットの返信

宛先ノードは RREQ を受信するとルート応答パケット RREP (Route REPLY) を、RREQ が中継されてきたルート情報を用いて送信元ノードへ返信する。

ルート情報の決定

RREP を受信した送信元ノードはそのルート情報をルーティングテーブルに加えてルート構築が完了する。

本提案ではここで RREQ の情報にメトリック値を付加し、その値を用いて最適なルート情報を選択する。RREQ のフラッディングが行われる際、中継するノードは前ホップノードとの相対速度および自身の加速度をメトリック値に累積していく。宛先ノードは RREP にこのメトリックを付加して返信を行う。送信元ノードは 1 回のルート要求に対して複数の異なるルート情報を RREP から取得するが、その中からメトリック値の最小のものを最もリンク切断が起こりにくく安定したルートであると判断し選択する。

メトリック値 M は次のような式 (1) で表される。

$$M = \Sigma\{|V_p - V| + |t \cdot \alpha|\} \quad (1)$$

ここで V_p [km/h] は前ホップ車両の速度、 V [km/h] は自車両の速度、 α [km/h/sec] は自車両の加速度をそれぞれ表している。 t [sec] は加速度 α に対する重み付けとなっており、今回 $t = 1$ としている。リンク切断が起こりにくく安定したルートであると判断するためには、まず各リンクの相対速度が小さいことが基準となると考えられる。

しかし図 6 のように、車両 a と b の間の相対速度と車両 a と c の間の相対速度を比較したとき ab 間の値の方が小さかったとする。したがって相対速度の小さい ab 間の方がリンク切断が起こりにくく安定であるとまず考えられる。しかし車両 b と c それぞれの加速度について考慮し b の加速度が大きい場合は、今後車両 b についてリンク切断は起こりやすいと考えられる。このようにリンクの安定性には相対速度と加速度が影響するので、ルート情報に対するメトリック値は

これらの累積値で表し値の小さいものが安定したルートであると判断できる。

5. 評価

5.1 シミュレーション

本提案を計算機シミュレーションによって評価を行った。図 7 のようにシミュレーションのモデルを構成した。

高速道路環境におけるネットワーク道路の構築を想定し、サービスエリアとして直線形状の道路区間を設定した。各車両はサービスエリアの片側から流入し、もう片側へ通過するもしくはサービスエリア内に設けられた分流出より流出する。またサービスエリアの入り口には走行支援サービスを提供する路側ユニットを設置する。路側ユニットとの接続車両はデータの宛先車両へ車車間で構築された通信ルートを用いてデータパケットを転送する。

シミュレータには独自のイベント駆動型のシミュレータを用いた。また、車両はポアソン分布に従って到着し、初期速度は車線の平均車両速度と等しいものとした。到着の後、車両の加速度は、前方車両との車間距離に応じて加減するようモデル化した。これにより、速度が可変し、車両どうしの衝突を避けるとともに、車両密度を保つことが可能となる。

シミュレーション条件は表 1 のように設定した。

通信コネクションについては以下のように設定した。ネットワーク道路においてはサービスエリア全体に通信ルートが確立されていることが必要である。また小

容量のデータを様々な車両に対して送信するサービス形態であると考えられる。このことを評価するために、路側ユニットとの接続車両およびエリア長だけ離れた 2 台の車両を送信受信のコネクションとして設定し、1 sec ごとに再設定を行った。なお、本評価では提案プロトコルは IP レベルで動作するという前提で評価を行った。

5.2 比較方式と評価項目

以下の 4 つのルート構築方式を比較方式として評価を行った。DSR：リアクティブ型の代表的な既存方式、DSR+Metric：走行特性メトリックを利用した DSR、Proposal：グループ化ネットワーク構成と走行特性ルート選択を組み合わせた提案方式、No_min_speed：速度によるリーダ選択をしないグループ化構成と走行特性ルート選択を組み合わせた方式。

以下の項目について評価した。

パケット到着率

到達パケット数/総パケット数。ルート情報を保持していないまたはリンク切断により通信ルートが確立されていない場合は、パケットロスとカウントし再送処理は行わない。

平均ルート維持時間

ルートテーブルに記載されたルート情報がリンク切断時に発生する RERR (Route ERRor) により削除されるまでの時間を示す。ここでルート情報の有効期限は 3 sec と設定しており、平均ルート維持時間は 0 ~ 3 sec の値で示される。

オーバーヘッド

ルート構築処理における制御パケットである RREQ, RREP, RERR の通信量を示す。DSR において制御パケットのサイズは宛先までのホップ数により変化するが 20~40 Byte 程度であり、平均制御パケットサイズを 40 Byte として算出した。また、グループ形成の制御パケットのリーダ要求パケット、リーダ要求応答パケット、リーダ確認パケット、リーダ確認応答パケットの送受は含まれていない。

平均ホップ数

各方式により構築されたルートの平均ホップ数を示す。

5.3 評価結果

5.3.1 パケット到着率

図 8 にパケット到着率とサービスエリア長の関係を示す。サービスエリア長が大きくなるとホップ数も増加しパケット到着率は低下するが、各方式について比較すると DSR と DSR+Metric の値の低下に比べて、

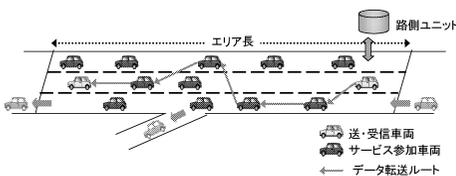


図 7 シミュレーションモデル
Fig. 7 Simulation model.

表 1 シミュレーション条件
Table 1 Simulation parameters.

エリア長, 車線数	直線 200 ~ 1,200 (m), 3 車線
車両密度	15 ~ 120 (vehicle/km)
車両の発生	ポアソン分布
平均車両速度	車線 1 ~ 3 : 80, 90, 100 (km/h)
無線通信規格, 無線距離	IEEE802.11b, 100 (m)
リーダ確認・要求パケット発生周期	100 (msec)
データパケット発生周期	10 (msec)
総データパケット数	10,000

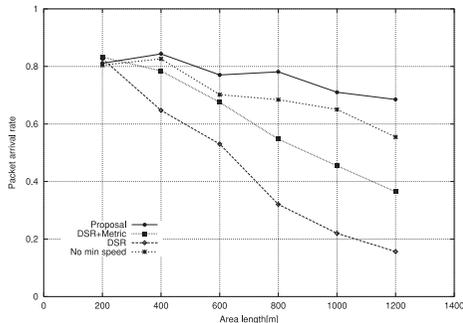


図 8 サービスエリア長に対するパケット到着率 (車両密度 60 vehicle/km)

Fig. 8 Packet arrival rate vs. service area length (vehicle density 60 vehicle/km).

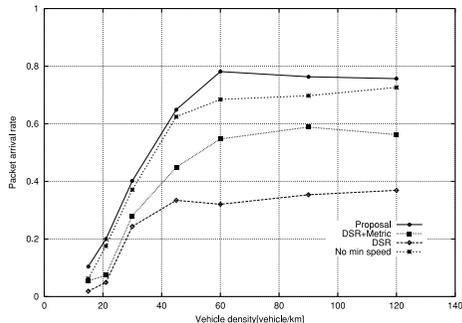


図 9 車両密度に対するパケット到着率 (サービスエリア長 800 m)

Fig. 9 Packet arrival rate vs. vehicle density (service area length 800 m).

Proposal と No_min_speed は値の低下が緩やかになっている。この理由は第 1 に DSR と DSR+Metric では宛先までのルート情報を全体として構築し管理しているのに対し、Proposal と No_min_speed ではグループ間ごとにルート構築しているためにリンク切断が起こりにくくなっていることである。第 2 に Proposal と No_min_speed ではグループ間で構築された通信ルートを利用することで、送信元車両は自身で宛先へのルート情報を保持していなくてもデータ転送を実行することが可能であるからである。

DSR と比較し DSR+Metric の値が上回っているのは、走行特性ルート選択によってリンク切断の起こりにくい安定したルート情報を選択しているためである。

No_min_speed と比較し Proposal の値が上回っているのは、速度の小さい車両をグループリーダーとして選択しているため、グループ間のルートのサービスエリア内に存在する時間が大きくなり、ルートの再構築が起こりにくいからである。

図 9 にパケット到着率と車両密度の関係を示す。各方式どうしの比較については図 8 の場合と同様の理由であると考えられる。全体的な傾向としてどの方式も、まず車両密度の増加にともないパケット到着率も増加し、車両密度が 60 vehicle/km 以上になると到着率は一定値に収束している。また車両密度 30 のとき、すなわち車間距離が約 100 m と高速走行に十分であるとき提案方式は DSR の約 2 倍の値を示している。

以上から、走行特性ルート選択の制御、またグループ化ネットワーク構成それぞれの提案によってパケット到着率が向上したことが確認できた。

5.3.2 平均ルート維持時間

図 10 に平均ルート維持時間とサービスエリア長の関係を示す。DSR と DSR+Metric の値はサービスエリア長が大きくなるに従い低下しているのに対し、

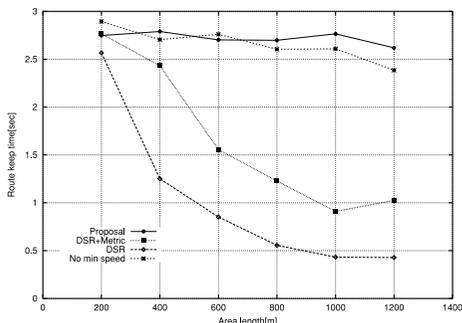


図 10 サービスエリア長に対する平均ルート維持時間 (車両密度 60 vehicle/km)

Fig. 10 Average route available period vs. service area length (vehicle density 60 vehicle/km).

Proposal と No_min_speed について見ると、サービスエリア長の変化に対してほぼ一定した値となっている。これはグループ化ネットワーク構成により通信ルートがグループ間ごとに構築されているので、エリア長が大きくなっても各通信ルートのホップ数はほぼ一定なためである。

Proposal と No_min_speed を比較すると、サービスエリア長が大きい場合 (800 m 以上)、Proposal の値が上回っている。この理由は第 1 に Proposal では速度の小さい車両をグループリーダーに選択していることにより、ルートのサービスエリア内での存在時間が大きくなり、ルートの再構築が起こりにくくなったためである。また第 2 に各グループリーダーどうしの速度が小さい値に収束しているためにお互いの走行特性が近くなり、グループ間で安定なルート選択を実現しやすくなっているためである。一方、サービスエリア長の小さい場合 (800 m 以下) は、Proposal と No_Min_speed で顕著な差は現れていない。本提案は全体としてグループリーダーがサービスエリア内に滞在する時間が長くなることを期待している。しかし、そも

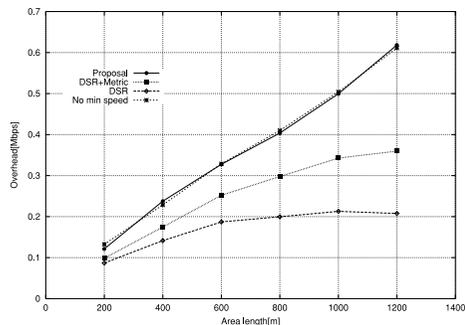


図 11 サービスエリア長に対するオーバーヘッド
(車両密度 60 vehicle/km)

Fig. 11 Amount of control packets vs. service area length (vehicle density 60 vehicle/km).

そもサービスエリア長が小さいと、速度の小さな車両をグループリーダーに選択しても、その車両のサービスエリアでの滞在時間が短いため、Proposal の効率に顕著な向上は見られなくなる。

以上から、走行特性ルート選択によってルート維持時間の大きい安定なルートが選択されていること、グループ化ネットワーク構成によってサービスエリア規模の拡大に対応したルート構築が実現できていることが確認できた。

5.3.3 オーバヘッド

図 11 にオーバーヘッドとサービスエリア長の関係を示す。オーバーヘッドはルート構築の制御パケットである REEQ, RREP, RERR であるが、ルート検索のためにフラッディングが行われる RREQ が最も影響する。サービスエリア長が大きくなることで RREQ によるルート検索の範囲が拡大するので値が増加している。

DSR と DSR+Metric を比較すると DSR+Metric の方が値が大きい。フラッディングでは RREQ の ID を管理し受信済みの RREQ の再ブロードキャストを防止している。しかし DSR+Metric ではより安定なルートを検索するために、受信済みの RREQ であってもメトリック値のより小さいものについては再ブロードキャストを行うためオーバーヘッドが増加している。

Proposal と No_min_speed について見るとほぼ同程度の値を示しており、DSR+Metric と比較すると値は増加している。

DSR+Metric では送信元車両からエリア全体に RREQ がフラッディングされる。一方、Proposal と No_min_speed ではグループ化ネットワーク構成によりグループリーダー間ごとでルート構築が行われる。このとき、各リーダーは前後の近接リーダーが存在すると考えられる範囲に限定して RREQ をフラッディングす

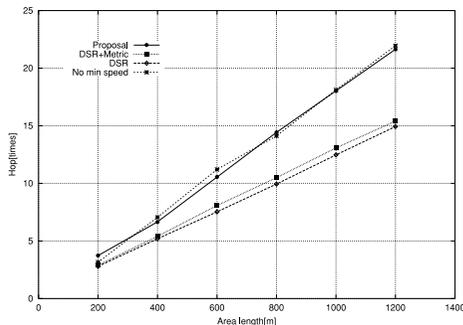


図 12 サービスエリア長に対する平均ホップ数
(車両密度 60 vehicle/km)

Fig. 12 Average number of hops vs. service area length (vehicle density 60 vehicle/km).

る。そのため、近接リーダーどうしてフラッディングの範囲に重複が生じる。したがって、同じサービスエリア長でも DSR+Metric に比べてオーバーヘッドが増加していると考えられる。このオーバーヘッドは今のところ安定性の高いルートを維持するうえで許容せざるをえないオーバーヘッドである。

以上のことから本提案の適用によって既存方式である DSR よりオーバーヘッドは増加することが確認されるが、サービスエリア長の拡大に対応するためであり本提案の有用性は保たれると考えられる。

5.3.4 平均ホップ数

図 12 に平均ホップ数とサービスエリア長の関係を示す。DSR と DSR+Metric に比べ、Proposal と No_min_speed ではサービスエリア長の増加に対するホップ数の増加量が大きいことが分かる。これは DSR と DSR+Metric では最短ルートを使用しようとするのに対し、Proposal と No_min_speed では先にグループを構成し、その間をつなぐルートを構築するため、必ずしもグローバルに最短ルートを使用するわけではないからである。

6. おわりに

本稿では、走行支援を提供するために特定道路区間に対する車車間ネットワーク環境の実現を目指し、特定道路区間にとどまる道路固定型ネットワークについて考察し、速度の小さい車両をリーダーとしたグループ化ネットワーク構成と走行特性を利用したルート選択による、ルート構築方式を提案した。

計算機シミュレーションによって評価を行った結果、サービスエリア長が 1,200 m のときに、既存方式ではパケット到着率が 20% まで大幅に低下するのに対し、提案方式では必ずしもグローバルに最短ルートを使用するわけではなく、平均ホップ数が増加するが、パケッ

ト到着率は70%と高い値を保つことが可能であると示された。以上のことからサービスエリア規模の確保やエリア内により長くとどまる位置依存のネットワーク構成という点に対し本提案の有効性が示され、ネットワーク道路の構築手法として提示することができた。

今後、車車間通信において走行支援が求められる交差点や合流など、より複雑な道路環境に適用するために、本稿で提案した方式を拡張する予定である。

参 考 文 献

- 1) Lochert, C., Hartenstein, H. and Tian, J.: A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments, *IEEE Proc. Intelligent Vehicles Symposium*, pp.156–161 (2003).
- 2) Lochert, C., Mauve, M. and Fubler, H.: Geographic routing in city scenarios, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, Vol.9, No.1 (2005).
- 3) Wu, H., Fujimoto, R., Guensler, R. and Hunter, M.: MDDV: A Mobility-Centric Data Dissemination Algorithm for Vehicular Networks, *ACM Proc. 1st ACM workshop on Vehicular ad hoc networks*, pp.47–56 (2004).
- 4) Nambodiri, V., Agarwal, M. and Gao, L.: A Study on the Feasibility of Mobile Gateways for Vehicular Ad-hoc Networks, *ACM Proc. 1st ACM workshop on Vehicular ad hoc networks*, pp.66–75 (2004).
- 5) Chen, Z., Kung, H. and Vlah, D.: Ad Hoc Relay Wireless Networks over Moving Vehicles on Highways, *ACM Proc. 2nd ACM International Symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pp.247–250 (2001).
- 6) Mauve, M., Widmer, J. and Hartenstein, H.: A Survey on Position-Based Routing in Mobile Ad Hoc Networks, *IEEE Network*, November/December 2001, pp.30–39 (2001).
- 7) 齋藤正史, 船井麻祐子, 梅津高朗, 東野輝夫: アドホック通信に基づく行き先経路の道路情報取得プロトコルの開発, 情報処理学会研究報告, 2004-ITS-16, pp.49–56 (2004).
- 8) 吉田成志, 新井国充, 浅見重幸, 三木哲也: 車両アドホックネットワーク向けルーティング方式の提案, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J88-B, No.8, pp.1434–1443 (2005).

(平成 18 年 4 月 1 日受付)

(平成 18 年 10 月 3 日採録)



成田 干城 (学生会員)

平成 18 年慶應義塾大学大学院理工学研究科開放環境科学専攻情報通信メディア工学専修修士課程修了。同年キャノン株式会社入社。



春名 恒臣 (学生会員)

平成 18 年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。現在、同大学大学院理工学研究科開放環境科学専攻情報通信メディア工学専修修士課程在学中。高度道路交通システムの車車間通信の研究に従事。



重野 寛 (正会員)

平成 2 年慶應義塾大学理工学部計測工学科卒業。平成 9 年同大学大学院理工学研究科博士課程修了。現在、同大学理工学部情報工学科助教授。博士(工学)。計算機ネットワーク・プロトコル, モバイル・コンピューティング, マルチメディア・アプリケーション等の研究に従事。情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会幹事。著書『～ネットワーク・ユーザのための～無線 LAN 技術講座』(ソフト・リサーチ・センター)、『コンピュータネットワーク』(オーム社)等。電子情報通信学会, IEEE, ACM 各会員。



岡田 謙一 (正会員)

慶應義塾大学理工学部情報工学科教授。博士(工学)。専門はグループウェア, コンピュータ・ヒューマン・インタラクション『コラボレーションとコミュニケーション』(共立出版)をはじめ著書多数。GN 研究会運営委員, MBL 研究会運営委員, 日本 VR 学会仮想都市研究会幹事。情報処理学会論文誌編集主査, 電子情報通信学会論文誌編集委員。ECSEW2001 プログラム委員, INTER-ACT2001 財務委員長。IEEE, ACM, 電子情報通信学会, 人工知能学会各会員。平成 7 年度情報処理学会論文賞, 情報処理学会 40 周年記念論文賞, 平成 12 年度情報処理学会論文賞受賞。