

車々間通信とアドホックネットワーク

間瀬 憲一†

Inter-Vehicle Communications and Mobile Ad Hoc Networks

Kenichi MASE†

あらまし モバイルアドホックネットワーク (MANET) の有望な利用方法の一つは車々間通信である。本論文は車々間通信を対象としたアドホックネットワーク (VANET) に関する論文のサーベイである。主な内容は次のとおりである。まず、車々間通信の特徴について述べ、VANET と一般的な MANET の特徴、相違点を示す。次に、VANET の主なアプリケーションを運転支援サービス、道路交通情報サービス、ユーザ通信・情報サービスの三つに分類して示す。近い将来大多数の車が GPS、デジタル道路地図などを装備することを想定し、位置情報を利用するルーチングプロトコルに注目する。具体的にはユニキャストとジオキャストに関して、それらを実現する多くのルーチングプロトコルの提案を二つの代表的なアプローチ、次ホップ中継方式と指向型フラッディングに分類し、それぞれの特徴、課題をまとめる。最後に、VANET アプリケーションの代表例として、アラーム転送方式と道路交通情報サービスを示す。

キーワード 車々間通信, VANET, アドホックネットワーク, ジオキャスト, フラッディング

1. まえがき

交通事故による死傷者増加、環境への悪影響は大きな社会問題になっており、自動車運転の高度安全化、効率化、快適化などを目的として新たなサービスを創出するため、多くの取り組みや共同実験プロジェクトが行われている [1]~[6]。サービスには車そのものに関するもの (保守など)、運転に関するもの (安全性、効率性など)、利用者に関するもの (情報収集、娯楽など) がある。自動車に各種センサ機能を搭載し、自動車内部、自動車相互や外部との通信手段をもたせることで、これらの多彩なサービスの実現が可能になると考えられる。

自動車内部の通信には LAN を装備し、自動車と外部の通信には従来の移動通信や無線 LAN の技術を適用することが考えられる。一方、自動車相互の通信 (車々間通信) にはモバイルアドホックネットワーク (MANET) の利用が考えられる。MANET は移動通信の基地局や無線 LAN のアクセスポイント、固定網を必要とせず、端末 (ノード) のみで構成されるネッ

トワークである。二つのノードが通信範囲にあれば直接通信し、通信範囲外であれば他のノードと複数リンクを経由して通信する。このような通信形態をマルチホップ通信と呼び、中継ノードはルータの役割を果たす。MANET は通信インフラを利用できない軍事作戦での通信手段として注目されてきたが、センサネットワークやユビキタスネットワーク実現の観点から注目される技術であり、近年、研究開発や標準化が進展している [7], [8]。

車々間通信に適用されるアドホックネットワークは VANET (Vehicular Ad hoc NETwork) と呼ばれる。自動車には GPS やデジタル道路地図を利用するカーナビゲーションシステムが標準装備化されつつあり、これらを利用することで、従来の MANET より効率的な情報配信も可能である。車々間通信は特に、車同士の交通事故防止や周辺の交通状況把握のため有望な技術と考えられる。本論文では、VANET における情報配信、情報共有技術に着目して論文サーベイを行い、研究開発動向を展望する。

2. 車々間通信の特徴

車々間通信を従来のセル方式移動通信網を経由して行うことは可能であるが、これはセルのカバー範囲で

†新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟市
Graduate School of Science and Technology, Niigata University,
2-8050 Ikarashi, Niigata-shi, 950-2181 Japan

のみ利用可能である。国全体の道路をすべてセルでカバーするためには膨大な投資が必要になる。VANETはセルの内外にかかわらずサービスが可能であり、また、セルのカバー範囲においてもより効率的で低コストとなる場合もあり得る。利点として次の三つが挙げられている [9]。

- (1) 安全に関する情報の許容時間内の低遅延転送
- (2) 低通信コスト
- (3) 位置情報に基づく近隣車への通信

これらの利点は車々間通信において考えられる次のシナリオや条件に基づいている。

(1) 車は多くのセンサをもち、それらが車々間通信でやり取りされる情報の発信源になる。このような場合、情報量は比較的少なく周期的に発生し許容時間内に転送される必要がある。

(2) 車々間通信は地理的に近く、匿名の車の間で行われることが多い。

車以外に道路沿いに固定ノードを設置しておき、VANETに参加させることも可能である。これらのノードはセンサや交通信号機の制御機能を有し、インターネットなどの固定網へのゲートウェイとして利用される。また、車々間通信、路車間通信における情報の一時的な保管場所として利用も考えられる [10], [11]。

一般的に MANET ではノードとして、携帯 PC、PDA などの移動ノードが想定されるが、VANET はそのような MANET とは異なる特徴をもつ。以下では車そのものもノードと呼ぶ。

(1) VANETに参加するノードは広大なエリアに散在する。

(2) 参加ノードは常に変化し互いに匿名である。

(3) ノードの移動範囲は道路、交差点などの物理的構造に従う。

(4) ノード密度と速度は場所と時間により大きく変化し、大きな相関を有する。

(5) 十分な電力供給が可能である。

(6) 各ノードは GPS などを利用し、自身の位置情報を認識可能である [12]。また、デジタル道路地図も利用可能である。

(7) 各ノードは複数の無線インタフェースをもち、複数チャネルを利用可能である。これによる重量増とコスト増は許容される。

(8) 各ノードは多くのセンサをもち、データを周期的/随時に、また独立/同期して発生する。

(9) メッセージの緊急性により、メッセージ転送

に優先性の考慮が必要である。

3. VANET アプリケーションと技術課題

VANETには多くのアプリケーションが考えられ、以下の三つに分類される [11], [13]~[21]。

運転支援サービス：このサービスの目標は交通事故を減らし、運転の安全性と効率を増加させることである。例えば急ブレーキ情報を即座に後続の車へと伝搬させ追突事故を防止する。車の位置や速度を近くの車とやりとりすることにより、車線の変更、車線の合流、交差点通過などを安全に効率的に行うための協調的運転を行う。

道路交通情報サービス：このサービスの目標は運転者に周辺（例えば半径 50 km 以内）の道路の交通情報を知らせるものである。例えば道路を長さ 500 m ごとの区間に分割し、各道路区間の車の平均速度を通知する。このようなサービスは集中管理型のシステムでも実現できるが、車々間通信による自律分散型のシステムにより、より効率的・経済的に実現できる可能性がある。

ユーザ通信・情報サービス：このサービスの目標は他の車との間で駐車場やガソリンスタンドなどの情報を交換したり、道路沿いのゲートウェイを利用してインターネット接続を提供することである。

VANET アプリケーションを実現するには、物理層・データリンク層、ネットワーク層、トランスポート層、応用層にわたる各種の技術課題がある。物理層・データリンク層では、任意の車々間、路車間でのアドホック通信機能が必要であり、無線 LAN/MAN 技術の利用が考えられる。車々間には現状で利用可能なものとして IEEE802.11 シリーズの 11b, 11g, 11a など既存の無線 LAN 規格がある。更に高速の 11n 規格の開発も進展している。車々間に特化したものとしては専用狭域通信 (DSRC: Dedicated Short Range Communication) に基づく 11p 規格の開発が進められている。また、路車間には MAN に分類される IEEE802.16e 規格の利用も考えられる。ネットワーク層では、ルーティングプロトコル、IP アドレスオートコンフィギュレーションなどが課題である。MANET を対象として各種ルーティングプロトコルが提案され、IETF で標準化も進展しているが [8]、これらは 2. で述べた VANET の特性には必ずしも適合するものとはいえない。このため VANET で有効なルーティングプロトコルを確立する必要がある。MANET のオートコンフィギュレーション

は IETF における標準化検討が本格的に開始されたところである。トランスポート層では TCP と UDP があるが、特に TCP についてノード移動に伴うリンク状態の変化の影響など、MANET, VANET 環境特有の課題がある。応用層では上述したアプリケーションの実現に有用で共通的な機能要素を確立することが重要である。更に性能改善のための層横断的な種々の課題がある。以下では VANET の情報配信、情報共有を大きく特徴づけるものとして、4., 5. ではネットワーク層、6., 7. では応用層の関連技術課題を示す。

4. ルーチングプロトコル

4.1 概要

MANET のルーティングプロトコルはトポロジー利用型と位置情報利用型に大別される。トポロジー利用型は更にプロアクティブ型とリアクティブ型に分類される。プロアクティブ型は各ノードが制御メッセージをやりとりし、あらかじめすべてのノードに対する経路を構築し、経路情報を常に更新していく方式である。リアクティブ型は送信するデータが生じた時点で、経路がなければ終点への経路をそのときに発見する方式である。どちらの方式もフラッディングプロトコルなどにより制御メッセージの MANET 全体への配信が必要であり、ノードの数が数百以上になると制御メッセージの負荷のためパケット転送性能が低下するというスケーラビリティの問題がある。

位置情報利用型では、各ノードは GPS やその他の方法で自身の位置情報を認識している。始点ノードは終点ノードの位置情報をロケーションサービス [22]~[25] により知り、パケットのヘッダに終点アドレスに加えて位置情報を設定する。そして、終点の位置情報に対して、ローカルな位置情報（自身と隣接ノードの位置情報など）だけを利用してパケット配送を行う。本方式は基本的にはデータパケットの配送に用いるが、リアクティブ型の経路要求メッセージの配送に適用する方法も提案されている [26]。位置情報利用型はトポロジー利用型に内在するスケーラビリティの問題を緩和する可能性がある。特に自動車では GPS やこれを利用するカーナビゲーションシステムが標準装備化される動向にあり、VANET 環境では有望なアプローチと考えられる。

位置情報利用型でパケット配送を行い、与えられた終点ノード位置に最も近いノード（最終中継ノード）までのパケット配送が成功したとしてもパケットが終

点ノードにより受信されるとは限らない。二つの原因が考えられる。一つは GPS による位置情報に誤差がある。二つ目にロケーションサービスによって与えられた位置情報が正確であってもロケーションサービスとパケット配送に一定の時間がかかり、その間に終点ノードが移動することによる。その結果、終点ノードが最終中継ノードの通信範囲外に存在する場合がある。これに対応するため、位置情報利用型とトポロジー利用型の組み合わせ型も提案されている [24], [27]。

位置情報利用型の通信にはユニキャストとジオキャストが考えられる (図 1)。ユニキャストは 1 対 1 通信のことであり、前述のように始点はロケーションサービスにより終点の位置情報を獲得する。終点の位置情報はパケットヘッダに IP アドレスなどの終点ノード ID と一緒に格納される。ユニキャストは運転支援サービスとユーザ通信・情報サービスでの利用が考えられる。ジオキャストは 1 対他のマルチキャスト通信であり、ある領域（終点領域）を終点として指定し、その終点領域に存在するすべてのノードにパケットを配送することを目標とする [28]。終点領域の情報もパケットヘッダに格納される。終点領域は座標などで明示的に与えられるとは限らない。始点ノードの位置からの方向や距離で指定されることもあり得る [18], [29]。ジオキャストは運転支援サービスと道路交通情報サービスでの利用が考えられる。

位置情報利用型では、ジオキャストはユニキャストの自然な拡張として実現できるので、以下では両者を同じフレームワークの中で述べる。位置情報利用型のルーティング方式は次ホップ中継方式と指向型フラッディング方式の二つのアプローチに分類される。表 1 に両者の特徴を示す。次ホップ中継方式はトポロジー

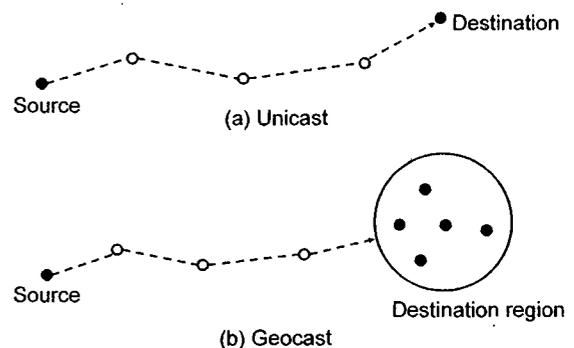
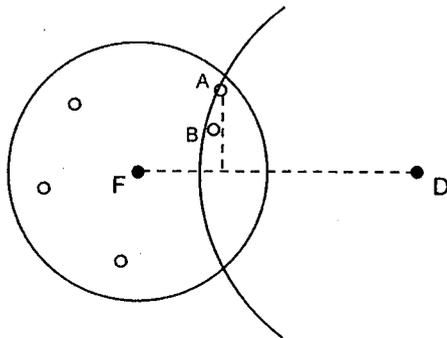


図 1 ユニキャストとジオキャスト
Fig. 1 Unicast and geocast.

表 1 位置情報利用型の二つのアプローチ
Table 1 Two approaches for position-based routing.

	Hello-based neighbor detection	MAC address	Comments
Next-hop forwarding (Greedy forwarding)	YES	Unicast address (Reliable)	- Control overhead occurs. - Hello interval may be set proportional, to local node density.
Directed Flooding	NO	Broadcast address (Not reliable)	- Forwarding zone and distance-aware-timer-based suppression may be used to reduce the flooding overhead. - Passive acknowledgement may be used.



A : Most Forward within Radius (MFR)
B : Least Distance to Destination (LDD)

図 2 次ホップ転送方式
Fig. 2 Next-hop forwarding.

利用型で通常利用される方式であり、位置情報利用型での利用も考えられる。この方式はユニキャストでよく用いられるが、ジオキャストでの利用も考えられる [30]。指向型フラッディング方式は位置情報利用型特有の方式である。

4.2 次ホップ中継方式

本方式では各ノードは周期的に 1 ホップのハローパケットを送信し、隣接ノードに対して自身の ID と位置情報を広告する。または、ハローパケットのオーバーヘッドを低減させるため、データパケット配送時に隣接探索メッセージをブロードキャストし、隣接ノード情報を集める [31], [32]。原理的には、配送ノードは終点 (ユニキャストの場合)、終点領域 (ジオキャストの場合) の方向へ、自身より近く最も前進距離が大きいノード (MFR: Most Forward within Radius) [33] あるいは最も近いノード (LDD: Least Distance to the Destination) [34] を中継ノードとして選択する (図 2)。ジオキャストにおいて、終点領域への距離は例えば終点領域の中心点を基準に算定する。このような中継ノードの選択方法は貪欲前進法 (Greedy

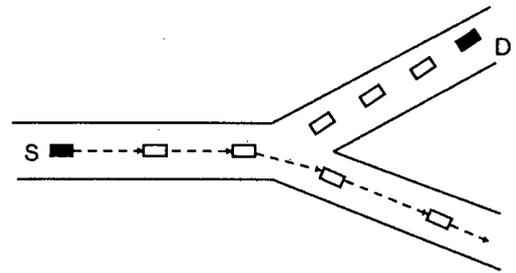


図 3 局所最大問題
Fig. 3 Local maximum problem.

forwarding) と呼ばれる。実際には選択された次ホップへのパケット送信はそのノードの ID に基づいて行う。位置情報だけでは誤差もあるので、ノードを特定できない。もし、隣接ノードが終点ノード/終点領域の方向に見つからない場合、配送ノードにおいて一時的にパケットを保管し、隣接ノードを発見するとパケットを送信する方法も考えられる [35]。この方法は MANET に一時的に分割が生じているときに有効であり、終点領域におけるフラッディングでも利用可能である [29]。

IEEE802.11 などの標準的なリンク層プロトコルを想定すると、選択された次ホップへのパケット中継においてリンク層でのフレームではあて先アドレスとして MAC ユニキャストアドレスを使用する。フレーム配送の高信頼化のため、配送失敗時の再送メカニズムが提供されている。一方、後述するように、指向型フラッディングにおいては MAC ブロードキャストアドレスが使用される。この場合には再送メカニズムが提供されていない。

隣接ノードの情報を正確に維持するため、ハロー周期は短い方が良いが、一方でオーバーヘッドは増大する。したがって、適切なハロー周期の選定が重要になる。また、ハローによるオーバーヘッドは隣接ノードが多いほど大きくなるので、一つの方法としてハロー周期を周辺のノード密度に比例させる方法が提案されている [35], [36]。VANET では渋滞などの高密度の状態が出現するが、そのような場合には車の速度は一様に低速化する傾向がある。このような場合にはハロー周期を大きくしても隣接ノードの変化が少なく許容される。したがって、上記の方法は VANET 環境では有効であると考えられる。

一般に貪欲前進法は終点ノードへ至るパスがあるにもかかわらず、終点にパケットを配送できない場合がある。一例を図 3 に示す。この問題は局所最大 (Local

maximum) と呼ばれ、様々な回復方法が提案されている [23], [31], [34]. 例えば, トポロジー利用型を併用する [37]. 別の方法として, 終点へのパスにおいていくつかの通過地点をあらかじめ指定しておき, 各配送ノードが次の通過地点を目標として次ホップを選択する. [27] ではこのような通過地点をアンカーと呼んでいる. この方法ではアンカーの適切な選択方法が課題となる. VANET 環境でデジタル道路地図が利用可能であることを前提とすれば, 道路に沿った貪欲前進法により次ホップを選択することが可能であり [35], [38], 複雑な回復方法を使用する必要もなく局所最大問題を自然に解決できることになる.

ユニキャストの場合, ID に基づく次ホップ中継は終点ノードへの最終ホップでも利用される. ジオキャストの場合には, 終点領域内で, 後述する指向型フラッディングにおいて多く利用される単純フラッディング法が利用できる. しかし, 周期的なハローメッセージ交換により収集した隣接ノードの情報を有効利用し効率的フラッディングを行う方法も考えられる [32], [36], [39]~[46].

多くのジオキャストプロトコルでは終点領域は二次元平面上の領域として与えられる. VANET 環境で終点領域が道路上に限定されるならば終点領域を一次元領域として扱うことが可能である (一次元法). [32], [47] では車の前進方向の情報に基づき, このようなアプローチが示唆されている. 更にデジタル道路地図を利用すれば一次元法をより直接的に実現可能である. すなわち道路に沿った貪欲前進法によるブロードキャストの連鎖により道路上に限定された終点領域全体をカバーできる. これにより非常に単純なジオキャストを実現できる. 一次元法は次の条件が成立すれば有効である [48]. すなわち, 道路幅を L , 最大送信距離を R とするとき,

$$L \leq \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot R \quad (1)$$

一例として, $R = 150 \text{ m}$ とすれば, 道路幅が 129 m までは一次元法が有効になる. 道路幅は通常 100 m 以内であり IEEE802.11b などの無線 LAN でも一次元法が十分適用可能である.

4.3 指向型フラッディング方式

本方式はハローメッセージを用いない方法であり, その分オーバーヘッドが少なくなる [49]. 指向型フラッディングは基本的には単純フラッディングプロトコルに基づいて実現される. 単純フラッディングプロトコ

ルとは, 始点ノードがパケットをブロードキャストし, それを受け取ったノードが次々と再ブロードキャストを繰り返すことにより, MANET 全体にパケットを配送するものである. このとき, 同じパケットを複数回受信することがあり得るが, 再ブロードキャストを行うのは最初のパケットを受信した場合だけである. このような単純フラッディングを行えばユニキャスト, ジオキャストの両者を実現できるが, MANET 全体に不要にパケットを送っていることになり, 膨大なフラッディングオーバーヘッドを生ずる. ユニキャスト, ジオキャストではパケット配送の対象地域が限定されているので, MANET 全体にパケットを配送する必要はない.

そこで, 指向型フラッディングの目標は終点 (ユニキャスト) / 終点領域 (ジオキャスト) の位置情報を利用してできるだけフラッディングオーバーヘッドを削減することである. 指向型フラッディングではパケットを受信した各ノードは, そのパケットを再ブロードキャストするか否かを地理的な条件に基づき独立に決定する. 具体的には, 始点または再ブロードキャストしたノード (配送者) と終点/終点領域の間に, 終点/終点領域を含む中継ゾーンが定義される [22], [28] (図 4). そのパケットを受信した隣接ノードは自身が定められた中継ゾーンの中に位置するか否かを判定し, 中継ゾーン内に位置する場合には再ブロードキャ

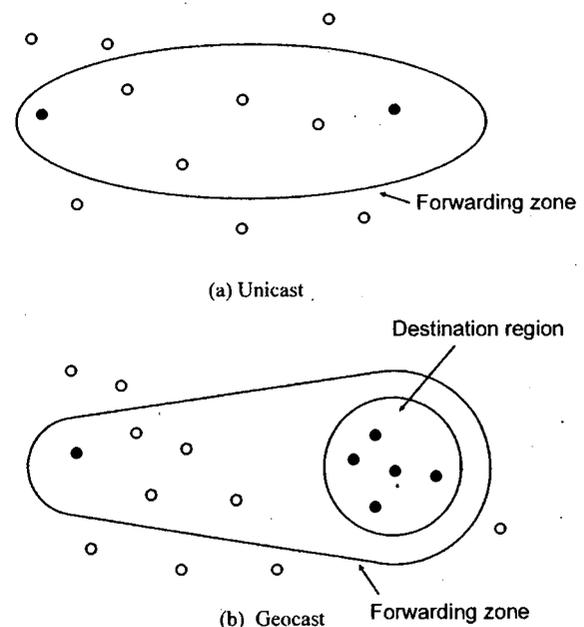


図 4 指向型フラッディング
Fig. 4 Directed flooding.

ストを行う。中継ゾーン外である場合には受信パケットを破棄する。この方法は中継ゾーン内に隣接ノードが存在しない場合には、パケット配送が失敗することになる。その場合でも、中継ゾーン外には終点/終点領域に到達できる隣接ノードが存在する可能性もある。パケットの終点/終点領域への到達性を改善するため、中継ゾーンを広げることは可能であるが、より多くのノードが不必要に再ブロードキャストに参加するため、フラッディングオーバーヘッドが増大する [28]。したがって、中継ゾーンの最適化設計は興味ある問題であり、様々な方法が提案されている [22], [26], [49] ~ [51]。VANET ではこの問題はデジタル道路地図を用いることにより、単純化できる可能性がある。すなわち始点と終点/終点領域の位置情報が与えられたとき、地図上での最短経路に含まれる道路区間により中継ゾーンを構成すればよい。

更にフラッディングオーバーヘッドを削減するため、距離タイマ抑制法を使用することができる。これに属するものとして、距離遅延伝送プロトコル [47] は単純フラッディングを前提として提案された方式であるが、指向型フラッディングにも適用可能である。競合中継法 [51] と無ビーコンルーティングアルゴリズム [49] はユニキャストを前提として提案された方式である。距離タイマ抑制法では、パケットを受信したノードが中継ゾーン内にある場合、すぐにはパケットの再ブロードキャストを行わない。まず、自身の位置とパケット配送者の位置情報から計算される前進量に基づき、タイマ値を設定する。前進量とは終点/終点領域の方向へパケットが前進した距離を示すものである。前進量は例えば以下のように定式化される [51]。

$$P(f, z, n) = \max \left\{ 0, \frac{\text{dist}(f, z) - \text{dist}(n, z)}{R} \right\} \quad (2)$$

ここで、 f, z, n はそれぞれ、配送者、終点、パケットを受信したノードの位置を示す。 $\text{dist}(x, y)$ は x, y 間の距離を表し、 R は通信距離を表す。この式は前述の LDD に基づく。ジオキャストの場合、終点領域の中心位置を z とする。このとき、タイマ値は

$$t(P) = T(1 - P) \quad (3)$$

のように設定される。ここで、 T は最大中継遅延を表す。タイマ値が 0 となったときパケットを転送する [29], [51]。

ノードが他のノードのパケット送信を傍受したときの振舞いはユニキャストとジオキャストで異なる。ユ

ニキャストの場合、ノードはタイマをキャンセルし、パケット中継を中止する。ジオキャストの場合、傍受したパケットの送信者の位置により、中継に参加する場合と中止する場合がある。具体的には、ノードは与えられた通信半径に基づき、中継ゾーン内での自身のパケット送信による被覆領域増分を計算し、それが与えられたしきい値より大きければ、タイマ値が 0 となったとき、パケット送信を行う (図 5)。被覆領域増加分とは、そのノードの通信範囲からそのノードが同一パケットを受信した他のノードによる被覆領域を除いたものである [39]。この考えは終点領域におけるパケット送信のために提案されているが [47]、中継ゾーンにおいても利用できる。

指向型フラッディングでは始点、中継ノードはブロードキャストを行う。データリンク層ではフレームヘッダにブロードキャスト MAC アドレスが使用される。IEEE802.11 のような標準的リンク層プロトコルではブロードキャスト MAC アドレスのフレームに対し再送メカニズムは提供されていない。これが次ホップ中継方式との大きな違いである。リンクレベルのパケット配送を高信頼化するため、ネットワーク層のサポートが考えられる。一つの方法は受動的確認応答である。これは、ノードが隣接ノードへのパケット配送が成功したかどうかを隣接ノードのパケット再ブロードキャストを傍受することで確認するものである [49]。この方法では、ユニキャストの場合、終点ノードも再ブロードキャストを行う必要がある。もし、確認応答が得られない場合、配送者はパケット再送を行うが、その分フラッディングオーバーヘッドは増加する。この方法は次ホップ中継方式と同様、MANET に一時的に分割が生じた場合に有効である。

指向型フラッディング方式のジオキャストでは、終

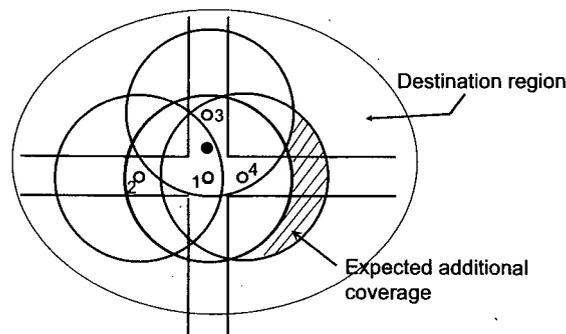


図 5 ノード 4 で計算した被覆領域増加分
Fig. 5 Expected additional coverage calculated by node 4.

点領域において、通常、単純フラッディングが利用される。これは次ホップ中継方式のように隣接ノードの情報に基づく効率的なフラッディングが使えないからである。それでも、なお、各ノードはフラッディングオーバーヘッドを削減するため、前述の被覆領域増加などの手法を用いることも考えられる [36], [39], [47]。しかし、実際のパケットの到達範囲は周囲の物理的、電磁的環境に大きく影響を受けるので、与えられた通信半径を利用することの実用性については疑問が残る。VANET 環境ではノード位置がデジタル道路地図で与えられる道路に限定されるので、4.2 で述べたように、一次元のマルチホップによるパケット配送で十分であり、フラッディングオーバーヘッドを削減させるため、デジタル地図に基づく単純な距離タイマ抑制法を終点領域においても使用することができる。

5. ロケーションサービス

一般にユーザ通信・情報サービスではユニキャストの通信形態が必要になる。このとき 4.1 で述べたように、終点ノードの ID から位置情報を得るため、ロケーションサービスが利用される。MANET を対象として、数多くのロケーションサービス方式が提案されている [23], [52], [53]。原理的には始点ノードが終点ノードの ID を入れた問合せを MANET 全体にフラッディングし、それを受信した終点ノードは自身の位置を始点ノードへ応答する。この際のフラッディングオーバーヘッドを下げるため、問合せの範囲の限定、代理ノードによる応答など様々な提案がある。これらの方法は MANET が地理的に限定されているときには利用可能であるが、車が長距離を移動し、広範囲に広がる VANET 環境に適応するとはいえない。遠距離の車々間通信はインターネットなどのインフラを利用してより効率的に実現することができる。この場合、グローバルなロケーションサービスは不要である。モバイル IP を前提とすれば、車は近隣のインターネットゲートウェイ内のフォーリンエージェントに所属する。この場合、ロケーションサービスは車とインターネットゲートウェイの間でのみ必要である。ユーザ通信・情報サービスの主なアプリケーションは、インターネットアクセスであることを考慮すると、そのようなインフラサポート型のロケーションサービスは有望である。

一方、運転支援サービスと道路交通情報サービスでは、ロケーションサービスは必ずしも必要にはならない。この場合、初期には通信相手は ID により特定され

るわけではない。特に、運転支援サービスでは通信は限られたエリアの中で必要になり、通信相手は ID ではなく車の位置で決まる。このような場合、ユニキャストに基づく高信頼の通信リンクを維持するため、近隣の車の ID を求める必要がある。この問合せのためジオキャストが利用可能である。このサービスは逆ロケーションサービスといえる。

6. アラーム情報の伝達

運転支援サービスの一つとして衝突事故防止に資するアラーム情報伝達がある。交通事故や渋滞が起こったとき、警戒エリアに侵入するすべての車にアラーム情報を迅速に提供する必要がある。これを VANET のジオキャスト機能により行うことが考えられる。同一原因に対して複数の車が同時にアラーム源となりアラーム情報の送信を開始すると、アラームストームが生じ、無線帯域を圧迫するおそれがある。同一原因に基づく大量のアラーム情報の発信を抑制する仕組みが必要である。アラーム内容に基づき同一の原因のアラームを特定し、4. で述べた距離タイマ抑制法を用いてアラームストームを抑制することが可能である。また、同一原因の複数アラームを一つのアラームに圧縮する方法も考えられる。圧縮はセンサネットワーク分野で一般的な方法である [54]。

アラームはアラーム原因が除かれるまで繰り返し送出される必要がある。これは警戒エリア内の車が VANET の分割により、アラーム受取りに失敗したり、警戒エリア外の車が警戒エリアに常に進入する可能性があることによる。最適なアラーム周期を安全性確保と無線帯域消費量を考慮して設計する必要がある。今、最も厳しい条件として、以下のシナリオを考える。二つの車が同一車線上にあり、前方の車は交通事故などにより道路上で停止している。後続の車は速度 V で走行中で、前方の車から i 番目のアラームが送出されたとき、通信範囲の丁度外側にあって受取りに失敗し、 $i+1$ 番目のアラームを初めて受け取る。この時点でブレーキを開始し、前方の車の直前の位置で停止して衝突を免れる。このとき、アラーム周期上限、 $\Delta\theta_{max}$ を選択するためのガイドラインが次式で与えられる [48]。

$$\Delta\theta_{max} = \frac{R - D_{brake}(V)}{V} \quad (4)$$

ここで、 R は通信距離、 V は車の速度、 $D_{brake}(V)$ はブレーキ距離である。 $D_{brake}(V)$ は $\Delta t_{reaction}$ を

運転者の反応時間 (1 秒程度), b_{max} (4.4 m/s^2 程度) を最大減速度とすると, 次式で与えられる [29].

$$D_{brake}(V) = V \cdot \Delta t_{reaction} + \frac{V^2}{2 \cdot b_{max}} \quad (5)$$

例えば, V を 200 km/h , R を 250 m とするとき, $\Delta\theta$ は約 2.4 秒となる. 別の観点から, アラーム情報を反対車線から来る対向車へも転送する必要があるとする. この場合, 二つの車が通信範囲にある時間をコンタクトタイムと呼ぶ [9]. 最大相対速度を 400 km/h , R を 250 m とすると, 最小コンタクトタイムは 4.5 秒となる. これが $\Delta\theta$ の上限に対するもう一つのガイドラインになる.

アラーム原因が継続する間, 警戒エリアに進入する車にアラーム伝達を行う方法としてジオキャスト方式とローカルブロードキャスト方式の二つのアプローチが考えられる. ジオキャスト方式では, アラーム原因を発見したノードがアラーム源となり, 周期的にアラームを発信し, それがジオキャストにより警戒エリア全体に送られる (図 6). アラーム源の役割は必要時には他のノードにハンドオーバーされる. ローカルブロードキャスト方式では, 警戒エリアにいるノードはアラームを受け取ると, それ自身がアラーム源となり隣接ノードへの周期的アラーム転送を開始する (図 7). あるいは, ハロー交換などの隣接ノード発見プロトコルを用いて, 新たに隣接ノードを発見するとアラーム情報を転送する. ジオキャスト方式とローカルブロードキャスト方式のいずれの場合もアラームを受信したノードはそのアラームを一時蓄積し, 必要な場合にアラーム源となる. [55] では, このような方式を総称して蓄積型ジオキャストと呼ぶ.

ジオキャスト方式において, 最初のアラーム源は固定設置のサービスノードである場合を除けば, 警戒エ

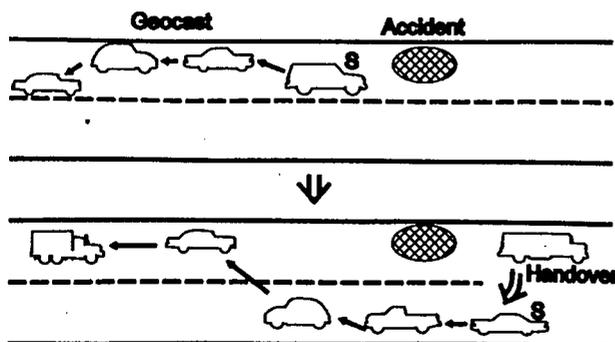


図 6 ジオキャスト型アラーム伝達
Fig. 6 Geocast-based alarm propagation.

リアに停止中の車か, 通過中の車である. 前者の場合は, 停止した車が継続的にアラーム源となり周期的なアラーム転送を行い警戒期間の間, 警戒エリアに進入する車にアラームをジオキャストすることができる. また, アラーム転送を行うのにより都合のいい位置にいる車にアラーム源の役割をハンドオーバーすることも考えられる. 後者の移動中の車の場合, この車が警戒エリアを通過した後もアラーム源を継続するのは適切とはいえない. これは車が警戒エリアを離れるほど, 警戒エリアへのアラーム転送を確実にを行うのが困難になるからである. このような場合, より適切な場所にいる他の車がアラーム源の役割を引き受ける必要がある [55]. これには二つのアプローチがある. 1 番目のアプローチでは, 現在アラーム源となっているノードがアラーム源候補を探し, ハンドオーバーを行う方式である. ハンドオーバーを確実にを行うハンドシェイクプロトコルが必要になる. 2 番目のアプローチでは, 現在アラーム源ではないノードがアラームを受信したとき, アラーム源になるか, ならないかを自身とアラーム源の現在位置とデジタル道路地図に基づき, 自律的に決定する方式である. 同様に, いったんアラーム源となったノードは同一内容のアラームを他のノードから受信すると, アラーム源の役割を続けるか, 中止するかを自身と他のアラーム源の現在位置とデジタル道路地図に基づき, 決定する. ノードが高速移動する VANET では, 1 番目のアプローチで確実なハンドオーバーを行うことが困難な場合があり, 2 番目のアプローチは有望である.

ローカルブロードキャスト方式に関して, エリア型と周辺型の二つの方法が提案されている. エリア型では警戒エリアでアラームを受け取ったすべてのノードが警戒エリアにいる限りアラーム源になる. この方法は隣接ノード法と呼ばれている [55]. 同様の方法がユニキャストに対して提案され, 伝染法と呼ばれる [56], エリア内での情報配送にも利用できる. 周辺型では警戒エリアの周辺ゾーンに位置するノードがアラーム源として選ばれるように, 常時アラーム源のハ

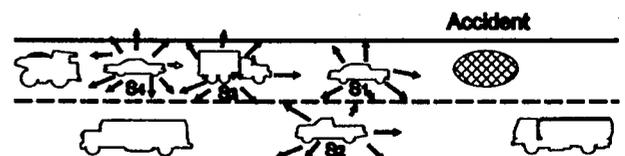


図 7 ローカルブロードキャスト型アラーム伝達
Fig. 7 Local broadcast-based alarm propagation.

ンドオーバが行われる。このためのハンドオーバの方法が[57]で提案されており、選ばれるアラーム源の数を最小化するため、指向型フラッディングと類似の抑制法が使われている。

前述のように、アラーム源の役割の移行はジオキャスト型でもローカルブロードキャスト型でも生ずる。アラーム源の役割を引き受けたノードはもとのアラーム原因の最新状態を感知できるとは限らない。その結果、これらのノードは警戒状態が変化したり原因が取り除かれてもアラームを出し続けるおそれがある。このような古くなった警戒情報の分配を防ぐため、アラームメッセージにはアラーム内容に加えて、アラームの発生場所、発生時刻、アラーム内容の有効期間を含めることが必要である。アラーム源の役割が他のノードにハンドオーバされた場合、これらのデータはコピーされ、後続のアラームメッセージに使われる。有効期間が過ぎたとき、アラーム源の役割は停止する[55]。

7. 道路交通情報サービス

車々間通信を用いる道路交通情報システムはいくつか提案されている。ここでは[19]で提案されたSOTISと呼ばれるシステム概念をもとにサービスイメージを示す。SOTISでは各道路は距離500m程度の道路区間に分割される(図8)。道路区間は進行方向ごとにそれぞれ設定する。各車は周辺(例えば周囲50km以内)の道路に関して道路区間ごとの道路交通情報のリスト(これを交通データベースと呼ぶ)をもつ。道路交通情報とは道路区間ごとの交通に関連する集約されたデータであり、例えば平均走行速度、道路状態、天気情報などである。このようなシステムを対象として、いくつかのデータ集約技術が提案されている[20]。道路交通情報を車々間通信で実現する一つの方法はジオキャストの利用である。すべての車がそれぞれ始点としてジオキャストを行うため、無線帯域への負荷が大

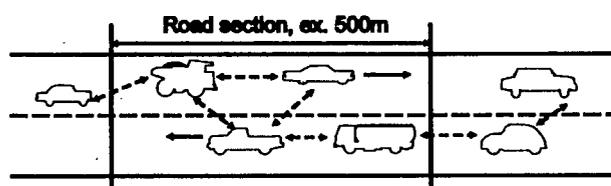


図8 車々間通信を利用した道路交通情報システム
Fig.8 Traffic information service based on inter-vehicle communication.

きくなる。[19]~[21]では、6.に述べた隣接ノード法と類似の方法が提案されている。この方法では、まず、各車は自身の位置と走行速度及び、隣接ノードから通知されるそれらの生情報(一次データ)に基づき、対応する道路区間の道路交通情報を計算・更新する。計算された道路交通情報は作成時刻とともに交通データベースに記録される。次に各車は所有する交通データベースの全情報(自車の一次データを相乗りさせる)を周期的にブロードキャストする。これを受け取った各ノードは自身の交通データベースにおいて、自身が存在する道路区間以外の、他の道路区間の道路交通情報を更新する。ここで、同じ道路区間に関する道路交通情報を複数受け取った場合、最新の情報に基づき更新する。ブロードキャストする交通データベースの量は膨大にはならない。例えば、対象道路区間の総延長を50km、道路区間当りの道路交通情報を100Byteとすると、進行方向を考慮して、交通データベースの総量は20kByteとなる。同様の推定値が[21]でも用いられている。前述のジオキャストを利用する方法と異なり、マルチホップは含まれないので、無線帯域への負荷は比較的少ない。

この方法では、ある道路区間の道路交通情報は道路に沿った後続車の周期的なブロードキャストにより中継されることにより、他の車へ配送される。これを周期中継方式と呼ぶ。この方法はジオキャストのように即時中継を行う方法に比べて情報伝搬により多くの時間を必要とする。 n ホップ中継の所要時間は $n * T/2$ である。ここで、 T は周期を表す。一方即時中継方式では d をジオキャストにおける1ホップ当りの伝送遅延とすると、 $n * d$ である。 T と d はそれぞれ秒オーダ、10msオーダであり、前者は後者に比べてかなり大きい。周期中継において、車間距離が通信距離以内で連続的に走行する車列を想定し、ホップ当りの進行距離200m、周期5秒で100ホップの転送を仮定すると、20kmの伝搬遅延時間は5分以内である。すなわち、運転者は20km先の道路交通情報を5分以内の遅れで受信可能であり、実用上許容範囲あると考えられる。走行車が少ない場合、VANETに分割が生じ、情報伝搬の遅延が大きくなる。極端な場合として、かなりの時間、前方に車がない場合を考える。この状況においても、この車は進行方向の道路交通情報を対向車から得ることができる。逆に、道路交通情報への需要が高まる混雑時には、伝搬遅延も最小化される。

交通渋滞の場合、多くの車が同じ道路区間に存在し、

類似の道路交通情報が繰り返し送出される。ノード密度が増えるほど、無線帯域消費が増大する。この状況で、各車は同じ道路区間を走行中の他の車から交通データベース情報を一定時間以内に受け取っている場合は自身の発信をスキップすることが考えられる。あるいは、ブロードキャスト周期を同一区間を走行中の車から受信する道路交通情報の受信数に比例するように変化させる[21]。同様の方法は4.2に述べたように、ハロー周期の選択にも利用可能である。

8. むすび

本論文ではITSなどで注目される車々間通信にアドホックネットワークを利用する試みを取り上げ、情報配信、情報共有技術に関する研究開発動向のサーベイを行った。まず、車々間通信の特徴について述べ、車々間アドホックネットワーク(VANET)と従来のモバイル・アドホックネットワークの相違を示した。次に、VANETの主なアプリケーションを運転支援サービス、道路交通情報サービス、ユーザ通信・情報サービスの三つに分類して示した。次に、GPS、デジタル道路地図などの標準装備を前提として位置情報を利用するルーティングプロトコルを概観した。この中には、一般にモバイルアドホックネットワーク(MANET)を対象として提案されたものと車々間アドホックネットワーク(VANET)を対象として提案されたもの([29],[35],[47],[48])がある。具体的にはユニキャストとジオキャストの二つの通信形態を取り上げ、それらを実現するルーティングプロトコルを次ホップ中継方式と指向型フラッディング方式の二つのアプローチに分類し、それぞれの概要、特徴、課題を述べた。特に、GPSやデジタル道路地図を利用することで、情報配信・共有技術を単純化、効率化できる可能性を指摘した。最後に、VANETアプリケーションの代表例として、アラーム転送方式と道路交通情報サービスの概要を述べた。

VANETを用いた情報配信・共有に関する個別技術の研究開発は進展しているが、体系的な技術評価は今後の課題である。特に、複雑で多様な道路上の交通状況をどのようにモデル化しVANETの性能を評価するかは重要な課題であり、今後の研究進展が望まれる。

ITS関連技術の国際標準化はISO/TC204で扱われている。車々間通信についても検討対象であるが、アドホックネットワークの適用は今後の課題と考えられる。また、GPSによる位置情報の精度についても十

分な対策と評価が必要である。アドホックネットワーク関連技術の国際標準化はIETFで扱われている。トポロジー利用型のルーティングプロトコルに関して、DYMOとOLSRv2のStandard Track RFCに向けた標準化作業が進展している[8]。また、アドホックネットワークのオートコンフィギュレーションに関する標準化検討がスタートした段階にある。しかし、位置情報利用型のルーティングプロトコルの標準化検討には手がつけられていない。VANET及びそれを利用したサービスの実用化進展のため、標準化は不可欠である。今後の標準化の進展が望まれる。

文 献

- [1] "http://www.ahsra.or.jp/demo2000/"
- [2] "http://www.path.berkeley.edu"
- [3] "http://www.ist-overdrive.org"
- [4] "http://www.et2.tu-harburg.de/fleetnet"
- [5] "http://network-on-wheels.de"
- [6] "http://www.car-2-car.org/"
- [7] 小牧省三, 間瀬憲一, 松江英明, 守倉正博, "無線LANとユビキタスネットワーク," 丸善, 2004.
- [8] 阪田史郎, 青木秀憲, 間瀬憲一, "アドホックネットワークと無線LANメッシュネットワーク," 信学論(B), vol.J89-B, no.6, pp.811-823, June 2006.
- [9] H. Hartenstein, B. Bochow, A. Ebner, M. Lott, M. Radimirsch, and D. Vollmer, "Position-aware ad hoc wireless networks for inter-vehicle communications: the Fleetnet project," Proc. ACM MobiHoc'01, 2001.
- [10] A. Svensson and M. Rydstrom, "A communication network for safe traffic and efficient transportation," Proc. 11th Wireless World Research Forum Workshop, Oslo, Norway, June 2004.
- [11] J. Anda, J. LeBrun, D. Ghosal, C. Chuah, and M. Zhang, "VGrid: Vehicular adhoc networking and computing grid for intelligent traffic control," VTC 2005.
- [12] S. Capkun, M. Hamdi, and J.P. Hubaux, "GPS-free positioning in mobile ad-hoc network," Proc. 34th HICSS, 2001.
- [13] M. Aoki and H. Fujii, "Inter-vehicle communication: Technical issues on vehicle control application," IEEE Commun. Mag., vol.34, no.10, pp.90-93, 1996.
- [14] R. Morris, J. Jannotti, F. Kaashoek, J. Li, and D. Decouto, "CarNet: Abscalable ad hoc wireless network system," Proc. 9th AGM SIGOPS European workshop: Beyond the PC: New Challenges for the Operating System, Kolding, Denmark, Sept. 2000.
- [15] W.J. Franz, H. Hartenstein, and B. Bochow, "Internet on the road via inter-vehicle communications," Workshop der Informatik 2001, Mobile Communications over Wireless LAN, Research and Applications, Sept. 2001.
- [16] P.L.J. Morsink, C. Cseh, O.j. Gietelink, and M.

- Miglietta, "Preliminary design of an application for communication based longitudinal control in the CARTALK2000 project," e-Safety conference, paper 2152, 2002.
- [17] R. Miller and Q. Huang, "An adaptive peer-to-peer collision warning system," Vehicular Technology Conference (VTC) Spring, 2002.
- [18] P. Morsink, R. Hallouzi, I. Dagli, C. Cseh, L. Schafers, M. Nelisse, and D. Bruin, "CARTALK 2000: Development of a cooperative ADAS based on vehicle-to-vehicle communication," Proc. 10th World Congress and Exhibition on Intelligent Systems and Services, Madrid, Spain, Nov. 2003.
- [19] L. Wischhof, A. Ebner, H. Rohling, M. Lott, and R. Halfmann, "SOTIS—A self-organizing traffic information system," Proc. IEEE Vehicular Technology Conference Spring, pp.2442–2246, Jeju, Korea, May 2003.
- [20] T. Nadeem, S. Dashtinezhad, C. Liao, and L. Iftode, "TrafficView: A scalable traffic monitoring system," 2004 IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM), Berkeley, California, USA, pp.19–22, Jan. 2004.
- [21] M. Saito, J. Tsukamoto, T. Umedu, and T. Higashino, "Evaluation of inter-vehicle ad-hoc communication protocol," Proc. 19th Int. Conf. on Advanced Information Networking and Applications (AINA '05), 2005.
- [22] S. Basagni, I. Chlamatac, and V.R. Syrotiuk, "A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM)," ACM/IEEE Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom '98), pp.76–84, 1998.
- [23] M. Mauve, J. Widmer, and H. Hartenstein, "A survey on position-based routing in mobile ad-hoc networks," IEEE Netw., vol.15, no.6, pp.30–39, Nov. 2001.
- [24] J.P. Hubaux, T. Gross, J.Y.L. Boudec, and M. Vetterli, "Toward self-organized mobile ad hoc networks: The terminodes project," vol.39, no.1, pp.118–124, 2001.
- [25] T. Camp, J. Boleng, and L. Wilcox, "Location information services in mobile ad hoc networks," Proc. IEEE Int. Conf. on Communications (ICC), pp.3318–3324, 2002.
- [26] Y. Ko and N.H. Vaidya, "Location-Aided Routing (LAR) in mobile ad hoc networks," Proc. ACM/IEEE MOBICOM, pp.66–75, 1998.
- [27] L. Blazevic, L. Buttyan, S. Capkun, S. Giordano, J.P. Hubaux, and J.Y.L. Boudec, "Self-organization in mobile ad hoc networks: The approach of Terminodes," IEEE Commun. Mag., vol.39, no.6, pp.166–173, 2001.
- [28] Y.B. Ko and N.H. Vaidya, "Geocasting in mobile ad hoc networks: Location-based multicast algorithms," IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA '99), 1999.
- [29] L. Briesemeister and G. Hommel, "Role-based multicast in highly mobile but sparsely connected ad hoc networks," Proc. MobiHOC, 2000.
- [30] C. Maihofer, "A survey of Geocast routing protocols," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.6, no.2, pp.32–42, 2004.
- [31] B. Karp and H.T. Kung, "GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks," Proc. ACM/IEEE MOBICOM, pp.243–254, 2000.
- [32] K. Yamada, M. Sun, W. Feng, T.H. Lai, and H. Okada, "Broadcasting protocols based on GPS technology for inter-vehicle communication," IEICE Technical Report, RCS99-166, 2000.
- [33] H. Takagi and L. Kleinrock, "Optimal transmission range for randomly distributed packet radio terminals," IEEE Trans. Commun., vol.32, no.3, pp.246–257, 1984.
- [34] H. Frey, "Scalable geographic routing algorithms for wireless ad hoc networks," IEEE Network, pp.2–6, July/Aug. 2004.
- [35] J. Tian and L. Coletti, "Routing approach in CarTALK 2000 project," IST-Mobile & Wireless Communications Summit, Paper no.1047, 2003.
- [36] Y. Tseng, S. Ni, and E. shih, "Adaptive approaches to relieving broadcast storms in a wireless multihop mobile ad hoc network," IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Application (WMCSA '99), 1999.
- [37] R. Jain, A. Puri, and R. Sengupta, "Geographical routing using partial information for wireless ad hoc networks," IEEE Pers. Commun. Mag., vol.8, no.1, pp.48–57, 2001.
- [38] C. Lochert, H. Hartenstein, J. Tian, H. Fussler, D. Hermann, and M. Mauve, "A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments," IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2003, Columbus, pp.156–161 Ohio, June 2003.
- [39] S. Ni, Y. Tseng, Y. Chen, and J. Sheu, "The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network," Mobicom '99, pp.151–162, 1999.
- [40] A. Qayyum, L. Viennot, and A. Laouiti, "Multipoint relaying: A efficient technique for flooding in mobile wireless networks," 35th Annual Hawaii Int. Conf. on System Sciences (HISS), 2001.
- [41] K. Mase, Y. Wada, N. Mori, K. Nakano, and M. Sengoku, "Flooding schemes for clustered ad hoc networks," IEICE Trans., Commun., vol.E85-B, no.3, pp.605–613, March 2002.
- [42] B. Williams and T. Camp, "Comparison of broadcasting techniques for mobile ad hoc networks," Proc. ACM Mobihoc, pp.194–205, 2002.
- [43] Z.J. Haas, J.Y. Halpern, and L. Li, "Gossip-based ad hoc routing," INFOCOM, 2002.

- [44] K. Viswanah and K. Obraczka, "An adaptive approach to group communications in multi-hop ad hoc network," Int. Conf. on Networking (ICN), 2002.
- [45] J. Cartigny and D. Simplot, "Border node retransmission based probabilistic broadcast protocols in ad-hoc networks," Hawaii Int. Cong. on System Sciences (HICSS), 2003.
- [46] Y. Yi, M. Gerla, and T. Kwon, "Efficient flooding in ad hoc networks: A comparative performance survey," ICC, 2003.
- [47] M. Sun, W. Feng, T. Lai, K. Yamada, H. Okada, and K. Fujimura, "GPS-based message broadcast for adaptive inter-vehicle communications," VTC Fall, pp.2685-2692, 2000.
- [48] A. Bachir and A. Benslimane, "A multicast protocol in ad hoc networks: Inter-vehicle Geocast," IEEE VTC Spring, 2003.
- [49] M. Heissenbuttel and T. Braun, "BLR: Beacon-less routing algorithm for mobile ad-hoc networks," Comput. Commun., vol.27, no.11, pp.1076-1086, 2004.
- [50] I. Stojmenovic, A.P. Ruhil, and D.K. Lobiyal, "Voronoi diagram and convex hull based geocasting and routing in wireless networks," Proc. 8th IEEE Symp. Comp. and Commun. ISCC, pp.51-56, 2001.
- [51] H. Fussler, J. Widmer, M. Kasemann, M. Mauve, and H. Hartenstein, "Contention-based forwarding for mobile ad hoc networks," Elsevier's Ad Hoc Networks 1, pp.351-369, Nov. 2003.
- [52] J. Li, J. Jannotti, D.S.J. De Couto, D.R. Karger, and R. Morris, "A scalable location service for geographic ad hoc routing," Proc. 6th Annual ACM/IEEE Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBI-COM) 2000, pp.120-130, 2000.
- [53] S.M. Das, H. Pucha, and Y.C. Hu, "Performance comparison of scalable location services for geographic ad hoc routing," IEEE INFOCOM, 2005.
- [54] R. Viswanathan and P.K. Varshney, "Distributed detection with multiple sensors: Part I-Fundamentals," Proc. IEEE, vol.85, no.1, pp. 54-63, 1997
- [55] C. Maihofer, C. Cseh, W. Franz, and R. Eberhardt, "Performance evaluation of stored Geocast," IEEE 58th Vehicular Technology Conference, vol.5, pp.2901-2905, 2003.
- [56] A. Vahdat and D. Becker, "Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks," Technical report, CS-200006, Duke University, 2000.
- [57] Q. Sun and H. Garcia-Molina, "Using ad-hoc inter-vehicle networks for regional alerts," Technical Report, Stanford University, 2004.

(平成 17 年 10 月 28 日 受付)



間瀬 憲一 (正員：フェロー)

昭 45 早大・理工・電気通信卒。昭 47 同大大学院修士課程了。同年電電公社武蔵野電気通信研究所入所。以来、通信網構成法、ダイナミックルーチング、ネットワーク設計法、通信品質、コンピュータネットワーク、マルチホップ無線ネットワーク等の研究に従事。昭 53~54 米国コロンビア大客員研究員。平 6 年 7 月、NTT 通信網研究所・通信品質研究部長。平 8 年 7 月、NTT マルチメディアネットワーク研究所・情報通信アクセスメント研究部長。平 11 より新潟大学工学部情報工学科教授。平 16 より新潟大学大学院自然科学研究科教授、平 17 同大学コーステーション自然科学系附置国際情報通信研究センター長、同超域研究機構プロジェクトリーダー。工博。平 5 年度本会論文賞受賞。平 9 年度第 13 回電気通信普及財団テレコムシステム技術賞受賞。IEEE フェロー。著書「マルチメディアネットワークとコミュニケーション品質」(共著)、「無線 LAN とユビキタスネットワーク」(共著)など。