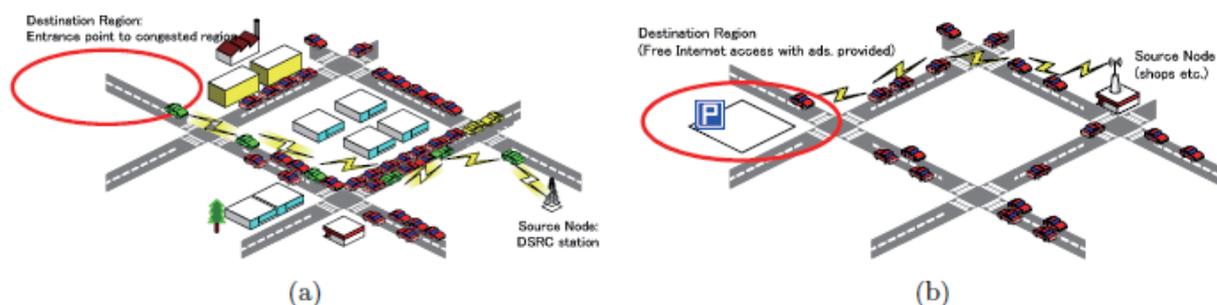


車載無線機器による車車間アドホックネットワーク上の堅牢な経路制御

山口 弘 純 大阪大学大学院情報科学研究科准教授

1 研究の目的・意義

近年、高度な交通システム（ITS）の実現を目指し、DSRC や VICS ビーコンなどの狭域通信器が路側や店舗などに設置されつつある。しかし、これら固定インフラの完全な整備と展開には膨大なコストと年月がかかり、機器の更新は安易にできないといった問題点もある。これに対し、安価な車載無線機器による車車間アドホックネットワークを構築し、車両から車両へデータをバケツリレー式に転送することで、インフラがない地域や災害等で利用不能となった場合もデータ配信を可能とする方式に注目が集まっている。これにより、例えば、事故現場に停止した緊急車両から現場に流入する車両に事故渋滞映像を配信することで渋滞を回避する、(2)無線 LAN スポットが提供するインターネットサービスを、道路を走行する車両を介して近隣の駐車場まで拡大する、(3)災害時に携帯電話基地局が不通となった場合、緊急車両が被災者と避難所との音声通話データを中継する、など多くの応用事例が考えられる（下図）。



しかし、これらの映像・音声ストリーミングや双方向通信サービスはリアルタイム性が求められるため、中継車両の移動のもとでもデータ遅延および損失が少ない十分堅牢な経路を提供することが求められる。

本研究では、車車間アドホックネットワーク上で堅牢な通信経路を実現するルーティング技術に関する研究を行う。GPSなどの測位機器と電子地図を用いて、高確率で同方向に同速度で移動する車両を予測し、その上に通信経路を確立するルーティングプロトコルを設計する。これにより車車間通信リンクの切断リスクを軽減し、経路の堅牢性を高める。高精度計算機シミュレーションにより有効性を確認するとともに、実用に向けた課題発見に努める。

2 研究の方法

2-1 関連研究調査

マルチホップ車車間通信による情報配布や通信を扱った研究はこれまでに多く存在する。その中で、明示的に経路を構築しないブロードキャストベースの情報散布プロトコルとして、UMB、RBM、MDDVなどが知られている。

UMBは各車両（ノード）が道路に沿ってなるべく遠方にある車両にメッセージを送信し、経路のホップ数の減少を図っている。RBMはノード密度の低い高速道路において、各車両は他車両に遭遇するまでメッセージ転送を待機する。MDDVは各車両が位置情報と電子地図を利用し、道路経路に沿ったメッセージの配信経路を設定し、その道路に沿ったメッセージ配布を行う。これらのブロードキャスト型のプロトコルは、明示的な通信経路を決定しないため、本研究が想定する継続的なリアルタイム通信などには不向きである。

これに対し、ノード間で通信経路を構築するルーティングプロトコルも提案されてきている。CarNetは高速にランダム移動をするノードを対象とした位置情報ルーティングプロトコルであるが、車両の移動特性などは考慮していない。GPCRは、各ノードが無線範囲内にある最も宛先領域に近いノードをグリーディに選択し、経路探索メッセージを転送することで経路を発見し、その際障害物も迂回可能な位置情報ルーティングGPSRを車車間通信に応用したプロトコルである。GPCRは路側の建築物などを電波の障壁と考え、電波の届

く範囲で最も宛先領域に近い車両を転送先として選択する。また、無線範囲内の車両の密度分布を用いて交差点を識別する。しかし、GPCR では複数の道路を跨る経路や、右左折数の多い道路経路上に通信経路を構成する可能性があり、車両の移動によるリンク切断の影響を受けやすいと想定される。

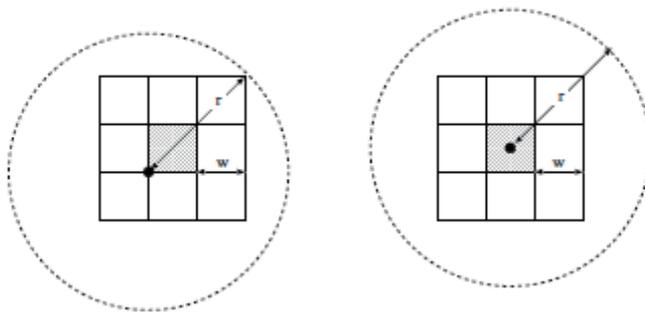
提案するプロトコルでは、近年の車両におけるカーナビゲーションシステムの装備率増加を受け、各車両は電子地図の参照が可能であるという仮定をおいている。このもとで、なるべく多くの車両がそれに沿って移動していると想定される道路経路に沿った通信経路を探索することで、高い耐切断性を持つ通信経路を発見する。また、その道路経路に沿った通信経路は十分な耐切断性を持ち合わせているとの仮定のもとで、その通信経路の切断時にはその道路経路に沿った通信経路を再構築することで耐切断性の高い通信経路を復元する。

2-2 プロトコル設計

(1) 環境条件と動作概要

各ノードは近距離無線デバイスを装備し、一意な ID を持つとする。また、GPS などの測位装置と電子地図を装備しているとする。電子地図は有効グラフ $G = (E, V)$ で表される。E は道路セグメントの集合、V は交差点の集合とする。道路セグメントは隣接する 2 つの交差点間の道路を表し、各方向ごと 1 セグメントとする。また、各セグメントには国道番号などの道路識別子が (もしあれば) 与えられているとし、各ノードは道路セグメントが同じ道路上のものかどうかの判断ができるとする。各交差点にはその位置情報も付随しているものとする。各ノード u は測位装置と電子地図により、自身の位置 $P(u)$ 、自身が存在するセグメント識別子 $S(u)$ 及び道路識別子 $R(u)$ 、そのセグメントの両端の交差点識別子及びそれら交差点の位置情報がわかっているとする。

地理領域はグリッドに分割される。あるグリッドに隣接する周囲 8 グリッドをそのグリッドの隣接グリッドと呼ぶ。グリッドにある各ノードは隣接グリッド内のすべてのノードと通信可能であるよう、グリッドサイズ w と無線範囲 r の関係を $w = 2^{1/2} * r / 4$ と定義する (下図)。



なお、グリッドサイズ w が各ノードにおいて既知の場合、経度 x 分、緯度 y 分の座標のノード v の存在するグリッド ID $G(v)$ を下記のように定義する。

$$G(v) = G_x(v) * W + G_y(v)$$

ただし、 $G_x(v)$ は x のメートル表現の w による商、 $G_y(v)$ は y のメートル表現の w による商、 W は $G_y(v)$ の最大値より大きい定数とする。 W は $G_y(v)$ の最大値より大きい定数であるため、グリッド ID は x および y より一意に決定される。これにより、各ノードは共通パラメータ w 及び W からある位置を含む一意なグリッド番号を計算することができる。

設計したプロトコルは 2 地点間通信経路をオンデマンドに構築し、維持するプロトコルである。始点ノード s と、終点座標 d に対し、このプロトコルは道路経路に沿って、 d を含むグリッド $G(d)$ への経路を探索して構築する。構築した経路が切断した場合、プロトコルは始めに通信経路を構築した道路経路上でのみ経路の再探索を行い、これが失敗した場合、プロトコルは経路を放棄し、再度始点ノード s と終点座標 d に対し、経路を探索して構築する。プロトコルは経路構築プロセスと経路維持プロセスからなる。

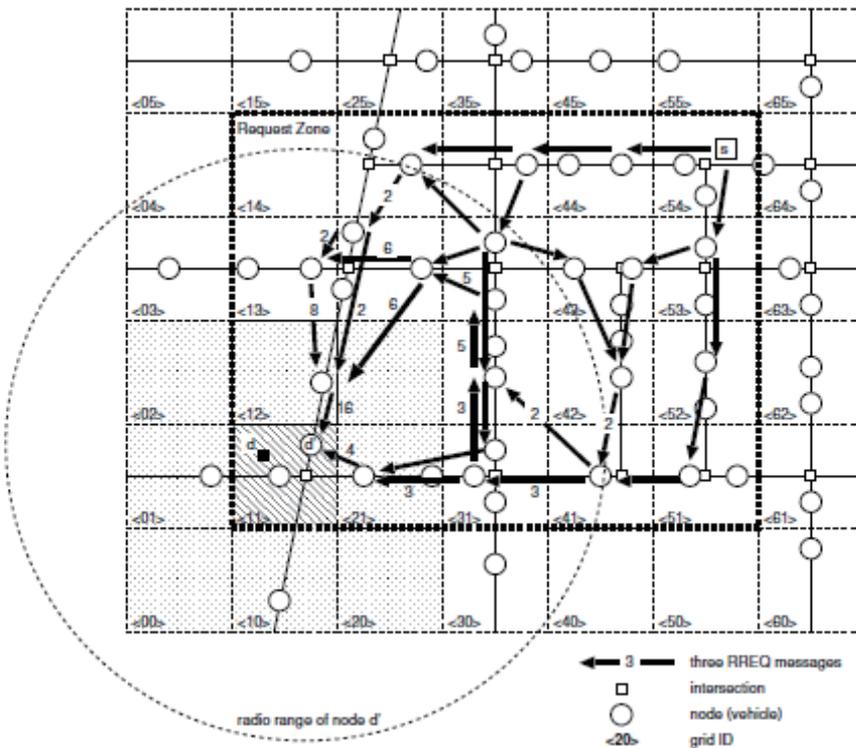
(2) 経路構築プロセス

経路構築プロセスでは、LAR のメッセージ削減手法に基づき、メッセージを転送する際、 s と $G(d)$ を含む領域を予め設定し、この領域内のみでメッセージを転送する。

s から $G(d)$ へ経路を探索する場合、 s は $G(s)$ に隣接しておりかつ転送領域内の各グリッドから、1 ノードずつ選択し、RREQ メッセージを転送する。転送した経路探索メッセージ (Route REQuest、以下 RREQ) には s のノード ID、 s が存在する道路セグメント ID $S(s)$ 、道路 ID $R(s)$ 及びグリッド ID $G(s)$ が含まれて

いる。RREQ メッセージを受信した各ノードは、同様の選択方法で転送領域内の隣接グリッドごとに 1 つノードを選択し、自身のノード ID、自身が存在する道路セグメント ID、道路 ID 及びグリッド ID を追加した RREQ メッセージを転送する。G(d) の隣接グリッド内のノードが RREQ を受信した場合、ノードは G(d) 内のもっともノード ID の若いノード d0 を指定して RREQ メッセージを転送する。d0 を G(d) の代表ノードとよぶ。d0 は最初の RREQ メッセージを受信してから一定時間は他の RREQ メッセージの到着を待ち、受信した複数の RREQ メッセージから後述する基準に基づき最も品質の良い通信経路候補を選択し、その経路を辿り s へ経路決定 (Route REPLY、以下 RREP) メッセージを送信することで経路を決定する。ただし、RREP には選択された RREQ に記録されていたノード ID 列とグリッド ID 列を含める。

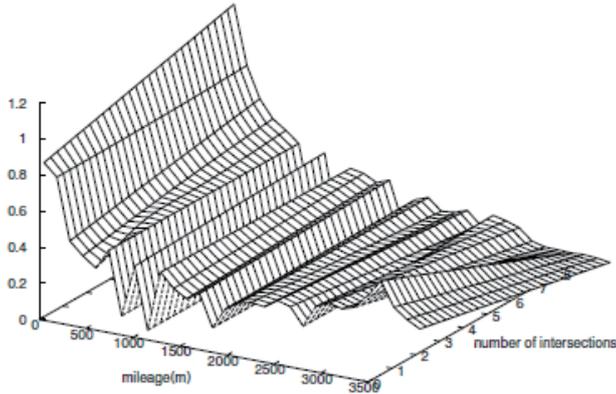
下図は RREQ メッセージの転送例を示している。ここでは、s はグリッド 54 に存在し、宛先領域はグリッド 11 である。s はまず転送領域内の隣接グリッド (44 および 53) からそれぞれ転送ノードを選択し、RREQ メッセージを送信する。それらの転送ノードは RREQ メッセージの受信後、同様に転送ノードを選択し、RREQ メッセージを転送する。RREQ メッセージが宛先領域 (グリッド 11) の隣接グリッド (12 および 21) 内のノードに転送された場合、ノード番号の最も小さいノード d0 を宛先領域内から選んで RREQ メッセージを転送する。d0 は受信した RREQ メッセージに記録された経路情報に基づき、経路を確定する。



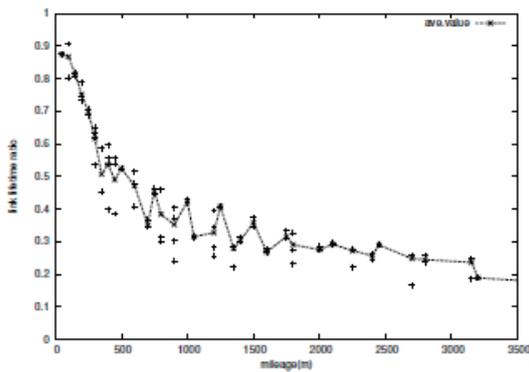
(3) 経路選択のメトリック

RREQ メッセージから得られる道路経路情報から適切な通信経路を選択するために、(i) 道路経路上での 2 ノードの走行距離、(ii) 道路経路の交差点数、及び (iii) それら交差点のうち右左折を必要とする回数、が 2 ノード間のリンクの生存時間にどの程度影響を与えるかを実験により調査した。この目的のため、交通流シミュレータを用いて、格子状の道路からなり、交差点間のセグメント長が 50m から 500m まで、50m 刻みで変更した地図を用意した。これらの地図において、0 から 8 個の交差点を持つ道路経路を選んだ。そのため、道路長は最短 50m から最長 4500m となった。また、各交差点では、ノードは一樣な確率で直進または右左折するようにした。すべての地図において、ノード密度は同じになるように設定した。このもとで、2 ノード間のリンク接続率 (2 ノードが道路経路に同時に存在していた時間に対する、2 ノード間が直接通信可能となった時間総和の割合) を観測した。実験結果を下図(a) に示す。なお、ノードの無線範囲を 200m とした。下図(b)、下図(c) は下図(a)において、それぞれ走行距離、交差点数のみに着目した場合の結果を示している。下図(b) より、ノードの走行距離の増加に応じて、リンク接続率はおおよそ線形的に減少していることがわかる。2 ノードの走行距離が短い間は、信号などでノード間距離が若干増加しても互いの通信範囲内にとどまっている可能性が高いが、走行距離が長くなるにつれて、それが通信範囲より大きくなる可能性も増加することから、得られた結果はおおよそ想定通りであるといえる。下図(c) より、交差点数の増加

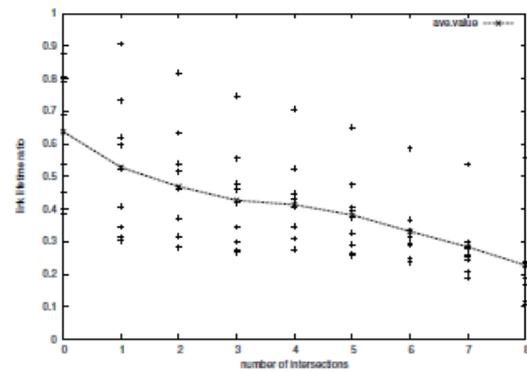
によるリンク接続率の低下は線形的であることがわかる。



(a) 走行距離および交差点数との関係

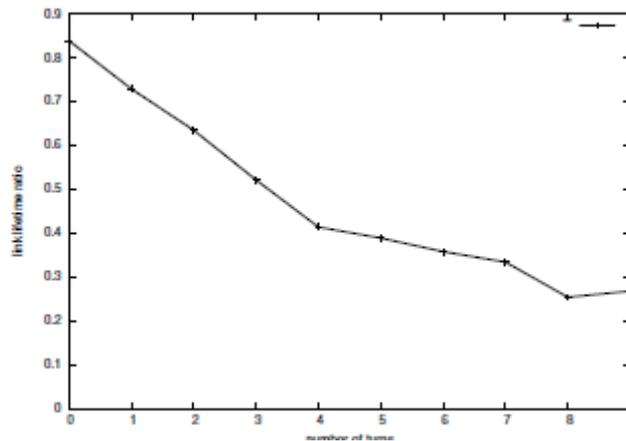


(b) 走行距離との関係



(c) 交差点数との関係

また、下図は、1200m の経路長、交差点数 9 である道路経路において、その交差点に占める右左折が 0 回から 9 回の場合のリンク接続率を示している。明らかに、右左折回数が少ない場合にリンク接続率が非常に高く、右左折数増加に対する接続率の低下率がかなり大きいことがわかる。



以上の結果から、道路経路上の実際の走行距離を除けば、右左折数が支配的な要素であることがわかる。経路探索メッセージから通信経路を決定する場合、それに付随する道路経路の右左折数が最も少ない通信経路を優先すればよいと考えられる。

(4) ルーティングテーブルの更新

RREP メッセージを転送する際、経路上の各ノードは、RREP メッセージ内に記録されていたノード ID 列から、自身の前方及び後方のノードをルーティングテーブルに記録する。また、グリッド ID 列も記録する。グリッド ID 列は道路経路形状を表しており、経路維持プロセスで用いられる。

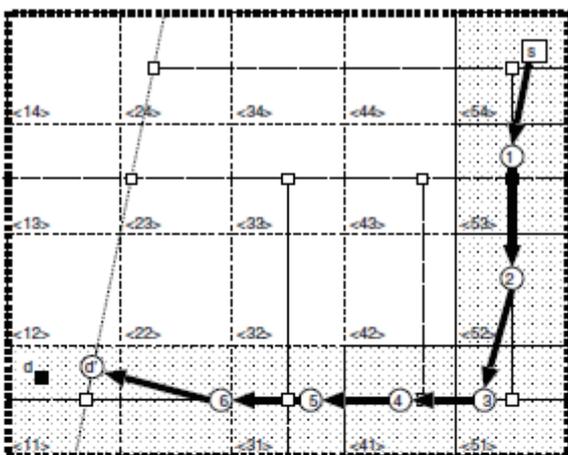
(5) 経路維持プロセス

経路維持プロセスは、経路が切断した場合、経路探索で発見された通信経路が存在する道路経路を含むグリッド上に存在しないノードを経路から切り離し、それらのグリッド上のみから代替ノードを探すことで、その道路経路に沿った通信経路を復元させる。このグリッド列を道路経路グリッド列と呼ぶ。

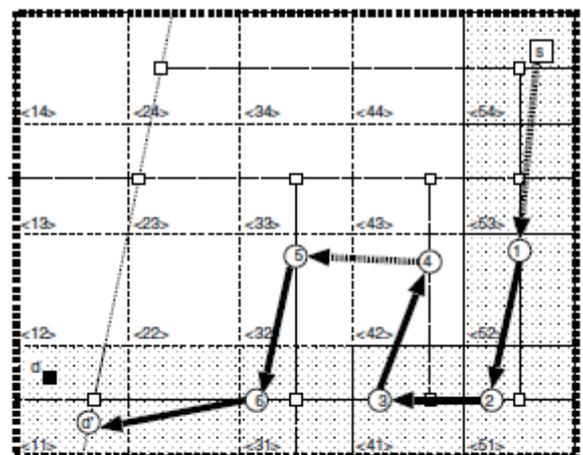
ノード s から $G(d)$ 内のノード d_0 までの通信経路は、中間ノードの移動や、 d_0 の $G(d)$ からの離脱などにより切断される場合がある。経路上の各ノードは、自身の前後ノードとのリンク切断が発生した場合、自身が現在存在しているグリッドが道路経路グリッド列に含まれないと判明すれば、自身と接続しているノードとのリンクを強制切断する。これにより新たなリンク切断が発生し、道路経路グリッド列上に存在しないノードは同様の動作を行う。その結果、道路経路グリッド列から離脱したノードはすべて通信経路から外される。前方ノード（経路上での d_0 側のノード）とのリンクが切断されたが道路経路グリッド列上にあるノードは、以下に述べる経路維持プロセスを開始する。

各ノードは道路経路グリッド列における自身のグリッドの前方グリッドから代替ノードを探し、自身の記憶した道路経路グリッド列を含む経路維持メッセージ (Route Re-Pair, 以降 RRPR) を送信する。その際、切断した通信経路の残存ノードが存在すれば、そのノードを優先的に選択する。これにより、道路経路グリッド列上にある残存経路を最大限に利用できる。再構築が不可能な場合、そのノードは経路エラーメッセージ (Route ERRor メッセージ, 以下 RERR) を送信ノード s に送信する。この場合、ノード s は経路構築プロセスを実行し、新たな経路を探索する。

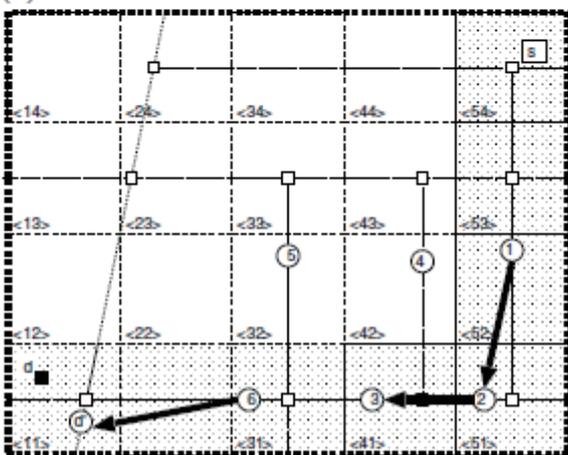
下図を用いて経路維持プロセスを説明する。下図(a)は、初期経路を表す。下図(b)では、ノード s 、1 間のリンクは距離が離れたことにより、またノード 4、5 間のリンクは障害物により、リンクが切断した状態を表している。経路の切断が発生した場合、全ノードは自身の状態をチェックする。このとき、ノード 5 とノード 4 は自身が初期経路から外れたことに気付くため、経路から強制切断する(下図(c))。残りのノードは切断した前方グリッドから代替ノードを選択し、残存経路と接続することで、道路経路グリッド列に沿った通信経路を復元している(下図(d))。



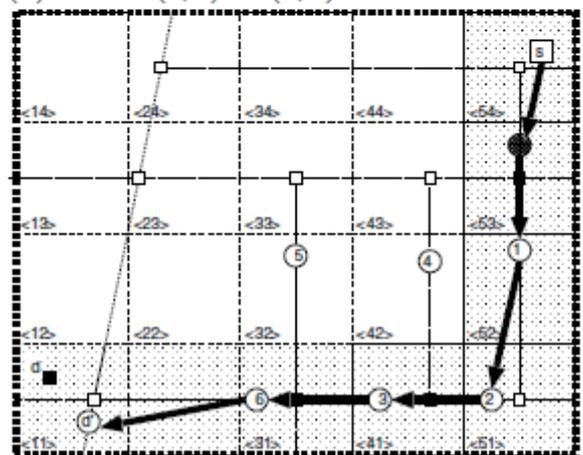
(a) 経路構築プロセス実行直後の通信経路



(b) リンク $(s, 1)$ と $(4, 5)$ が切断した状態



(c) 道路経路グリッド列を外れたノードを



(d) 復元された通信経路

2-3 評価実験

プロトコル性能を評価するために、道路交通流シミュレータで大阪府吹田市役所付近の道路地図を再現し、15分間のノードの移動ログを作成した。道路地図は約1200m x 1200mで、sとdの直線距離が600m、800m、1000m、1200m、1400mで、ノード密度は560台/km²、車両平均速度が8.3m/s(30km/h)~16.6m/s(60km/h)、グリッドサイズが70m、無線範囲は200m、シミュレーション時間は600secとした。また、交差点の中心から30m半径の範囲は見通し可能な空間とし、どの道路セグメント間でも通信可能とするが、それ以外の範囲においては異なる道路上の道路セグメント間は障害物により通信不可能とする(同じ道路上のセグメントは通信可能とする)。

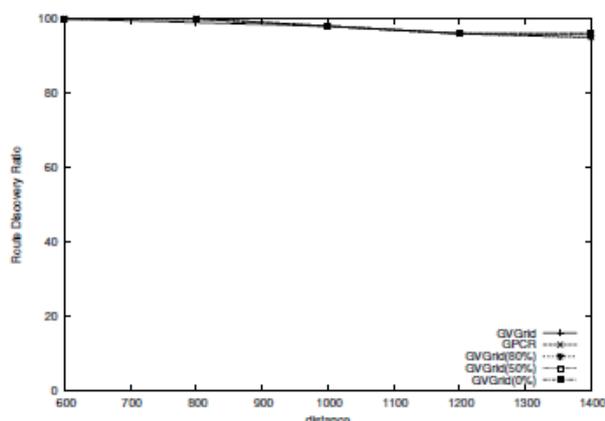
プロトコルの比較対象として、GPCRを実装した。GPCRはGPSRの車車間通信版で、高い経路の発見率を目指した深さ優先探索手法である。GPCRは、建物などで電波の周辺への伝播は阻害され、電波の届くノードは同じ道路上にある可能性が高いという前提の下で送信ノードから目的ノードへの経路を構築する。

GPCRで経路を探索する時、各ノードは隣接ノードの中で最も目的ノードに近いノードを選択し、メッセージを転送する。経路探索メッセージがノードを発見できない場合は逆戻りし、手前の交差点で反時計周りの方向へ迂回路を探索することで、経路の発見率を向上させる。転送方向に交差点がある場合、交差点内のノードにメッセージを中継してもらうことで、建物などによる電波の遮断により経路ノード候補数が減少することを防いでいる。経路が切断した場合は送信ノードから新たに経路の再探索を行う。また、プロトコルにおける電子地図の装備率を変えて実験を行うことで、現実の電子地図の普及率におけるプロトコルの有効性を検討した。以下、車両に対する電子地図装備率をXとし、GVGrid(X)で提案プロトコルにおける装備率Xの場合の値を表す。ただし、GVGrid(100%)は単にGVGridと表記する。X < 100%において、電子地図を装備しない各ノードvは、位置情報の取得及びグリッド識別は可能であるとし、隣接ノード選択アルゴリズムにおいて $B_{len} = dist(v, p) * 2^{-1/2} * w^{-1} * T$ でバーストを行うとする。これは、電子地図が利用不可能なノードを通信経路に取り入れると経路の安定性を損なう可能性があるため、最も低い優先度でバーストさせることで、他にもっと良いノードがない場合のみ選択させるようにしている。このため、結果として本来プロトコルで選択されるはずのないノード(互いに接続していない道路上にあるノード)もバーストするようになるため、経路発見率は高くなる可能性があるが、通信経路が不安定になる可能性も高くなる。

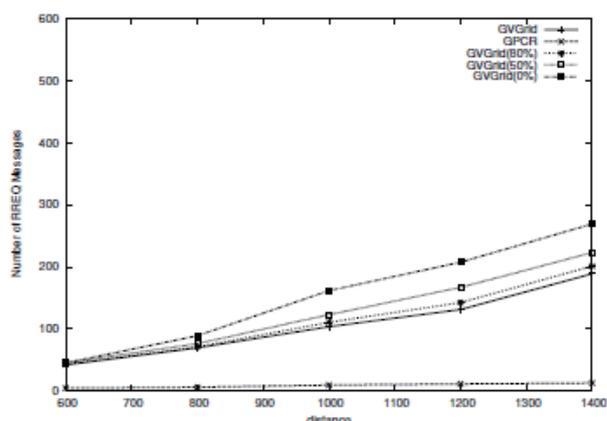
(1) 経路構築プロセスに関する評価

下図に経路構築プロセスの性能を示す。提案プロトコルはGPCRと比較し、隣接ノードを選択する基準が厳しいため、経路発見率の低下が予想されるが、車両密度が比較的高い本実験において、大きな差異はみられなかった(下図(a))。なお、装備率の低下に伴い発見率がわずかながら向上する理由は、電子地図を装備していないノードが道路形状に関わりなく選択されるようになり、結果として隣接ノードの候補数が増加したためである。

下図(b)にRREQメッセージ数を示す。GPCRは深さ優先で探索を行うため、幅優先探索を行うプロトコルよりは少なくなるが、GPCRはHelloメッセージにより、プロトコルはブラックバーストにより隣接ノードを選出するため、両方の手法においてRREQメッセージ数そのものは少ない。



(a) 経路発見率

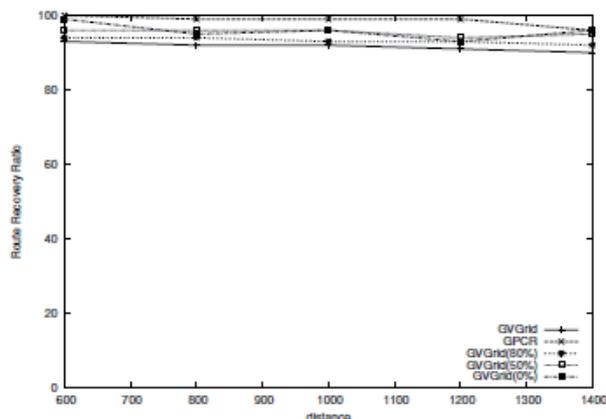


(b) RREQメッセージ数

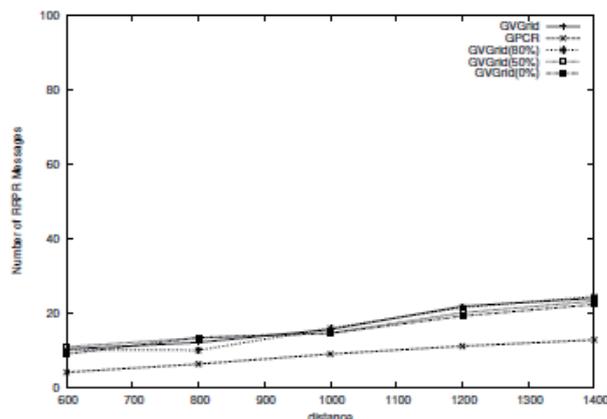
(2) 経路維持プロセスに関する評価

下図(a)は、プロトコルの経路維持プロセスが道路経路グリッド上で行う局所的な経路再構築が成功し

た割合（これを経路再発見率とよぶ）を示している。なお、GPCRは経路切断時にはネットワーク全体で経路を再探索する。したがって、プロトコルの経路再発見率はGPCRのそれより低くなると考えられるが、プロトコルは約90%の経路再発見率を達成しており、ほとんどの場合において道路経路グリッド上での局所的な再探索のみで経路が再構築されることがわかる。なお、提案プロトコルは道路経路グリッド上で再構築できなかった場合、ソースノードから新しい経路を再探索する。これを含めた再発見率は図9(a)の経路再発見率とほぼ等しくなり、GPCRとほぼ同程度の性能を達成できる。下図(b)におけるRRPRメッセージ数も、RREQメッセージ数の場合と同様の理由により少ないことがわかる。



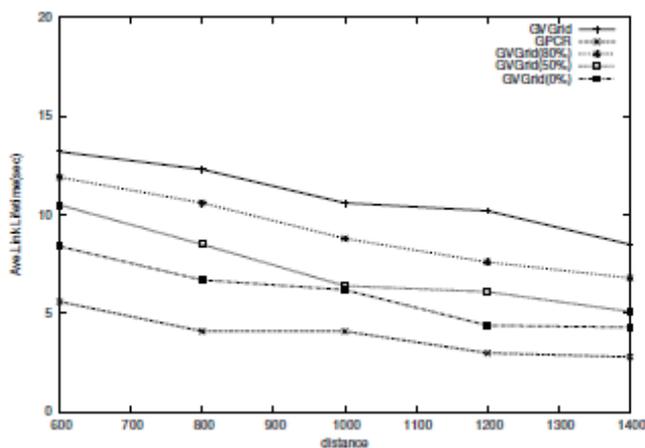
(a) 経路の再発見率



(b) RRPR メッセージ数

(3) 経路品質に関する評価

下図に通信経路上のリンクの平均生存時間を示す。GPCRは距離の遠いノードを優先的に選んでおり、また、ノードの速度や移動方向といった車両移動特性を考慮していないため、ノード間の距離の増大によりリンクの切断が起こりやすい。例えば送信ノードと目的領域間距離が1400m離れている場合、5秒弱でいずれかのリンクが切断する。これに対し、提案プロトコルでは距離が短い場合は13秒以上、距離が長い場合も10秒前後はリンクが生存する。これより、提案プロトコルではより切断回数の少ない通信経路を構成できていることがわかる。



【参考文献】

- C. Lochert, M. Mauve, H. Fusler, and H. Hartenstein. Geographic routing in city scenarios. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, pages 69-72, 2005.
- G. Korkmaz, E. Ekici, F. Ozguner, and U. Ozguner. Urban multi-hop broadcast protocol for inter-vehicle communication systems. In Proc. of the 1st ACM Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2004), pages 76-85, 2004.
- L. Briesemeister and G. Hommel. Role-based multicast in highly mobile but sparsely connected ad hoc networks. In Proc. of ACM Mobihoc, pages 45-50, 2000. (poster paper).

- H. Wu, R. Fujimoto, and G. Riley. Analytical models for information propagation in vehicle-to-vehicle networks. In Proc. of IEEE VTC, fall 2004.
- R. Morris, J. Jannoti, F. Kaashoek, J. Li, and D. De-couto. CarNet: A scalable ad hoc wireless network system. In Proc. of SIGOPS European Work-shop, 2000.
- B. Karp and H. T. Kung. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In Proc. of ACM/IEEE Mobicom, pages 243-254, 2000.
- Y.-B. Ko and N.H. Vaidya. Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks. In Proc. of ACM/IEEE Mobicom, pages 66-75, 1998.
- J.L. Sobrinho and A.S. Krishnakumar. Distributed multiple access procedures to provide voice communications over IEEE 802.11 wireless networks. In Proc. of IEEE GLOBECOM, pages 1689-1694, 1996.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
車車間アドホックルーティングプロトコル GVGrid の実装と評価	マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICO2007) シンポジウム論文集	2007年7月
位置情報ルーティングによる車車間オーバーレイネットワークの検討	情報処理学会研究報告 (情処技報)	2007年9月
Stability Oriented Overlay Multicast for Multimedia Streaming in Multiple Source Context	Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Communications	2008年5月
車車間ルーティングプロトコルによる車両と基地局との通信プラットフォームの提案	情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICO2008) シンポジウム論文集	2008年7月