

行先道路情報取得プロトコルRMDPの評価と 車々間・路車間通信混在環境への適応

塚本 淳[†] 齋藤 正史[†] 梅津 高朗[†] 東野 輝夫[†]

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科

本稿では、我々が提案する車々間アドホック通信プロトコル RMDP における道路情報の散布・伝搬についての評価結果を報告する。RMDP は、車速や車載通信装置の装備率などに依存せず、一定期間に受信したメッセージ数により道路情報を散布する間隔を変更するものである。本プロトコルを用いることにより、通常の道路状況のみならず、渋滞状況においても低いパケット衝突率を実現でき、先行する道路の情報を迅速に取得できることをシミュレーションにより確認した。また車々間通信の補助として路車間通信を用いることにより、車々間通信の普及率が低い段階においても道路情報を伝播できることを示した。

Evaluation of Inter-Vehicle Ad-hoc Protocol RMDP for Acquiring Local Traffic Information and its Extension using Road-to-Vehicle Communication

Jun Tsukamoto[†] Masashi Saito[†] Takaaki Umedu[†] Teruo Higashino[†]

[†] Graduate School of Info. Sci. & Tech., Osaka Univ., Japan

In this paper, we have evaluated an inter-vehicle ad-hoc protocol called RMDP (Received Message Dependent Protocol). RMDP is a protocol for disseminating and propagating the preceding traffic information to the following vehicles. It dynamically changes the dissemination interval depending on the number of reception messages for avoiding message collision. We show that RMDP can avoid message collision in heavy traffic jam conditions by the simulation. Our simulation results show that by using the proposed RMDP, a lot of vehicles can acquire their preceding traffic information within short periods. We also show that RMDP can get more traffic information by using road-to-vehicle communication which fills up their inter-vehicle communication.

1 はじめに

近年の携帯電話網の発展や GPS (Global Positioning System) 機器の小型化・低価格化・高性能化に伴い、GPS 装置と携帯電話によるデータ通信を利用し、各車両の現在位置や行き先に応じた渋滞情報や路面環境、駐車場の空き情報等の周辺施設情報等を提供するサービスが実用化されている。さらに無線 LAN 技術の発展に伴い、GPS 装置と IEEE802.11b などの無線カードを車のカーナビ等に搭載し、道路情報等をリアルタイムに取得することを目指す研究が進められている。

本稿では、高いコストを伴うサーバ設備などのインフラ整備を行わず、無線 LAN などを利用した車々間でのモバイルアドホック通信機能を用いて近隣の道路情報を伝達するためのアプリケーション層プロトコルの評価結果について報告する。評価プロトコルは、各車両が収集した道路情報と他車両から受信した道路情報を適宜取捨選択しながら周囲にブロードキャストし、周辺を走行する車両がその道路情報を受信して順次伝搬させていくという方針に基づいている。

評価するプロトコルは、従来著者が考案した走行速度依存ランダム送信プロトコル SDRP (Speed Dependent Random Protocol) [18][19] と今回提案する受信メッセージ数依存送信プロトコル RMDP (Received Message Dependent Protocol) である。SDRP は、走行する車の速度に依存した送信間隔でデータ散布を行うプロトコルであるが、車載通信装置の装備率に応じた散布間隔の設定が必要であることがわかっている。RMDP は SDRP での評価結果を基に設計したプロトコルであり、過去の受信メッセージ数に応じて動的に道路情報の散布間

隔を変更する。RMDP は、車載通信装置の装備率に関する事前仮定を置くことなく、データ受信総量を大きくすることを目的としている。二つのプロトコルに対して、筆者らが開発したモバイルアドホックネットワークシミュレータ [18] を用いて、車載通信装置を装備している車両の割合を変化させながら全体で交換されるデータ量の変化ならびにパケットの衝突率について評価した。

評価対象とする道路環境は円滑な移動が可能な市街地と局所的な渋滞道路の二種類とし、それらの道路における SDRP と RMDP の性能比較・評価を行った。RMDP を用いることで、車載通信端末装置の装備率に依存せずにほぼ同一のパケット衝突率での通信が可能となり、RMDP が SDRP に比較して柔軟性の高いプロトコルであることを示すことができた。また、渋滞状況においては、[18] に基づいて提案した RMDP の基本的なプロトコル設計にパケット衝突率を加味するよう変更を加えた。変更を加えた RMDP ではデータ受信時のエラーを検出し、受信エラー回数を送信間隔に反映させることで、送信間隔を大きくする。これにより、ひどい渋滞時においてもパケット衝突率を低く抑えられ、車々間での通信が十分に実行できることを示せた。

車載通信装置の装備車両が十分な割合まで普及した際には円滑な車々間通信による道路情報の伝播が可能となるが、サービス開始時の普及率は数%程度に留まり、車々間通信だけでは十分な情報伝播を行うことができない可能性がある。そこで装備率が低い場合においては、車載通信装置普及率の低さを補完する仕組みが必要である。本稿では、車々間通信の補助装置とし

て、路上にリピータ装置を設置する方法を提案する。本リピータ装置は、車両に搭載される車載通信装置と同等の機能を有しており、通過車両から散布された情報を一定期間保持し再び散布するものである。このリピータ装置との路車間でのアドホック通信と車々間通信との混在環境においても、RMDP が意図した通りに動作することを示し、さらに装備率が低い際に路車間通信の補助により道路情報の取得率を向上できることを示す。

2章で本研究が想定する車々間通信のためのモバイルアドホックネットワークについて述べ、3章で提案する道路情報サービス用アドホック通信プロトコル RMDP を説明する。またシミュレーション対象を4章で説明し、5章でシミュレーション結果を示し、SDRP と RMDP を評価・比較する。さらに6章で RMDP を車々間・路車間通信混在環境へ適応した結果を考察し、7章で今後の課題を述べ、最後に8章で本稿をまとめる。

2 車々間通信のためのモバイルアドホックネットワーク

現在、車両に渋滞情報などを伝える方法として、VICS[1] のように FM 多重放送やビーコン、デジタルラジオなどの放送媒体を用いる方法と、カーナビに携帯電話などの通信端末を接続しサーバと通信を行う方法などが実用化されている [2][3][4]。一方、車々間でアドホック通信を行うことでデータを散布・収集するための方法も研究されている。FleetNet Project[5] では路側の基地局からある車両が取得した情報を前後に走行している車両に車々間通信で情報伝達させている。また車々間でのアドホック通信によるマルチキャストプロトコルの提案 [6]、交差点での衝突回避のための Peer-to-Peer 通信方法の考案 [7]、信号や駅のキオスク、空港のラウンジなど一定の箇所にサーバを設置し、そのサーバとアドホックな移動端末との間での通信方式の提案 [8]、通信基地局を介さず車々間でモバイルアドホックネットワークを構築するための方法としてデータの散布に基づく手法の提案 [9][10] などがある。しかし、モバイルアドホックネットワークを構築する方法の多くは、モデルの簡単化のために端末がランダムに移動することを仮定しているものが多い。しかし、公道を走行する車両の動きはランダムでは近似できず、車両の動きに合ったモデルを適用する必要がある。また、各地点の道路情報は時間と距離によって情報の重要度が変化するが、それらの重要度の変化が考慮されていないものも多い。

道路上を想定した車々間のモバイルアドホック通信をモニターするシステムとして TrafficView[11] や CB-AODV-Simulator[6] などが開発されている。しかし、TrafficView では複数車線の車両の走行は考慮しているが、道路を直線に限定するなどの制限を設けており、典型的な道路状況を十分再現できていない。また、時間と距離に応じた情報の伝達方法を考慮した車々間通信プロトコル [10] も提案されており、道路地図に即した車両の移動を考慮しているが、渋滞の発生や信号待ち等への対応はまだ不十分である。さらに、車両の移動については考慮しているが、2台の車両から同時に発信されたデータの衝突を考慮しておらず、2つのデータは何らかの衝突回避機能により常に正しく受信できると仮定している。しかし、実際には渋滞の中で多くの車両がデータ散布を頻繁に行うと、ブロードキャストストーム [12] と呼ばれる大量データの衝突現象が発生し、ほとんどのデータが他車両に伝わらないという問題がある。従って、渋滞時のデータの衝突なども考慮したプロトコルとする必要がある。また散布ノードの密度に応じてデータの散布割合を変えるプロトコル [13] も提案されているが、端末の移動をランダムと仮定している。

本研究では、より現実的な交通流を再現するために交通流シミュレータ NETSTREAM[14] を利用した。NETSTREAM

は、渋滞低減や環境改善のための ITS 導入の効果予測や事前評価を行うために開発されたシミュレータである。交通流シミュレータのモデルとして、マクロモデルを採用し統計的な観測データをもとに、広域の交通流を再現する。入力として、道路リンクごとに交通流特性や最高速度、信号の長さ、車両の発生割合等を定義し、個々の車両の挙動について1秒ごとに計算を行う。交通流モデルは、前の車両と自車両までの距離 S に対して、 $K = 1/S$ をその道路の密度（道路密度）と定義し、 K と渋滞時の道路密度 $K_{congestion}$ 、その道路の自由走行時での最高速度 V_{max} から Greenshields の関係式（式1）により各車両の走行速度 V を求めていく。

$$V = V_{max} \times \left(1 - \frac{K}{K_{congestion}}\right) \quad (1)$$

この交通流モデルにより都市全体などの広域で交通流を精度高く計算できることは、長野オリンピック開催時の交通渋滞予測などに利用された実績から実証されている [14]。本研究で利用した車々間通信状況を評価するためのシミュレータは、交通流シミュレータ NETSTREAM と連携させることにより、より現実に近い道路環境と車両の通行量に基づくシミュレーションを行う。典型的な道路と交通流を再現し、複数の車両から発信されたデータのバケット衝突も考慮した車々間通信プロトコルを提案・評価する。

3 道路情報サービス用アドホック通信プロトコル

3.1 位置依存サービスの伝達

車両に装備されているセンサーから各車両が次のような内容のデータの組（自車両位置、現在時刻、走行速度、道路 ID、進行方向（東西南北）、路面環境、車両状態（ワイパー稼働等））を、一秒ごとに計測し、過去数十秒間の道路情報の一部を選択して自車両の道路情報として発信するものとする。ひとつのデータの組のサイズは、これに収集した周辺施設情報を追加したとしても 100Bytes 以内で表現できる。他の車両から取得した道路情報を車々間で高々100個お互いに交換すると仮定し、交換する道路情報は合計 10KBytes 以内で表現できるとする。また、道路 ID はカーナビに搭載している道路地図と GPS から得られる現在地を照らし合わせることで取得できるものとする。

ここで、道路情報が車々間アドホック通信により伝播していく過程を具体的に説明する。例えば、先行する車両 A が過去数十秒間の自身の位置情報と進行方向、走行速度、路面環境など（「車両 A の道路情報」と呼ぶ）を組にして周辺にブロードキャスト（散布）する（図1）。この情報を受信した対向車線の車両 B が自身の道路情報と共に車両 A の道路情報も再散布すれば、車両 A の後ろを走る別の車両 C に車両 A と車両 B の道路情報を伝えることができる。その結果、若干のタイムラグは生じるが、車両 C は先行して走行する車両 A の現在地までの経路の渋滞状況や路面状況、周辺施設情報などを取得ができる。また、車両 B がそれまでに取得した車両 B の道路情報も取得できる。

3.2 アドホック通信プロトコル

車々間でアドホックな通信を行う方法として、IEEE 802.11[15] の IBSS (Independent Basic Service Set) による通信がある。IEEE802.11 の IBSS 通信では通信範囲内の2ノード間でのアドホックな通信をサポートすると共に CSMA/CA による衝突回避アルゴリズムが実装され、ブロードキャストサービスがサポートされている。本稿における提案プロトコルは

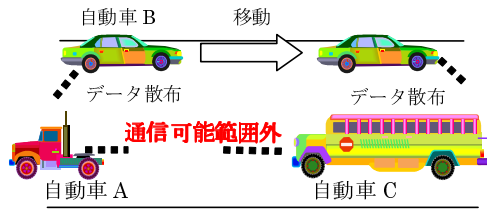


図 1: 車々間通信

IEEE802.11 の IBSS 通信上での UDP/IP プロトコルを用いたアプリケーションプロトコルであるとする。

ここで、シミュレーションの簡単化のために以下のような仮定を行う。まず無線での通信範囲を 100m とし、100m 圏内の車両同士の通信が可能であるとする。ただし、2 ノード間の距離が大きくなると、受信電波が弱くなり、受信データのエラー確率が大きくなる [16]。物理現象から電波は距離の 2 乗から 3.5 乗で減衰していくことが知られているが、ネットワークシステム設計やアンテナの特性、符号化によるエラー訂正により、仕様で定められた到達可能距離までは十分な受信成功確率を確保できると考える。ただし、到達可能距離を超えると電波の弱さを誤り訂正で補正しきれなくなり、受信成功確率は急激に低下する。これらのことから受信成功確率 P を式 2 で近似することとした。ここで x は、2 ノード間の距離である。

$$P = 1 - \frac{x^2}{10000} \quad (2)$$

車々間通信が使用可能な実質通信帯域幅を 100KBytes/sec とし、100 個の道路情報は、10KBytes の UDP パケットとして近隣に散布する。10Kbytes の UDP パケットの衝突をシミュレートするために、1 秒間を仮想的に 10 個のスロットに分割し、各 UDP パケットが 1 つのスロットを占有する。複数の車両から送信される車両情報が同一スロットで発信された場合、それらの車両から半径 100m の円に重なる領域内にある車両は、それらのデータが衝突し共に正しく受信できなかったものと見なす。現実には、10Kbytes のデータがそのまま送信されるのではなく、複数のパケットに分割して送信し、受信側で再構築される。そのためあるパケットが衝突しても、他のパケットから一部の情報を得ることは可能である。しかし、全パケットを正常に受信しなければデータを再構築できないようなデータ構造が使われる可能性も考慮に入れ、10 個のスロットに 10KBytes のパケットを送信すると仮定する。

またデータが衝突した場合には、その領域内の車両が衝突を受信エラーとして検出できるとする仮定。無線 LAN におけるいわゆる隠れホスト問題 [17] と呼ばれる複数の無線局からの電波到達範囲の重複の影響や道路上の物体・周辺建物の影響については、受信確率の近似の範囲内であるとした。以上のように IEEE802.11 の衝突回避や再送アルゴリズムによる通信での実現を想定しているにもかかわらず、シミュレーションでの仮定は非常に悲観的なものとしている。しかし、屋外を走行する車両が車々間でのアドホック通信のみで有効な情報交換が可能となるプロトコルを導出するために、本稿でのシミュレーションの前提としている。

3.3 道路情報散布プロトコル

3.3.1 速度依存道路情報散布プロトコル SDRP

速度依存道路情報散布プロトコル SDRP (Speed Dependent Random Protocol) [18][19] は、道路情報の散布が走行速度に依存したランダムな間隔で行われるプロトコルである。SDRP

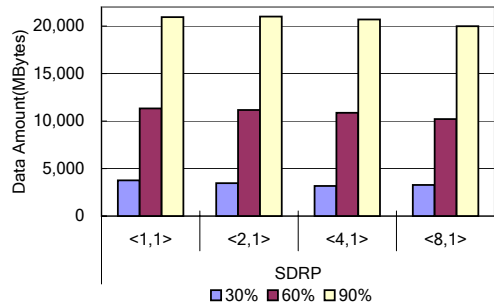


図 2: SDRP 受信データ総量

では、走行する車の速度 v に応じた送信間隔の上限値 $T_{max}(v)$ と下限値 $T_{min}(v)$ をあらかじめ設定し、 $[T_{max}(v), T_{min}(v)]$ のランダムな送信間隔 T でデータの送信を行う。一般に、高速走行時には対向の車両同士のデータ交換の成功確率が小さくなるため、道路情報の取得確率を高めるために送信間隔 T を小さくする必要がある。一方、渋滞時や交差点など低速走行時に情報を頻繁に発信すると、それらの情報同士の衝突が起こり、周辺車両は受信に失敗する。このため送信間隔 T を大きくする必要があるのである。

道路公団等の渋滞状態の定義を速度の観点から見た場合には閾値として 20Km/h ~ 30Km/h が使用されることが多い。よって、本稿では高速・低速の閾値として 30Km/h を採用し、速度 v が低速 v^- の場合と高速 v^+ の 2 つの場合に分けそれぞれの送信間隔を決定する。また $T_{min}(v) = T_{max}(v)/2$ 、すなわち $T = [T_{max}(v)/2, T_{max}(v)]$ と設定し、速度 v での送信間隔 T を $T_{max}(v)$ と省略して表記する。さらに低速 v^- での送信間隔を $T_{max}(v^-)$ 、高速 v^+ での送信間隔を $T_{max}(v^+)$ と表記することとする。またシミュレーションでは $T_{max}(v^+) = 1$ 秒で固定し、 $T_{max}(v^-)$ の値を 1, 2, 4, 8 と変化させた。

図 2 は、[18] で車々間通信端末装備率別の SDRP の受信データ総量 (各車が受信したデータの総和) を評価した結果である。図 2 から受信データ総量をできるだけ大きくするには、車々間通信端末装備率 90% のときは $<2,1>$ で、車々間通信端末装備率 60% のときは $<1,1>$ で、情報散布すれば良いことがわかる。しかし、これでは車々間通信端末装備率を事前に知らなければ、受信データ総量を最大にできる送信間隔がわからない。そこで、この問題点を解決するために SDRP の評価結果から受信メッセージ数依存道路情報散布プロトコル RMDP を設計した。

3.3.2 受信メッセージ数依存道路情報散布プロトコル RMDP

受信メッセージ数依存道路情報散布プロトコル RMDP (Received Message Dependent Protocol) は、情報散布間隔 T を過去の一定期間 t に受信したメッセージ数 γ の関数 $F(\gamma)$ として決定するプロトコルである。実環境においては、本サービスを具備している車載通信装置の装備率は徐々に増加していく。従って、ある装備率を想定して、受信データ量を最大にする送信間隔を設定することはできない。しかし、一定の時間内に受信したメッセージ数に応じて送信間隔を決定することが可能となれば、車載通信装置の装備率に依存せず受信データ量を最大にできると考える。同様に、送信間隔を周囲の状況に応じて動的に変更することでパケットの衝突率を減らすことも期待できる。

本研究では、散布間隔 T は受信メッセージ数に反比例することが望ましいと仮定し、結果として車載通信装置の装備率に依存しない最大の受信データ量を得るための散布間隔を決定する。

そこで RMDP における関数 $F(\gamma)$ として式 3 を定義する .

$$T = F(\gamma) = \frac{\alpha}{1 - \beta \cdot \gamma} (\alpha, \beta > 0) \quad (3)$$

α, β は正の定数であり , γ は過去の一定期間 t に受信したメッセージ数である . また , RMDP における受信メッセージ数 γ を式 4 で定義する .

$$\gamma = M_{success} \quad (4)$$

ここで $M_{success}$ は受信に成功したメッセージ数である .

[18][19] の実験により , $t = 30sec$, $\alpha = 0.14$, $\beta = 0.06$ とすることで , 受信データ量を最大にできることがわっている . そのため , シミュレーションでは 30 秒間の受信メッセージ数 γ に応じて式 5 で求まる散布間隔で道路情報を散布することとする .

$$T = F(\gamma) = \frac{0.14}{1 - 0.06 \cdot \gamma} \quad (5)$$

ただし , $\gamma=17$ において F の値は無限大となる . そこで , $\gamma \geq 17$ の場合には散布を中止し , 他車からのデータを受信するのみとし , 衝突の発生を抑制することとする . また , 本パラメータは無線 LAN の到達距離 , 通信帯域幅に依存するものであるが , その場合でも α, β を適切に設定することで車載通信装置の装備率に依存しない散布間隔を計算できる .

4 シミュレーション環境

筆者らは車々間通信を用いた道路情報の伝播をモニターするアドホックネットワークシミュレータ [18] を開発している . 本シミュレータを用いて , 二種類の道路環境 , ならびに二つのプロトコルの評価を行った . 道路 1 は中央に市街地がある道路網を再現し , 渋滞がほとんどない交通状況を想定している . 道路 2 は局所的な渋滞を再現し , 片側車線が渋滞し対向車線が空いているという渋滞状況を想定している . 評価環境を以下に示す .

道路 1 ● 道路環境 : 20Km \times 20Km , 信号数 198 個 (図 3)

- 交通状況 : 渋滞はほとんどなし
- シミュレーション時間 : 60 分 (データ評価には 10 分から 50 分の 40 分間を使用)
- 車両環境 : 4,890 台 (60 分間での総台数)

道路 2 ● 道路環境 : 南北 2 車線 2km と東西 1 車線 2km の十字路 , 信号は交差点に一箇所 (図 4)

- 交通状況 : 各道路で平均 700m の渋滞が発生し , 渋滞中には 1 車線で平均 70 台 , 2 車線で平均 135 台の車両がある . また平均 10 秒に一台の割合で対向車が走行し , 渋滞通過に要する時間は平均 5 分である .
- シミュレーション時間 : 60 分 (データ評価には 20 分から 40 分の 20 分間を使用)
- 車両環境 : 6907 台 (60 分間での总台数)

道路 1 , 2 共通 ● 車両の位置情報 : 1 秒ごと

- 車載通信装置装備率 : 30% , 60% , 90%
- 自車走行情報 : 過去 10 分の 30 秒毎の道路情報 (20 個)
- ネットワーク環境 : 無線 LAN 到達距離 100m , 通信帯域幅 100KBytes/sec
- 伝播アルゴリズム : 走行速度依存ランダム送受信プロトコル SDRP , 受信メッセージ数依存道路情報散布プロトコル RMDP
- 受信確率 : 距離依存で受信確率が変動 (図 2)
- データ保持法 : 受信バッファが満杯になると , 受信バッファの 50% が空になるように , 破棄するデータをランダムに選択する .
- 一度に送信可能なデータ数 : 100 個
- 受信バッファサイズ : データ 300 個分
- 試行回数 : 各 3 回 , 3 回の平均をとる .

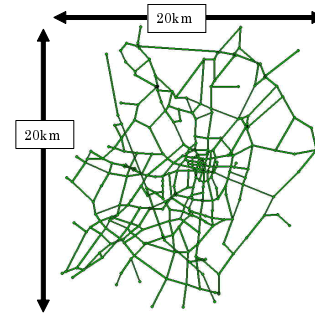


図 3: 道路 1 : 中央に市街地がある道路網

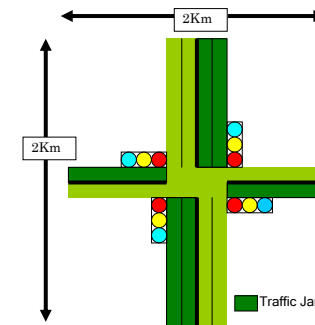


図 4: 道路 2 : 局所的な渋滞が発生した十字路

5 シミュレーション結果

5.1 パケット衝突率と総データ送受信量

道路 1 と道路 2 を用いて , SDRP と RMDP におけるパケットの衝突率 , 総データ送信量 (各車が送信したデータ量の和) , 総データ受信量 (各車が受信したデータ量の和) を測定した .

5.1.1 中央に市街地がある道路網 : 道路 1

中央に市街地がある道路網 (道路 1) を用いて SDRP と RMDP の各車載通信装置装備率 (30% , 60% , 90%) における衝突率 , 総データ送信量 , 総データ受信量の評価を行った . SDRP は , $T_{max}(v^-) = 1 \sim 8$, $T_{max}(v^+) = 1$ とした .

図 5 に SDRP と RMDP の衝突率 , 図 6 に総データ送信量 , 図 7 に総データ受信量を示す . SDRP では車載通信装置の装備率増加に伴い平均的な衝突率が増加するが , RMDP では車載

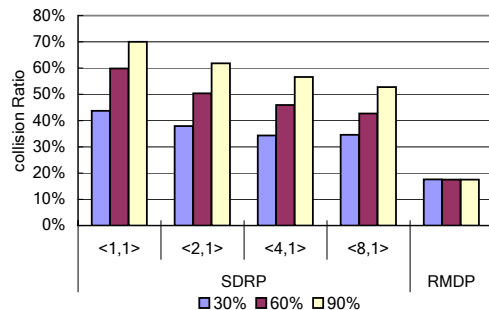


図 5: 道路 1 : 衝突率 (SDRP $T_{max}(v^-) = 1 \sim 8$, $T_{max}(v^+) = 1$, RMDP)

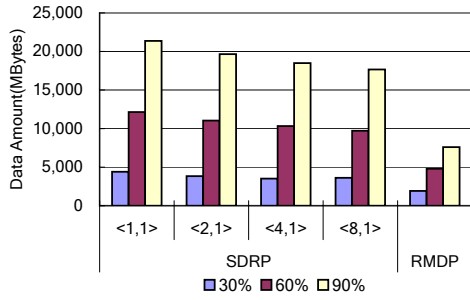


図 6: 道路 1 : 総データ送信量 (SDRP $T_{max}(v^-) = 1 \sim 8$, $T_{max}(v^+) = 1$, RMDP)

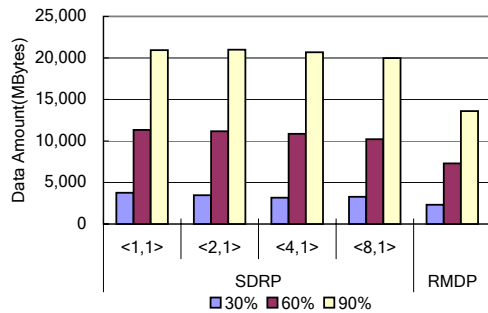


図 7: 道路 1 : 総データ受信量 (SDRP $T_{max}(v^-) = 1 \sim 8$, $T_{max}(v^+) = 1$, RMDP)

通信装置の装備率が変化しても衝突率は 18%程度でありほとんど増加しない。これは、RMDP が受信したメッセージ数に応じて送信間隔を決めるプロトコルであるためである。車載通信装置の装備率が高く受信メッセージ数が多い場合にはデータ送信を抑制し、頻繁なパケット衝突を避ける。車載通信装置の装備率が低く受信メッセージ数が少ない場合にはデータ送信を積極的に行い、空いている帯域幅を最大限利用する。このことにより、RMDP は装備率の違いにより送信間隔を変え、結果的に車載通信装置の装備率に依存しない衝突率を実現できたと考ええる。

一方、受信メッセージが多い場合にはデータ送信を抑制するため、RMDP は SDRP に比べ総データ送信量が小さくなり、結果として総データ受信量も減少している。SDRP では複数の車両が近隣にいる場合に、その一部の車両のみが衝突により受信できないこともあるが、RMDP では送信自体を実行しないために、結果として総データ受信量が減少している。しかし、壊滅的な状況を導くブロードキャストストームを起こさせないためには、非常に有効なプロトコルであることが示された。

5.1.2 局所的な渋滞が発生した十字路：道路 2

局所的な渋滞が発生した十字路（道路 2）を用いて各車載通信装置装備率（30%、60%、90%）における SDRP と RMDP のパケット衝突率を評価した。図 8 に SDRP と RMDP のパケット衝突率を示す。渋滞状況下での高い車両密度により車載通信装置の装備率が 60%、90%の場合には、SDRP、RMDP ともに衝突率が 95%を超えており、データ交換は円滑に行えなっていない。

これは SDRP が周囲の状況に依存しないため渋滞下でも市街地と同じ送信間隔で散布しているためであり、市街地を想定

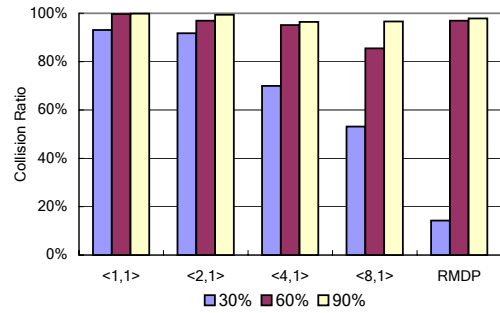


図 8: 道路 2 : 衝突率 (SDRP $T_{max}(v^-) = 1 \sim 8$, $T_{max}(v^+) = 1$, RMDP)

した情報送信間隔では渋滞状況に対応できないことを示している。図 8 で低速走行時の送信間隔を長くすると衝突率は少しずつ減少していくため、渋滞状況に応じた長い送信間隔を設定すれば、衝突率を下げるができる。しかし、実際には、走行中の車両が自車と周辺車両の速度の情報のみから渋滞の程度を予測することは難しい。そのため SDRP のように速度だけに依存したプロトコルでは、交通状況に合わせて送信間隔を変更することは難しく、刻一刻と交通状況が変化する実際の道路への適応には向かない。

一方、RMDP においては、衝突率の高さから受信メッセージ数が減少してしまい、それともない散布頻度が上がることで状況をさらに悪化させるという悪循環に陥る可能性がある。

そこで、RMDP においてパケットの衝突におけるエラー状況を送信間隔に反映させることとする。渋滞や交差点に車両がある可能性が高い低速走行時に受信車両は受信データのエラーを検出し、その検出回数を受信メッセージ数に加えることで高衝突率の環境を認識し、式 3 で送信間隔に反映する。そのために式 4 で定義した受信メッセージ数 γ の定義を式 6 に変更する。

$$\gamma = \begin{cases} M_{success} & (v > v_{th}) \\ M_{success} + M_{error} \times n & (v \leq v_{th}) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 v は現在の走行速度、 v_{th} は受信エラー検出する速度の上限値、 $M_{success}$ は受信に成功したメッセージ数、 M_{error} は検出した受信エラー数、 n は重み付けをするための非負の定数である。 γ は式 3 で送信間隔 T に反映される。 v_{th} より低速に走行している間は、受信メッセージ数 γ として $M_{success}$ だけでなく M_{error} を加えることで、受信車両は受信データのエラーを検出し、高衝突率の環境を認識できる。一方、速度 v が v_{th} より大きく車両が高速に移動できている状況は、車両密度が小さい状況であるため受信エラーを反映させる必要はない。またさらに車両密度が小さい状況では積極的に情報散布を行うために、多少の受信エラーは無視することが望ましいと考えられる。

シミュレーションでは、 v_{th} を渋滞状態の定義として用いられる 30km/h とし、検出した受信エラー数 M_{error} への重み付け n を 0, 0.5, 1, 2 で変化させた。 $n = 0$ のときは式 4 の定義と同じになる。

図 9 に受信エラー検出数への重み付けを行った RMDP におけるパケットの衝突率、総データ送信量、総データ受信量を示す。車載通信端末未装備率は 90%である。 $n = 0$ で受信エラーを反映しない場合には 98%以上だった衝突率が、 $n > 0$ では 15%未満に低く抑えられ、総データ受信量も 2 倍以上に増加している。また n を大きくすると受信エラーに敏感になり、総データ送信量と総データ受信量を減少させていくことがわかる。これらのことから、式 6 の定義により受信エラーを送信間隔に

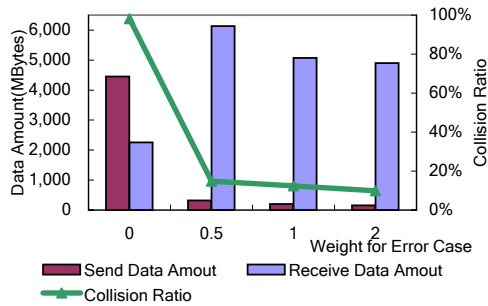


図 9: 道路 2 : 重み付け別 RMDP の衝突率と総データ送受信量 (n=0~2)

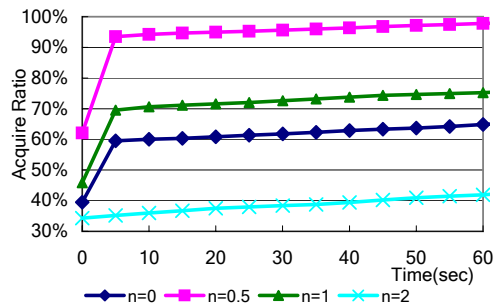


図 11: 道路 2 : 先行道路情報取得割合

図 11 に道路 2 における先行道路の情報取得割合とその時間的変化を示す。重み付け $n=0$ の場合よりも、重み付け $n=0.5$ や $n=1$ の方が素早く情報取得ができています。これは、受信エラー検出を送信間隔に反映し衝突率を下げたことで、円滑な情報伝播が可能になったことを示している。一方、 $n=1$ は $n=0.5$ より情報取得率が低く、 $n=2$ では $n=0$ よりも情報取得率が低くなってしまっている。つまり、重み付けが大きくなるほど、情報取得に長い時間を要しており、過剰な重み付けは情報取得に悪影響を与えることがわかる。これは重み付けを大きくするほど、受信エラーに敏感になるためである。これにより受信エラーを検出した車両が帯域の空きがある場合にも情報散布を控え、総データ受信量が減ることで共有される情報量が減少するためである。この結果から今後のシミュレーションでは、受信エラー検出数に対する重み付けには 0.5 を採用する。

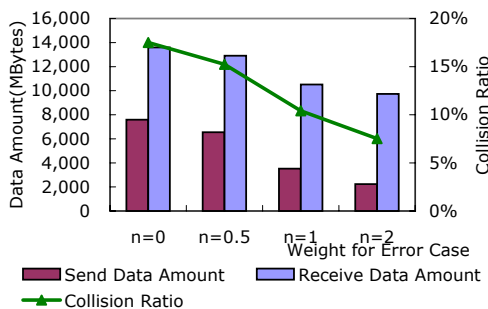


図 10: 道路 1 : 重み付け別 RMDP の衝突率と総データ送受信量 (n=0~2)

また重み付け $n=0.5$ において 5 秒後で 93% 車両が情報取得ができています。つまり、渋滞末尾に停車後すぐに前方 600m の情報が取得ができています。渋滞の道路では、この渋滞がどこまで続いているのかを知りたいが、この結果は 600m 先の情報を瞬時に取得できることを示している。これは実際の道路における渋滞情報取得の点から実用的な性能であり、RMDP が渋滞道路において素早い情報伝達が可能なプロトコルであることが言える。

反映した結果、RMDP は渋滞状況においても衝突率を低く抑え、円滑な情報伝播を可能にできた。

また図 10 に道路 1 に受信エラー検出を行う RMDP を適用した場合の結果を示す。車載通信端末の装備率は同じく 90% である。受信エラーを反映した RMDP ($n > 0$) を適用した場合には、受信エラーを反映しない場合 ($n=0$) に比べて総データ送信量が減少するため、衝突率と総データ受信量も減少していくが、衝突率の上昇や総受信データ量の急激な減少はない。すなわち RMDP に受信エラーを反映した場合でも市街地の利用に問題がないことがわかる。これらのことから、受信エラーを反映した RMDP は道路の交通状況が変化しても衝突率を低く抑えることが可能であると言える。つまり、RMDP は交通状況に依存せずにデータ交換が行えるプロトコルであり、刻一刻と状態が変化する実際の交通状況へも適応可能であると考えている。

道路 1 の先行道路の情報とは、ある車の目的地周辺の道路情報であり、かつ進行方向が一定角度内である情報として近似している。自車が興味のある道路情報は将来通過する車線の情報であり、同じ道路であっても対向車線の情報ではない。そこで各車が移動している方向に関する角度制限を設けることで、車線を限定している。ここでは、目的地周辺のデータとして半径 200m 範囲内の情報であり、進行方向の 120 度以内のデータを指す。また評価対象の車両は、1 時間に 10 台以上の車両が自車の目的地付近の道路を通過し、かつ走行中に少なくとも 1 台/min 以上の対向車線の車両とデータ交換可能な車両であり、都市部においてこの仮定は十分なものであると考える。評価項目は、目的地が 1~5km 先である車両のうち目的地の道路情報を取得できた車両割合の時間的変化である。RMDP の受信エラー検出数への重み付けは $n=0.5$ とした。

5.2 道路情報取得割合とその時間的変化

道路 1 と道路 2 を用いて、各状況下における先行道路の情報取得割合とその時間的変化を評価した。車載通信装置の装備率は 90% とし、RMDP で動作する。先行道路の情報が取得できた状態とは、先行道路の情報を車々間通信によって情報取得するか、自車が先行道路の圏内に入ることによって直接情報取得した状態を指す。

先行情報を早期に取得できる重み付けを決定する必要があるため、まず道路 2 における先行道路の道路情報取得割合を評価する。道路 2 における先行情報は、交差点のある半径 100m 以内の情報とし、進行方向については考慮しないこととする。評価対象車は渋滞状況下にある全車両であり、渋滞最後尾に停車し、渋滞に巻き込まれてから先行道路の情報を取得するまでの時間と情報取得割合を評価する。

図 12 に道路 1 における先行道路の情報取得割合とその時間的変化を示す。1km 先の情報は出発から 1 分で 70% 近くの車両が情報取得できており、2 分後には 2km 先の情報も 70% 以上の車両が取得ができています。さらに 3 分後には 3~4km 先の情報も 50% 以上取得でき、5km 先の情報も 5 分後には 40% の車両が取得ができています。しかし、実用化には 1, 2 分程度で 1~5km 先すべての情報が 100% 近く取得できることが望ましい。そのため、保持する情報量や送信するデータ量を増やす等によって、プロトコルを改良していく必要がある。

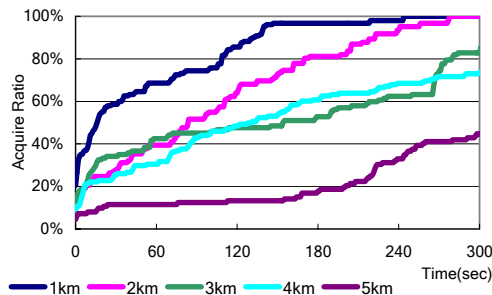


図 12: 道路 1 : 先行道路情報取得割合

6 RMDP の車々間・路車間通信混在環境への適応

6.1 車々間・路車間通信混在環境

車々間通信による情報伝播が円滑に行なわれ各車が情報を共有するためには、車載通信装置を搭載する車両が普及し、装備率が十分に大きくなければならない。しかし、車両のライフサイクルは数年単位であるため、車載通信装置はゆっくりと普及していきと考えられる。そのためサービス開始時の普及率は数%程度であると推定でき、車々間通信だけでは十分なサービスが提供できない可能性がある。そこで車々間通信創成期においては、車載通信装置普及率の低さを補完する仕組みが必要である。本稿では、車々間通信の補助とし路側にも車載器と同等の通信装置を設置することにより、路車間アドホック通信を利用することを提案する。ここで、路側に設置する通信装置はインフラのような大きなコストを要求するものではない。

本稿で提案する路側の通信装置はリピータ装置である。リピータ装置は、車々間通信を傍受し、受信したデータをバッファに蓄えて、それを再ブロードキャストするだけの単純な装置である。移動せず自身の情報を送信しない以外は車載通信装置と同等であり、リピータ同士の通信機能はなく独立で動作する単純な情報転送装置である。このような装置ならば、非常に安価に実現可能と考えている。サービス開始時には必要な場所にリピータ装置を設置しサービス品質を確保していく。もちろん、自宅の近隣などについては利用者が自身で設置することも考えられる。車載通信装置の普及に伴い、このリピータ装置も古くなり動作しなくなっていくが、この場合には撤去するだけでよい。車載通信装置の普及に伴い少しずつ撤去されることを想定しているため、どのようにリピータ装置の設置・撤去を行ってもプロトコル自身は同じように動作する。このようにリピータ装置を利用することにより、サービス立ち上げ時からのサービス品質を保証、車々間通信の普及を促進できると考えている。また、通信プロトコルにはこのような車々間・路車間通信混在環境においても有効に動作することが求められる。

6.2 路車間アドホック通信

路車間アドホック通信とは、車載通信装置と路上に設置された通信装置が道路情報交換を行うアドホック通信を指す。リピータ装置は周辺の車両やリピータ装置から散布された道路情報を受信し、周辺にある車両やリピータ装置に再散布することで、情報の拡散を助ける。路車間アドホック通信にも IEEE802.11 の IBSS による通信を用い、通信範囲や通信帯域幅などの性能はすべて 3.2 章で仮定した車々間アドホック通信と同じである。また、本稿ではリピータ装置にも RMDP を実装し、路車間通信と車々間通信を同じプロトコルで動作させる。つまりアドホックネットワークとしては車両とリピータ装置は区別しな

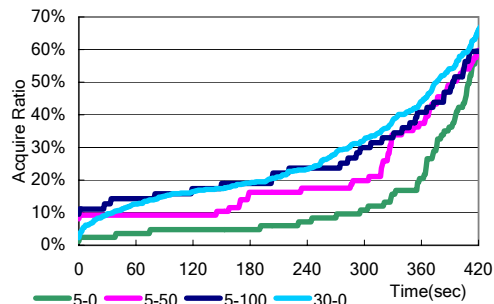


図 13: 道路 1 : リピータ装置設置時の先行道路情報取得割合

い。これは車々間・路車間アドホック通信プロトコルを単純でスケラブルなものにすることを目的としているためである。また車載通信装置とリピータ装置を同じように扱うことにより、リピータ装置設置や撤去が原因で衝突率の急激な上昇が起こらないことを、5.1.1 章で示した RMDP の特徴である「通信端末装備率に依存しない衝突率」から保証できる。

6.3 車々間・路車間通信混在環境シミュレーション

シミュレーションには道路 1 を用い、車載通信装置の装備率は 5% とした。交差点を中心に 310 箇所をリピータ装置の設置場所の候補に指定し、設置場所は候補からリピータ装置の設置率に従いランダムに選択する。リピータ装置の設置率を 0%、50%、100% と変化させ、先行道路の情報取得割合とその時間的変化を評価した。評価対象の車両は、目的地が 1~5km 先である全車両とした。また車載通信装置装備率 X% とリピータ装置の設置率 Y% の組を $[X - Y]$ と表すこととする。

図 13 に目的地が 3km 先である全車両を対象にリピータ装置の設置率を変化させた場合の先行道路の情報取得割合とその時間的変化を示す。車載通信装置の装備率 30% でリピータ装置の設置率 0% の場合 ($[30 - 0]$) も比較のためにのせている。240 秒経過した時点で、 $[5 - 0]$ では情報取得率が約 7% に留まっているが、 $[5 - 50]$ では約 18% まで上昇している。さらに $[5 - 100]$ では 24% となり、 $[30 - 0]$ とほぼ同じ情報取得率を達成できている。つまり車載通信装置の装備率 5% という低普及率でも、リピータ装置の設置により車載通信装置の装備率 30% と同等のサービスを提供できている。また目的地が 1, 2, 4, 5km 先である車両を対象にした場合にも同様の傾向が観察できた。このことからリピータ装置設置はサービス開始時における車々間通信の補助として、先行道路情報取得に有効であることがわかった。さらに RMDP が車々間・路車間通信混在環境においても適切なプロトコルであるということが示せた。

今後はリピータ装置が転送する情報を優先度によって選別するなどの機能を追加し、車載通信装置の装備率 5% でも車載通信装置の装備率 90% 程度と同等のサービスを提供できるように改良を進める予定である。

7 今後の課題

本稿では、RMDP を利用することによって道路の交通状況に依存せずデータ交換が可能になることを示した。今後は RMDP を用いて、情報の交換・伝播を行い遠方の情報をできるだけ素早く取得できることを目指して、保持・散布するデータ内容の選択アルゴリズムの改良を行う予定である。具体的には情報収集された時間や位置が近い重複データを保持しないようにし、できるだけ広い地域の情報を保持するようにする。また、リピー

タ装置が転送する情報を緊急性（事故情報など）や重要度（渋滞情報など）によって選別するなどし、車載通信装置の装備率が低い段階でも利用者の要求に沿ったサービスを高品質で提供できるように改良していく予定である。

8 おわりに

本稿では、車々間アドホック通信プロトコルとして受信メッセージ数に応じて散布間隔を変更するプロトコル RMDP の評価を行った。シミュレーションの結果、RMDP はパケットの衝突率が車載通信装置の装備率に依存しないプロトコルであり、車載通信装置の装備率が未知の場合にも適応可能であることがわかった。さらに受信エラー検出を行うことで、渋滞状況においてもパケットの衝突率を低く抑えることができ、素早い情報伝達が可能となることを示した。このことから RMDP のパケット衝突率は道路の交通状況に依存しない、より実用的なプロトコルであることがわかった。また車載通信装置の普及率が低い段階を想定し、車々間通信の補助装置として路車間通信装置リピータを提案した。さらに、車々間通信と路車間通信が混在する環境でも RMDP が適切に動作し、リピータ装置を設置することで車載端末数の不足を補い先行道路の情報取得割合を向上できることを示した。

参考文献

- [1] 財団法人道路交通情報通信システムセンター：“VICS”，<http://www.vics.or.jp/eng/>.
- [2] トヨタ自動車株式会社：“G-BOOK”，<http://www.toyota.co.jp/g-book/>.
- [3] 本田技研工業株式会社：“インターナビ・プレミアムクラブ”，<http://premium-club.jp/>.
- [4] 日産自動車株式会社：“カーウイングス”，<http://www.nissan-carwings.com/>.
- [5] 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. of 2nd ACM Int. Symp. on Mobile Ad-hoc Networking & Computing (MobiHoc 2001)*, pp.259-262, 2001. S
- [6] C. Schwingenschlogl and T. Kosch：“Geocast Enhancements of AODV for Vehicular Networks”，*ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, Vol.6, No.3, pp.96-97, 2002.
- [7] R. Miller, Q. Huang：“An Adaptive Peer-to-Peer Collision Warning System”，*Proc. of IEEE Vehicle Technology Conference(VTC)*, pp.414-418, 2002.
- [8] M. Papadopouli, and H. Schulzrinne：“Effects of power conservation, wireless coverage and cooperation on data dissemination among mobile devices”，*Proc. of 2nd ACM Int. Symp. on Mobile Ad-hoc Networking & Computing (MobiHoc2001)*, pp.117-127, 2001.
- [9] W. R. Heinzelman, J. Kulik, H. Balakrishnan：“Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks”，*Proc. of 5th Annual ACM/IEEE Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99)*, pp.174 - 185, 1999.
- [10] B. Xu, A. Ouksel and O. Wolfson：“Opportunistic Resource Exchange in Inter-vehicle Ad-hoc Networks”，*Proc. of 2004 IEEE Int. Conf. on Mobile Data Management (MDM2004)*, pp.4-12, 2004.
- [11] T. Nadeem, S. Dashtinezhad, C. Liao, and L. Iftode：“Traffic View: A Scalable Traffic Monitoring System”，*Proc. of 2004 IEEE Int. Conf. on Mobile Data Management (MDM2004)*, pp.13-26, 2004.
- [12] S.Y. Ni, Y.C. Tseng, Y.S. Chen, and J.P. Sheu：“The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad-hoc Network”，*Proc. of 5th Annual ACM/IEEE Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99)*, pp.151-162, 1999.
- [13] A. Khelil, C. Becker, J. Tian, K. Rothermel：“An epidemic model for information diffusion in MANETs”，*Proc. of 5th ACM Int. Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM'02)*, pp.54-60, 2002.
- [14] E. Teramoto, M. Baba, H. Mori, H. Kitaoka, I. Tanahashi, Y. Nishimura, et. al.：“Prediction of Traffic Conditions for the Nagano Olympic Winter Games Using Traffic Simulator：NETSTREAM”，*Proc. of 5th World Congress on ITS*, Vol.4, pp.1801-1806, 1998.
- [15] IEEE802.11 Standard：“Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications”，*ISO/IEC 8802-11:1999*, 1999.
- [16] T. Rappaport：“Wireless Communications: Principles and Practice, Second Edition”，*Prentice Hall*, 2001.
- [17] A. S. Tanenbaum：“Computer Networks Forth Edition”，*Pearson Education Inc.*, 2003.
- [18] 齊藤正史, 船井麻祐子, 梅津高明, 東野輝夫：“アドホック通信に基づく行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.
- [19] M. Saito, M. Funai, T. Umedu and T. Higashino：“Inter-vehicle Ad-hoc Communication Protocol for Acquiring Local Traffic Information”，*Proc. of 11th World Congress on ITS*, CD-ROM, 4066.pdf, 2004.