

マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式

横山 達也^{†a)} 倉本 圭太[†] 長谷川孝明^{†b)} 麻生 敏正^{†c)}
石其 俊明[†]

Multi-Class Zone ITS Communication Scheme

Tatsuya YOKOYAMA^{†a)}, Keita KURAMOTO[†], Takaaki HASEGAWA^{†b)},
Toshimasa ASO^{†c)}, and Toshiaki ISHISONO[†]

あらまし 本論文では、マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式を提案した上、車両の安全を目的とする通信の性能評価において一般性が高くなるよう考慮して評価方法を規定し、これを用いてマルチクラスゾーン ITS 情報通信方式の基本性能を評価し、基地局の設置効果の検証を行っている。提案方式は、小さな通信帯域幅で安全のための高品質な通信を実現するために、交差点特有の事故が発生しやすい領域を考慮し、3種の通信領域において役割の異なる通信 (TDMA, Slotted ALOHA, CSMA) を行う車車間・路車間統合通信である。本論文では、車両の安全を目的とした通信の性能評価のために、他車両との中心座標の距離が2s以内に一瞬でも5m以内になると予測される車両を他車両と衝突可能性が高い車両と定義した上、これに基づき、短時間で他車両と衝突可能性が高いと判定された車両の衝突回避に必要な情報の取得率を評価指標として用いている。マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式評価用シミュレータを構築し、このシミュレータを用いて通信の基本性能評価を行っている。その結果より、数種の交通状況において、通信帯域幅と最近傍領域における必要情報取得率の関係を示している。提案方式は、本論文で仮定した通信環境下において、主道路両側5車線・従道路両側3車線の交差点に基地局を設置する場合、必要情報取得率80%を満たす通信帯域幅が6MHz程度から3MHz程度へ、90%を満たす通信帯域幅が13MHzから3.5MHz程度へ減少することを明らかにしている。平均車両密度55 Veh./km/lane、通信帯域幅3.5MHzの場合に、基地局の設置による必要情報取得率の向上は最大となり、必要情報取得率約70%から約90%に向上することを明らかにし、特に交通量の大きい交差点において基地局設置効果が高いことを示している。以上より、マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式の効果を示している。

キーワード マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式, 交差点, 安全, 衝突可能性判定, 車車間・路車間統合通信

1. ま え が き

自動車事故の件数や死者数は減少傾向にあるが、その数は依然として多い。約半数の事故が交差点で発生しており、交差点における事故削減が社会的に重要である。これらの事故は、人・車・インフラにおいて、互いの位置・移動速度などの情報共有 (Vehicle Information Sharing : VIS) [1] の実現により削減可能である。VIS 実現のために現在までに多くの通信方式に関する研究が行われている [2]~[15]。

これらの従来研究は車車間通信に関する研究 [2]~

[8] と路車間通信に関する研究 [9], [10], 更にこれらを統合した車車間・路車間統合通信に関する研究 [11]~[15] の三つに分類できる。車車間通信はインフラを用いないため、社会的コストが小さいという利点がある。車車間通信において、実装の容易さの観点から、CSMA 方式を用いた制御は実現可能性が高い。これはインフラによる通信制御を行わず、各車が自律的に通信を行うため、比較的簡易に通信範囲内で一様な通信品質を実現できる。一方で、このような車車間通信は路車間通信と比べて、帯域幅の利用効率は低く、特にオフロードが高い場合、通信品質は劣化する。

路車間通信は基地局による集中管理が可能であるため、前述したような車車間通信に比べ、通信範囲内において高い通信品質を実現可能である。ただし、全ての道路においてインフラを設置することは社会的コストの面から合理的でない。

[†] 埼玉大学大学院理工学研究科, さいたま市
Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, Saitama-shi, 338-8570 Japan

a) E-mail: tatsuya@hslab.ees.saitama-u.ac.jp

b) E-mail: takaaki@hslab.ees.saitama-u.ac.jp

c) E-mail: tosimasa@hslab.ees.saitama-u.ac.jp

車車間・路車間統合通信は、車車間通信と路車間通信の長所を組み合わせることが可能である。例えば車車間通信失敗時の基地局によるパケット中継方式の提案 [12] が行われている。

安全のための通信において、最も重要な点は衝突する可能性が高い車両同士の通信性能である。更に小さい帯域幅で、安全のための通信を実現することも重要である。また交差点での事故の大半は交差点内とその周辺で発生する。したがって、この事故が発生しやすい場所（交差点内とその周辺）ではリアルタイムかつ確実な通信、事故が発生しにくい場所（交差点より遠方）ではベストエフォートの通信を行うことで、小さい帯域幅で安全のための通信が実現できる。

しかしながら、従来研究ではこれに着目し、交差点特有の事故が発生しやすい場所を考慮して通信を切り替える通信方式の検討が行われていない。更に、安全のための ITS 情報通信に関する従来研究では、全体の通信性能評価やシナリオごとの評価は行われているが、安全のための通信において重要な、他車両と衝突可能性の高い車両のみを対象とし、かつ一般性の高い評価は行われていない。

そこで本論文では、小さな通信帯域幅で安全のための高品質な通信を実現するために、交差点特有の事故が発生しやすい領域を考慮して、3種の通信領域において役割の異なる通信を行う車車間・路車間統合通信である、マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式 [16] を提案する。更に、他車両と衝突可能性の高い車両のみを対象とし、かつ一般性が高くなるよう考慮して評価方法を規定し、これを用いてマルチクラスゾーン ITS 情報通信方式の基本性能を評価し、基地局の設置効果の定量的な検証を行う。

以降、2. では、従来の ITS 情報通信方式と従来の評価方法について述べ、3. でマルチクラスゾーン ITS 情報通信方式の提案を行う。4. で他車両と衝突可能性の高い車両のみを対象とし、かつ一般性が高くなるよう考慮して評価方法を規定し、5. でマルチクラスゾーン ITS 情報通信方式の基本性能評価を行い、6. にむすびを示す。

2. VIS 実現のための ITS 情報通信の研究

2.1 従来の ITS 情報通信方式

ITS 情報通信は、車車間通信と路車間通信、更にこれらを統合した車車間・路車間統合通信の三つに分類できる。車車間通信に関する研究の多くは、実装の容

易さの観点から、CSMA 方式による実現を想定している。例えば、[2] では、CSMA 方式を用いた車車間通信による協調走行の実現に関する研究を行っている。

車車間通信はインフラを用いないため、社会的コストが小さいという利点がある。また、CSMA 方式を用いる場合、インフラによる通信制御を行わず、各車が自律的に通信を行うため、比較的簡易に通信範囲内で一様な通信品質を実現できる。一方で、このような車車間通信は、多くの場合、自律的に通信を行うため、送信タイミング制御の空き時間を多く要することや、オフロードが高い場合に通信の失敗が多くなることから、路車間通信と比べて、帯域幅の利用効率が低い。特に通信範囲内にいる車両に対して十分な帯域幅が確保されていない場合、危険性の高い車両に対して高品質な通信を保証することができない。CSMA 方式以外を用いる通信に関する研究では、TDMA 方式を用いたリアルタイム通信方式の検討 [3], [4] も行われているが、これらは CSMA 方式を用いたものと比べ、実装は複雑である。

路車間通信は基地局による集中管理が可能であるため、車車間通信に比べ、帯域幅の利用効率が高く、通信範囲内において高い通信品質が実現可能である。例えば、[9] では道路照明を用いた連続型路車間通信システムの提案が示されており、[10] では交通量に応じた動的な通信範囲の構成方法の提案が行われている。ただし、車両が走行する全ての道路にインフラを設置することは社会的コストの面から合理的でない。ここで重要な点は路車間通信はインフラで集中管理を行うことで、車車間通信と比べ、帯域をより効率的に使うことが可能になることである。

車車間・路車間統合通信は、車車間通信と路車間通信の長所を組み合わせることが可能である。例えば車車間・路車間統合通信に関する研究では、車車間通信失敗時の基地局によるパケット中継方式の提案 [12] や、路車間通信におけるシャドーイングや車車間通信における普及率の問題を解消する方式の提案 [13] が行われている。

しかしながら、車車間・路車間統合通信に関する従来研究では、交差点特有の事故が発生しやすい場所を考慮して通信を切り換えることで、小さい帯域幅で安全のための高品質な通信を実現する方式の研究が行われていない。

2.2 従来の評価方法

ここでは、通信性能評価の対象と、評価指標の観点

から、従来の評価方法を整理する。

従来研究は通信性能評価の対象という観点から、大きく分けて、全車両を評価対象とするもの [2]～[4], [9]～[15] と、特定の位置関係にある 2 車両を対象とするもの [5]～[8] に分類できる。[5] では、右直事故と出会い頭事故に関する評価を行い、[6] では、右折待ち車両と直進車両を対象とした評価を行っている。これらの研究では、限られたシナリオのみを評価対象としている。

更に従来用いられている評価指標は、全体性能を評価するための指標 [2]～[5], [7]～[15] と、特定の事故回避のための評価指標 [6] がある。前者の指標には、受信失敗率、連続パケット破棄数、遅延時間がある。一方、後者の指標には、初回相手車両把握地点や最大情報更新距離がある。初回相手車両把握地点は、予防安全サービスを開始する地点が間に合っているか否かを判断するための指標である。また、最大情報更新距離は、車両の挙動把握頻度を距離で評価するための指標である。

安全のための通信で特に重要な点は危険性が高い車両の通信性能である。しかしながら、従来研究では、通信範囲全体の通信性能評価やシナリオごとの評価は行われているが、他車両と衝突可能性の高い車両のみを対象とし、かつ一般性の高い評価は行われていない。

3. マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式 [16]～[18]

3.1 概要

安全のための通信において、最も重要な点は衝突する可能性が高い車両同士の通信性能である。交差点での事故の大半は交差点内とその周辺で発生する。財団法人交通事故総合分析センターが提供している平成 21 年度の交通事故統計年報では、車両相互型の事故は、交差点と交差点付近で、それぞれ 284,175 件と 83,283 件、合計 367,458 件発生したことが示されている。そして単路では、250,187 件発生したことが示されている。上述した交差点の領域は、事故統計上、横断歩道も自転車横断帯もない場合は図 1 に示す濃い灰色の道路領域であり、横断歩道または自転車横断帯がある場合はこれらを含む内側の領域を指す。また、交差点付近とは交差点の領域の側端から 30 メートル以内の道路領域である。単路は、事故統計上、「交差点（付近も含む）」「踏切」「一般交通の場所」以外の道路部分である。加えて道路長を考慮した場合、交差点とその付近における単位長当りの事故発生件数は突出する。した

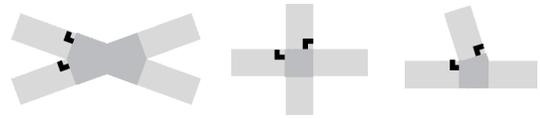


図 1 事故統計上の交差点領域（横断歩道も自転車横断帯もない場合）

Fig. 1 Intersection area in accident statistics (neither pedestrian crossing nor cycling crossing).

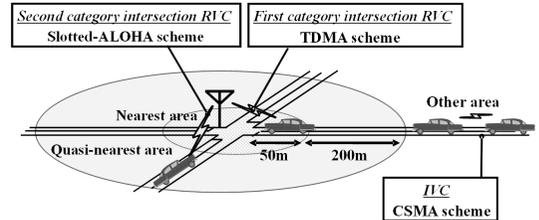


図 2 マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式

Fig. 2 Multi-class zone ITS communication scheme.

がって、交差点特有の事故が発生しやすい場所を考慮して通信を切り換えることで、つまり事故が発生しやすい場所（交差点内とその周辺）ではリアルタイムかつ確実な通信、事故が発生しにくい場所（交差点より遠方）ではベストエフォートの通信を行うことで、小さい帯域幅で安全のための通信が実現できる。

マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式は、図 2 に示すように、3 種の通信領域において、役割の異なる通信を行うことで、小さい帯域幅で、交差点周辺において確実かつ周期的な通信を行う。3 種の通信領域は、交差点に近傍な領域から順に、最近傍領域、準近傍領域、その他の領域とする。実装の容易さに鑑み、これらの領域では、それぞれ、第 1 種交差点路車間通信 (TDMA)、第 2 種交差点路車間通信 (Slotted ALOHA)、車車間通信 (CSMA) を行う。第 2 種交差点路車間通信では、Slotted ALOHA 方式を用いて、第 1 種交差点路車間通信における通信準備（スロット予約）と、可能な限り高品質な通信を行う。そして、第 1 種交差点路車間通信では、事前に予約したスロットを使用し、TDMA 方式を用いた通信を行う。通信の切換は、高精度な自位置特定と基地局の位置情報データベースの搭載を前提とし、各車両が通信領域の変更を判断して行う。その他の領域（基地局が設置されていない交差点を含む）では、CSMA 方式でベストエフォートの通信を行う。

ただし、交差点間の距離が短い場合、路車間通信

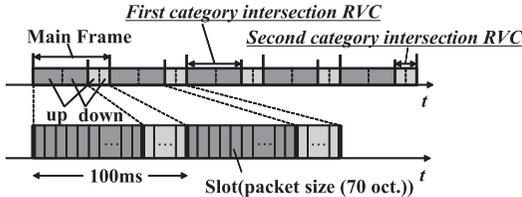


図3 フレーム構成
Fig.3 Frame structure.

(第1種・第2種交差点路車間通信)領域が重なる。路車間通信領域の重なりによる電波干渉を避けるために、隣接交差点では異なる通信帯域を利用する。また、割当スロット数不足の場合、基地局は最近傍領域に近い車両を優先してスロット割当を行う。

図3に路車間通信のフレーム構成を示す。路車間通信メインフレームは第1種交差点路車間通信サブフレームと第2種交差点路車間通信サブフレームから構成される。アップリンクとダウンリンクの分割は、各サブフレーム内において、TDD (Time Division Duplex)で行う。

次に、提案方式における路車間通信について具体的に述べた上、VIS実現のために各車両が行う処理を説明する。各車両は1スロットを利用し、自車情報など(車両IDと位置と速度、加えて必要な情報がある場合はその要求)を基地局に送信する。基地局は1スロットを利用し、1台の車両の情報のみ送信する。具体的には、基地局は、最近傍領域の車両1台に対して、第1種交差点路車間通信サブフレームのダウンリンク用スロットを一つ用いて、車両IDや位置、速度、その車両が要求した情報(サイズが大きい場合、その対象車両用の次のスロットに分割)を送信する。一方、準近傍領域の車両1台に対して、第2種交差点路車間通信サブフレームのダウンリンク用スロットを一つ用いて、上述した情報にスロット予約情報(利用可能なスロットの情報)を付加した上、送信する。各車両は、基地局が送信するパケットを観測し、これらに含まれる車両IDと自車IDを比較することで、自車が要求した情報を取得した上、他車両の情報(位置や速度)を取得する。これにより、路車間通信領域に存在する車両同士で、互いの位置や速度の情報共有が可能となる。

上述したフレーム構成より、周波数の逼迫状況を考慮した実現性の高い帯域幅では、第1種路車間通信ではおおよそ0.1sごとに周期的な通信が実現され、第2種路車間通信では、おおよそ1sごとに周期的な通

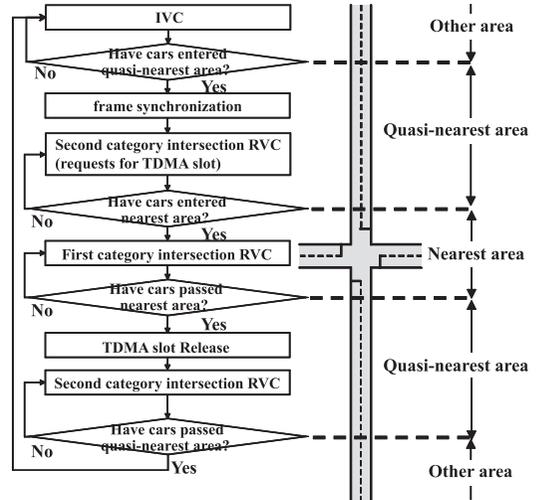


図4 通信手順
Fig.4 Communication procedure.

信が実現される。一般的に、衝突2s前に情報取得することで多くの事故が回避できるといわれている。また、前述したように、最近傍領域は、準近傍領域に比べ事故の発生件数が高く、加えて道路長を考慮した場合、最近傍領域における単位長当たりの事故発生件数は突出する。したがって筆者らは、小さな通信帯域幅で安全のための高品質な通信を実現する場合、交差点における事故の大半が発生する最近傍領域で確実な通信ができれば、準近傍領域で1sに1回以下の通信でもおむね問題がないと考えている。

3.2 通信手順

図4に通信手順を示す。まず、その他の領域を走行中の車両は基地局を必要としない車車間通信を行う。車車間通信では、CSMA方式を用いて、路車間通信の空きスロットを使用して通信を行う。次に、車両は準近傍領域に進入すると、基地局からのパイロット信号を受信し、フレーム同期を行うことで、第2種交差点路車間通信を開始する。第2種交差点路車間通信では、Slotted ALOHA方式を用いて、第1種交差点路車間通信における通信準備(スロット予約)と、可能な限り高品質な通信を行う。

スロット予約手順について説明を行う。前述したように、準近傍領域内の車両は、第2種交差点路車間通信サブフレームのアップリンク用スロットを用いて、車両IDと位置と速度、加えて必要な情報がある場合はその要求(例えば、渋滞情報の要求など)を基地局

に Slotted ALOHA 方式で送信する。この自転車情報の送信により、各車両は自転車の存在を基地局に伝え、これが結果的にスロット予約の要求となる。次に基地局は、準近傍領域内の車両の情報を収集後、準近傍領域内の各車両の位置情報と第 1 種路車間通信用サブフレームの空きスロット数を考慮し、スロットの割り当てを行う。そして基地局は、第 2 種の交差点路車間通信用サブフレームのダウンリンク用スロットを用いて、車両 ID や位置、速度、スロット予約情報（利用可能なスロットの情報）、加えてその車両が要求した情報（サイズが大きい場合、その対象車両用の次のスロットに分割）を送信する。このとき、基地局は 1 スロットを利用し、1 台の車両の情報のみ送信する。各車両は、基地局が送信するこれらのパケットに含まれる車両 ID と自転車 ID を比較し、自転車のスロット予約情報を取得する。

最近傍領域に進入した車両は第 1 種交差点路車間通信を行う。第 1 種交差点路車間通信では、事前に予約したスロットを使用し、TDMA 方式を用いた通信を行う。車両は最近傍領域を退出後にスロットを解放し、再度、第 2 種交差点路車間通信を行う。

このように通信を切り換えるため、基地局の設置されていない交差点では、CSMA 方式を用いた車車間通信が行われる。そのため、基地局が設置されていない交差点においても、シームレスな通信が実現できる。

4. 他車両と衝突可能性の高い車両のみを対象とし、かつ一般性を考慮した評価方法 [19]

4.1 他車両と衝突可能性の高い車両の判定方法

車両の安全を目的とした通信方式において、危険性の高い車両のみを対象とした通信性能評価が重要である。本論文では、何らかの理由でハンドル操作または、アクセル/ブレーキ操作を失敗した場合に、短時間で危険性が高い状況となる車両同士の通信性能を評価することを目的とし、これらの車両を分母にした上、通信の性能評価を行う。例えば、隣接する車線を併走する 2 台の車両は、このまま通常走行を続けた場合は衝突する可能性が低い、何らかの理由でハンドル操作または、アクセル/ブレーキ操作を失敗した場合に、短時間で危険性が高い状況となるため、他車両と危険性が高い車両と判定される。本論文では、他車両との中心座標の距離が 2s 以内に一瞬でも 5m 以内になると予測される車両を他車両と衝突可能性が高い（危険性

が高い）車両と定義している。

個々の車両の挙動は、個々の運転者の特性（年齢、運転頻度、視力など）や機械的特性に依存し [20]、予測時間が長くなるほど誤差が増加するため、数十秒間の移動軌跡を高精度に予測することは困難である。更に、1s 程度の進行方向空間（車間距離）であっても、現実には衝突は少数である。前車が普通に停止する限り、当該車両の実質的な進行方向空間は、当該車両の進行方向空間距離に前車の停止距離を加えたものになり、多くの場合、前車の停止距離と当該車両の停止距離が大幅に異ならないため、衝突は発生しない。一般的には、2s 程度前に警告することで、多くの事故は回避可能であることがいわれている。また、欧米では推奨される進行方向空間時間を 2s 以上、日本でもそれを踏襲していることが多いと示されている [20]。また、この数値は複数の警察署の HP にも掲示されている。

更に、[21] で示されている現行の衝突軽減ブレーキシステムは、国土交通省の技術指針に基づき、走行速度 15 km/h 以上、法定速度以下で作動し、自動制御における作動減速度は 5.0 m/s^2 以上、大型車両が 3.3 m/s^2 以上とされている。これは、運転者が制動により回避を行い、それが衝突軽減ブレーキシステムの作動減速度を上回るものであれば、運転者の制動を優先し、システムをオーバーライドできる仕組みである。自動制御は、乗用車の場合は TTC (Time To Collision) が 1.4s、大型自動車の場合は TTC が 1.6s から開始可能である。

加えて [22] では、後側方障害物警報システムに関する車線変更シミュレーションを行い、一般道に比べて移動速度が大きい高速道路において、TTC が 2s 以上の場合、後続車の制動だけでも衝突回避が期待できること、TTC が 2s 未満の場合では車線変更を行う車両で警報を提示することが必須であることを示している。

以上より、本論文では、現実的な衝突可能性判定の精度と安全のための通信の要件に鑑み、衝突可能性が高いかどうかの判定基準として 2s を用いている。

図 5 を用いて具体的な衝突可能性判定方法を述べる。衝突可能性判定は、まず、2 車両の位置（中心座標）、速度、加速度を用いて、相対位置（点 A(0.0) 及び点 B(x_r, y_r))、相対速度 V_r 、相対加速度 α_r を求める。次に、これらの値を用いて、2 車両の 2s 間の相対位置を予測する。予測相対位置は、等加速度運動を仮定して求める。そして、2s 間の 2 車両の予測相対位置が一瞬でも 5m 以内となる場合に、衝突可能性が

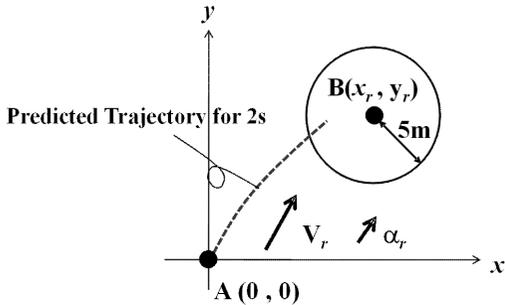


図 5 衝突可能性判定モデル
Fig. 5 Model to examine collision possibility.

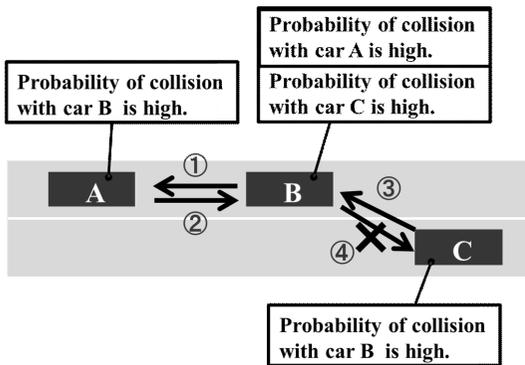


図 6 必要情報取得率の計算例
Fig. 6 Calculation example of Ratio of received information necessary.

高い状態と判定する。

4.2 評価指標

安全のための通信では、危険性の高い車両が危険回避に必要とする情報の取得率が高いことが要求される。本論文では評価指標として、他車両と衝突可能性の高い車両の必要情報取得率を（必要情報の取得回数）/（衝突可能性が高く、他の車両の情報取得を必要とした回数）と定義し、用いる。必要情報とは、車両が衝突回避に必要とする、相手車両の位置や速度等の情報である。

図 6 を用いて必要情報取得率の計算方法を説明する。図 6 では、衝突可能性判定により車両 A と車両 B、車両 B と車両 C が互いに衝突可能性が高いと判定されたとする。この場合、車両 A は車両 B の情報取得を必要とする。同様に、車両 B は車両 A 及び車両 C の情報取得を必要とし、車両 C は車両 B の情報取得を必要とする。よって、衝突可能性が高く、他車両の情報取得を必要とする回数は 4 回となる。これに対

する必要情報取得の成否を以下のように仮定すると、

- ① 車両 A は車両 B の情報取得に成功
- ② 車両 B は車両 A の情報取得に成功
- ③ 車両 B は車両 C の情報取得に成功
- ④ 車両 C は車両 B の情報取得に失敗

この場合、必要情報の取得回数は 3 回となり、衝突可能性の高い車両の必要情報取得率は 75%となる。また、車両 A と車両 C は互いに衝突可能性が高いと判定されないため、車両 A と車両 C における互いの情報取得の成否は必要情報取得率に影響しない。

5. 基地局設置効果の定量的評価 [19]

他車両と衝突可能性の高い車両のみを対象とし、かつ一般性を考慮した判定モデルと前述した評価指標を含む、マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式の評価用シミュレータを構築した上、定量的な評価を行う。このシミュレータの交通流部は [23] を利用している。この交通流シミュレーションは 0.1s 刻みで行われるため、衝突可能性判定は 0.1s 間隔で行う。

この交通流部について述べる（詳細は [23] 参照）。道路は仮想的な一般道で、主道路と複数の従道路で構成され、各交差点には信号機が設置されている。車両モデルは乗用車を仮定し、各運転者は周囲の交通状況判断して運転する。片側 3 車線の場合、車両発生箇所が 3 あり、評価対象エリアへの車両の進入は車線ごとにポアソン生起するものとしている。最低車間距離以内で車両が進入する場合には、車両プールで待機し、最低車間距離確保後に進入する。その後、運転者は信号機を見て、信号現示に従った運転を行う。このシミュレータではこれらの判断に運転者ごとのばらつきがないものとしている。[23] では、この交通流シミュレータを用いて、大都市を想定する道路ネットワークの一部区間（11 交差点）を対象に平均旅行時間の評価を行い、その結果、閑散時（主道路の平均車頭間隔 40s 以上）では、平均旅行速度が約 45 km/h 以上、混雑時（主道路平均車頭間隔が 10s の場合）に平均旅行速度が約 15 km/h であることを示している。交通センサ [24] では、東京都特別区の混雑時の平均旅行速度は約 18 km/h であることが示されており、おおよそ一致している。

5.1 帯域幅の検討方法

安全の観点から、マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式における基地局設置効果の定量的評価を行う。ただし、前述したように、マルチクラスゾーン ITS 情報

通信方式は、基地局の設置されていない交差点では、CSMA 方式を用いた車車間通信を行うため、提案方式において基地局の有無による性能比較は、提案方式と CSMA 方式を用いた車車間通信方式の比較も意味する。

交差点での事故の大半は交差点内またはその周辺で発生するため、本論文では最近傍領域（停止線上流 50m）を主たる評価領域とする。利用可能な通信帯域幅は有限かつ貴重な資源であり、通信帯域幅と通信性能の関係を明らかにすることが重要となる。

ここではまず、数種の交通状況ごとに、評価を行う各通信帯域幅において、第 1 種交差点路車間通信の必要情報取得率が最も高くなる、第 1 種交差点路車間通信と第 2 種交差点路車間通信、それぞれの通信帯域幅を求める。そして各交通状況、各通信帯域幅において性能が最も高い帯域利用をした場合を最高性能とし、性能比較を行う。本論文では、帯域幅の計算は、誤り訂正、ロールオフ率、ヘッダを全て含めて $1\text{ Hz} = 1\text{ bit/s}$ として計算するものとする。

5.2 シミュレーション諸元

本論文では、種々の通信帯域幅において交通量と通信の基本性能の関係を検討するために、主方向の 1 車線あたりの平均車頭間隔を 7s, 15s, 30s とした、3 種の交通状況に対して評価を行う。各平均車頭間隔に対する平均車両密度は、それぞれ 55 veh./km/lane, 20 veh./km/lane, 10 veh./km/lane である。また、都市部の交差点を想定し、図 7 に示すように、主道路両側 5 車線、従道路両側 3 車線とした。ここでは交差点数を 3 とし、中央の交差点における通信性能を評価する。各直進・右左折希望率を表 1 に示す値とし、また直進車両の車線変更選択率は 80% とした。シミュレーション時間は 5000s とした。

通信諸元を表 2 に示す。メインフレーム長は 0.1s とする。表中の路車間通信の通信範囲とは、基地局と車両が通信可能な最大距離であり、車車間通信の通信範囲とは、車両と車両が通信可能な最大距離である。一方、キャリアセンス半径とは、車車間通信において各車両のデータ送信の際に行うキャリアセンスの最大距離である。本論文では、通信機器は車両の中央に配置されていると仮定している。表中の正規化遅延とは、1 スロット長（図 3 参照）で正規化した遅延時間である。車車間通信のデータ送信試行間隔は平均 20ms のポアソン生起に従うものとする。第 2 種路車間通信を行う準近傍領域は、図 2 に示すように、停止線上流

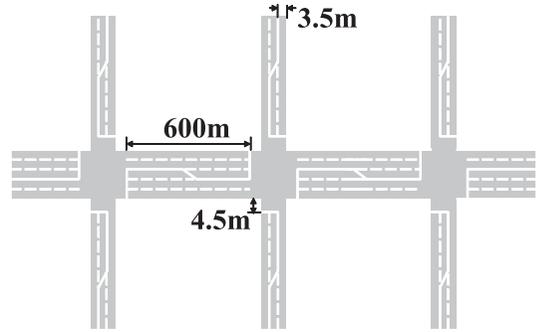


図 7 道路諸元
Fig.7 Road parameters.

表 1 直進・右左折希望確率

Table 1 Probability of straight-moving, left-turn and right-turn.

	左折 [%]	直進 [%]	右折 [%]
主方向	10	80	10
従方向	40	20	40

表 2 通信諸元

Table 2 Communication parameters.

通信範囲	路車間通信	250 m
	車車間通信	100 m
キャリアセンス半径		200 m
通信周期		0.1 s
正規化遅延		0.5
通信チャンネル数		2 CH
パケット長 (データ長)		70 oct.(30 oct.)

50m から 250m までの 200m の範囲としている。また、車車間通信の通信範囲は 100m とした。これに対して、隠れ端末による通信失敗を低減するために、キャリアセンス半径を 200m とし、評価を行う。

本論文では、提案方式の基本性能を評価することを目的としているため、シャドーイングが発生しない交通環境（大型車混在率 0, ビルなどの障害物なし）において、電波減衰と多重伝搬は発生しないものとして性能評価を行う。本シミュレーションでは、ランダムバックオフ終了のタイミングが同時の場合、パケット衝突が発生する。本シミュレーション結果では、前述のようにパケット誤りの発生条件を限定したことにより、現実の電波伝搬環境と比べ、通信性能が高い可能性がある。大型車によるシャドーイングは、基地局のアンテナの設置位置を高くすることによって影響を小さくすることも可能である。また、必要に応じてマルチホップさせることにより、通信性能の劣化を削減可能である。ただし、マルチホップさせた場合、利用す

る帯域幅が大きくなる。同様に周波数依存する電波減衰や回折、多重伝搬を考慮した場合も通信性能は変化する。これらに関する定量的評価も重要であるが、本論文では提案方式の基本性能を評価することを目的としているため、これらを含めた性能評価は今後の課題とする。また、SNR と多値多相化変調によっても通信性能は変化するが、5.1 でも述べたように、以降の帯域幅の計算は誤り訂正、ロールオフ率、ヘッダを全て含めて $1 \text{ Hz} = 1 \text{ bit/s}$ として行う。

5.3 評価結果

基地局の設置されている交差点と基地局の設置されていない交差点において、通信帯域幅に対する最近傍領域の必要情報取得率を評価する。更に、評価結果に対して通信帯域幅と交通量の観点から基地局の設置効果について検討を行う。

図 8 に通信帯域幅に対する最近傍領域における必要情報取得率の評価結果を示す（情報取得を必要とした回数は車両密度 55 veh./km/lane の場合、約 130 万回であった）。図 8 (a) は検討を行った全通信帯域幅に対する結果を示しており、図 8 (b) は必要情報取得率の変化が大きい部分に着目し、結果の詳細を示している。通信帯域幅が極端に小さい場合（通信帯域幅がそれぞれ、平均車両密度 55 veh./km/lane では約 1.0 MHz 以下、平均車両密度 20 veh./km/lane では約 0.4 MHz 以下、平均車両密度 10 veh./km/lane では約 0.3 MHz 以下である場合）、基地局の設置されている交差点における必要情報取得率は、基地局の設置されていない交差点における必要情報取得率に比べて低くなった。これは、このような条件下では、第 2 種交差点路車間通信における通信失敗の多発により、多くの車両がスロットの予約を行えないまま最近傍領域に進入してしまうためである。これにより、基地局の設置されている交差点の最近傍領域における必要情報取得率が低くなる。

通信帯域幅がそれぞれ、平均車両密度 20 veh./km/lane では約 6 MHz 以上、平均車両密度 10 veh./km/lane では約 2 MHz 以上の場合、基地局の設置されている交差点と基地局の設置されていない交差点における必要情報取得率はほぼ同等となった。また、平均車両密度 55 veh./km/lane 、通信帯域幅が 25 MHz の場合においても、基地局設置により、必要情報取得率が約 5% 高くなることがわかった。このような条件下では、TDMA 方式（第 1 種交差点路車間通信）と CSMA 方式のどちらにおいても、高い必要

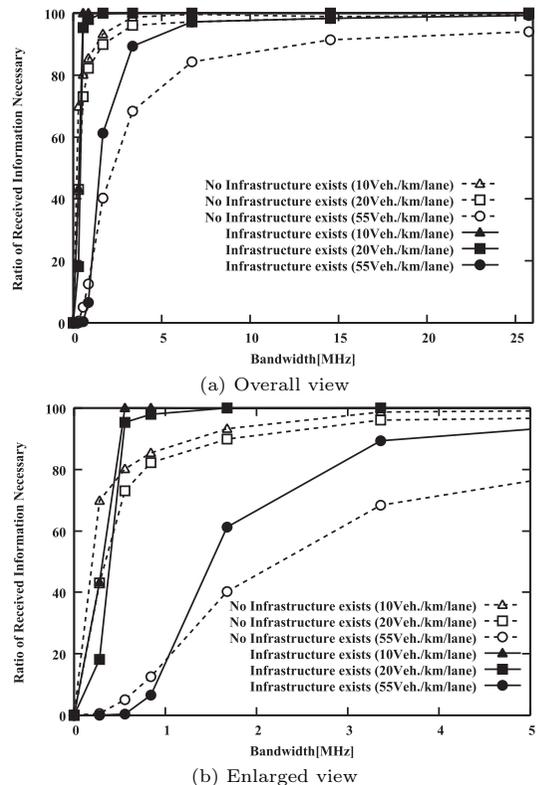


図 8 最近傍領域における必要情報取得率
Fig. 8 Ratio of received information necessary in a nearest area.

情報取得率を実現可能であることが分かる。

その他の通信帯域幅（例えば、平均車両密度 20 veh./km/lane の場合、通信帯域幅が約 0.4 MHz ~ 約 6 MHz ）においては、基地局の設置による必要情報取得率の向上が確認できる。提案方式で用いる TDMA 方式は、基地局が集中管理し、車両ごとに専用のスロットを割り当てて通信を行うため、競合によるパケット衝突が発生しない。一方、CSMA 方式を用いる車車間通信では、自律分散的に通信を行うため、通信帯域幅が十分に大きくない場合、競合によるパケット衝突が発生する。そのため、このような通信帯域幅においては、基地局の設置されている交差点の必要情報取得率は、基地局の設置されていない交差点の必要情報取得率に比べて高くなる。

また、必要情報取得率 80% を満たす通信帯域幅は、基地局の設置されている交差点においては 3 MHz 程度以上、基地局の設置されていない交差点においては 6 MHz 程度以上必要となった。必要情報取得率 90% を

満たす通信帯域幅は、基地局の設置されている交差点においては 3.5 MHz 程度以上、基地局の設置されていない交差点においては 13 MHz 程度以上必要であることが分かった。基地局の設置により、基地局を設置しない場合に比べて小さい通信帯域幅において高い必要情報取得率を実現可能であることが分かる。

更に図 8 より、通信帯域幅に対する必要情報取得率の関係は、交通量で大きく変化した。特に交通量の増加によって、基地局設置による必要情報取得率の向上の割合が増加する。これは、上述したように、提案方式で用いる TDMA 方式は、CSMA 方式に比べ、通信帯域幅の利用効率が高いためである。検討を行った交通状況のうち、最も大きい交通量 (55 veh./km/lane) において、基地局の設置による必要情報取得率の向上は最大で 20% 程度 (通信帯域幅 3.5 MHz の場合に約 70% から約 90% に向上) となった。一方、最も小さい交通量 (10 veh./km/lane) においては、基地局の設置による必要情報取得率の向上は小さい。例えばこの交通状況において、通信帯域幅 1.5 MHz に対する必要情報取得率は、基地局の設置されている交差点では 99.9%、基地局の設置されていない交差点では 90% 程度となった。これより、交通量の小さい交差点においては、基地局の設置を行わずとも、高い必要情報取得率を得られることが分かる。しかし、必要情報取得失敗率 (必要情報取得率を 100% から引いた値) は、基地局の設置されている交差点では 0.1%、基地局の設置されていない交差点では 10% 程度となる。したがって、基地局の設置により、衝突の可能性が高い状態にある車両の必要情報の取得失敗回数を 1/100 に削減可能となる。そのため、交通量の小さい交差点においても、基地局の設置効果があるといえる。

図 9 に通信帯域幅に対する準近傍領域における必要情報取得率の評価結果を示す。この結果より、今回評価を行った準近傍領域 (停止線上流 50 m から 250 m までの 200 m の範囲) では、検討した全ての状況において基地局を設置されていない場合の結果がよいことが分かった。しかしながら、前述したように、小さな通信帯域幅で安全のための高品質な通信を実現する場合、準近傍領域でスロットの予約を行い、事故の起こる確率の高い交差点周辺 (最近傍領域) で確実な通信ができれば、おおむね問題がないと筆者らは考えている。加えて、本論文では、準近傍領域を図 2 に示すように、停止線の上流 50 m から 250 m の範囲としているが、これを適切に設定することによって、最近傍領域

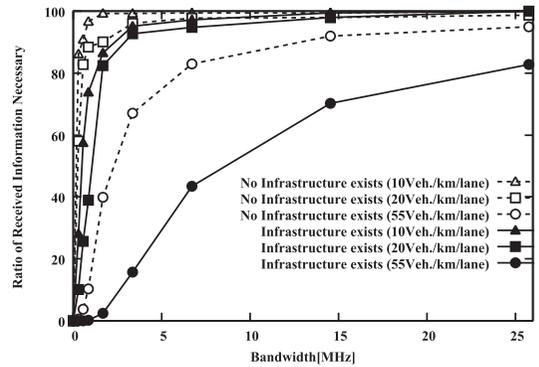


図 9 準近傍領域における必要情報取得率
Fig.9 Ratio of received information necessary in a quasi-nearest area.

の通信性能を劣化させることなく、準近傍領域の通信性能を向上させる可能性がある。このより詳細な検討は今後の課題とする。

これらの結果より、通信帯域幅と交通量の観点から基地局の設置効果を確認し、特に交通量が大きい交差点の最近傍領域において基地局の設置効果が高いことを示している。以上より、マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式の効果を示している。

6. む す び

本論文では、マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式を提案した上、車両の安全を目的とする通信の性能評価において一般性が高くなるよう考慮して評価方法を規定し、これを用いてマルチクラスゾーン ITS 情報通信方式の基本性能を評価し、基地局の設置効果の検証を行った。

提案方式は、小さな通信帯域幅で安全のための高品質な通信を実現するために、交差点特有の事故が発生しやすい領域を考慮し、3種の通信領域において役割の異なる通信 (TDMA, Slotted ALOHA, CSMA) を行う車車間・路車間統合通信である。本論文では、車両の安全を目的とした通信の性能評価のために、他車両との中心座標の距離が 2s 以内に一瞬でも 5 m 以内になると予測される車両を他車両と衝突可能性が高い車両と定義した上、これに基づき、短時間で他車両と衝突可能性が高いと判定された車両の衝突回避に必要な情報の取得率を評価指標として用いた。マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式評価用シミュレータを構築し、このシミュレータを用いて通信性能評価を行った。その結果より、数種の交通状況において、通信帯域幅

と最近傍領域における必要情報取得率の関係を示した。提案方式は、本論文で仮定した通信環境下において、主道路両側 5 車線・従道路両側 3 車線の交差点に基地局を設置する場合、必要情報取得率 80% を満たす通信帯域幅が 6 MHz 程度から 3 MHz 程度へ、90% を満たす通信帯域幅が 13 MHz から 3.5 MHz 程度へ減少することを明らかにした。平均車両密度 55 Veh./km/lane, 通信帯域幅 3.5 MHz の場合に、基地局の設置による必要情報取得率の向上は最大となり、必要情報取得率約 70% から約 90% に向上することを明らかにし、特に交通量の大きい交差点において基地局設置効果が高いことを示した。以上より、マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式の効果を示した。

今後の課題として、マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式の最適な準近傍領域の幅の検討を含めたより詳細な評価や検討や、シャドローイングや電波伝搬を含めた性能評価がある。

文 献

- [1] T. Hasegawa, K. Mizui, and K. Seki, "A concept reference model for ITS communication systems -View from vehicle information sharing," Proc. 13th World Congress on Intelligent Transportation Systems, CD-ROM, 2006.
- [2] K. Tokuda, M. Akiyama, and H. Fujii, "DOLPHIN for inter-vehicle communications system," Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000, pp.504-509, Dearborn, MI, USA, Oct. 2000.
- [3] K. Bilstrup, E. Uhlemann, E.G. Strom, and U. Bilstrup, "On the ability of the 802.11p MAC method and STDMA to support real-time vehicle-to-vehicle communication," EURASIP J. Wireless Communications and Networking, vol.2009, Jan. 2009.
- [4] 牧戸知史, 鈴木徳祥, 原田知育, 松村潤哉, "リアルタイム車車間通信のための自律分散型 TDMA プロトコル," 情処学論, vol.48, no.7, pp.2257-2266, July 2007.
- [5] 宮本進生, 四方博之, シャグダル オウンチメグ, 大山卓, ヌリシラジ マハダド, 三浦 龍, 小花貞夫, "CDMA vs TDMA : 安全運転支援のための車車間通信システム特性評価," 信学論 (A), vol.J93-A, no.7, pp.474-484, July 2010.
- [6] 伊藤健二, 田所幸浩, 鈴木徳祥, 原田知育, 尾口健太郎, 伊藤修郎, "車車間通信による安全運転支援システムの性能評価," 信学技報, ITS2007-26, Sept. 2007.
- [7] 鈴木秀格, 村田英一, 荒木純道, "出会い頭衝突事故防止のための位置情報を利用した車車間通信方式に関する検討," 信学技報, ITS2005-40, Dec. 2005.
- [8] A. Tang and A. Yip, "Collision avoidance timing analysis of DSRC-based vehicles," Accident Analysis & Prevention, vol.42, no.1, pp.182-195, 2010.
- [9] 福井良太郎, 柿田法之, 屋代智之, 重野 寛, 松下 温, "道路照明を用いた連続無線ゾーン構成法による路車間通信システムの実用性の評価," 情処学論, vol.43, no.12, pp.3931-3938, Dec. 2002.
- [10] 朝倉啓充, 成田干城, 中村めぐみ, 屋代智之, 重野 寛, 岡田謙一, "連続型路車間通信システムにおける動的ゾーン制御アルゴリズム," 情処学論, vol.46, no.8, pp.2152-2561, Aug. 2005.
- [11] J. Santa, A.F. Gomez-Skarmeta, and M. Sanchez-Artigas, "Architecture and evaluation of a unified V2V and V2I communication system based on cellular networks," Comput. Commun., vol.31, pp.2850-2861, July 2008.
- [12] 台蔵浩之, 岩橋 努, 渡辺 尚, "車車間通信と路車間通信を統合する MAC プロトコルの評価について," 信学技報, ITS2003-114, Feb. 2004.
- [13] 屋代智之, 松下 温, "路車間通信・車車間通信統合 MAC プロトコル : I-WarpII," 情処学論, vol.42, no.7, pp.1781-1789, July 2001.
- [14] 藤野信次, 塩内正利, 石原 進, 水野忠則, "車車間・路車間統合によるデータ通信効率化の一検討," 情処学研報, 2005-ITS-23, pp.105-111, Nov. 2005.
- [15] 塚本晃司, 藤井雅弘, 伊丹 誠, 伊藤敏二, "車々間・路車間統合システムを用いた単一方向巡回ネットワークの提案と評価," 信学論 (A), vol.J87-A, no.9, pp.1236-1244, Sept. 2004.
- [16] 倉本圭太, 長谷川孝明, "交差点付近の車両の安全を目的としたリアルタイム ITS 情報通信システム," 信学技報, ITS2006-7, May 2006.
- [17] K. Kuramoto, K. Fujimura, and T. Hasegawa, "The multi-class zone ITS communication scheme for real-time communications in intersections," Proc. 10th IEEE Conf. on ITSC, pp.431-435, 2007.
- [18] 石其俊明, 長谷川孝明, 倉本圭太, "マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式における車車間通信の一検討," 信学技報, ITS2008-10, July 2008.
- [19] 横山達也, 長谷川孝明, 麻生敏正, "マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式における基地局設置効果について," 信学技報, ITS2010-80, March 2011.
- [20] 松永勝也 (編), 交通事故防止人間科学, ナカニシヤ出版, 東京, 2009.
- [21] 澤田東一, 廣瀬敏也, 春日伸子, 銭谷真拓, "衝突被害軽減ブレーキシステムの評価に関する研究," IATSS Review, vol.33, no.4, pp.311-318, Dec. 2008.
- [22] 若杉貴志, "ドライバ特性から見た SOWS (Side Obstacle Warning Systems) の警報発生タイミングに関する検討," 自動車技術会論文誌, vol.33, no.3, pp.593-596, July 2002.
- [23] 麻生敏正, 長谷川孝明, "拡張したシミュレータによる高度デマンド信号制御方式の性能評価," 信学論 (A), vol.J91-A, no.1, pp.33-43, Jan. 2008.
- [24] 交通工学研究会, "平成 17 年度道路交通センサス全国道路・街路交通情勢調査," 交通工学研究会, 2007.
(平成 23 年 10 月 5 日受付, 24 年 2 月 13 日再受付)



横山 達也 (正員)

平 21 埼玉大・工・電気電子システム卒。
平 23 同大大学院博士前期課程了。在学中
ITS における安全の通信に関する研究に
従事。



石其 俊明

平 20 埼玉大・工・電気電子システム卒。
平 22 同大大学院博士前期課程了。在学中
ITS における安全の通信に関する研究に
従事。



倉本 圭太

平 18 埼玉大・工・電気電子システム卒。
平 20 同大大学院博士前期課程了。在学中
ITS における安全の通信に関する研究に
従事。



長谷川孝明 (正員)

昭 56 慶大・工・電気卒。昭 61 同大
大学院博士課程了。同年埼玉大・工・電気助
手。同助教授を経て、現在、同大学院理
工学研究科教授。工博。平 7~8 カナダ・
ビクトリア大客員研究員。現在の興味は、
IT (Information Technology) による人
と物の移動の高度化のシステム創成論的アプローチにある。ス
ペクトル拡散通信システム、CDMA、ニューラルネットとその
情報システムへの応用、画像入力マイクロホンなどの人間の意
思伝達を含む情報通信の方式・情報と信号の処理の研究を経て、
近年は、システム創成論的アプローチにより、ITS プラット
フォーム、システムアーキテクチャ、下位レイヤでそれらを支
える ITS 要素技術としての情報通信・ポジショニング・HMI、
上位レイヤで展開される ITS アプリケーションを楽しんでいる。
平 2 年度本会篠原記念学術奨励賞受賞、著書「スペクトル
拡散技術の基礎と応用」(分担執筆)、「プライマリー C 言語
ノート」、「モバイル・コンピューティング教科書」(分担執筆)
など。IEEE ITS ソサイエティ Board of Governors メンバ、
情報処理学会、国際交通安全学会、情報理論とその応用学会各
会員、米国 TRB (Transportation Research Board of The
National Academies) メンバ。



麻生 敏正 (正員)

平 17 埼玉大・工・電気電子システム卒。
平 22 同大大学院博士後期課程了。主とし
て ITS における交通信号制御に関する研
究に従事。また現在、ITS における安全の
通信に関する研究に興味。