

T_sR_m 評価法を用いた車車間通信の通信半径に関する検討 ～通信すべき車両を考慮した車車間通信の性能評価～

近藤将太郎[†] 長谷川孝明[†]

[†] 埼玉大学 大学院理工学研究科 〒 338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255
E-mail: †{shotaro,takaaki}@hslab.ees.saitama-u.ac.jp

あらまし 本論文は、安全を目的とした ITS 情報通信において、評価領域全体の車両数に対する評価対象車両数の割合である「該当車両率」を導入することで、車両の中心位置が 2 秒以内に 5m 以内となる車両を評価対象車とする「2s5m 評価法」を一般化した「 T_sR_m 評価法」の特性を検討し、この評価法を用いた車車間通信の評価から最適通信半径が存在することを明らかにしている。まず、「 T_sR_m 評価法」のパラメータである衝突判定時間や衝突判定距離の範囲が該当車両率に与える影響を検討している。本研究の条件下で、「2s5m 評価法」の場合、評価対象車両台数が従来の ITS 情報通信の評価指標に広く用いられていた全領域評価の車両数の 7%程度であることを示している。次に、同じ条件下で、必要情報取得率が最大となる車車間通信の最適通信半径は、「2s5m 評価法」の場合 20m であるのに対し、全領域評価の場合 200m であることを示している。「 T_sR_m 評価法」から決定される車車間通信の最適通信半径が大幅に小さく、これは周波数利用効率が高いことを意味している。最後に、これらの結果から、限られた帯域で安全を目的とした車車間通信の評価を適切に行うことが重要であると結論されている。

キーワード ITS 情報通信方式, 車車間通信, 通信評価法, T_sR_m 評価法

On the Range of Inter-Vehicle Communications Based on the “ T_sR_m ” Evaluation Method –Considering Vehicles that Need to Communicate Each Other–

Shotaro KONDO[†] and Takaaki HASEGAWA[†]

[†] Graduate School of Science and Engineering Saitama University
255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570 Japan
E-mail: †{shotaro,takaaki}@hslab.ees.saitama-u.ac.jp

Abstract This paper examines the characteristics of the " T_sR_m evaluation method", which is generalized the "2s5m evaluation method" that uses the vehicles whose center position is within 5 m within 2 seconds as the evaluation target vehicles, by introducing "corresponding vehicle rate" which is the ratio of the number of vehicles to be evaluated to the number of vehicles in the entire evaluation area in the ITS communications for safety purposes, and clarifies that the optimum communication range exists from the evaluation of V2V communications using this evaluation method. First, the influence of the range of the collision determination time and the collision determination distance, which is a parameter of the " T_sR_m evaluation method", on the corresponding vehicle ratio is studied. Under the conditions of this research, in the case of the "2s5m evaluation method", it is shown that the number of vehicles to be evaluated is about 7% of the number of vehicles in the whole area evaluation widely used as the conventional evaluation index of ITS communications. Next, under the same condition, the optimum communication range of V2V communications where the ratio of receive information necessary becomes the maximum is 20m in the case of "2s5m evaluation method" and 200m in the case of the conventional whole area evaluation. The optimum communication range of the V2V communications determined by the " T_sR_m evaluation method" is significantly small; this means that the frequency utilization efficiency is high. Finally, from these results, it is concluded that it is important to appropriately evaluate the V2V communications with the aim of safety in a limited band.

Key words ITS Information Communication Method, Inter-Vehicle Communication, Communication Evaluation Method, T_sR_m Evaluation Method

1. まえがき

自動車事故による負傷者や死者数は減少傾向にあるが、接触事故は依然として多い[1]。そのうちおよそ半数が交差点とその付近で発生しており、交差点での交通事故の削減が社会的に非常に重要である。これらの事故を防止するために、ITS（高度交通システム; Intelligent Transport Systems）の分野では、通信を用いて人・車・インフラ間で情報共有 (Vehicle Information Sharing; VIS) を行い、ドライバーの知覚範囲の拡大を行うことが重要 [2] であり、VIS の観点から ITS 情報通信システムとアプリケーションの関係が ITS 通信コンセプトリファレンスモデルによって示されている [3]。VIS 実現のために、車両がインフラを介さずに通信を行う車車間通信、車両がインフラを介して通信を行う路車間通信、さらにこれらを統合した車車間・路車間統合通信があり、これらについて様々な研究が行われている [4]~[12]。しかし、従来の ITS 情報通信における通信性能評価は、一般の通信システムにおける性能評価と同様に、全体のノードに関するスループットや通信の成功確率がこれまで広く用いられている。安全を目的とした ITS 情報通信方式において、位置的に遠い車両などの衝突可能性の低い車両間で通信を行う必要性は低い。そのため、通信性能評価が車両の位置に依存しない全領域評価等では、適切な通信評価ができていないとは限らない。車両間の衝突可能性に関する研究として、文献 [9] では、車線をベースとした衝突リスク判定アルゴリズムの提案を行っている。

本論文では、文献 [13] で提案されている 2 秒以内に 5m 以内となる車両を評価対象とした通信成功確率を一般化し、通信性能評価の特性を検討する。さらに、車両の中心位置が 2 秒以内に 5m 以内となる車両を通信すべき車両と定義する「2s5m 評価法」と、従来の ITS 情報通信において広く用いられている評価領域内のすべての車両を通信すべき車両とする「全領域評価」の通信成功確率を比較することで、評価対象車の定義によって車車間通信の最適な通信半径が異なることを示し、通信すべき車両の定義によって通信性能評価に影響が及ぶことを示す。

2. 衝突可能性の高い車両のみを対象とした通信評価法 [13]

本節では、文献 [13] で提案されている衝突可能性の高い車両のみを対象とした通信評価法の概要を示す。

2.1 通信評価法の概要

一般の通信システムにおける性能評価は全体のノードに関するスループットや通信の成功確率などが用いられており、ITS 情報通信における通信性能評価にもこの評価指標が広く用いられている。しかし、車両の距離が近い場合や、車両が接近している場合、ブレーキや発進などの加速度が生じた場合に事故が起きる可能性が高く、安全を目的とした ITS 情報通信では、これらのような距離的に近く衝突の可能性が高い車両間での通信が重要である。

文献 [13] では、互いの中心位置が 2 秒以内に 5m 以内とな

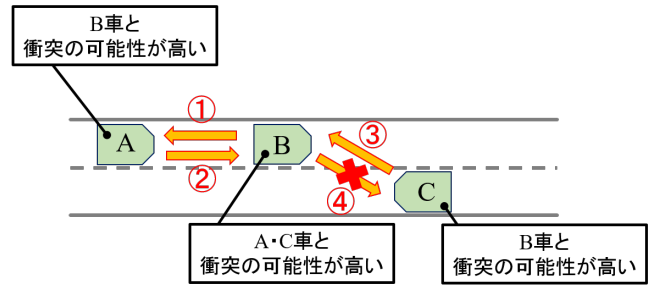


図 1 必要情報取得率・該当車両率の計算例

る車両間での通信成功確率を通信評価指標として用いており、文献 [14], [15] では、この通信性能評価法の計算負荷が高いことを示した上で高速化手法を提案し、シミュレーション時間の短縮化を図っている。

2.2 必要情報取得率の概要

前述したように、ITS 情報通信において、安全に関する情報の通信を行う際には、距離的に近く衝突の可能性が高い車両間での通信成功が重要となる。衝突可能性が高い車両間での通信成功確率を必要情報取得率とする。すなわち、

必要情報取得率 =

$$\frac{\text{必要情報の取得回数}}{\text{衝突可能性が高い車両の情報取得を必要とした回数}} \quad (1)$$

を指標とした通信評価を行う。必要情報とは、車両が衝突回避に必要となる相手車両の位置や速度等の情報である。

図 1 に必要情報取得率の計算例を示す。この場合、「衝突可能性が高い車両の情報取得を必要とした回数」は 4 回、「必要情報の取得回数 (衝突可能性が高い車両間での通信の成功回数)」は 3 回であるため、必要情報取得率は $3/4 = 75\%$ である。この際、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 間での通信の成否は必要情報取得率に影響しない。

3. $TsRm$ 評価法と該当車両率

文献 [13] では、互いの中心位置が 2 秒以内に 5m 以内となる車両を衝突可能性が高いと定義し、その車両間での通信成功確率を必要情報取得率とした。本論文では、互いの中心位置が 2 秒以内に 5m 以内となる車両を評価対象車とすることを「2s5m 評価法」と呼称する。さらに、2s5m 評価法を一般化し、 T 秒以内に Rm 以内となる車両を評価対象車とすることを「 $TsRm$ 評価法」と呼称し、ITS 情報通信システムの通信性能評価を行う。

3.1 $TsRm$ 評価法の概要

$TsRm$ 評価法とは、互いの中心位置が T 秒以内に Rm 以内となる車両を衝突する可能性が高いとみなし、その車両間での通信の重要性が高いと考える評価法である。 $TsRm$ 評価法では、互いの中心位置が T 秒以内に Rm 以内となる車両を通信すべき車両とみなし、その車両間での通信成功率 (必要情報取得率) を評価する。 T を「衝突判定時間」、 R を「衝突判定距離」と呼称する。衝突判定時間や衝突判定距離は車両間の相対

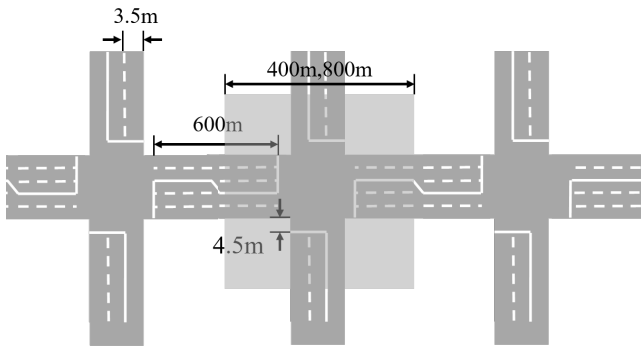


図2 道路諸元

位置, 相対速度, 相対加速度を用いて, いかなる車両間の状態を衝突可能性が高いとするのかを定義するパラメータである.

3.2 該当車両率の概要

TsRm 評価法による評価対象車が評価領域内の車両に占める割合を「該当車両率」と定義する. 該当車両率を式(2)に示す.

$$\text{該当車両率} = \frac{\text{衝突可能性が高い車両の台数}}{\text{評価領域内の車両台数} - 1} \quad (2)$$

該当車両率が高くなると, 評価領域内において通信すべき車両が増加していることを意味する. また, 該当車両率 100%とは, 評価領域内の全ての車両と通信する必要があるため, 従来における全領域評価と等価である.

図1における該当車両率の計算例を示す. 自車を除いた評価領域内の車両台数は2台であるため, 各車両の該当車両率は

- 車両 A: 1/2
- 車両 B: 2/2
- 車両 C: 1/2

となり, 評価領域全体の該当車両率は $4/6 \approx 66.7\%$ となる

3.3 シミュレーション条件

交通流シミュレーションに用いた道路環境は図2に示すように, 主道路両側5車線, 従道路両側3車線とする. 交差点数を3とし, 評価領域による該当車両率への影響を調査するために, 中央交差点付近の400m四方, 800m四方を評価領域とする. また, 各交差点には信号機があり, 車両は信号現示に従った走行を行う. 交通流のシミュレーション刻みはミクロスコピックシミュレーションに広く用いられている0.1秒である. 各交差点における車両の設定希望左右折率を表1に示す. 様々な交通量における通信性能について検討するために, 1車線あたりの平均車頭間隔が7秒, 10秒, 30秒の交通状況に対してシミュレーションを行う. 平均車頭間隔7秒, 10秒, 30秒における中央交差点付近(停止線上流50mまでの領域)の平均車両密度はそれぞれ55台/km/lane, 20台/km/lane, 10台/km/laneである.

3.4 シミュレーション結果

図3に2s5m評価法を用いた車両密度による該当車両率を示す. 車両密度が高くなると該当車両率が減少していることが分かる. 車両密度が増加すると式(2)の計算で用いる「衝突可

表1 直進・右左折設定希望確率

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

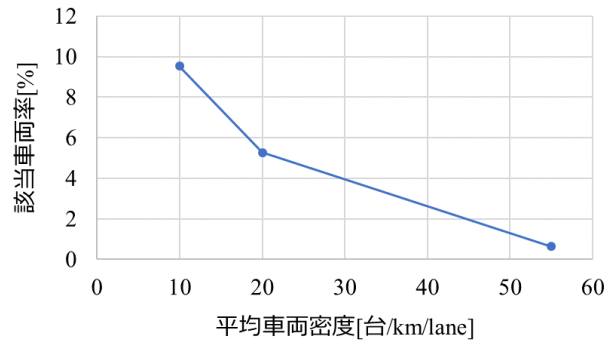


図3 車両密度による該当車両率

性能が高い車両台数」と「評価領域内の車両台数」がともに増加するが, 「衝突可能性が高い車両台数」の増加量よりも「評価領域内の車両台数」の増加量が多いため, 該当車両率が減少したと考えられる. 車両密度によって該当車両率が異なることを踏まえた上で, 以後は平均車両密度20台/km/laneにおける該当車両率について検討する.

次に, 評価領域における該当車両率を図4に示す. 交差点付近400m四方と800m四方における該当車両率をそれぞれ図4(a), 図4(b)に示す. 該当車両率は衝突判定時間や衝突判定距離に対して単調増加していることが分かる.

図4において, 衝突判定距離を固定とした場合の該当車両率を図5に, 衝突判定時間を固定とした場合の該当車両率を図6に示す. 図5より, 評価領域によって定まる衝突判定時間を超えると衝突判定距離によって決まる値に飽和する. 図5(a)において, 衝突判定距離5mの場合, 衝突判定時間10秒で該当車両率は35%程度に飽和していることがわかる. 図5(a)では衝突判定時間10秒, 図5(b)では衝突判定時間20秒において該当車両率が飽和したと考えられる. 評価領域が限られているため, それ以上衝突判定時間を大きくしても衝突可能性の高い車両の台数がほとんど増えないためである. また, 図6(a), 図6(b)ではそれぞれ衝突判定距離400m, 800mで衝突判定時間によらず該当車両率が100%となっている. これは評価領域の辺の長さとも一致する. 衝突判定時間によらず, 評価領域内のすべての車両が衝突可能性が高いと判定されるためであり, これは評価領域内の全領域評価と等価であることを意味する. 通信すべき車両を2秒以内に5m以内となる車両(2s5m評価法)とすると, 式(1)で表される, 必要情報取得率の分母である「衝突可能性が高く情報取得を必要とした車両台数」は, ITS情報通信の通信性能評価に多く用いられてきた全領域評価の7%程度である(図4(a)). すなわち, 従来のITS情報通信における通信性能評価は, 本来通信すべき車両の $100/7 \approx 14$ 倍もの車両台数について検討していることを意

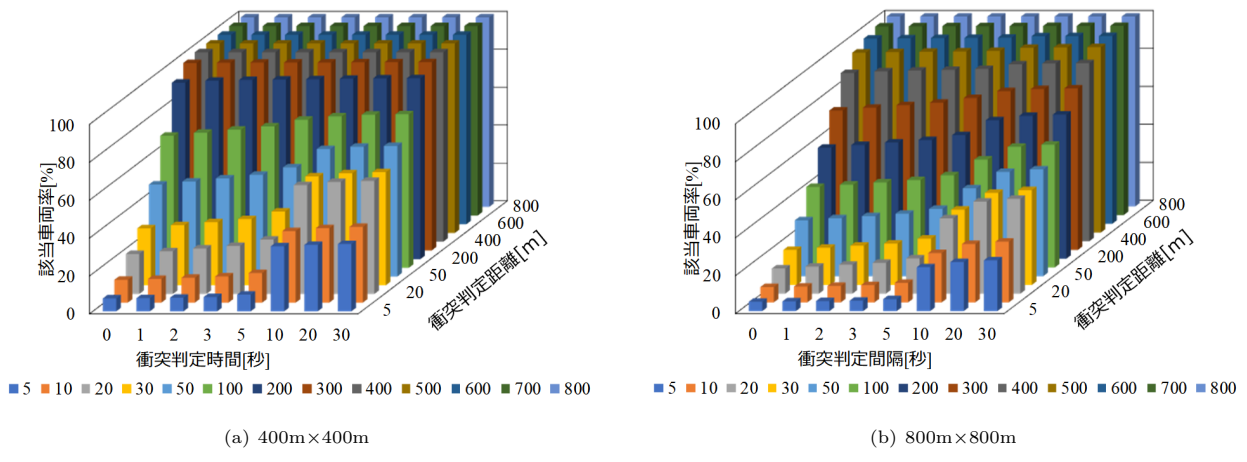


図4 該当車両率

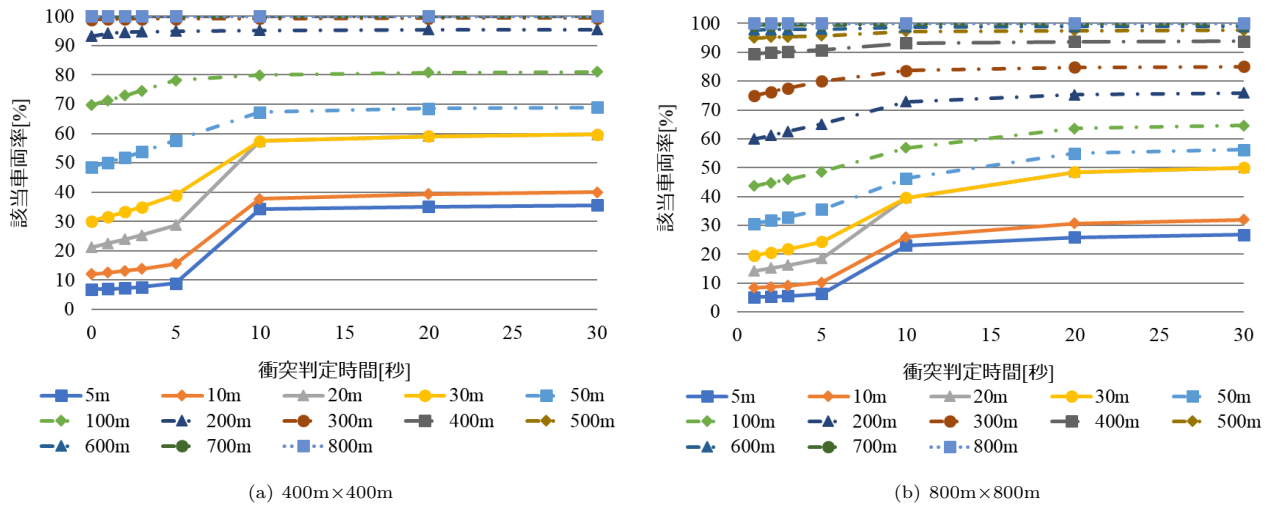


図5 衝突判定時間に対する該当車両率

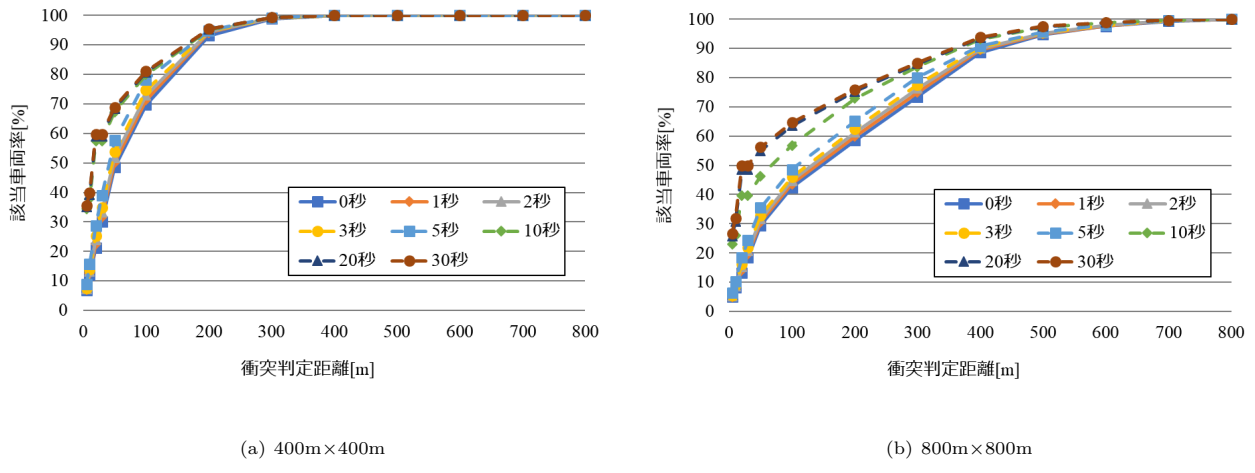


図6 衝突判定距離に対する該当車両率

味する。

4. 車車間通信の最適通信半径の導出

遠くの車両と通信するためには通信半径を大きくする必要があり、一般に、通信半径を大きくすると周波数利用効率が下

がる。しかし、車車間通信の通信半径が小さいと周辺の通信すべき車両と情報共有ができず、安全に関するITS情報通信が担う役割を果たせない。本節では、車車間通信の最適通信半径が存在することを示し、通信すべき車両の定義によって車車間通信の最適通信半径が異なることを示す。

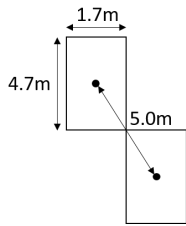


図 7 2s5m 評価法の妥当性

4.1 最適通信半径の導出方法

図 7 に示すように、一般的に用いられる車両が接触する場合、車両の中心座標間の距離はおよそ 5m である。したがって、車両の中心位置の距離が 5m を下回ると車両間で接触が起こればと考えられる。接触事故を減らすためには事前の警告によるドライバーへの運転支援が必要である。一般に、2 秒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言われている [16]。これらのことから、車両の中心位置が 2 秒以内に 5m 以内になる車両を衝突可能性の高い車両とし、衝突可能性の高い車両間では安全に関する通信を行う重要度が高いと考え、通信すべき車両とすることは妥当である。2s5m 評価法と従来広く用いられてきた通信評価を比較するために、2s5m 評価法と全領域評価の必要情報取得率の比較を行う。前述したように、2s5m 評価法は 2 秒以内に 5m 以内になる車両が通信すべき車両であると考え、全領域評価は領域内のすべての車両が通信すべき車両と考える評価法である。

4.2 シミュレーション条件

2s5m 評価法と全領域評価における必要情報取得率を計測する。3.3 と同様に、図 2 に示す道路環境において、平均車両密度 10 台/km/lane, 20 台/km/lane, 55 台/km/lane とした 3 種の交通状況に対して評価を行う。ただし、評価領域は中央交差点付近の 400m 四方とする。表 2 に車車間通信諸元を示す。各車両は 0.1 秒毎にパケットを生成し、周囲の車両に自車

表 2 車車間通信諸元

評価領域	400m×400m
アクセス方式	IEEE 802.11p に準拠
キャリアセンス半径	通信半径の 2 倍
通信周期	0.1 秒
正規化遅延	0.5
パケット長	70byte

の位置や速度などの情報を伝達するためにブロードキャストを試みる。リアルタイム性の確保のために、パケットが生成される際に保持している古いパケットは破棄される。通信機器は車両の中央に設置されていると仮定し、隠れ端末による通信失敗を回避するために、キャリアセンス半径を通信半径の 2 倍とする。正規化遅延とは単位パケット長で正規化した遅延時間である。また、シャドウイングが発生しない交通環境であり、通信範囲内で通信が行われ、通信の失敗はパケット衝突のみとする。SN 比や多値多相化変調により通信性能は変化するが、以降の帯域幅の計算は誤り訂正、ロールオフ率、ヘッダをすべて含めて 1Hz=1bps と仮定して計算を行う。

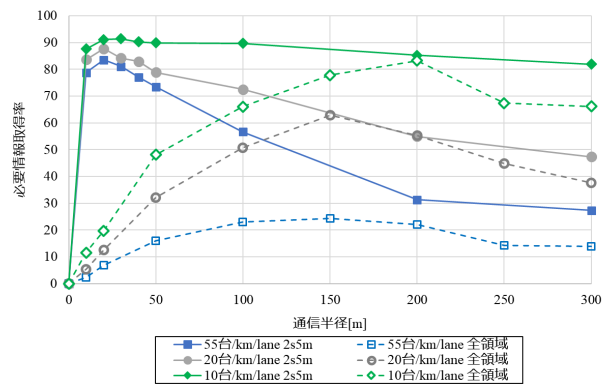


図 8 最適通信半径の導出

4.3 シミュレーション結果

図 8 に車車間通信の通信半径に対する必要情報取得率を示す。ただし、利用可能帯域幅は 1.792MHz とする。必要情報取得率の最大値をとる通信半径が車車間通信の最適通信半径である。図 8 から、2s5m 評価法の場合は 20m、全領域での評価の場合は 200m 付近に車車間通信の最適通信半径が存在することが分かる。車両密度、評価法によらず、通信半径の増加に伴って必要情報取得率が一度増加し、最適通信半径を超えると減少する特性を持つ。通信半径を最適通信半径よりも小さい値に設定すると、パケットを送信することができても通信すべき車両にパケットが届かない。通信半径を最適通信半径よりも大きい値に設定すると、通信範囲内に通信すべき車両以外の車両を多く含み、通信すべき車両以外のキャリアセンスが多く行われる。そのため、通信路が混雑し、パケットを送信する機会が与えられないため、必要情報取得率が減少していると考えられる。

2s5m 評価法と全領域評価の車車間通信の最適通信半径に差異があることから、通信すべき車両の定義が、通信システムが設定するパラメータの 1 つである車車間通信の通信半径に影響を及ぼしていることが分かる。また、車両密度によってピークの必要情報取得率は増減するが、車車間通信の最適通信半径は車両密度によらず、通信すべき車両の定義に依存することが分かる。

次に、各評価法において車車間通信の通信半径を最適通信半径に設定した場合の周波数利用効率について検討する。2s5m 評価法での通信半径を 20m、全領域評価での通信半径を 200m と設定したときの、利用可能帯域幅における必要情報取得率を図 9 に示す。通信すべき車両の定義が異なると、同じ車両密度、同じ利用可能帯域幅であっても必要情報取得率に大きく差があることが分かる。特に、車両密度が高い場合はその差が顕著に表れており、平均車両密度 55 台/km/lane、利用可能帯域幅約 1.8MHz の場合、2s5m 評価法は必要情報取得率が 81% に対して、全領域評価では 22% となっている。

日本において ITS 情報通信の安全運転支援システムに割り当てられた周波数は 755.5MHz-764.5MHz の 9MHz である [17]。世界でも、決められた周波数帯域内でシステムを構成することが要求される。一般に、通信半径を大きくすると周波数利

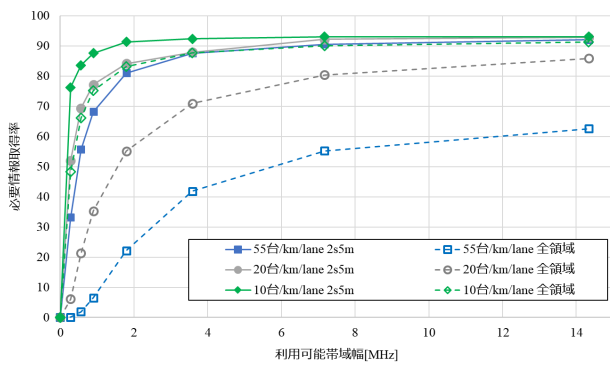


図9 最適通信半径における必要情報取得率

用効率が低くなり、通信半径を大きくして同様の通信性能を得るためには、より広い帯域幅が必要であるということが図9からも分かる。したがって、周波数利用効率を高くするために、車車間通信のシステム設計時に通信すべき車両の定義を行い、必要最小限の通信半径を用いた車車間通信を行うことが重要である。

5. むすび

本論文は、安全を目的としたITS情報通信において、評価領域全体の車両数に対する評価対象車両数の割合である「該当車両率」を導入することで、車両の中心位置が2秒以内に5m以内となる車両を評価対象車とする「2s5m評価法」を一般化した「TsRm評価法」の特性を検討し、この評価法を用いた車車間通信の評価から最適通信半径が存在することを明らかにした。

まず、「TsRm評価法」のパラメータである衝突判定時間や衝突判定距離の範囲が該当車両率に与える影響を検討した。本研究の条件下で、「2s5m評価法」の場合、評価対象車両台数が従来のITS情報通信の評価指標に広く用いられていた全領域評価の車両数の7%程度であることを示した。

次に、同じ条件下で、必要情報取得率が最大となる車車間通信の最適通信半径は、「2s5m評価法」の場合20mであるのに対し、全領域評価の場合200mであることを示している。「TsRm評価法」から決定される車車間通信の最適通信半径が大幅に小さく、これは周波数利用効率が高いことを意味している。例えば、本論文にて検討した環境では、利用可能帯域幅約1.8MHzにおける必要情報取得率が2s5m評価法と全領域評価ではそれぞれ81%、22%となり、周波数利用効率が大幅に増加していることが分かる。これらの結果から、限られた帯域で安全を目的とした車車間通信の評価を適切に行うことが重要であると結論付けている。

今後の課題として、交差点における必要情報取得率を検討したため、単路における車車間通信の検討、各評価法における厳密な最適通信半径の導出、「衝突可能性の高い車両」の定義に関する検討が挙げられる。

文 献

[1] 内閣府, “平成28年度版交通安全白書,” 2016.

[2] T. Hasegawa, K. Mizui, S. Kaoru, “A CONCEPT REFERENCE MODEL FOR ITS COMMUNICATION SYSTEMS -VIEW FROM VEHICLE INFORMATION SHARING-,” Proc. 13th World Congress on Intelligent Transport Systems, 2006.

[3] T. Hasegawa, K. Mimui, H. Fujii, K. Seki, “A concept reference model for inter-vehicle communications,” Proc. 10th World Congress on Intelligent Transport Systems 2003, pp.342-346, 2003.

[4] K. Kuramoto, K. Fujimura, 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.

[5] Yuheng Du, Mashrur Chowdhury, Senior Member, IEEE, Mizanur Rahman, Student Member, IEEE, Kakan Dey, Member, IEEE, Amy Apon, Senior Member, IEEE, Andre Luckow, and Linh Bao Ngo, “A Distributed Message Delivery Infrastructure for Connected Vehicle Technology Applications,” IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, Early Access, 2017.

[6] Kakan Chandra Dey, Anjan Rayamajhi, Mashrur Chowdhury, Parth Bhavsar, James Martin, “Vehicle-to-vehicle (V2V) and vehicle-to-infrastructure (V2I) communication in a heterogeneous wireless network - Performance evaluation,” Transportation Research Part C, pp.168-184, 2016.

[7] Daein Jeong, Member, “Performance Analysis of Distributed Broadcasting in IEEE 802.11p MAC Protocol,” IEICE Transactions on Communications, E98.B-6, pp.1086-1094, 2015.

[8] Yoshihisa Okada, Tomotaka Wada, Masato Horie, Fumio Nakase, and Hiromi Okada, Members, “Experimental Performance Evaluations of Reflect - Transmission Control Schemes for Vehicle-Pedestrian Communication (VPEC),” IEICE TRANS. COMMUN., E90.B-10, pp.2931-2939, 2007.

[9] Jaehwan Kim, Student Member, IEEE, and Dongsuk Kum, Member, IEEE, “Collision Risk Assessment Algorithm via Lane-Based Probabilistic Motion Prediction of Surrounding Vehicles,” IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, Early Access, 2017.

[10] Xianan Huang, Ding Zhao, and Hui Peng, “Empirical Study of DSRC Performance Based on Safety Pilot Model Deployment Data,” IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, VOL.18, NO.10, pp.2619-2628, OCTOBER 2017.

[11] Celimuge WU, Satoshi OHZAHATA, and Toshihiko KATO, Members, “Practical Solution for Broadcasting in VANETs Using Neighbor Information,” IEICE TRANS. COMMUN., VOL.E96 - B, NO.11, pp.2856-2864, NOVEMBER 2013.

[12] Jorge Alfonso, Nuria Sanchez, Jose Manuel Menendez, Emilio Cacheiro, “Cooperative ITS communications architecture: the FOTs project approach and beyond,” IET Intelligent Transport Systems, Special Issue: Highlights from the ITS Europe Congress in Helsinki, 2014.

[13] 横山達也, 倉本圭太, 長谷川孝明, 麻生敏正, 石其俊明, “マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式,” 電子情報通信学会論文誌 A, J95.A-8, pp.683-693, 2012

[14] 近藤将太郎, 長谷川孝明, “マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式シミュレーション高速化の一検討,” 日本シミュレーション学会電子情報通信学会, JSST-MDMC2016-1-04 IEICE-ICTSG2016-04, pp.20-25, 2017.

[15] 近藤将太郎, 長谷川孝明, “マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式シミュレーション高速化の一検討 採録決定,” 日本シミュレーション学会.

[16] 松永勝也 (編), “交通事故防止の人間科学,” ナカニシヤ出版, 2009.

[17] ARIB STD-T1091.3 版, “700MHz 帯高度道路交通システム標準規格,” 電波産業会, 2017.