情報処理学会論文誌 Vol.55 No.2 801–811 (Feb. 2014)

車車間通信の輻輳を考慮したショックウェーブ抑制方式

鈴木 理基[1,a)] 重野 寛[1,b)]

受付日 2013年5月13日, 採録日 2013年10月9日

概要：ITS では渋滞対策も必要で，車車間通信によるショックウェーブ現象の抑制が重要となる．従来から，伝播抑制を狙う早期速度調整方式と発生抑制を狙う車間距離制御方式の適用が検討されているが，いずれも個別に検討されており，両者を効果的に併用する例はない．本論文では，早期速度調整と車間距離制御の両方式を併用するショックウェーブ抑制方式を提案する．提案方式では，車車間通信の輻輳時において，併用する各抑制方式での通信エラーがショックウェーブに与える影響の大きさに応じてそれぞれの通信周期を大きくすることで，通信性能を改善し，ショックウェーブ抑制効果を高く維持する．シミュレーションでは，提案方式と通信周期の制御なく早期速度調整ならびに車間距離制御方式を組み合わせた方式（単純併用方式）とを比較した．その結果，1,600 vehicles/lane/h という混雑した車両流入量において，単純併用方式では通信成功率 0.92，平均ショックウェーブ伝播速度 0.89 m/s，平均渋滞時間 58.90 秒であるのに対し，提案方式ではそれぞれ 0.96，0.57 m/s，52.54 秒であり，その有効性が確認された．

キーワード：高度交通システム，車車間通信，ショックウェーブ抑制，輻輳制御

Shockwave Suppression Method Considering Network Congestion in Vehicle-to-vehicle Communication

Masaki Suzuki[1,a)] Hiroshi Shigeno[1,b)]

Received: May 13, 2013, Accepted: October 9, 2013

Abstract: The mitigation of the traffic congestion is one of the most important goal for the future ITS. Since the shockwave is boosted as it propagates and brings up the traffic jam, the shockwave suppression is very important. Currently, the shockwave suppression is studied by two approaches of propagation suppression and occurrence suppression, individually, and the effective use of both approaches is not discussed. This paper proposes the effective combined use of early velocity control method and inter-vehicular distance control method for the suppression of the shockwave. After detecting the communication error in the vehicle to vehicle communication, the vehicle checks the degree of shockwave propagation effect obtained by both methods respectively, and adjusts the communication intervals of each method to suppress the shockwave. The proposed method is evaluated through the simulation and shows the expected results in the average communication success ratio, the average shockwave propagation speed and the average congestion time.

Keywords: intelligent transport systems, vehicle-to-vehicle communication, shockwave suppression, congestion control

1. はじめに

近年，安全・安心，環境にやさしい車社会の実現にむけて，様々な改善が進められているが，渋滞の低減や，目的地までの走行時間短縮も重要課題の 1 つである．一般に，高速道路における渋滞は走行速度が 40 km/h 以下になった状態と定義され [1]，交通集中渋滞，突発渋滞等に分類される．日本自動車工業会の「ドライバーの渋滞対策」[2] によると，高速道路における渋滞発生の内訳はそれぞれ約 60%，約 35%である．交通集中渋滞は道路の地理的，構造的条件によりボトルネックが発生し，渋滞の先頭が特定地点に定まっているものを指し，インフラを用いた交通制御

[1] 慶應義塾大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Keio University, Yokohama, Kanagawa 223–8522, Japan
[a)] its@mos.ics.keio.ac.jp
[b)] shigeno@mos.ics.keio.ac.jp

© 2014 Information Processing Society of Japan

による渋滞抑制が検討されている [3], [4]．一方，突発渋滞は突然の降雨やイベントの終了時刻にともない，交通量が容量超過したり，あるいは事故や故障車両により一時的に道路容量が低下したりすることによる渋滞を指す．突発渋滞はその発生地点が不定なため，事前に定点カメラ等の設置が必要なインフラを用いた交通制御を適用できず，発生予測も難しく，渋滞解消までに長時間を要する．突発渋滞発生時には前方を走行する車両の減速動作が後続車の減速動作に伝播，増幅するショックウェーブ現象 [5] が主要原因とされている．ここで，ショックウェーブ発生時には，道路上の混雑区間における通過時間の増大が問題となるため，車車間通信を活用したショックウェーブ現象の発生や伝播の抑制手法の検討 [6], [7] が走行時間短縮のうえで重要となる．

従来，ショックウェーブ抑制方式には，伝播抑制に重点をおく早期速度調整方式と発生抑制に重点をおいた車間距離制御方式がある．これらの方式は，それぞれ個別に検討されており，両者を併用しようという試みはない．しかし，高車両密度時に両手法を併用すると，無線帯域での輻輳により通信エラーが発生し，各車両で走行制御するための情報が損失し，ショックウェーブ抑制効果が悪化する場合がある [8]．したがって，情報伝送の輻輳を低減するため通信量を小さく制限する機構が必要となる．その際，通信エラーの影響をできるだけ小さくするように通信量を制限することが重要である．

このため本論文では，情報欠損がショックウェーブに与える影響の大きさに応じて通信周期を制御するショックウェーブ抑制方式を提案する．本方式では，通信エラー時に早期速度調整ならびに車間距離制御方式それぞれの通信エラーがショックウェーブに与える影響度を推定し，通信エラー率と影響度に比例して車車間の通信周期を制御する．

以下に，2 章でショックウェーブ現象の仕組み，その抑制方式に対する従来の検討状況ならびに問題点を明らかにする．次いで 3 章で車車間通信の輻輳を考慮したショックウェーブ抑制方式を提案する．4 章でシミュレーションにより，提案方式を既存方式と比較し，通信成功率，平均ショックウェーブ伝播速度ならびに平均渋滞時間の観点からその有効性を確認する．最後に 5 章で結論と今後の課題を述べる．

2. ショックウェーブ抑制手法

突発渋滞の抑制には車車間通信を用いた方式が検討されており，直接要因であるショックウェーブ現象を抑制することが重要とされている [5]．以下に，ショックウェーブ現象とその抑制手法を説明する．

2.1 ショックウェーブ現象

高車両密度時に道路上のある車両が減速すると，その減速が後続車両に伝播し，車両の走行時間を増大させ，さらには渋滞を引き起こす場合がある．図 1 に車両 A から E が道路上を走行している際の (a) 車両動作の時間推移，(b) 時空間ダイアグラムを示す．(a) では時刻 t_1 に車両 A が減速した場合，車両 B は追突を避けるため時刻 t_2 に車両 A より大きい減速を行う．次いで時刻 t_3 には車両 C が車両 B よりもさらに大きく減速する．(b) では，車両速度は走行軌跡の傾きで示され，ショックウェーブは変曲点の推移で示される．後続車両へのショックウェーブ伝播にともなって，後続車両の速度は前走車両よりも小さくなり，車間距離も小さくなる．結果として混雑区間が発生し，車両の走行時間が増大し，さらに後続車両へ減速が伝播する場合には渋滞が発生する．

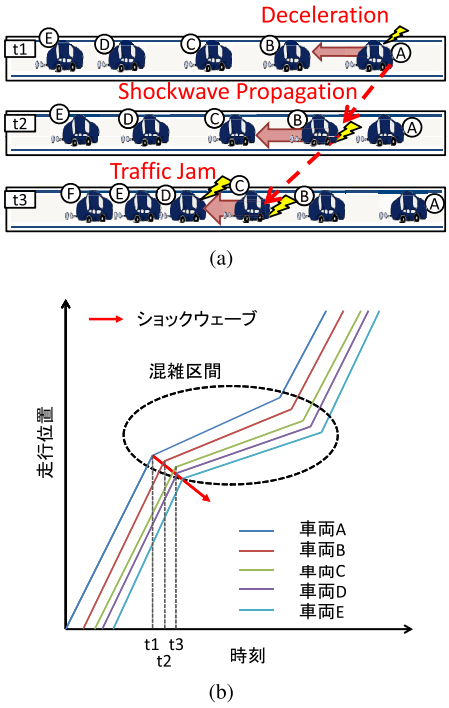


図 1 ショックウェーブによる車両渋滞の発生例．(a) 車両動作の時間推移，(b) 時空間ダイアグラム

Fig. 1 Example of traffic congestion caused by shockwave. (a) Transition of vehicles, (b) Time space diagram.

ある車両を通過するショックウェーブ伝播速度 W は式 (1) で示される [7], [9]．

$$W = \frac{q_d - q_u}{k_d - k_u} = \begin{cases} 0 & (\frac{|N_d|}{L_d} - \frac{|N_u|}{L_u} = 0) \\ \dfrac{\frac{1}{L_d}\sum_{l\in N_d} v_d(l) - \frac{1}{L_u}\sum_{l\in N_u} v_u(l)}{\frac{|N_d|}{L_d} - \frac{|N_u|}{L_u}} & (\text{otherwise}). \end{cases} \quad (1)$$

ここで，q は交通スループット，k は車両密度，$v(l)$ は車両 l の速度，L は測定区間道路長，N は L 上の車両台数，u は観測地点の上流，d は下流をそれぞれ示す．

図 2 にショックウェーブ伝播速度計算例を示す．車両 A から C が図中に示す速度と車間距離で道路上を走行して

© 2014 Information Processing Society of Japan

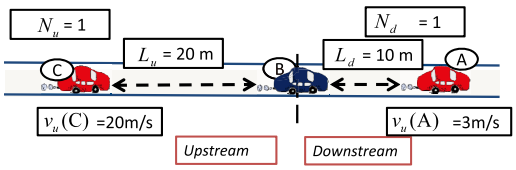


図 2 ショックウェーブ伝播速度の計算例
Fig. 2 Calculation example for shockwave propagation speed.

いる．車両 B を通過するショックウェーブ伝播速度は図 2 に示す $N_u = 1$，$N_d = 1$，$L_u = 20$，$L_d = 10$，$V_u(C) = 3$，$V_d(A) = 10$ であることから式 (1) より，$W = -14\,\mathrm{m/s}$ と算出される．

一般にショックウェーブ伝播速度が大きいほど後続車両の減速量が大きくなるため，ショックウェーブ伝播速度を抑制することが渋滞や走行時間を低減するうえで重要である [9]．ショックウェーブの抑制手法はその伝播速度を小さくする手法（伝播抑制手法）とショックウェーブ自体の発生を抑制する手法（発生抑制手法）に分類されており，各々の代表例である早期速度調整方式と車間距離制御方式を以下に説明する．

2.2 早期速度調整方式

伝播抑制手法の代表例に，早期速度調整方式 [6], [10] がある．早期速度調整方式では車両どうしがビーコンで交換されている位置，速度情報に加えて車間距離，走行レーン，ショックウェーブの発生フラグや伝播速度の情報を拡張ビーコンとして周期的に交換し，急激な速度変化を検知し，周囲に通知する．このため，拡張ビーコンの通信範囲が広いほど，後続車両は前走車両の減速状況を早く把握でき，大きな速度調整をともなわない早期対応が可能となり，結果としてショックウェーブ伝播速度を低減できる．文献 [6] では，車載センサやカメラを用いず，無線通信のみを用いて近傍の車両どうしで位置，速度情報を交換することで効果的なショックウェーブの検知を実現している．

早期速度調整方式はビーコンの通信範囲が影響範囲であり，通信範囲が広いほど早く減速を開始できるため高い伝播速度抑制効果を示すが，小さい減速度の速度調整では間に合わないような伝播速度の大きなショックウェーブは抑制できない．また，輻輳発生時に通信エラーや遅延によって車両の情報更新が遅延する場合には，前走車両の減速検知が遅れるとともに速度調整の開始が遅延し，結果としてショックウェーブ抑制効果が低下し，ショックウェーブ伝播速度が増大する．ここで，情報更新遅延が大きいほどショックウェーブ伝播速度は増大する．

2.3 車間距離制御方式

発生抑制手法の代表例に車間距離制御方式 [7], [11], [12] がある．文献 [7], [11] は車車間通信により前走車両と加減速情報を共有し，自動加減速によって前走車両との車間距離を一定に保つ Cooperative Adaptive Cruise Control（CACC）方式がショックウェーブに与える影響を議論している．文献 [7] では，CACC 方式がショックウェーブ抑制に効果的であることを精緻に評価，検討し，CACC の普及率が高くなるほど道路ネットワーク上で観測されるショックウェーブの発生が抑制されることが示されている．ここでは CACC 方式よりも短周期の情報交換を行い，自動走行により短い車間距離の車群を形成，維持する隊列走行（Platoon）方式となっている．文献 [12] は国内の代表的な Platoon 方式例であり，同一方向に走行する複数車両が縦列に車群を形成し，大型トラック 3 台から 5 台による隊列を高速道路上で車間距離 4 m を維持しながら 80 km/h で自動走行させている．

車間距離制御方式では，車両が前走車両と非常に高精度で同期して加減速するため，車群内で減速量が増大せず，ショックウェーブが発生しない．そのために車両間では短周期の情報交換ならびに低キックバック遅延の情報伝達が必要である．したがって，車群を形成可能な車両台数の上限は低く 5 台から 10 台程度とされ，高車両密度時に道路上の全車両が車間距離制御方式を利用することは現実的ではない．また，輻輳発生時に通信エラーや遅延によって，車両の情報更新が遅延する場合には安定した車群走行を維持できず，車群安定性が低下し，加減速動作が増幅しショックウェーブを引き起こす．本方式でも早期速度調整方式と同様，車両の情報更新遅延が大きいほど，そのショックウェーブ伝播速度は大きくなる [8]．

2.4 早期速度調整/車間距離制御方式の効果的な併用

車間距離制御方式の効果は車群を形成するメンバ車両間の範囲に限定されるが，車両間の協調が実現できれば，ショックウェーブ抑制効果は増大する．一方，早期速度調整方式はショックウェーブ抑制の効果は薄いが，拡張ビーコンを用いるため無線通信機を搭載している全車両が対応できるという利点がある．しかし，早期速度調整方式と車間距離制御方式の検討が個別に実施されており，道路上で車群に参加する車両と単独で走行している車両が混走している状況においてショックウェーブを効果的に抑制するため，両方式を併用することの検討例はない．ここで，シングルチャネルに複数のアプリケーションが混在することを想定すると，渋滞が発生しやすい高車両密度時に両方式を併用する場合には，無線帯域で輻輳が発生し，情報抜けや通信遅延により抑制効果が低下する恐れがある．このため，無線帯域での輻輳発生時の性能改善には，各車両が送信回数を減少することも有効であると考えられ，通信周期を増大させることが必要となる．早期速度調整ならびに車間距離制御方式とも，通信周期をどの程度の間隔にするかで，情報更新周期が変動し，ショックウェーブ伝播速度に

© 2014 Information Processing Society of Japan

影響する．この際，ショックウェーブ伝播速度は大きいほど渋滞を誘発しやすいため [9]，伝播速度の判定時点において早期速度調整ならびに車間距離制御方式いずれか通信エラーがショックウェーブ伝播速度に与える影響の大きい方を優先して，その影響を排除することが必須となる．したがって，車両間で各方式の伝播速度差を情報交換し，各車両において各方式間での通信エラーの影響の大きさを比較することがショックウェーブを効果的に抑制するために重要となる．

3. 車車間通信の輻輳を考慮した通信周期制御によるショックウェーブ抑制方式の提案

早期速度調整方式ならびに車間距離制御方式を併用する際に，各方式の通信エラーがショックウェーブ伝播速度に与える影響を推定し，影響の大きさに応じて各方式の通信周期を調整するショックウェーブ抑制方式を提案する．

3.1 通信周期制御によるショックウェーブ抑制方式の提案概要

突発渋滞では前走車両の減速動作が後続車両に伝播するショックウェーブ伝播速度が大きくなればなるほど渋滞が起きやすくなる．また，通信輻輳時には通信エラーが発生しやすくなる傾向があり，通信エラー時にショックウェーブが加算波及するのを避ける手法が必要となる．車両は位置，速度を GPS により測位するものとし，道路上の全車両が早期速度調整方式で車車間通信を行い，一部の車両が車群を形成し，車間距離制御方式で車車間通信を行うものとする．この際，通信方式には車車間通信で一般的である CSMA/CA 方式を用いることを想定し，同一チャネルで通信する場合には，一方が他方の情報交換データを読み取ることで，位置，速度情報が有効活用できる．以下に，通信周期制御によるショックウェーブ制御方式の提案概要を示す．

(1) 渋滞に直結するショックウェーブ伝播速度の通信エラーによる増大分を車車間通信データから計算する．その尺度には，通信エラー発生直後のデータ正常受信時に実車両位置から算出されるショックウェーブ伝播速度（W_{actual}）とエラー発生直後にデータを正常受信したとして，エラー発生前に正常受信したデータから推定されるショックウェーブ伝播速度（$W_{\mathrm{estimated}}$）の差（W_{diff}）を用いる．

(2) 早期速度調整ならびに車間距離制御の両方式の送信データに，両方式の通信成功率ならびに W_{diff} を追加し，車両間で情報交換する．通信エラーが発生して輻輳状態になった場合には，両方式の W_{diff} を比較し，それらの大きさに応じて通信周期を大きくすることでデータ送受信の負荷を軽減する．

(3) 同一チャネル上に早期速度調整方式と車間距離制御方式が混在するため，両方式ともに通信エラーの影響がある．このため，ショックウェーブの伝播速度の増大には，ノイズ閾値を比較基準として両方式とも小，いずれか片方が大，両方式とも大の 4 通りが想定され，それぞれの場合で通信周期調整を行う．その動作概要を**図 3** に示す．基本的には，W_{diff} の大きさに比例して周期を増大させるが，特に両方式とも大の場合には併用方式の W_{diff} の総和に対する W_{diff} の割合も考慮する．

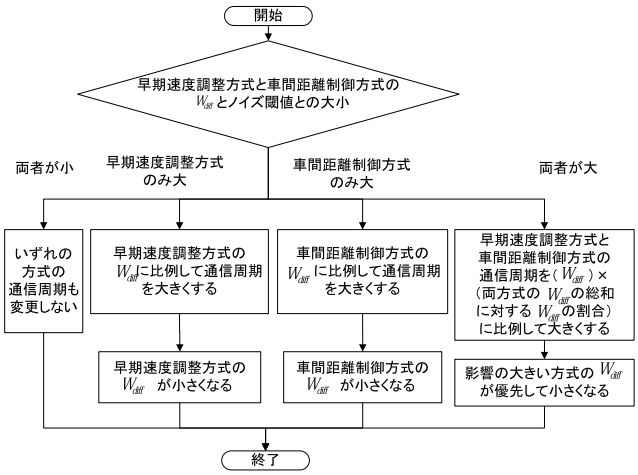


図 3 通信周期制御によるショックウェーブ伝播速度差抑制動作概要
Fig. 3 Suppression mechanism for shockwave propagation speed by controlling packet transmission intervals.

以下にショックウェーブ伝播速度差算出，通信周期調整方法の詳細を説明する．

3.2 ショックウェーブ伝播速度差算出方法

ある抑制方式における通信エラー発生時のショックウェーブ伝播速度差 W_{diff} は，式 (2) から算出する．

$$W_{\mathrm{diff}} = W_{\mathrm{actual}} - W_{\mathrm{estimated}} \tag{2}$$

ここで，W_{actual} は通信エラー後，最初の受信パケットから取得可能な実車両位置から算出されるショックウェーブ伝播速度，$W_{\mathrm{estimated}}$ は通信エラー発生前，最後に正常に受信したパケットから予測される通信エラーがない場合の周囲車両と自車両の位置ならびに速度から推定される通信エラー後，最初のパケット受信時のショックウェーブ伝播速度を示す．

以下に早期速度調整方式ならびに車間距離制御方式の W_{diff} 算出方法の詳細を例を用いて説明する．

(1) 早期速度調整方式の W_{diff} 算出方法

図 4 に早期速度調整方式の通信エラーによるショックウェーブ伝播例を示す．(a) に車両動作の時間推移を示し，(b) に時空間ダイアグラムを示す．図では，車両 A から D が道路上を走行し，各車両は通信範囲内を走行し，拡張ビーコンを定期的に交換する．定常状態において各車両が

© 2014 Information Processing Society of Japan

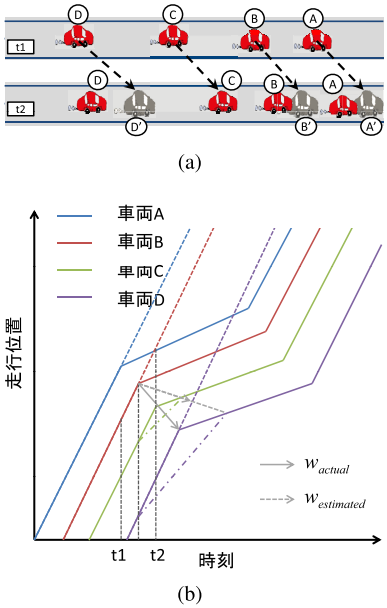


図 4 車両 C で観測される早期速度調整方式通信エラーによるショックウェーブ伝播例．(a) 車両動作の時間推移，(b) 時空間ダイアグラム

Fig. 4 Example of shockwave propagation at vehicle C caused by communication loss of early velocity control method. (a) Transition of vehicle movement, (b) Time space diagram.

等速運動するものとした場合，時刻 t_1 から t_2 の間に早期速度調整方式のパケットが損失すると，時刻 t_2 では車両 C が予測する車両 A，B ならびに D の位置や速度と実際に各車両が走行する位置や速度が異なる場合がある．(b) において車両 C は周囲を走行する車両 A，B，D の位置を点線に示すように誤って認識するため，減速動作の開始が遅れる．したがって，W_{actual} が発生する．通信エラーがない場合には，(b) 内の一点鎖線で示すように小さい減速度の減速動作を開始できるため，$W_{\text{estimated}}$ のように図中の傾きが小さくなり，ショックウェーブ伝播速度を小さくできるのに対し，通信エラー時にはショックウェーブ伝播速度を抑制できない．車両 C における早期速度調整方式の W_{diff} を算出するとき，$W_{\text{actual_ExBeacon}}$，$W_{\text{estimated_ExBeacon}}$ は式 (1) に基づき，式 (3)，(4) から算出される．

$$W_{\text{actual_ExBeacon}} = \frac{V_{B'}/D_{B'-C} - V_{D'}/D_{C-D'}}{1/D_{B'-C} - 1/D_{C-D'}} := F(V_{B'}, V_{D'}, D_{B'-C}, D_{C-D'}), \quad (3)$$

$$W_{\text{estimated_ExBeacon}} = F(V_B, V_D, D_{B-C}, D_{C-D}), \quad (4)$$

ここで，D_{i-j} は図中の車両 A から D，ならびに A′ から D′ について車両 i と j の車間距離を示し，V_i は車両 i の速度を示す．

(2) 車間距離制御方式の W_{diff} 算出方法

図 5 に車間距離制御方式の通信エラーによるショックウェーブ発生例を示す．(a) に車両動作の時間推移を示し，(b) 車群参加車両の速度時間推移を示す．(a) に示すように，車両 A から D が直線道路上を走行し，車両 A から C が車群を形成する．定常状態において車間距離制御方式を搭載している車両は一定の車間距離を維持するものとした場合，時刻 t_1 から t_2 の間に車両 C に到達する車間距離制御通信にエラーが発生すると，車群は安定性を失い (b) に示すように後続車両の速度はゆらぎ，結果として (a) に示すように車両 C の位置は通信エラーがなかったとした場合の車両 C′ の位置からずれる．車両 C は車間距離制御通信を受信するたびに周囲車両の位置から正常受信時の車両位置を算出し，車間距離制御通信の W_{diff} を算出する．このとき，$W_{\text{actual_Platoon}}$，$W_{\text{estimated_Platoon}}$ はそれぞれ式 (5)，(6) から算出され，$W_{\text{estimated_Platoon}}$ の算出式は $W_{\text{estimated_ExBeacon}}$ と共通である．

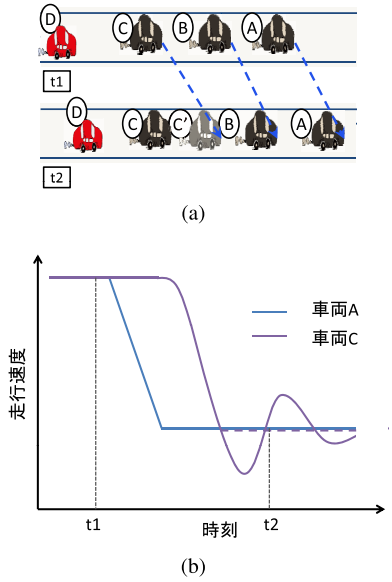


図 5 車両 C で観測される車間距離制御方式通信エラーによるショックウェーブ発生例．(a) 車両動作の時間推移，(b) 車群参加車両の速度時間推移

Fig. 5 Example of shockwave occurrence at vehicle C caused by communication loss of inter-vehicular distance control method. (a) Transition of vehicle movement, (b) Time alteration of speed.

$$W_{\text{actual_Platoon}} = F(V_B, V_D, D_{B-C'}, D_{C'-D}), \quad (5)$$

$$W_{\text{estimated_Platoon}} = F(V_B, V_D, D_{B-C}, D_{C-D}), \quad (6)$$

ここで，D_{i-j} は図中の車両 A から Z，ならびに C′ について車両 i と j の車間距離を示し，V_i は車両 i の速度を示す．

(3) 併用時における各車両の W_{diff} 算出処理

W_{diff} の計算は受信車両がパケット受信時に実行するが，早期速度調整ならびに車間距離制御方式が混在している状況では，受信車両が車群に属するか否か，受信パケットが早期速度調整と車間距離制御方式のいずれであるかによって，処理が異なる．その処理フローを**図 6** に示す．各車両はパケットを受信すると受信パケットが早期速度調整方式と車間距離制御方式のいずれであるかを判定する．受信パ

© 2014 Information Processing Society of Japan

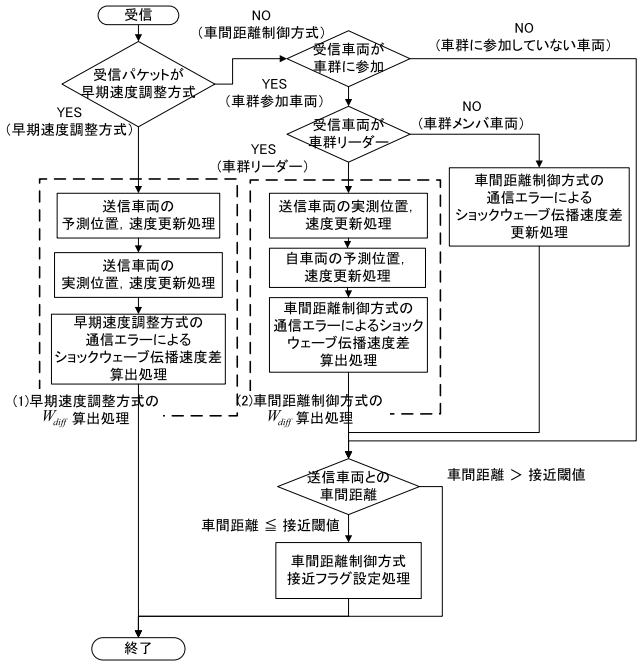


図 6 パケット受信時の W_{diff} の推定処理フロー

Fig. 6 Execution flow of shockwave propagation speed estimation at the packet receiving.

ケットが早期速度調整方式の場合，全車両の処理は同一で，早期速度調整方式の W_{diff} を算出する．受信パケットが車間距離制御方式の場合，車群に属さない受信車両も車群の近傍を走行する場合には車間距離制御方式の通信エラーによるショックウェーブ増大の影響を受ける．したがって，送信車両が車群リーダか否かを検査し，次いで受信車両が車群に参加しているか否かを検査する．受信車両が車群参加車両の場合，車群リーダからのパケット受信時に W_{diff} を算出する．一方，受信車両が車群に参加しない場合は車群リーダからのパケット受信時には何も処理をせず，車群メンバ車両からのパケット受信時に車間距離制御方式の W_{diff} 更新処理を行う．W_{diff} 更新処理では，一定時間に受信した最大値を近傍の車群における W_{diff} として保持する．W_{diff} の保持時間が車両位置情報の更新周期よりも短い場合，周辺車両からの情報を集計する前に W_{diff} を破棄するため，正確に W_{diff} を把握できない可能性がある．また，W_{diff} の保持時間が車両位置情報の更新周期よりも長い場合，周辺車両の古い位置情報に基づいて動作する可能性がある．したがって，W_{diff} の保持時間は車両位置情報の更新周期と等しくする．全車両は送信車両との車間距離を検査し，車群が近傍を走行しているかを判定する接近閾値よりも小さければ車間距離制御方式接近フラグを設定する．

3.3 通信周期調整方法

提案方式では，各車両が自律的に早期速度調整方式と車間距離制御方式の通信周期を決定する．この際，通信エラー率と W_{diff} の大きさを考慮し，同一通信帯域を使用する 2 つの方式のうち，W_{diff} が大きい方式の通信エラー率を優先して改善することがショックウェーブ抑制に効果的であると予測される．したがって，早期速度調整方式ならびに車間距離制御方式の通信周期 T は式 (7) から算出する．

$$\begin{aligned} T &= B \times (1+\omega) \\ &= B \times (1+\lambda \times A \times R), \end{aligned} \tag{7}$$

ここで，B は基本通信周期，ω は通信周期の増加係数を示し，$\lambda \times A \times R$ で示す．この際，λ は通信エラー率，A はショックウェーブ伝播速度差係数，R は抑制方式間の相対ショックウェーブ伝播速度差係数を示し，ω は λ，A ならびに R がそれぞれ増加する際に増加し，かついずれかが 0 の際に 0 にするべきであるため，それらを乗算するものとした．各係数はこの条件を満たす簡単なモデルとした．

以下にそれぞれを説明する．通信エラー率 λ は式 (8) から算出する．

$$\lambda = 1 - \frac{P}{M}, \tag{8}$$

ここで，P は受信パケット数を示し，早期速度調整方式では一定の距離以内の車両から受信するパケット数，車間距離制御通信では，車群内他車両から受信するパケット数である．M は受信期待数を示し，単位時間に受信するパケット数を通信周期と車群構成車両数ならびに周辺車両台数から算出する．

通信エラー率 λ が大きいほど，通信周期は長くなる．ショックウェーブ伝播速度差係数 A は，ショックウェーブ伝播速度差の増加とともに ω が増加し，ショックウェーブ伝播速度差が 0 以下となるときに ω も 0 となるように，式 (9) から算出する．

$$A = \max\left(\alpha_2 \left(W_{\mathrm{diff_自方式}} - \alpha_1\right), 0\right), \tag{9}$$

ここで，添字の自方式は早期速度調整方式の A 算出時には早期速度調整方式を指し，車間距離制御方式の A 算出時には車間距離制御方式を指す．$W_{\mathrm{diff_自方式}}$ は自方式の W_{diff}，α_1 は微小な速度のゆらぎによって生じる不要な周期調整を行わないためのノイズ閾値，α_2 は W_{diff} に対して単位を換算し，通信周期調整量を決める重み係数を示す．$W_{\mathrm{diff_自方式}}$ が大きいほど通信周期が長くなる．α_1 ならびに α_2 は実験により決定する．

相対ショックウェーブ伝播速度差係数 R はショックウェーブ伝播速度差の抑制方式間での比率が増加する際に通信周期の増加係数 ω を増加させるため，式 (10) から算出する．

$$R = \frac{W_{\mathrm{diff_自方式}}}{W_{\mathrm{diff_自方式}} + W_{\mathrm{diff_他方式}}}, \tag{10}$$

ここで，添字の他方式は早期速度調整方式の R 算出時には車間距離制御方式を指し，車間距離制御方式の R 算出時には早期速度調整方式を指す．$W_{\mathrm{diff_自方式}}$ ならびに $W_{\mathrm{diff_他方式}}$

© 2014 Information Processing Society of Japan

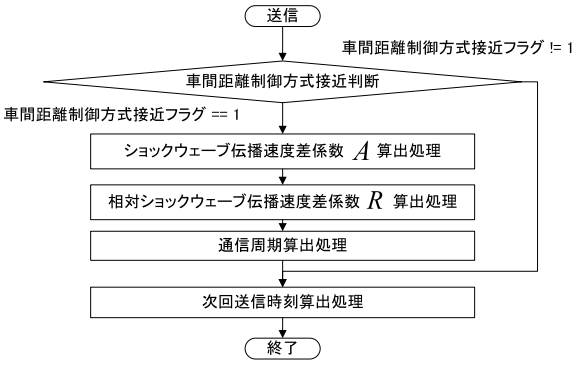


図 7 パケット送信時の通信周期決定処理フロー
Fig. 7 Execution flow of transmission interval decision at the packet sending.

は自方式ならびに他方式の W_{diff} を示す．R は併用する両方式の W_{diff} の総和に対する，ある方式の W_{diff} の割合である．$W_{\mathrm{diff_他方式}}$ に比して $W_{\mathrm{diff_自方式}}$ が大きいほど通信周期が大きくなるので，併用する方式のうち，W_{diff} の大きい方が優先して通信周期を大きくする．

各方式の通信周期は各車両がパケット送信後に決定する．その処理フローを**図 7** に示す．各車両は送信後，車間距離制御方式近傍走行フラグを検査する．車群が近傍を走行している場合，ショックウェーブ伝播速度差係数 A ならびに相対ショックウェーブ伝播速度差係数 R を算出する．次に，受信パケットから通信エラー率を取得し，通信周期を算出する．最後に，通信周期から次回送信時刻を算出する．

4. 提案方式の評価と考察

提案方式の評価と考察にあたって，W_{diff} のノイズ閾値（α_1）ならびに重み係数（α_2）を事前に決定する必要がある．以下に，シミュレーション条件，パラメータの決定ならびに渋滞が起こりやすい状況を想定したシミュレーションの結果を示す．

4.1 シミュレーション条件

ある車両が事故や故障で道路上で急減速し，道路上に停車する渋滞が起こりやすい状況を想定し，車両の流入量を変化させた場合に既存方式ならびに提案方式が渋滞や走行時間に与える影響を評価する．このため，通信シミュレータ Scenargie 1.5 [13] ならびに交通流シミュレータ MATES [14] を並列実行する環境でシミュレーションした．主なシミュレーション条件を**表 1** に示す．道路モデルは高速道路を想定した信号のない 2 車線の直線道路とし，道路上を走行する全車両は無線通信機を搭載するものとした．全車両は一方の道路端点から流入し，道路上を走行した後，他方の端点から流出する．そのうち 1 台は故障車とし，流入時には他車両と同様の走行モデルで走行するが，道路中央で急停車させ，2 車線のうち 1 車線を通行不可とする．1,300 秒にわたる通信，交通のシミュレーションを行い，開始から 100 秒後に故障車が流入し，開始から 1,000 秒後に車両の流入を止める．測定時間はシミュレーション時間のうち 200 から 1,000 秒とした．流入車両のうち 10%の車両はトラックで車間距離制御方式で車群を形成する．車群走行に必要な通信は文献 [12] に準じ，車間距離制御通信では 50 byte の情報に車両タイプ，早期速度調整方式ならびに車間距離制御方式の通信エラー率ならびに W_{diff} を加えた 78 byte の情報を 20 msec で交換することを想定し，車間距離制御通信が損失した場合，後続車両は文献 [15] のモデル式 (11) で示される加速度 u で走行するものとする．

表 1 シミュレーションパラメータ
Table 1 Simulation parameters.

Communication	
Simulator	Scenargie 1.5
Packet size	78 bytes（Platoon）
	128 bytes（ExBeacon）
Initial transmission interval	20 ms（Platoon）
	100 msec（ExBeacon）
PHY layer	802.11p
Modulation scheme	OFDM（QPSK 1/2）
Transmission power	20 dBm
Band frequency	5.9 GHz
Bandwidth	10 MHz
Bit rate	6.0 Mbps
Propagation model	Two ray
Traffic	
Simulator	MATES
Size of vehicles（W, L, H）	2.5, 12, 3.8 [m]（Truck）
	1.7, 4.7, 2 [m]（Passenger car）
Number of platoon members	10 vehicles
Road length	10 km
Number of lanes	2 lanes（One way）
Expected speed	60 to 120 km/h
Driver model	IDM

$$u = K_1(V_p - V) + K_2(D - hV), \tag{11}$$

ここで，K_1，K_2 は車頭間隔ゲイン，V_p は先行車速度，D は車間距離，h は時定数，V は自車両速度を示し，代表的な値である $K_1 = 1$，$K_2 = 0.5$，$h = 1$ を用いる．また，車群に参加しない車両は乗用車として，Intelligent Driver Model（IDM）[16] に従って走行する．これらの車両は早期速度調整方式で通信し，ショックウェーブ伝播を抑制する．拡張ビーコンは文献 [6] に準じ，100 byte の情報に加え車群に参加しているか否かを区別する車両タイプ，各々の通信エラー率ならびに W_{diff} を加えた 128 byte の情報を 100 msec 間隔で交換する．W_{diff} の保持時間は 100 msec とした．本シミュレーション条件では，見通しの良い場合の車両の通信半径を約 500 m としており，隊列接近閾値は通信範囲よりも十分に短い 400 m とする．早期速度調整と車間距離制御方式とも同一チャネルを使って通信する．

© 2014 Information Processing Society of Japan

以下では，評価指標として通信成功率，平均ショックウェーブ伝播速度，平均渋滞時間を測定する．

通信成功率 I を式 (12) に示す．

$$I = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\frac{\left(P_{\mathrm{Platoon(k)}} + P_{\mathrm{Exbeacon(k)}}\right)}{\left(P'_{\mathrm{Platoon(k)}} + P'_{\mathrm{Exbeacon(k)}}\right)}, \tag{12}$$

ここで，$P_{\mathrm{x(k)}}$ は車両 k が抑制方式 x に関して受信したパケット数，$P'_{\mathrm{x(k)}}$ は車両 k が抑制方式 x に関して受信すべきパケット数，N は道路上を走行する車両台数を示す．

平均ショックウェーブ伝播速度 W_{average} を式 (13) に示す．

$$W_{\mathrm{average}} = \frac{1}{T_2 - T_1}\sum_{t=T_1}^{T_2} W(t) \tag{13}$$

ここで，T_1 は測定開始時刻，T_2 は測定終了時刻，$W(t)$ は時刻 t における故障車両から上流方向へ 500 m の区間に発生するショックウェーブ伝播速度を示す．

渋滞時間 $T_{\mathrm{congestion}}$ を式 (14) に示す．

$$T_{\mathrm{congestion}} = \frac{1}{N}\sum_{l\in N} T_{\mathrm{congestion}}(l) \tag{14}$$

ここで，N は測定対象の車両台数，$T_{\mathrm{congestion}}(l)$ は車両 l が時速 40 km/h 以下の速度で走行した時間を示す．

4.2 結果と考察

4.2.1 通信周期調整用パラメータの役割と値の決定

以下に，提案方式に用いるノイズ閾値 α_1 ならびに W_{diff} の重み係数 α_2 の役割の考察と，シミュレーションで採用する値を示す．

一般に式 (7) のように通信周期の増分 ω が測定値 W_{diff} に比例するモデルでは，W_{diff} の小さなゆらぎを無視できる機構が必要である．このため，ノイズ閾値 α_1 を適切に設定し，それ以下の値を無視することで安定動作を図った．また，式 (9) のように測定値 W_{diff} に重み係数を乗算するモデルでは，重み係数が小さい場合，測定値に応じて乗算結果の変化が小さくなる．重み係数が大きい場合には，測定値のわずかな変化に対しても乗算結果は大きく変わる．したがって，α_2 を適切に設定し，通信周期を調整する必要がある．ここで，式 (9) において A は α_2 に比例するため，α_2 をゼロより大きい一定値に固定し，α_1 を変化させることで抑制効果が最大となる α_1 の値を実験より求めることが可能である．したがってまず α_1 の決定実験を実施し，次いで α_2 の決定実験を実施する．

図 8 に車両流入量とノイズ閾値 α_1 を変化させた際の平均ショックウェーブ伝播速度を示す．ここで，$\alpha_2 = 1.0$ とした．車両流入量が 1,200 vehicles/lane/h 以下の場合には，α_1 の大小にかかわらず，有意差はない．ゆらぎを含むか否かにかかわらず，ショックウェーブ伝播速度が小さいため，α_1 がショックウェーブ抑制効果に与える影響は小さい．一方，流入量が 1,600 vehicles/lane/h の場合には，α_1 の増大にともない平均ショックウェーブ伝播速度は増加傾向にあり，$\alpha_1 = 0.0$ のときに最小である．ショックウェーブは増大しながら伝播するため，小さいショックウェーブでも無視できず，また，大きくなってから周期を調整するのでは抑制効果が薄くなることから，α_1 は小さい方が抑制効果が高いと考えられる．さらに，本シミュレーションでは，車両の位置測定誤差がないものとしているため，抑制効果を悪化させるようなノイズがほとんど発生しなかったものと考えられる．以下のシミュレーションでは $\alpha_1 = 0.0$ とした．

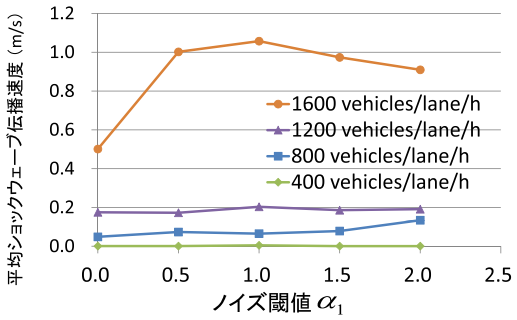


図 8 α_1 と平均ショックウェーブ伝播速度の関係
Fig. 8 Average shockwave propagation speed versus α_1.

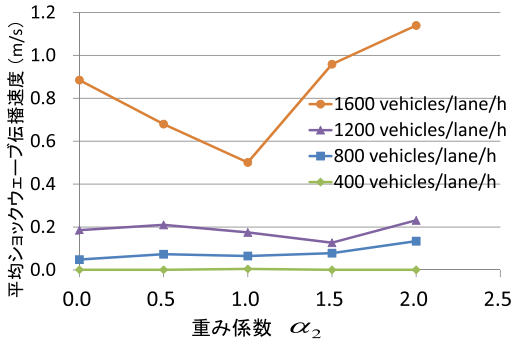


図 9 α_2 と平均ショックウェーブ伝播速度の関係
Fig. 9 Average shockwave propagation speed versus α_2.

図 9 に車両流入量と重み係数 α_2 を変化させた際の平均ショックウェーブ伝播速度を示す．車両流入量が 1,200 vehicles/lane/h 以下の場合には，α_2 にかかわらず W_{diff} が小さいため，乗算結果も小さくなり，ショックウェーブ抑制効果に有意差はない．一方，車両流入量が 1,600 vehicles/lane/h の場合には，$\alpha_2 = 1.0$ のときに最小値を示す．α_2 が 1.0 よりも小さい場合，通信エラー発生時に通信周期増大量が小さいため，輻輳の影響を低減できず，平均ショックウェーブ伝播速度は増大する．また，α_2 が 1.0 よりも大きい場合，通信エラー発生時の通信周期増大量が大きすぎるため，結果として各抑制方式の情報更新が遅れ，平均ショックウェーブ伝播速度が増大する．以下のシミュレーションでは $\alpha_2 = 1.0$ とした．

© 2014 Information Processing Society of Japan

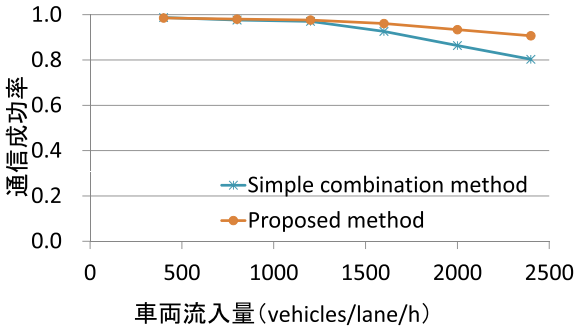


図 10 車両流入量と通信成功率の関係

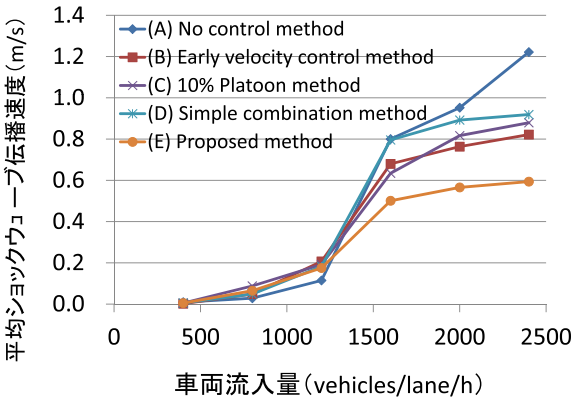
Fig. 10 Communication sucess ratio versus vehicle inflow.

4.2.2 通信成功率，ショックウェーブ伝播速度ならびに渋滞時間測定実験

提案方式を早期速度調整方式，車間距離制御方式，ならびに両方式を通信周期制御なく組み合わせた方式（以下，単純併用方式），いずれの抑制方式も用いない場合と比較する．ここで，車間距離制御方式では，流入する車両のうち 10%が車群形成するものとした（図中では 10% platoon method と表記する）．

図 10 に車両流入量を変化させた場合の通信成功率を示す．両方式ともに，車両流入量が小さい場合には高い通信成功率を示し，車両流入量が 1,200 vehicles/lane/h の場合には約 0.98 を示す．次いで，流入量を 1,600，2,400 vehicles/lane/h と増加させると，提案方式では 0.96，0.91，単純併用方式は 0.92，0.80 をそれぞれ示し，通信成功率は低下するが，その差は大きくなる．これは，単純併用方式が輻輳発生時に通信量を抑制しないのに対し，提案方式は通信量を抑制するためである．

図 11 (a) に車両流入量を変化させた場合の平均ショックウェーブ伝播速度，(b) に車両流入量が 2,400 vehicles/lane/h の場合の平均値と標準偏差を示す．表内の上段に平均値，下段に標準偏差を示す．各方式とも車両流入量が小さい場合は平均ショックウェーブ伝播速度は小さいが，車両流入量の増加にともない平均ショックウェーブ伝播速度が増大する．車両流入量が 1,600 vehicles/lane/h の場合，早期速度調整方式は 0.68 m/s，車間距離制御方式は 0.82 m/s，単純併用方式は 0.89 m/s を示す．提案方式は他方式に比して最小値である 0.57 m/s を示し，最も抑制効果が大きい傾向がある．車両流入量が小さい場合，単純併用方式は車間距離制御方式の抑制効果に加え，早期速度調整方式の効果が得られるため，各方式単独の場合よりも低い平均ショックウェーブ伝播速度を示す．しかし，図 10 で示すように単純併用方式は高車両密度時に通信成功率が低下するため，車両流入量が大きい場合，早期速度調整ならびに車間距離制御各方式を単独で使用するよりもショックウェーブ抑制効果は小さい．これに対し，提案方式では通信周期を調整することで通信成功率が改善され，併用する



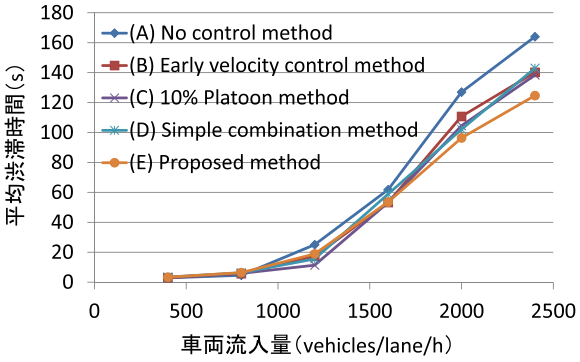
(a)

方式	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
平均値	1.22	0.82	0.88	0.92	0.59
標準偏差	0.20	0.15	0.13	0.11	0.11

(b)

図 11 平均ショックウェーブ伝播速度．(a) 車両流入量との関係，(b) 流入量 2,400 vehicles/lane/h の場合の平均値と標準偏差

Fig. 11 Average shockwave propagation speed. (a) Average shockwave propagation speed versus vehicle inflow, (b) Average value and standard deviation of average shockwave propagation speed when 2,400 vehicles/lane/h.



(a)

方式	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
平均値	164.00	140.19	138.08	142.99	124.66
標準偏差	2.25	4.86	5.42	3.31	5.65

(b)

図 12 平均渋滞時間．(a) 車両流入量との関係，(b) 流入量 2,400 vehicles/lane/h の場合の平均値と標準偏差

Fig. 12 Average congestion time. (a) Average congestion time versus vehicle inflow, (b) Average value and standard deviation of average congestion time when 2,400 vehicles/lane/h.

早期速度調整方式によりショックウェーブ発生情報が早急に伝達され，また，車間距離制御方式により安定性が改善されるため，他方式よりもショックウェーブ抑制効果が高くなる傾向がある．提案方式の平均ショックウェーブ伝播速度はシミュレーションした全方式の中で最小値を示す．

図 12 (a) に車両流入量を変化させた場合の平均渋滞時

© 2014 Information Processing Society of Japan

間，(b) に車両流入量が 2,400 vehicles/lane/h の場合の平均値と標準偏差を示す．表内の上段に平均値，下段に標準偏差を示す．各方式とも車両流入量が小さい場合は平均渋滞時間は小さいが，車両流入量の増加にともなって平均渋滞時間が大きくなる．車両流入量が 1,600 vehicles/lane/h の場合，平均渋滞時間が早期速度調整方式は 53.21 秒，車間距離制御方式は 53.19 秒，単純併用方式は 58.90 秒であるのに対し，提案方式は 52.54 秒を示した．図 11 における車両流入量が大きい場合の結果とあわせて考えると，併用方式のうち，単純併用方式は早期速度調整方式ならびに車間距離制御方式を単独で使用した場合よりもショックウェーブ伝播速度抑制効果が低下するため，結果として平均渋滞時間が大きくなる．これに対し提案方式は単純併用方式よりもショックウェーブ伝播速度を抑制できるため，平均渋滞時間が小さくなる．その結果，提案方式は早期速度調整方式ならびに車間距離制御方式よりも性能が良く，シミュレーションした全方式の中で最小の平均渋滞時間を示す．

5. おわりに

本論文では，道路上を走行するすべての車両で効果的にショックウェーブを抑制するため，無線帯域での輻輳時に早期速度調整ならびに車間距離制御方式を併用し，両者の通信周期を動的に制御する車車間通信を用いたショックウェーブ抑制方式を提案した．通信周期を変更しない単純併用方式は低車両密度時に高いショックウェーブ抑制効果を示すが，無線帯域での輻輳が発生しやすい高車両密度時に輻輳発生にともなって抑制効果が低下するのに対し，提案方式は通信周期を制御することで，通信成功率を改善した．その結果，単純併用方式や早期速度調整方式ならびに車間距離制御方式を単独使用した場合に比して平均ショックウェーブ伝播速度と平均渋滞時間がいずれも最小となり，提案方式が渋滞の短縮に有効であることを示した．今後，ショックウェーブ伝播速度を抑制可能とする通信周期調整量を決定するショックウェーブ伝播速度差係数 A および相対ショックウェーブ伝播速度差係数 R のモデル，GPS の位置測定誤差とノイズ閾値 α_1 が抑制効果に与える影響，ならびにショックウェーブ抑制方式の普及率が抑制効果に与える影響について引き続き検討を進める予定である．

謝辞 本研究の一部は，JSPS 科研費（B）課題番号 25280032（2013 年）の助成により行われました．

参考文献

[1] 警視庁：平成 23 年中の都内の交通渋滞統計（一般道路，首都高速道路）（オンライン），入手先 ⟨http://www.keishicho.metro.tokyo.jp/toukei/jyutai/data/ippan.pdf⟩（参照 2013-05-12）．

[2] 一般社団法人日本自動車工業会：ドライバーの渋滞対策（オンライン），入手先 ⟨http://www.jama.or.jp/lib/jamagazine/201210/01.html⟩（参照 2013-05-12）．

[3] Xu, Y., Wu, Y., Wu, G. and Sun, L.: Data Collection for the Detection of Urban Traffic Congestion By VANETs, *Asia-Pacific Services Computing Conference* (*APSCC*), pp.405–410 (2010).

[4] Schumacher, H., Priemer, C. and Slottke, E.N.: A Simulation Study of Traffic Efficiency Improvement Based on Car-to-X Communication, *Proc. 6th ACM International Workshop on VehiculAr InterNETworking*, pp.13–22 (2009).

[5] Ahn, S. and Cassidy, M.: Freeway Traffic Oscillations and Vehicle Lane-Change Maneuvers, *Transportation and Traffic Theory*, pp.691–710 (2007).

[6] Huang, D., Shere, S. and Ahn, S.: Dynamic Highway Congestion Detection and Prediction Based on Shock Waves, *ACM VehiculAr InterNETworking*, pp.11–20 (2010).

[7] Calvert, S., van den Broek, T. and van Noort, M.: Modelling Cooperative Driving in Congestion Shockwaves on a Freeway Network, *IEEE Intelligent Transportation Systems*, pp.614–619 (2011).

[8] Lei, C., van Eenennaam, E.M., Klein Wolterink, W., Karagiannis, G., Heijenk, G.J. and Ploeg, J.: Impact of Packet Loss on CACC String Stability Performance, *ITS Telecommunications*, pp.381–386 (2011).

[9] Hegyi, A., Schutter, B.D. and Hellendoorn, J.: Optimal Coordination of Variable Speed Limits to Suppress Shock Waves, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.6, No.1 (2005).

[10] Zhang, J., Boitor, A. and Ioannou, P.: Design and Evaluation of a Roadway Controller for Freeway Traffic, *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp.543–548 (2005).

[11] van Arem, B., van Driel, C. and Visser, R.: The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics, *IEEE Intelligent Transportation Systems*, Vol.7, No.4, pp.429–436 (2006).

[12] 関 馨，浜口雅春：隊列走行のための車車間通信（第 2 報），情報処理学会研究報告，Vol.2010-ITS-43, No.5, pp.1–8 (2010).

[13] 大和田泰伯，前野 誉，金田 茂，久永良介，高井峰生：Scenargie を用いた ITS シミュレーション，*IPSJ DICOMO 2008*, pp.233–234 (2008).

[14] 吉村 忍，西川紘史，守安 智：知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES の開発，*Proc. Japan Society for Simulation Technology*, Vol.23, No.3, pp.228–237 (2004).

[15] Xiao, L. and Gao, F.: Practical String Stability of Platoon of Adaptive Cruise Control Vehicles, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.12, No.4, pp.1184–1194 (2011).

[16] Treiber, M., Hennecke, A. and Helbing, D.: Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations, *Physical Review E*, Vol.62, No.2, pp.1805–1824 (2011).

© 2014 Information Processing Society of Japan



鈴木 理基 （学生会員）

1982 年生．2006 年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業．2008 年同大学大学院理工学研究科博士前期課程修了．2008～2010 年株式会社野村総合研究所勤務．2013 年慶應義塾大学大学院理工学研究科博士後期課程修了．現在，株式会社 KDDI 研究所勤務．博士（工学）．IEEE，ACM 各学生会員．



重野 寛 （正会員）

1990 年慶應義塾大学理工学部計測工学科卒業．1997 年同大学大学院理工学研究科博士課程修了．現在，同大学理工学部教授．博士（工学）．情報処理学会学会誌編集委員，同論文誌編集委員，同マルチメディアと分散処理研究会幹事等を歴任．現在，情報処理学会高度交通システム研究会幹事，電子情報通信学会英文論文誌 B 編集委員，Vice Chair of IEEE ComSoc APB TAC．ネットワーク・プロトコル，モバイルコンピューティング，ITS 等の研究に従事．著書『コンピュータネットワーク』（オーム社），『ユビキタスコンピューティング』（オーム社）等．電子情報通信学会，IEEE，ACM 各会員．

© 2014 Information Processing Society of Japan