

協調的隊列走行に向けた 車群通信のシミュレーション評価

大西 亮吉^{1,a)} 吉岡 顕¹

受付日 2011年3月30日, 採録日 2011年10月3日

概要: 無線を利用したスマートな集団走行によって, 環境対応(資源・大気)や渋滞解消の効果が期待されている. 通信システムの導入に際して, 混雑している状況や未対応車が混在している状況に対しても信頼性を確保することが必要であり, 筆者らは車群通信による通信状態の効率的な把握と通信状態変化への自律的な対処方法をこれまで提案してきた. 本論文では, 交通流シミュレータと無線通信シミュレータを統合プラットフォーム上で連携させたシミュレータを構築し, 車群通信の通信・隊列機能の振舞いや動作特性を定量的に評価した. 高速道路における自由流のワーストケースを想定したシナリオにおいて, 車群通信は通信機搭載率 100%でも通信帯域を飽和させずに送達確認を実現し, また通信機搭載率の増加特性から, 前後に隣接する通信車両どうして車群を形成する様子を示した. また車群の上限台数を超える合流は行わないことから, 通信機搭載率 100%でも様々なサイズの車群が存在する様子を示し, いずれも設計どおりの動作特性として確認することができた. さらにシミュレータの実行特性についても紹介する.

キーワード: 隊列走行, 車車間無線通信, 車群通信, 統合シミュレーション

Simulation Evaluation of Group Communication for Cooperative Vehicle Platooning

RYOKICHI ONISHI^{1,a)} AKIRA YOSHIOKA¹

Received: March 30, 2011, Accepted: October 3, 2011

Abstract: Inter-vehicular communications is expected to significantly enhance vehicle platooning capability in environmental protection and traffic flow improvement. Since it must remain a part of reliable vehicle systems even in heterogeneous and/or congested traffic situation, we have suggested an efficient method of group communication for interactivity assurance and platoon organization. We built an integrated simulator of roadway traffic and communication network in order to understand performance characteristics of the proposed method. In the paper, we describe that group communication enables vehicles to organize their cooperative platoons without causing wireless bandwidth saturation in dense highway traffic scenario. And we also confirmed that the size of platoons was diversified due to size limitation on merging, as we designed. The analysis on the simulation performance follows the simulation result.

Keywords: vehicle platooning, inter-vehicle communication, group communication, simulation integration

1. はじめに

先行車両を自動的に追従し, 隊列として連なった走行について, 数多くの研究や試行がなされてきた [1]. このよ

うな走行によって, 運転者を運転操作から解放するとともに, 車間距離の短縮による輸送効率の向上や環境負荷の軽減(燃費向上, 排ガス低減)が期待される. 一方, 無線機の低コスト化や高性能化が進んだことにより, 無線 LAN の仕様を車両用途にカスタマイズした IEEE 802.11p をベースに, 日本, 米国, 欧州において車車間無線通信の規格化や実証実験が進められている [2], [3], [4].

¹ 株式会社トヨタ IT 開発センター
Toyota InfoTechnology Center, Co., Ltd., Minato, Tokyo
107-0052, Japan

^{a)} onishi@jp.toyota-itc.com

このような車車間通信を利用して隊列走行を効果的に実現する提案がなされている。レーダや無線機で得られた先行車両の走行情報をもとに自車両の走行を制御する手法 [5], [6] があり、一般的に協調 ACC (Cooperative Adaptive Cruise Control) と呼ばれる。さらに進んだ形態として、隊列走行を行う車両間で受信応答 (ACK) を交わすことで、双方向の通信を確認しつつ走行制御を行う隊列走行システムが考えられる。より高度で柔軟な制御が可能となり、たとえば、隊列内で協調した加速度制御 [7], [8], 高速道路での合流 [9] や隣接車線への割込み [10] の際に協調して車間を広げる支援などが提案されている。このような走行を、本論文では協調的隊列走行 (Cooperative Vehicle Platooning), または簡単に協調走行と呼ぶ。筆者らは、この協調走行の実現に向けて、車群通信による通信状態の把握と通信状態変化への対処方法を提案してきた [11]。車群ごと、サイクルごとに受信応答をまとめて無線伝送することにより車両間で通信状態を効率的に共有し、状態変化に対しては各車両が自律的に対応することで、自身の状態の競合を回避して安定的に再編成を行う。

この隊列走行システムの検討とは別に、筆者らは、無線通信を利用した交差点安全支援システムを評価するためのシミュレーション手法も提案してきた [12]。本手法は、ITS アプリケーション、交通流、ネットワーク、電波伝搬の各要素シミュレーションを統合したもので、効率的、かつ普遍的な枠組みについては、(財)日本自動車研究所が事務局となって設立された「ITS 通信系シミュレータ評価検討委員会」[13], 「ITS 統合シミュレーション環境構築検討委員会」[14] へ参加して検討を進めてきた。

以上の知見に基づいて、隊列走行の特性 (通信特性・隊列特性・走行特性) を定量的に評価するためのシミュレータを構築し、車群通信の通信・隊列機能の動作特性やシミュレータの実行特性を評価した結果について本論文で紹介する。本論文の構成は次のとおりとなる。2 章では本論文の背景として、筆者らがこれまで提案した車群通信や統合シミュレータの概要、および本論文に関連する他者の研究について紹介する。3 章で隊列走行シミュレータの構成を説明し、4 章でシミュレーションによる評価結果を紹介する。5 章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

2.1 車群通信

筆者らは、協調走行の実現に向けて、車群通信による走行グループ内の通信状態の把握と通信状態変化への対処方法を提案してきた [11]。まず、車群通信によって通信状態を把握する方法について要点を述べる。車両は定期的に無線放送 (ブロードキャスト) を行っており、送信情報には所属車群 ID, サイクル番号のほかに、自車両の走行情報 (GPS など) で取得、誤差は仮定しない、車群に所属するすべての

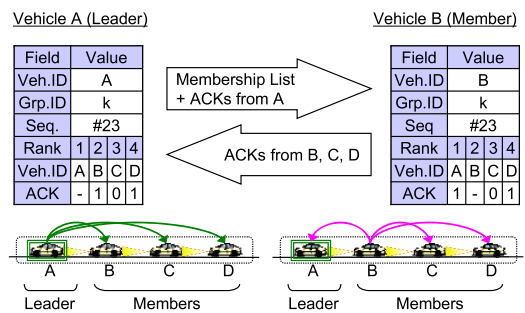


図 1 Group ACK
Fig. 1 Group ACK.

車両 ID とその車両の前回の送信に対する自身の ACK が含まれる。本手法は黒板モデルと呼ばれるエージェント間の情報共有手法 [15] をベースにしており、ブロードキャストが「黒板」への書き込みに相当する。リーダーによって車群 ID, サイクル番号が定義され、所属車両 ID とその走行順はメンバの位置情報から決定される。それに対してメンバは他の車両の前回の送信に対する ACK をまとめて書き込むことで、車群内で効率的に状態情報を共有することが可能となる。本手法を Group ACK と呼び、リーダーから送信される packets を HB (HeartBeat) パケット、メンバからの packets を MR (Membership Report) パケットと呼ぶ。図 1 は、車両 4 台の協調走行における Group ACK の様子を示す。車両 A がリーダー、車両 BCD がメンバである。図中の表は packet の内容を示しており、自車両 ID (Veh.ID), 所属車群 ID (Grp.ID), サイクル番号 (Seq.) に加えて、走行順 (Rank) に並んだ所属車両 ID (Veh.ID) とその車両に対する自身の ACK を含む。現在、23 番目のサイクルでリーダー A が送信した様子が図 1 左側であり、その後メンバ B が送信した様子が図 1 右側である。リーダーからの ACK は前回のサイクル (#22) の受信結果であり、メンバからの ACK は、リーダーに対しては現在 (#23), 他のメンバに対しては前回 (#22) の受信結果となる。このようにして、リーダーとメンバは走行順に車両 ID を共有して、互いに ACK をまとめて確認することができる。

続いて、通信状態の変化に対する車群の編成方法について要点を述べる。前述の仕組みによって、各車両は互いの位置関係や通信の双方向性を確認することができる。どの車群にも所属していない、前後に隣接する 2 台の通信車両が存在する場合、まず後続車両がリーダーや無線機で得られた先行車両の情報を送信する。先行車両はその情報を受けて、新しい車群のリーダーとなって車群 ID やサイクル番号を定義し、後続車両をメンバリストに含めた HB パケットを送信する。後続車両は前方の車両から到来したメンバリストに自車 ID を発見した場合、その車群のメンバとなって、リーダーへの ACK を含む MR パケットを送信する。これにより車群を形成することができる。車群どうしが合流する場合は、先行車群のリーダーは、後続車両や後続車群に

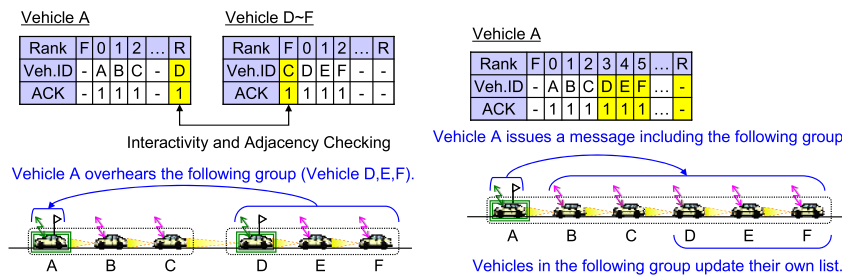


図 2 車群合流 (左:合流前, 右:合流後)

Fig. 2 Initial state (left) and end state (right) on merging.

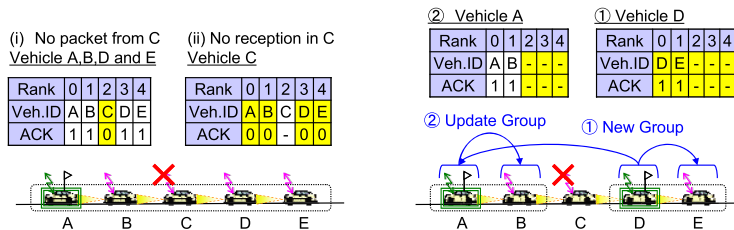


図 3 通信途絶の検知 (左) と通信途絶を検知した際の隊列再編成 (右)

Fig. 3 Comm. disruption detection (left) and reformation of group (right).

所属する全車両の通信を傍受し、これらを併合するだけのメンバ数の余裕があると判断した場合に、それらを合流させた HB パケットを送信する。後続車両は前方の車両から到来した HB パケットのメンバリストに自車 ID を発見した場合、その車群のメンバとなるため、MR パケットで新しいリーダーへ ACK を送る。結果、後続車群は解散となる。車群外で前後に隣接している車両を把握する必要があり、車群外の先行車 (走行順 F) や後続車 (走行順 R) についても同様に車両 ID とその車両に対する ACK を用意する。図 2 は 3 台ずつ構成された 2 つの車群が合流する様子を示す。図 2 左側は、先行車群のリーダー A が、隣接性や通信双方向性を確認した後続車群の所属車両 DEF の通信を傍受した状態である。リーダー A は後方車群を取り込んでもメンバ数上限内と判断した結果、図 2 右側のように、車両 DEF を取り込んだ HB パケットを送信する。車両 DEF はその情報を受けて先行車群のメンバとして MR パケットを送信して参加する。

通信途絶となった車両については、以下の条件によって検知することができる。

- (i) 送信障害の検知
 - ある車両からの通信が届かない。
 - かつ、他の車両からの情報も、その車両に対する ACK が偽。
- (ii) 受信障害の検知
 - ある車両からの情報で、すべて、または不特定多数の車両に対する ACK が偽。

通信途絶車両の直後のメンバは、自らリーダーとなって新しい車群を立ち上げ、後方のメンバを併合した HB パケットを送信し、後方のメンバは前方車両からの HB パケット

に自車両 ID を発見するため新車群に乗り換える。元の車群のリーダーは、新しい後続車群のリーダーとなった元メンバからの HB パケットを受信した場合、当該車両以降のメンバを除いた HB パケットを送信する。図 3 は 5 台で構成された車群の中央の車両 C が通信途絶となった場合の検知と対処の様子を示す。図 3 左側は通信情報を示しており、(i) 車両 C の送信障害を示す車両 ABDE からの情報、(ii) 車両 C の受信障害を示す車両 C からの情報となる。この場合、図 3 右側のように①車両 C の直後の車両 D が新車群のリーダーとなって後方の車両 E を併合した HB パケットを送信し、車両 E はこれを受けて新車群へ参加、②車両 A もこれを受けて車両 DE を除いた HB パケットを送信する。車両 C は通信途絶の理由により、車両 A の HB パケットから除かれる。

車群から除かれた車両は除外リストに記録され、一定時間合流対象外となる。図 3 の車両 C の通信が回復しても除外期間中であれば、2 つの車群に分割された状態は維持される。除外期間終了後は、合流を繰り返して再び 1 つの車群となる。車両 C の位置にシステム未対応の車両が存在する場合や割込みがあった場合、車両 D はレーダや無線機で得た情報からは先行車両を特定できず、通信途絶の場合と同様に新車群を立ち上げて先行車群 AB と後続車群 DE に分離する。そして 2 つの車群は互いに隣接性を確認できないため、車群 AB は車群 DE を併合せず分離した状態が維持される。

2.2 統合シミュレータ

筆者らは通信を利用した ITS アプリケーションの有効性や成立条件検証のために、交通流、通信、電波伝搬、お

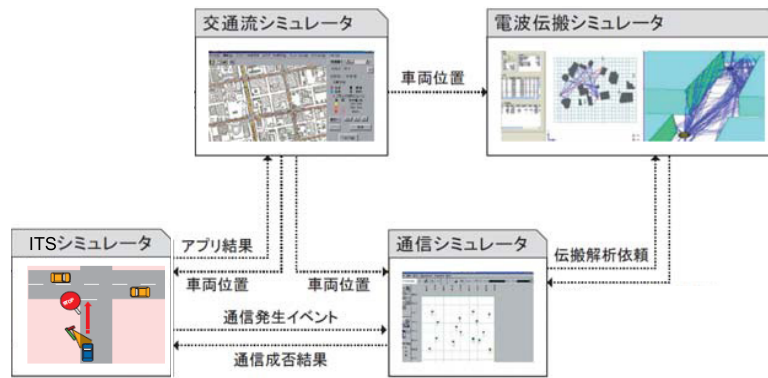


図 4 シミュレーション要素の連携イメージ

Fig. 4 Simulation integration.

よび評価対象となる ITS アプリケーションの 4 つの要素シミュレーションを連携させた統合シミュレータを開発した。図 4 に各要素シミュレーションの間で交換すべきデータの流れを示す。

まず、交通流シミュレータによって各車両位置を求める。ITS シミュレータでは、車両の位置関係から発生すべき通信を生成し、通信シミュレータに通信の成否や遅延を照会する。通信シミュレータは、ネットワーク上の送信車両と受信車両間の電波伝搬品質について電波伝搬シミュレータに照会する。電波伝搬シミュレータは、送信車両と受信車両の位置に加えて、周りの建物などの構造物および車両形状なども考慮して電波伝搬品質を計算して回答する。通信シミュレータは、得られた伝搬品質からビットエラー率、パケットエラー率を算出し、これと乱数によりパケット到達すなわち通信の成否や遅延を決定して回答する。ITS シミュレータはこの通信に関する情報を用いて、車両の動作を決定する。

統合シミュレータは、1 つのソフトウェアとして密に組み合わせるのではなく、それぞれ単体で動作する要素シミュレータを、TCP ソケット通信を介して統合プラットフォーム上で疎に組み合わせる手法を採用している。このことによりシミュレーション時間の増加が見込まれるが、インタフェース部分を開発することで既存の要素シミュレータを利用することができ、シミュレーション技術の進化にあわせた性能向上や、対象となる ITS アプリケーションの評価要件に対して適切な選択が可能となる。

2.3 隊列走行シミュレーションに関する研究事例

Arem らは文献 [5] において、通信と前方レーダを用いた協調 ACC の走行安定性や交通流の改善効果について、MIXIC と呼ばれるマイクロ交通流シミュレータを利用して評価を行っている。先行車両の追従制御について詳しく述べられており、特に制御係数については、先行車両の速度変化に対する自車速度の収束時間の考察がなされている。さらに、車線数減少により合流が発生するシナリオにおい

て、システム普及率に対する交通流の特性を調べている。4 レーン × 5 km の道路に 7,600 台/時の車両の流入があり、1 レーンあたり流入量は 1,900 台/時となる。3.5 km 地点で進行方向最左翼のレーンが終了するが、1.35 km 手前で警告が与えられるため、ドライバーは右隣のレーンへ移動を開始する。最後まで車線変更する機会が得られなかった車両はシミュレーションエリアから取り除かれて、その数はカウントされる。追従で車間を詰めている場合は合流が阻害され、合流後も速度や交通流において改善効果が見られないと報告しており、今後の課題として、(i) (複数車両の前方追従の結果としての) 隊列長の制限、(ii) 合流部に路側機を置いて車間拡張指示、(iii) 協調合流システムの検討をあげている。

このようなシミュレーションによって走行や交通流に関する特性の評価が可能となるが、文献 [5] では通信障害が発生しないという前提でなされている。また、先行車両のみの追従であり、隊列の形成や隊列による協調動作は検討されていない。本論文では、交通流と無線通信を統合したシミュレーションにおいて、通信を利用した隊列の協調動作について評価を試みる。

3. 隊列走行シミュレータの構築

隊列走行シミュレータのアーキテクチャについて、シナリオ、センシング、コントロールの 3 つに大別した構成で検討した。シナリオは、道路データと交通データによって定義される情報であり、道路データは道路・交差点の形状や制限速度、信号機設定などを含み、交通データは OD (出発点 O と到着点 D の組合せごとの交通量) や車種などを含む。センシングは、自車両や周辺車両の情報を取得するための機能であり、GPS/INS やレーダ、そして無線通信によって構成される。コントロールは、センシングによって得られた情報をもとに隊列を編成し、加速度を決定する機能である。隊列制御と走行制御で構成され、隊列制御は本論文では車群通信が相当し、走行制御は隊列を構成する車両の自動的な追従、またはドライバーによる追従となる。

図 5 にデータの流れも含めたアーキテクチャを示す。

このアーキテクチャを交通流シミュレータ MATES [16] と無線ネットワークシミュレータ Scenargie [17] を統合プラットフォーム上で結合させて実装を行った。MATES は 1 台の車両が自律したエージェントとして実装されたシミュレータで、すべての車両とその他の条件（道路形状、信号機など）を含む環境に対して、車両ごとに相互作用を行うマルチエージェントのモデルを採用している。筆者らはこれに外部から特定の車両に対する加速度設定を受け付ける機能拡張を行い、ドライバによる走行と車群通信による協調走行が混在した交通流のシミュレーションを可能にした。なお、協調走行もマルチエージェントをベースに設計されており、個々の車両は自律的に対応するため連携が容易である。Scenargie は文献 [13] において他のシミュレータ (ns-2, Qualnet) と詳細に比較検討されている。その結果として、Scenargie は隠れ端末問題の取扱いがより現実的であり、さらに通信ノード数の増加 (8~400 台) に対して、シミュレーションの所要時間やメモリの使用量の点で優れた性能を示している。

要素シミュレータの機能分担は次のとおりとなる。センシングや隊列制御、自動追従（加速度計算）で構成される隊列走行システムについては Scenargie の無線機能を利用して新たに実装を行い、ドライバ追従（加速度計算）は MATES にあらかじめ備わっている機能を利用した。この

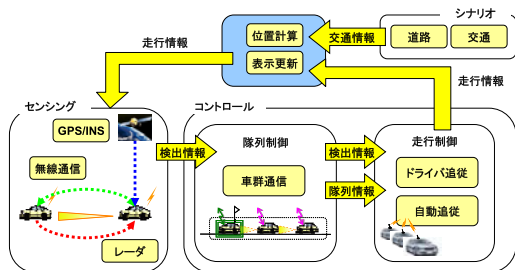


図 5 隊列走行シミュレータのアーキテクチャ
Fig. 5 Simulation framework of vehicle platooning.

関係で、道路データや交通データに加えてドライバ追従の設定を MATES に、センシングや隊列制御、自動追従の設定を Scenargie にシナリオとして与えている。図 6 に隊列走行シミュレータの実際の構成を示す。

隊列制御（車群通信）についてはすでに前章で説明を行っているため、それ以外の主要な機能として、GPS/INS、レーダ、無線通信、そして自動追従について説明する。

3.1 GPS/INS、レーダの設計

GPS（衛星測位システム）と INS（ジャイロなどの慣性航法システム）は一体的に取り扱い、自車両の走行状態（中心座標、速度、加速度、進行方向）を推定する機能について検討した。INS の機能により、測位ロスは生じない仕様とする。本論文では簡易的な設計として、MATES から得られた実際の走行情報の入力に対して測位誤差は与えず、そのまま走行情報を出力する。

レーダは、先行車両の走行情報を得る機能として設計した。MATES の内部において各車両は先行車両の ID を保有しているため、この情報を外部へ提供する拡張を行った。進行方向を中心とする所定の距離・角度の扇形エリアをレーダ検出範囲とし、MATES から得られた先行車両がレーダ検出範囲内に存在する場合は、その車両の走行情報を取得するが、この情報には車両 ID は含まれない。実際には、カメラ画像によって白線検知を行い、同じレーンにいる車両を検出するなど様々なアルゴリズムが考えられるが、本論文ではこのような簡易的な設計とする。

3.2 無線通信の設計

無線通信は、Scenargie が提供するモジュールに設定値を与えて使用した。物理層・データリンク層は、IEEE802.11p [18] の規格に従って設定している。また、無線 LAN において一般的に実装されているキャプチャ効果も Scenargie はサポートしている。これは受信中のフレームよりも一定以上高い電力のフレームを検知した際に、弱い電力のフレーム

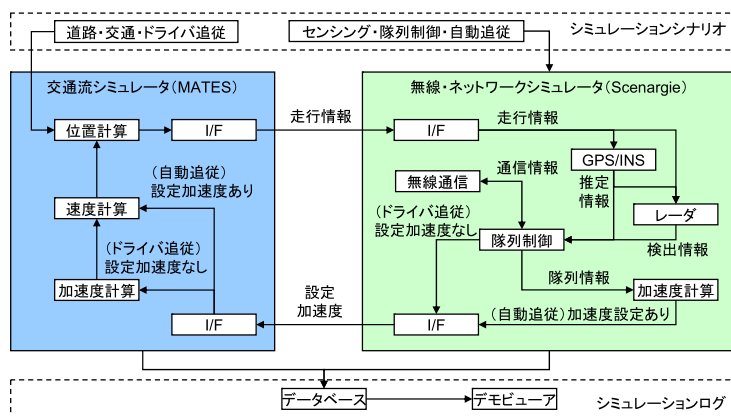


図 6 隊列走行シミュレータの実装
Fig. 6 Simulation implementation of vehicle platooning.

の受信をとりやめて、強い電力のフレームの受信を開始する機能である。通信負荷の非常に高い状況においても近傍通信が可能となる様子を、筆者らは100台の無線機を使用して確認している [19]。隊列走行では比較的短い距離の通信を必要とするため、この効果は特に重要である。また電波伝搬モデルについては2波モデルを使用し、電波の回折や遮蔽は、今回のシミュレーションの対象外とした。

3.3 自動追従の設計

自動追従の機能は、一般に追従目標とする車両の加速度（フィードフォワード制御）に対して、先行車両の速度差や車間距離の目標値との差を減少させるような加速度（フィードバック制御）を加えて、最終的な自車両の加速度を決定する [5], [7], [8]（本論文では、車間は先行車の後部から後続車の前部までの間隔と定義する）。たとえば、先行車両を追従目標とする文献 [5] の制御式は、式 (1) のように記述される。

$$a_{ref-d} = k_a \cdot a_p + k_v \cdot (v_p - v) + k_d \cdot (r - r_{ref}) \quad (1)$$

a_{ref-d} は自車両の要求加速度、 a_p は先行車両の加速度、 $v_p - v$ は先行車両との相対速度、 $r - r_{ref}$ は先行車両との車間距離と目標車間距離との差、 k_a , k_v , k_d はそれぞれ制御係数となる。

隊列走行においては、隊列の先頭車両を追従目標とするもの [7] や隊列内の車両で協調して仮想的な車両を仕立て、それを追従目標とするもの [8] などが考えられている。今回の自動追従では、車群の先頭車両を追従目標とする単純な設計とし、この設計の妥当性は今回評価の対象外とする。文献 [5] の制御式を拡張して、式 (2) のように記述される。

$$a_n = k_a \cdot a_0 + k_v \cdot (v_{n-1} - v_n) + k_d \cdot (r_n - r_{ref}) \quad (2)$$

車群内の i 番目を走行する車両について、加速度 a_i 、速度 v_i 、先行車両との車間距離 r_i として定義する。 $i = 0$ の場合は、先頭車両となる。つまり車群のメンバは、先頭車両となるリーダーを追従目標とし、さらに各メンバの先行車両との速度差や目標車間距離との差を減じるように加速度を調節する。この制御には、最小車間距離や、最大速度、最大・最小加速度の制限も与えられるよう設計した。制御係数は文献 [5] において最も安定的であると評価された値を使用する。また、ある車群に隣接する先行車群が存在す

る場合には、後続車群のリーダーは文献 [5] と同様に先行車両、つまり先行車群の最後尾の車両を追従する仕様とする。

4. シミュレーションによる特性評価

高速道路のシナリオで、通信機搭載率（以下、搭載率）0%、20%、40%、60%、80%、100% に対して、車群通信による協調走行がどのような特性を示すか、前述のシミュレータを用いて調べた。

4.1 設定条件

シミュレーションエリアは、図 7 に示すような道路長 2km 3車線の対向流で、通信車両は、上部3車線（隊列レーン）において隊列を形成し、下部3車線（負荷レーン）では隊列を形成せず、単に通信負荷を与える役割とした。定常状態を測定するために隊列レーンの始点・終点の 500m 区間は除き、始点から 500m~1,500m 地点の 1km 区間を計測エリアとした。計測に関する詳細は後述する。車線は外側から順に A, B, C とし、1時間あたりの流入車両数、および目標とする標準速度を以下のように設定した。

- A レーン（外側）：流入車両数 800 台/時、標準速度 80 km/h
- B レーン（中央）：流入車両数 1,600 台/時、標準速度 100 km/h
- C レーン（内側）：流入車両数 2,100 台/時、標準速度 120 km/h

文献 [20] では、渋滞発生時における東名高速下り大和地区の交通量と速度の関係を紹介している。上記の A~C レーンの流入車両数と標準速度は自由流のワーストケースに近い値となるよう、渋滞臨界点手前の状態を参考にして設定した。電波の回折や遮蔽のシミュレーションは行わないため、通信特性は無線機の密度（距離・台数）に依存する。したがって、車両密度を固定し、搭載率を変化させることで、無線機の密度に関する評価を行った。その他の主要な設定値を、表 1 にまとめて記載する。

車群を構成する台数には制約があり、上限値を超えるような合流は行われぬ。また車間距離や速度・加速度にもそれぞれ制約があり、この制約を超えるような値が要求された場合には、制約の上限値、または下限値に設定される。

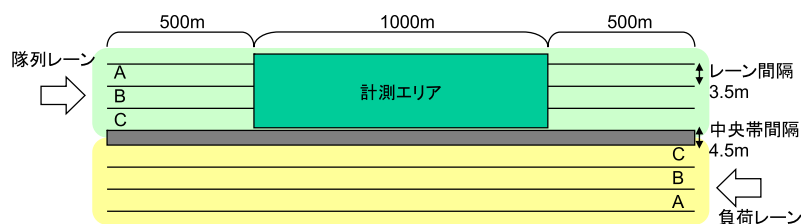


図 7 シミュレーションエリア

Fig. 7 Simulation area.

表 1 シミュレータの設定値
Table 1 Simulation setup.

機能	設定項目	設定値	
レーダ	検出範囲	100m, 30度	
	無線通信	中心周波数 (帯域幅)	5890MHz (10MHz)
	アンテナパタン@設置高	無指向性 0dBi@1.5m	
	送信出力	20dBm	
	最小受信電力	-85dB	
	キャプチャ受信電力差	10dB	
	変調方式	1/2QPSK-OFDM	
	伝送速度	6Mbps	
	送信周期 (1 サイクル)	100 ミリ秒	
	パケットサイズ	100 バイト	
	隊列制御	車群の上限台数	10
		車群の除外時間	5 秒
走行制御	自動追従制御係数	$k_a=1.0, k_d=0.1, k_v=0.58$	
	設定車間時間	自動 0.5 秒, ドライブ 1.4 秒	
	最大・最小加速度	最大 2.0m/s ² , 最小 -3.0m/s ²	
	最大速度	120km/h	
	最小車間距離	2m	
	車体長	5m	

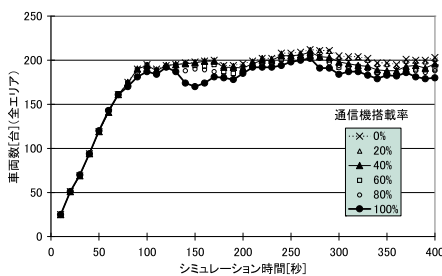


図 8 車両数の時間推移

Fig. 8 Sim. time vs. #vehicles.

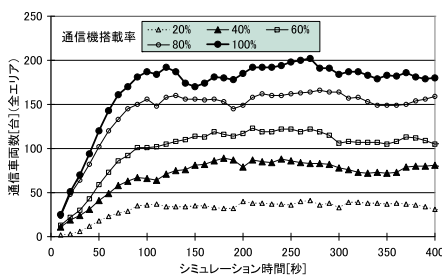


図 9 通信車両数の時間推移

Fig. 9 Sim. time vs. #comm. vehicles.

4.2 評価結果

シミュレーションエリアに存在する車両数や通信車両数の時間推移を図 8, 図 9 に示す. 約 100 秒目以降は定常状態となる様子が分かる. 図 8 によれば, 搭載率の増加にともない車両数が微減する. これは速度が増加して早く退出するためと思われるが, 速度については後述する. 搭載率 100%での, 通信距離に対するパケット到達・受信失敗の割合を図 10 に示す. 計測エリア内に存在する受信車両によって測定し, 送信車両は全エリア対象とする. 今回の条件ではビット誤りはなく, 600m を超えるあたりから最

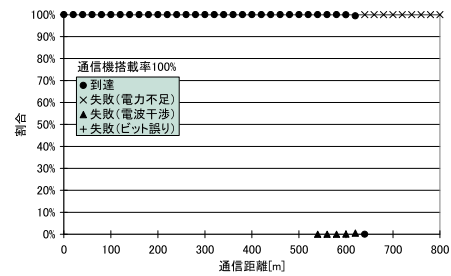


図 10 通信距離に対するパケット到達・受信失敗の割合

Fig. 10 Comm. distance vs. ratio of packet delivery and drop.

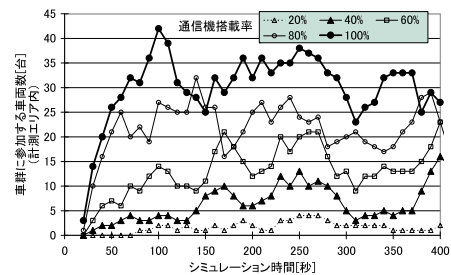


図 11 車群参加車両数の時間推移

Fig. 11 Sim. time vs. #vehicles in platoon.

小受信電力 -85dB 以下となって受信失敗となる. 図 9 によれば通信車両数はおよそ 180 台であるが, 100 ミリ秒の送信周期の場合, 通信帯域は飽和せず電波干渉もほとんど確認されなかった.

続いて, 車群通信について調べる. 車群へ参加する車両数の時間推移を図 11 に示す. リーダが計測エリア内に存在する車群を計測対象とする. 搭載率に対する 100~400 秒の区間平均値は (20%, 40%, 60%, 80%, 100%) = (2.0, 7.1, 14.9, 23.3, 32.0) であり, 搭載率 100%での車群参加車両数 32.0 で割って求めた車群参加率と, 簡易的な計

算で求めた通信車両の隣接率を比較したグラフを図 12 に示す。この計算内容は、搭載率を考慮した乱数によって生成した通信車両と非通信車両を 1 列に並べていき、通信車両と隣接する通信車両の数を求めた。車群参加率は若干下回るが全体としては同等の傾向を示しており、隣り合う通信車両どうして設計どおり車群を形成する様子が確認できる。1 車群あたりの車両数の割合を図 13 に示す。搭載率の増加にともない車群のサイズが大きくなる傾向が確認できるが、搭載率 100% の場合でも各サイズが同程度に存在

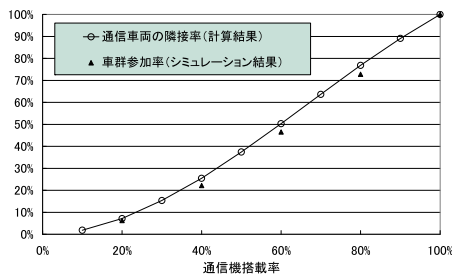


図 12 通信車両隣接率と車群参加率の関係

Fig. 12 Probability of neighboring vehicles and joining group.

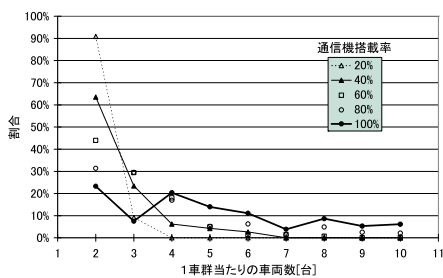


図 13 1 車群あたりの車両数の割合

Fig. 13 Ratio of #vehicles in a platoon.

する。車群の上限台数を超える合流は行わないため、このような特性を示すものと考えられる。車間時間と車間距離を図 14、車両速度と車両加速度を図 15 に示す。計測エリア内の走行車両を対象とする。図 14 左側の車間時間で 0.6 秒付近と 1.8~2.0 秒付近に山が現れ、搭載率が高いほど 0.6 秒付近へ山がシフトするが、搭載率 100% では低くなだらかな山となる。車群通信により自動追従車両が増加するが、搭載率 100% の場合は、ほぼすべての車両が車群に参加して自動追従となり、最高速度に達して加速できず、車間を詰められないためと考えられ、図 15 においてその様子が確認できる。

4.3 シミュレータの実行特性の評価

最後に、本シミュレータの実行特性について紹介する。実行環境は次のとおりとなる。CPU: Intel Xeon X5570 (2.93 GHz), メモリサイズ: 12 GByte, ディスクサイズ: 4 TByte, OS: CentOS release 5.3 (Final), データベース: PostgreSQL 8.4.4. なお、本シミュレータはマルチスレッドには対応していない。

図 9 のグラフによれば、通信車両数の 100~400 秒の区間平均値はおよそ (20%, 40%, 60%, 80%, 100%) = (36, 80, 113, 156, 186) である。この通信車両数の区間平均値に対する本シミュレータで生成したデータ量のグラフを図 16 に示す。データ量は通信車両数の 2 乗のオーダーで増加する様子が確認でき、1 回の送信に対して複数の無線機が受信することの影響が、本シミュレータの記録において支配的であると考えられる。

これらのデータ量に対するシミュレーション、および解

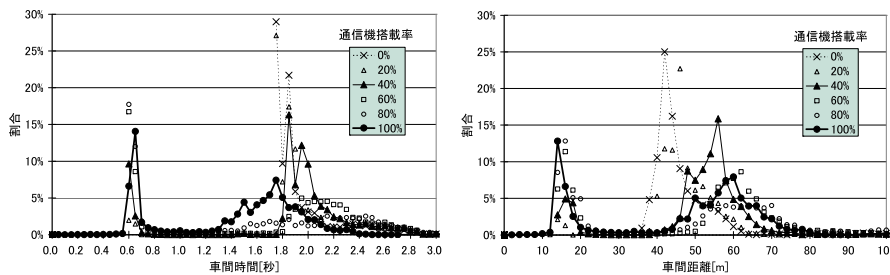


図 14 車間時間 (左)・車間距離 (右) の割合

Fig. 14 Ratio of time distance (left) and gap distance (right).

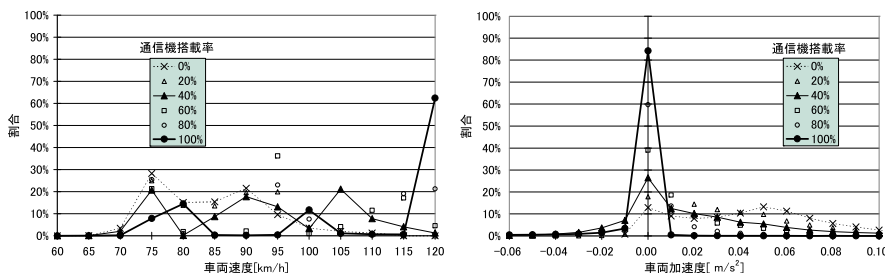


図 15 車両速度 (左)・車両加速度 (右) の割合

Fig. 15 Ratio of vehicle speed (left) and vehicle acceleration (right).

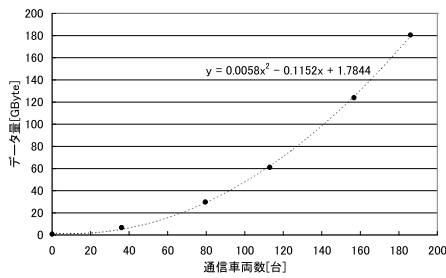


図 16 通信車両数とデータ量の関係

Fig. 16 #Comm. vehicles vs. simulation data amount.

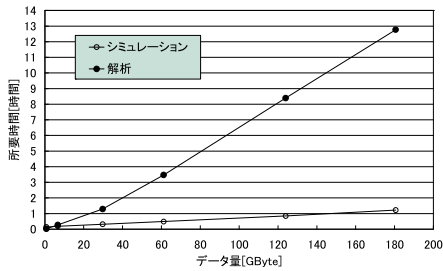


図 17 データ量と所要時間の関係

Fig. 17 Simulation data amount vs. required time.

析に要する時間のグラフを図 17 に示す。いずれの所要時間もデータ量に比例する様子が確認できるが、解析に要する時間がシミュレーション時間に対して 10 倍程度大きいことが分かった。

今回の評価では、シミュレーションの高速化以上に、解析の効率化が重要であると考えられる。1 回のシミュレーションですべての通信状況を記録して解析の自由度を高めるよりは、解析内容をふまえて限定的、かつ合理的に記録したほうが、後日解析内容を追加して再度シミュレーションを行ったとしても効率が良い可能性がある。

シミュレーションの精度に関しても簡単に考察を行う。タイムステップ間隔は交通流シミュレータが最も大きく、100 ミリ秒となる。最大速度 120 km/h の場合、約 3 m 進む計算となり、2 台の無線機の 1 タイムステップの距離差は最大で 6 m となる。今回の評価では、図 10 のとおり 600 m まで 100% 通信可能な状況であり、無線通信シミュレータの減衰・干渉計算に対する 1% 程度の距離差の影響は無視できるものとする。

5. まとめと今後の課題

交通流シミュレータと無線通信シミュレータを統合プラットフォーム上で連携させたシミュレータを構築し、車群通信の通信・隊列機能の振舞いや動作特性を定量的に評価した。IEEE802.11p の通信 (パケット長 100 バイト, 送信周期 100 ミリ秒) は、高速道路における自由流のワーストケースを想定したシナリオにおいて、通信機搭載率 100% でも通信帯域が飽和しないことを確認した。また通信機搭載率の増加に対する特性からは設計どおり、隣り合

う通信車両どうして車群を形成し、車群の上限台数を超える合流は行わない様子を確認した。車間時間からも車群通信によって自動追従車両が増加したことが確認できたが、通信機搭載率 100% の場合は、なだらかな車間時間分布が確認された。ほぼすべての車両が自動追従となって最高速度に達したため加速できず、車間を詰めきれなかったためと考察する。さらにシミュレータの実行特性についても評価を行い、通信の様子をそのまま記録するよりも、解析内容をあらかじめ意識して限定的、かつ合理的に記録することの必要性について言及した。

今後に向けた課題として、割込みや離脱に対する車群通信の評価が考えられるが、これらは高速道路の合流箇所や車線減少箇所における側方合流支援の設計とペアにして検討することが望ましいと思われる。ほかには、各種設定値に対する評価、他の隊列方式との比較、評価対象に応じた構成機能の高度化 (電波遮蔽や回折の考慮など)、評価指標の充実 (走行情報やスリップストリーム効果を考慮した環境性能) などが考えられる。効率的、かつ普遍的な評価方法については、継続的な検討が望まれる。

参考文献

- [1] Shladover, S.E.: Automated Vehicles for Highway Operations (Automated Highway Systems), *Proc. Institution of Mechanical Engineers Part I: J. Systems and Control Engineering*, Vol.219, No.1, pp.53-75, London, UK: Professional Engineering Publishing (2005).
- [2] 700 MHz 帯を用いた運転支援通信システムの実験用ガイドライン (ITS FORUM RC-006 1.0 版), ITS 情報通信システム推進会議 (2009), 入手先 (<http://www.itsforum.gr.jp/Public/J7Database/p34/ITSFORUMRC006V1.0.pdf>).
- [3] ITS Standards Fact Sheets: IEEE 1609 - Family of Standards for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE), U.S. Department of Transportation (2009), available from (http://www.standards.its.dot.gov/fact_sheet.asp?f=80).
- [4] CAR 2 CAR Communication Consortium Manifesto Overview of the C2C-CC System (Version 1.1), CAR 2 CAR Communication Consortium (2007), available from (http://www.car-to-car.org/fileadmin/downloads/C2C-CC_manifesto.v1.1.pdf).
- [5] van Arem, B., van Die, C.J.G. and Visser, R.: The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.7, No.4, pp.429-436, IEEE ITS Society (2006).
- [6] Shladover, S.E., Nowakowski, C., Cody, D. and O'Connell, J.: Cooperative Adaptive Cruise Control: Field Testing of Driver Use and Acceptance, *Proc. ITS World Congress* (2009).
- [7] Fritz, H., Bonnet, C., Schiemenz, H. and Seeberger, D.: Electronic Tow-Bar Based Platoon Control of Heavy Duty Trucks Using Vehicle-Vehicle Communications: Practical Results of CHAUFFEUR2 Project, *Proc. ITS World Congress* (2004).
- [8] Shida, M. and Nemoto, Y.: Development of a Small-Distance Vehicle Platooning System, *Proc. ITS World Congress* (2009).

- [9] Lu, X.-Y.: Automated Vehicle Merging Maneuver Implementation for AHS, *Vehicle System Dynamics*, Vol.41, No.2, pp.85–107, London, UK: Taylor & Francis (2004).
- [10] Tsugawa, S., Kato, S., Tokuda, K., Matsui, T. and Fujii, H.: A Cooperative Driving System with Automated Vehicles and Inter-Vehicle Communications in Demo 2000, *Proc. IEEE Intl. Conf. Intelligent Transportation Systems*, pp.918–923, IEEE ITS Society (2001).
- [11] 大西亮吉, アルトウンタシュオヌル, 吉岡 顕, 志田充央, 根本雄介: 協調的隊列走行のための車群通信技術の検討, 情報処理学会研究報告, Vol.2010-ITS-42, No.8 (2010).
- [12] 吉岡 顕, 小佐井潤, 本多輝彦: ITS 通信アプリケーション評価用統合シミュレータの開発, 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol.2007, No.1, pp.DS-1 (2007).
- [13] 安全運転支援システムの通信系シミュレータに関するフェジビリティスタディ報告書—要旨, (財)機械システム振興協会 (2008), 入手先 (<http://www.jari.or.jp/ja/kankohbutsu/hokoku/its/chosa/abstract/20-F-9-a.pdf>).
- [14] 安全運転支援システムの統合シミュレータに関するフェジビリティスタディ報告書—要旨, (財)機械システム振興協会 (2009), 入手先 (http://jari.jp/resource/pdf/O13_its/its_100517.pdf).
- [15] 石田 亨, 桑原和宏, 片桐恭弘: 分散人工知能, コロナ社 (1996).
- [16] 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, シミュレーション, Vol.23, No.4, pp.228–237, 日本シミュレーション学会 (2004).
- [17] 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, 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol.2008, No.14, pp.233–234 (2008).
- [18] IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems–Local and metropolitan area networks–Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments, IEEE Std 802.11p-2010, IEEE (2010).
- [19] Ramachandran, K., Gruteser, M., Onishi, R. and Hikita, T.: Experimental Analysis of Broadcast Reliability in Dense Vehicular Networks, *IEEE Vehicular Technology Mag.*, Vol.2, Issue 4, pp.26–32, IEEE Vehicular Technology Society (2007).
- [20] 牧野浩志, 大内浩之, 平沢隆之, 山田康右: 車線利用率適正化によるサグ部交通渋滞の削減, 土木技術資料, Vol.47, No.10, pp.38–43, (財)土木技術センター (2005).



吉岡 顕 (正会員)

1991年東京大学大学院工学系研究科原子力工学専攻博士課程修了。1992年東京大学大型計算機センター助手, 1997年同教育用計算機センター助教授, 2001年(株)トヨタIT開発センターより現職。自動車向け無線ネットワーク, およびシミュレーションによる評価手法の研究に従事。



大西 亮吉 (正会員)

1999年東京大学工学部電子情報工学科卒業。2001年同大学大学院電子情報工学専攻修士課程修了。2001年(株)トヨタIT開発センターより現職。自動車向け無線ネットワーク, およびシミュレーションによる評価手法の研究

に従事。