

## 隊列走行のための動的な隊列管理手法の提案

内川 亜美<sup>†1</sup> 羽鳥 遼平<sup>†1</sup>  
黒木 智也<sup>†1</sup> 重野 寛<sup>†2</sup>

隊列走行は複数の車両が短い車間距離を保ち、高密度な隊列を形成しながら走行するものである。隊列走行において、車車間通信による支援が行われる。既存の情報伝播方式では、隊列 ID を割りあてることにより隊列内車両を識別し、Broadcast, Unicast での伝搬を行ってきた。しかし、既存の伝搬方式では通信状態による隊列内車両の変化を考慮していない。そこで、本稿では隊列走行を支援するために、走行時の隊列内車両変化を考慮した、隊列内マルチキャスト手法 FilterMulticast を提案する。提案方式では、隊列内車両管理制御、パケット伝播制御を行う。前者では Bloom-Filter を用いた隊列フィルタを作成し、隊列内車両管理を行う。後者では作成した隊列フィルタを用いた隊列内車両識別により隊列内マルチキャストを行う。シミュレーションにより提案手法の性能を評価し、有効性を示す。

### A proposal of Dynamic Convoy Maintenance Scheme

AMI UCHIKAWA,<sup>†1</sup> RYOHEI HATORI,<sup>†1</sup> TOMOYA KUROKI<sup>†1</sup>  
and HIROSHI SHIGENO<sup>†2</sup>

ITS supports flexible platooning using Inter-Vehicle Communication. Flexible platooning here means that the vehicles take such formations as platooning including lane changing, over taking, cutting-in, merging, and transitions between them for compatibility of safety and efficiency of road traffic in the driving system. The multicast communication is suitable in flexible platooning. But there was no protocol that considered mobility of vehicle up to now. In this paper, we propose FilterMulticast, combining dynamic car group formation control and packet transmission control. We evaluate our proposal using simulations, and show the effectiveness of the proposal.

### 1. はじめに

現在、自動車の増加は大気汚染、交通渋滞、交通事故など様々な問題を投げかけている。そのような交通問題を改善する方法の一つとして車両の隊列走行がある。隊列走行とは、複数の車両が短い車間距離を保ち、高密度な隊列を形成しながら走行するものである。空気抵抗減少によるエネルギー消費削減や、道路容量増大による渋滞抑制が期待出来る<sup>1)-3)</sup>。

隊列形成時に隊列を組む車両同士の車両位置情報や前方の障害物情報の伝播において車車間通信による支援が行われる。車車間通信を利用することにより、車間距離維持や車両の合流・離脱が頻繁に発生する車両交通状況への最適化を行うことが可能である。

DEMO2000<sup>5)</sup>, IMTS<sup>6)</sup> では隊列協調走行実験が行われた。DEMO2000 では隊列を形成し、隊列走行、2つの隊列の分流、1つの隊列への合流、障害物検出と回避が実現された。その際、車車間通信によって自車両位置、速度、方向などの情報伝搬による支援が行われた。

これらの実験では、隊列車両にはあらかじめ車両を識別する車両 ID が割り振られており、複数の隊列走行を行う IMTS では隊列を識別する隊列 ID が割り振られている。隊列を形成した後での実験であり、隊列形成方法については考慮されていない。また、実際の車両交通状況では隊列車両は複数存在し、車両 ID の割り当て手法の考慮が必要である。

そこで本稿では、走行時の隊列内車両変化を考慮した隊列内マルチキャスト手法 FilterMulticast を提案する。提案方式は、隊列内車両管理制御、パケット伝播制御から構成される。隊列内車両管理制御では、通信範囲に応じた隊列を形成し、隊列内車両情報を登録した隊列フィルタによる隊列内車両管理を行う。パケット伝播制御では、生成した隊列フィルタを用いた隊列内車両識別により隊列内マルチキャストを行う。提案手法の性能をシミュレーションにより評価し、低い通信量での動的な隊列管理と隊列内マルチキャストを実現させる。

### 2. 関連研究と問題点

#### 2.1 隊列走行

隊列走行とは、複数の車両が短い車間距離を保ち、隊列を形成しながら走行する形態である。車車間通信を用いて同軸制御情報や合流制御情報伝搬による隊列走行支援が行われる<sup>4)</sup>。

<sup>†1</sup> 慶應義塾大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Technology, Keio University

<sup>†2</sup> 慶應義塾大学理工学部

Faculty of Science and Technology, Keio University

同軸制御とは、後続車両が先行車両の走行軌跡上を走行するように行う制御である。前方車両の位置情報をもとに同軸制御を行うと、後続の車両ほど先行車両との追従誤差が蓄積する。そこで、車車間通信を用い、前方車両の位置情報を全ての後続車両が受信することにより、より高精度な同軸制御が可能となる。

合流制御とは、隊列に車両が合流する際に行われる制御である。車両が隊列に合流する際には、合流車両直後の車両は急激な減速が余儀なくされ、交通流の不安定化を招く。そこで、合流以前に合流車両と隊列内車両で車車間通信を確立することであらかじめ合流車両の合流位置を予測することが必要である。

## 2.2 隊列走行に必要な通信

車車間通信は、経路構築をしてから情報伝搬を行う経路構築手法、制御パケットにより近隣車両の把握をし、中継車両選択を行うユニキャストベースの伝搬手法、経路構築をしないブロードキャストベースの伝搬手法に分類できる。

隊列走行時の通信はリアルタイム性が求められる。しかし、経路構築手法はリアルタイム性がない。これは、通信要求開始からパケットを送信するまでに時間がかかってしまい、パケット送信時と受信時でパケット内の情報に差が出てしまうからである。隊列走行時の制御情報の一つに同軸情報がある。同軸情報は 5msec 間隔の伝播が要求される<sup>5)</sup>。経路構築手法による要求達成は困難である。

ユニキャストベースの伝搬手法はリアルタイム性に優れている。また、制御パケットによる近隣車両情報を把握し、その情報を基にパケット伝搬を行うのでパケット受信車両に無駄がない。しかしユニキャストでのパケット伝搬は隊列内車両の数だけ通信が相互に生じる。よって通信により生じるトラフィック量が増加し、帯域圧迫が懸念される。その結果帯域圧迫が発生すると、パケット衝突によるパケット到着率の低下を招き隊列管理が困難となる。

ブロードキャストベースの伝搬手法はリアルタイム性に優れており遅延に関しては問題がない。しかし、パケット受信車両に冗長が生じる。隊列走行時は車両が高密度に存在する。そのため、多くの隊列外車両がパケットを受信する。その結果、各車両の処理量が增大する。

よって、隊列走行時における情報伝搬手法には、経路構築せず、受信車両に無駄のないブロードキャストベースのマルチキャストが適している。

マルチキャストを一般化した情報伝搬手法にジオキャストがある。ジオキャストは宛先領域を指定し、宛先領域内の全ての車両へパケットを伝搬する手法である。ジオキャストは位置情報に基づき受信車両の特定を行う。車両の移動性によって宛先領域内に存在する車両は

変化し、パケットを受信を行う特定車両が変化する。したがって、隊列内車両のようにあらかじめ特定された車両への情報伝搬は考慮されていない。

## 2.3 既存研究の問題点

既存研究に DEMO2000<sup>5)</sup>、IMTS<sup>6)</sup> がある。DEMO2000 では、5 台の自動車を用いた隊列協調走行実験を行っている。5 台の車両が隊列を形成し、隊列走行、2 つの隊列の分流、1 つの隊列への合流、障害物検出と回避を行った。その際、車車間通信によって自車両位置、速度、方向などの情報伝搬による支援が行われた。実験では車車間通信プロトコルとして DOLPHIN が用いられた。愛知万博ではバスと鉄道の両方の機能を持つ交通システム IMTS が実用化され、約 180 万人の人が乗車した。IMTS は専用軌道上を 2~3 台のバスが隊列を組み自動運転し、軌道終端部では隊列が解体され、各バスが単独での手動運転を行った。その際、隊列内先頭車両への情報伝達による隊列管理や車間距離維持のための隊列内車両間隔制御情報に車車間通信が用いられた。

これらの実験では、隊列車両にはあらかじめ車両を識別する車両 ID が割り振られており、複数の隊列走行を行う IMTS では隊列を識別する隊列 ID が割り振られている。隊列を形成した後での実験であり、隊列形成方法については考慮されていない。実際の車両交通状況では車両の移動性により隊列内車両の離脱加入が頻繁に発生する。よって、車両の移動性を考慮した動的な車両形成を行う必要がある。また、実際の車両交通状況では隊列車両は複数存在し、車両 ID の割り当て手法の考慮が必要である。

## 3. Filter Multicast

本稿では、隊列走行を支援するために、走行時の隊列内車両変化を考慮した隊列内マルチキャスト手法 FilterMulticast を提案する。提案方式は、隊列内車両管理制御、パケット伝播制御から構成される。隊列内車両管理制御では、通信範囲に応じた隊列形成と、隊列内車両情報を登録した隊列フィルタによる隊列内車両管理を行う。パケット伝搬制御では、生成した隊列フィルタを用いた隊列内車両識別による隊列内マルチキャストを行う。これらを行うことにより提案手法の性能を評価し、低い通信量での動的な隊列管理を可能とし、隊列内マルチキャストを実現させる。

なお、前提条件として各車両は GPS 等により自車両の位置を把握し、各車両の車両 ID (ナンバープレート等) はあらかじめ決められているものとする。以下に提案の詳細を示す。

### 3.1 隊列内車両管理制御

隊列内車両管理制御では、通信範囲に応じた隊列形成、隊列内車両情報を登録した隊列フィルタによる隊列内車両管理を行う。

#### 3.1.1 隊列形成

車両の移動性と通信範囲を考慮した動的な隊列形成手法について説明する。本提案では、車両をマスタ車両・メンバ車両・ノーマル車両の3種に分類する。車両発生時はノーマル車両とし、隊列はマスタ車両とメンバ車両から成る。本提案で使用するマスタパケットにはマスタ車両の車両フィルタ、位置情報が入っている。車両フィルタについては次節で説明する。隊列を形成するマスタ車両の特徴・動作、メンバ車両の特徴・動作について述べる。

- マスタ車両

隊列の先頭に位置する車両である。隊列運動に対して指令を出す。本提案では通信上のマスタとして機能する。マスタパケットを、定期的 ( $t$ ) にブロードキャストする。前方のマスタ車両からマスタパケットを受信すると、メンバ車両となる。

- メンバ車両

マスタ車両の後続車両である。マスタ車両の指令により隊列運動を行う。定期的 ( $t$ ) にマスタパケットを受信する。一定時間 ( $> \Delta t$ ) マスタパケットを受信しないと、自らがマスタ車両となる。

図1は車両状態の遷移図である。ノーマル車両はマスタ車両からのマスタパケット (Mpck) を受信すると、メンバ車両となる (図中 a)。メンバ車両は一定時間マスタ車両からマスタパケット (Mpck) を受信しないと、マスタ車両となる (図中 b)。マスタ車両は前方の他隊列マスタ車両からマスタパケット (Mpck) を受信しないと、マスタ車両のままである (図中 c)。マスタ車両は前方の他隊列マスタ車両からマスタパケット (Mpck) を受信すると、メンバ車両となる (図中 d)。隊列から離脱したメンバ車両はノーマル車両となる (図中 e)。以上のように、通信範囲に応じた動的な隊列形成を行う。

#### 3.1.2 隊列内車両管理

隊列内車両情報を登録した隊列フィルタによる隊列内車両管理について説明する。隊列フィルタは隊列 ID の役割を果たし、隊列内車両識別を行う長さ  $m$  ビットの配列である。この際、Bloom-Filter を用いる。

隊列フィルタ生成手順を例を用いて説明する。隊列内車両は自車両のナンバープレート番

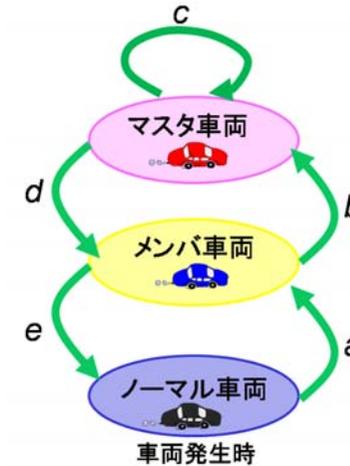


図1 車両状態遷移図

号をハッシュにかけ、 $n$  個のハッシュ値を得る。隊列内車両はすべての値が0にセットされた  $m$  ビットの配列を用意する。これを本提案では車両フィルタと呼ぶ。そして、車両フィルタ内のハッシュ値番目のビットを1にセットする。図2では車両Aは自車両のナンバープレート番号をハッシュにかけ、3つのハッシュ値  $\{a3, a11, a12\}$  を得たとする。このとき、車両Aに対応する車両フィルタは  $S_A = \{a3, a11, a12\}$  番目のビットが1となっている。車両Bの車両フィルタ  $S_B$ 、車両Cの車両フィルタ  $S_C$  も同様である。マスタ車両はマスタパケットとして自車両フィルタをブロードキャストする。マスタパケットを受信した各メンバ車両は、マスタ車両へ自車両フィルタを返信する。マスタ車両は受信した各メンバ車両フィルタを統合し、隊列フィルタを生成する。車両A、車両B、車両Cが属する隊列の隊列フィルタ  $S_{A,B,C}$  は  $S_A \cup S_B \cup S_C$  により生成される。図中の例では、車両A、B、Cが属する隊列フィルタ  $S_{A,B,C}$  は  $\{a1, a2, a3, a5, a7, a9, a10, a11, a12\}$  番目のビットが1にセットされている。

### 3.2 パケット伝播制御

隊列内マルチキャストを実現するパケット伝搬制御について例を用いて説明する。パケット伝搬制御では、隊列フィルタを用いた隊列内車両識別により、パケットを受信した車両が

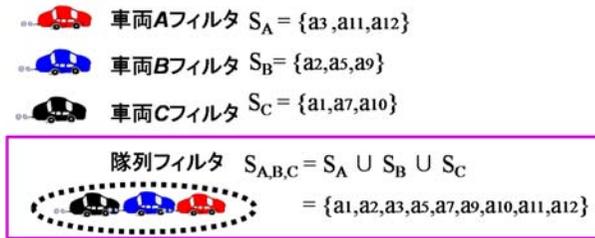


図 2 隊列フィルタ生成例

自律的に隊列内車両であるか否かを判断することで隊列内マルチキャストを実現する。

マスタ車両はデータパケットを送信する際に、隊列フィルタをパケットのヘッダに挿入し、ブロードキャストする。パケット受信車両は、ヘッダに挿入されている隊列フィルタに自車両が含まれているか否かを識別する。図 3 の隊列フィルタ  $S_{convoy}$  は  $\{a1, a2, a3, a5, a7, a9, a10, a11, a12\}$  番目のビットが 1 にセットされている。車両 B の車両フィルタ  $S_B$ 、車両 D の車両フィルタ  $S_D$  も同様である。車両 B がパケットを受信する際には、 $S_{convoy, B} = S_{convoy} \cup S_B$  により車両 B フィルタ  $S_B$  と一致する。よって、車両 B は自車両が隊列内車両であると判定し、パケットを受信する。一方  $S_{convoy, C} = S_{convoy} \cup S_C$  は車両 C フィルタ  $S_C$  と一致しない。よって、車両 C は自車両が隊列外車両であると判定し、パケットを受信しない。以上のように、隊列フィルタを用い各車両が隊列内車両識別を行い、パケットを受信するか否かを判断することにより、隊列内マルチキャストを行う。

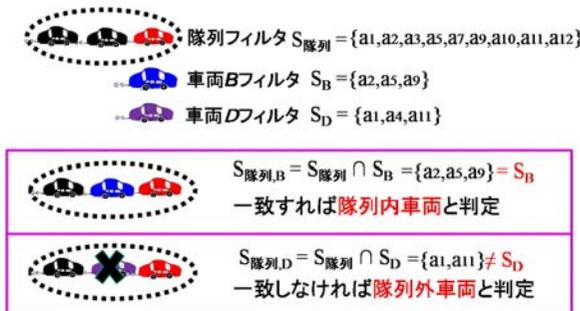


図 3 隊列内マルチキャスト手法

## 4. シミュレーション評価

### 4.1 シミュレーション条件

表 1 にシミュレーションパラメータを、図 4 にシミュレーションモデルを示す。図中の赤い車両はマスタ車両、青い車両はメンバ車両を示している。

表 1 シミュレーション条件

モデル	二車線直線道路
平均速度	100km/h
走行距離	1km
通信可能範囲	100m
マスタパケット送信周期	(150, 200, 400, 600, 750, 1000)msec
データパケット送信周期	20msec
隊列フィルタサイズ	32B
最大伝送速度	11Mbps

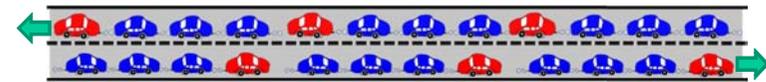


図 4 シミュレーションモデル

シミュレーションでは、一定の車頭間隔となるように車両を発生させた。そして無線通信距離に基づき、マスタ車両の通信範囲内に存在する後続車両をメンバ車両とみなし、隊列を形成した。マスタ車両の通信範囲外車両は自らがマスタ車両となり、同様に隊列形成を行った。隊列形成後、マスタ車両からメンバ車両へ定期的にデータパケットを送信した。無線通信距離は、IEEE802.11b の使用を想定し、最大通信距離は 100m としている。二車線直線道路へ入ってきた車両から隊列形成し、1km 隊列走行する。

用いた隊列フィルタサイズは無線通信距離内に入る車両台数を考慮し、BloomFilter の性質である誤判断確率が充分に小さくなるように設定した。誤判断確率とは、隊列外車両が隊列内車両であると誤って判断する確率である。

上記の条件でシミュレーションによる評価を行う。

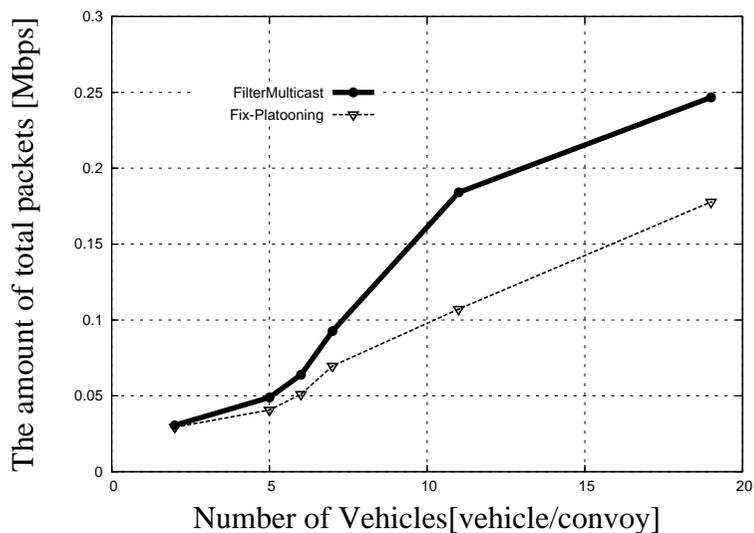


図 5 総送信量

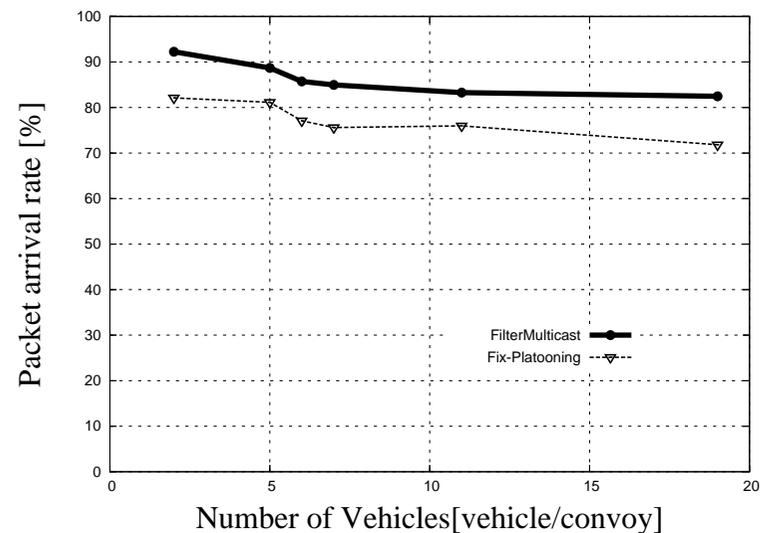


図 6 パケット到着率

## 4.2 比較対象および評価項目

### 4.2.1 比較対象

本研究の提案方式である FilterMulticast と隊列内車両と隊列 ID を固定したマルチキャスト Fix-Platooning を比較対象とした。Fix-Platooning はあらかじめマスタ車両とメンバ車両は決まっており、隊列 ID は固定値で走行前に割り当てられる。

### 4.2.2 評価項目

以下の 2 つの項目について評価した。

- 総送信量

シミュレーション時間内に送信された総パケット数を示す。

- パケット到着率

マスタ車両送信パケット数と同隊列内メンバ車両受信パケット数の比率を示す。メンバ車両と異なる隊列に属しているマスタ車両からのパケットはロスパケットとした。

## 4.3 シミュレーション結果と考察

以下にシミュレーション結果を示し、それぞれについて考察を行う。

### 4.3.1 総送信量

図 5 に隊列内の車両台数を変化させたときの総パケット送信量のグラフを示す。全体的な傾向として、隊列内車両台数の増加に伴い、送信パケット数が増加している。これは、隊列内車両台数が増加するにつれ、送信されるパケット数も増加するからである。加えて、隊列走行時は隊列内車両台数の増加に伴い、隊列内車両の最後尾車両の離脱発生が増加する。提案手法の総送信量には隊列内車両発生時に新たに隊列フィルタを生成するパケット数も含まれている。

それにも関わらず、提案手法は Fix-Platooning との送信量の差が最大 0.07Mbps に抑制されている。

提案により、低通信量での隊列形成が行われたことがわかる。

### 4.3.2 パケット到着率

図 6 に隊列内の車両台数を変化させたときのパケット到着率を示す。Fix-Platooning ではパケット到着率が低下している。これは、車両の移動性によりマスタ車両から通信範囲外となるメンバ車両が発生し、パケットを受信できないからである。これに対し、提案手法では、パケット到着率が上昇している。これは車両の移動性を考慮し、車両の通信範囲に応じ

動的な隊列形成と、隊列内車両の隊列からの離脱に応じた動的な隊列フィルタによる隊列内車両管理を行っているからである。提案手法のケットロスの理由として、異なる隊列からのケット受信が挙げられる。また、隊列フィルタ生成過程での誤りや隊列フィルタ生成途中でケット送信が開始されたことが考えられる。

提案により、車両の移動性を考慮した動的な隊列管理とケット伝搬を行うことでケット到着率 80%以上となることがわかる。

## 5. おわりに

本研究の目的は、隊列走行における動的な隊列形成と隊列内マルチキャスト実現である。隊列走行時は、隊列内車両への情報伝搬が必要である。隊列内車両への情報伝搬には、マルチキャストが適している。しかし、車両の移動性により隊列内車両は頻繁に変化する。そこで、車両の移動性を考慮した隊列管理が必要となる。

本稿では、動的な隊列管理による隊列内マルチキャスト手法 FilterMulticast を提案した。提案方式では、隊列内車両管理制御、ケット伝播制御を行う。隊列内車両管理制御では、通信範囲に応じた隊列形成、隊列内車両情報を登録した隊列フィルタによる動的な隊列内車両管理を行った。ケット伝搬制御では、生成した隊列フィルタを用いた隊列内車両識別による隊列内マルチキャストを行った。

シミュレーションでは固定のメンバーによる隊列形成・隊列走行を対象として、固定的な隊列 ID を割り当てた Fix-Platooning と提案手法の比較を行った。その結果、本方式は Fix-Platooning に対し隊列形成にかかるケットの総送信量の上昇を最大 0.07Mbps に抑え、隊列内車両へのケット到着率を改善することが出来た。

以上より、車両の移動性を考慮し、通信範囲に応じた隊列形成と車両情報を登録した隊列フィルタを生成することにより隊列マルチキャストを可能とする提案手法は動的な隊列管理手法という観点で有効であると言える。

## 参 考 文 献

- 1) Hsu, Ann, Sachs, Sonia, Eskafi, Farokh, Pravin: The Design of Platoon Maneuvers for IVHS, 1991, Vol.3, 2545-2550.
- 2) 中谷仁志: 先行車の後流中における追従車の空力特性, 自動車技術会学術講演会, 1991, pp2185-2188.
- 3) Y.Toor, P.Muhlethaler, A.Laouiti: Vehicle Ad Hoc networks: applications and related technical issues, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.10, No.3,

pp.74-88 (2008).

- 4) 大前学, 藤岡健彦, 三宅浩四郎: ITS 研究における DGPS と車車間通信を利用した周囲車両の相対位置計測に関する研究, 日本機械学会論文集, Vol.67, pp.1492-1498 (2001).
- 5) 徳田清仁: デモ 2000 協調走行の車車間通信技術, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.100, No.576, pp.25-30 (2000).
- 6) 財団法人鉄道総合技術研究所: 自動運転バス「IMTS」の開発現状について, <http://www.rtri.or.jp/>