

ICVS「シティパル」に搭載した 自動運転システム：隊列回送機能

Autonomous Vehicle Control System of ICVS City Pal: A Platooning System

田村 和也*	石山 真人*
Kazuya TAMURA	Mahito ISHIYAMA
藤巻 朋*	望月 和彦*
Tomo FUJIMAKI	Kazuhiko MOCHIZUKI

要 旨

ナビゲーションシステムと車車間通信を用いた車群走行制御システムにレーダセンシングシステムを協調させることで、インフラストラクチャに依存しない車群走行制御システム、すなわち、先頭車自動追従走行システムを確立した。先頭の車両がマニュアル運転で走行した軌跡を、追従車群が自動走行でトレースするものである。車間距離2m、最大連結台数5台、最高速度100km/hの車群走行を達成している。追従制御の精度は、縦方向±0.3m、横方向±0.2mである。

ABSTRACT

A platooning system, in which vehicles follow a lead vehicle without the road infrastructure, by combining radar sensing systems and the platooning system with inter-vehicle communication and navigation system has been developed. It tracks automatically the trace line of a lead vehicle. The maximum of five vehicles including a lead vehicle with the minimum vehicle-to-vehicle distance of 2 meters run at the maximum speed of 100km/h. The accuracy of tracking control was within ±0.3m in the longitudinal direction and ±0.2m in the lateral direction.

1. まえがき

本田は1994年にIntelligent Community Vehicle System (ICVS)という新しい形の共同利用システムを提案し、1998年に栃木県茂木町にあるツインリンクもてぎという本田のモビリティパークの中で、デモンストレーションと一部運用という形で具現化した。ICVSは4タイプの車両を用いて運用され、この中でシティパルと呼ばれる小型の電気自動車に自動運転機能が組み込まれた。ここに組み込まれた自動運転機能はインフラストラクチャを用いた自動駐車機能、自動迎車機能と、インフラストラクチャを必要としない隊列回送機能である。

インフラストラクチャを必要としない隊列回送は、先頭のマニュアル走行の車両を、後続の車両が自動走行で追従するもので、先頭車両の走行軌跡を正確にトレースしていくシステムである。この自動追従走行機能は、ナビゲーションシステムと車車間通信システムとレーダセンシングシステムとの協調により達成された。

ここでは、ICVSに搭載したインフラストラクチャを必要としない先頭車自動追従走行システムについて報告する。

2. 先頭車自動追従走行システム

インフラストラクチャを用いる自動追従システムでは、道路の車線中央ライン(または、車線区分線)との相対位置や姿勢に基づき車両制御を行っているのに対し、インフラストラクチャを必要としない自動追従システムは、前走車との相対位置や姿勢に基づいて車両制御を行う点が異なっている。インフラストラクチャを必要としない自動追従システムとしての先頭車自動追従走行システムは、国内外のAHSプロジェクトやITS世界会議等で、すでにいくつかの方式が提案されている^{1)~4)}。

立花ら¹⁾は、先頭車自動追従システムとして、赤外線ランプを先頭車後方に設け、追従車両に設けられたカメラによりその位置を計測し、先頭車に対する追従車の相対位置と姿勢を検出するシステムを報告している。ここで用いられた赤外線ランプとカメラは赤外線を用いた車車間通信を兼ね備えており、先頭車の車速、加速度、操舵角、ブレーキ信号を後続車に伝送する。

Schulzeら²⁾は立花らと同様に先頭車自動追従システムとして赤外線ランプを先頭車後方に設け、追従車両に搭載

*栃木研究所

したカメラでその位置を計測し、先頭車に対する追従車の相対位置と姿勢を検出するシステムを報告している。ここで採用した車車間通信は、5.8GHz帯の無線機を用いており、先頭車の操舵角と先頭車と追従車のステータスを相互に伝送する。

いずれも赤外線ランプとカメラによる画像システムと車車間通信を組み合わせたシステムであるが、二つのシステムには、赤外線ランプの設置個数と場所と形状が異なり、さらに、車車間通信方式の違いと通信内容の違いがある。

3. システムの概要

すでに提案されているシステムは、前述のように赤外線ランプとカメラの組み合わせによる画像システムにより前走車に対する自車位置と姿勢を検出している。つまり、3台以上の車群となる場合、追従車は直前の車両に対する位置と姿勢を検出することになる。これは、追従車は前走車に追走するかたちであり、後続の追従車になるにしたがい目標とする先頭車走行軌跡に対するトレースの誤差が増幅され、正確に先頭車走行軌跡をトレースすることが難しくることが予測される。また、画像システムと車車間通信を用いたシステムでは、小さな旋回半径となる屈曲路などで、道路構造やカメラの視野の制限から、前走車に対する自車の相対位置、姿勢情報が得られなくなる場合があると考えられ、追従走行が不安定となることが推定される。

これに対し、ICVSではナビゲーションシステムと車車間通信、レーダセンシングシステムを組み合わせ、Fig.1に示すような先頭車走行経路に対する自車位置および姿勢の推定を行なうことで、追従車が先頭車の走行した経路を正確にトレースするシステムとした。

画像やレーダなどのセンサでは前走車を認識しにくい旋回半径の小さなカーブや交差点などにおいて、ナビゲーションシステムと車車間通信を用いることは、先頭及び前走車の走行軌跡情報を得ることができ、ロバスト性の高い先頭車自動追従走行システムの構築が可能となる。また、ICVSの隊列回送機能として、先頭車が走行した軌跡を後続車が正確にトレースするという目標に対しても、ナビゲーションシステムの応用が有効である。

システム構成は、前述の2例が赤外線ランプとカメラによる画像システムを用いたことに対し、ICVSではナビゲーションシステムとレーダセンシングシステムを用いた点が異なっている。ICVSの車車間通信で送受されるデータは車速、加速度、操舵角、前走車位置や前走車座標系の補正量、先頭車位置などである。使用する無線の周波数は、2.4GHz帯である。

システムの構成を前述の2例と比較すると、Fig.2のようになる。この中で、システムの違いが明確に現れているところはセンシング部と車両状態量推定部である。本論文では、この二つの部分について述べる。

4. 制御アルゴリズム

先頭車自動追従走行システムは先頭車、追従車ともにナビゲーションシステムを用いて各々の車両位置と進行方向を演算している。ナビゲーションシステムにより得られた先頭車の位置と進行方向は、車車間通信を通じて追従車に伝送される。追従車は受信した先頭車位置と先頭車のその位置での車両制御量情報を進行方向情報とともに時系列的に並べ、先頭車軌跡情報を作成する。追従車は、自車の位置と進行方向をこの先頭車軌跡情報と比較することによ

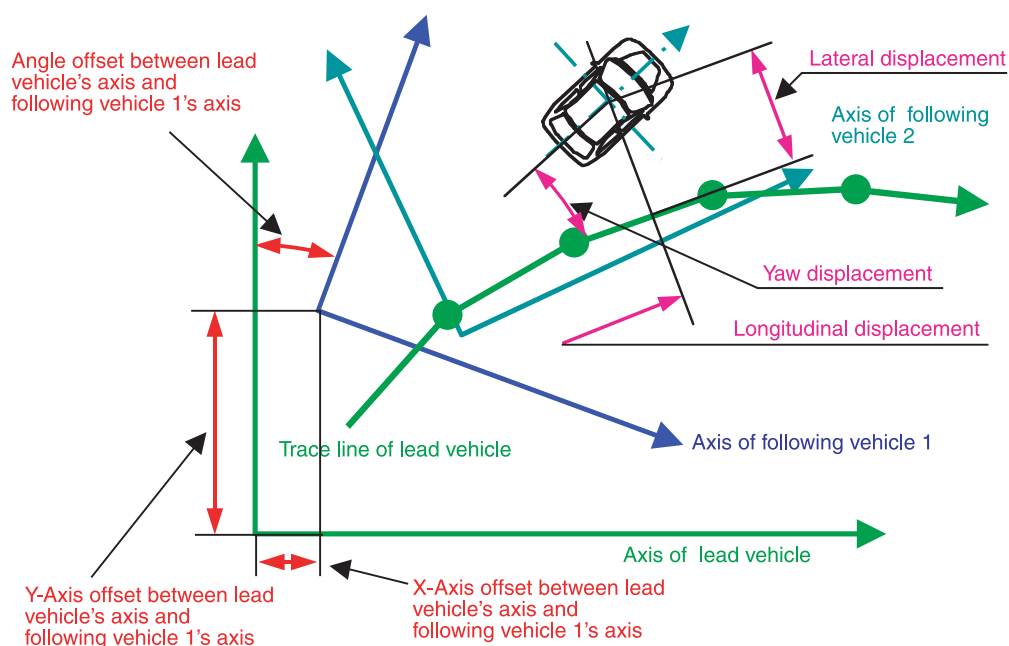


Fig.1 Vehicle displacement

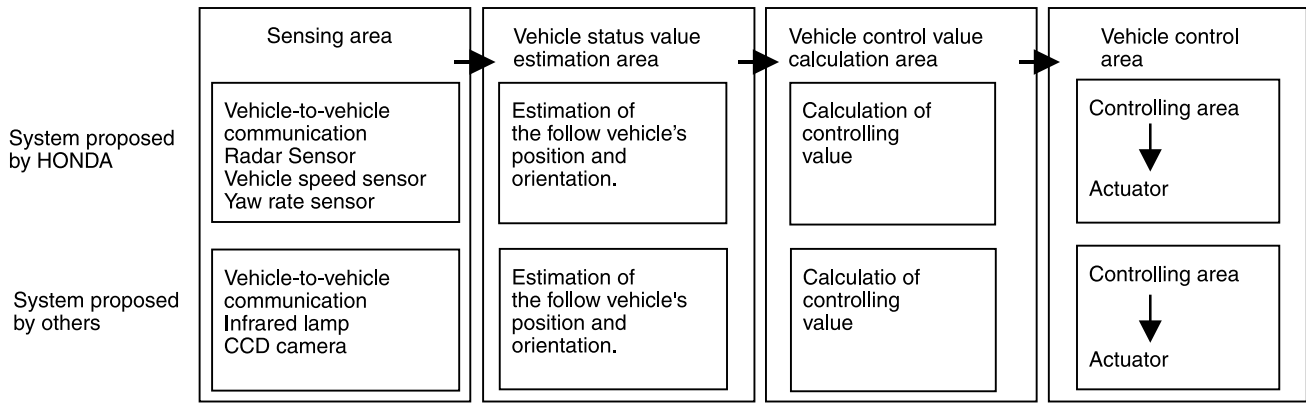


Fig.2 System block diagram

り、目標とする先頭車走行軌跡に対する現在の偏差を推定することが可能となる。

ここで、各々の車両のナビゲーションシステムは独自の座標系に基づいて自車位置計算などが行なわれるため、同一の場所であっても異なった位置座標となることが考えられる。よって、先頭車と追従車の相対的な位置関係を演算し、正確な追従を行うために、車群を形成する車両すべての座標系は、絶対的な座標系もしくは、単一の座標系に統一される必要がある。ICVSに採用したシステムでは、単一座標系として先頭車の座標系を使用した。

また、ICVSの各車両内で用いたナビゲーションシステムは、車速センサとヨーレートセンサからなる慣性航法であり、これは、積分演算を用いているため一般的に時間経過にともなう推定位置誤差が増加することが知られている。この誤差の増加率は、各々の車両により異なることから、追従車は自車座標系を単一座標系へ補正するための初期座標系オフセットのほかに時間経過に伴う誤差成分も補正する必要がある。そこで座標系の誤差を検出し、補正を行な

うためのセンサとして、センシング誤差が時間経過に依存しにくいものを選定した。このようなセンサとしてGPSやレーダといったものが上げられるが、今回のシステムの使用条件から、レーザレーダを選定した。

各々の追従車の座標系補正量は、車車間通信を介して得られる前走車位置とレーダにより観測される前走車位置から演算される。

Fig.3は先頭車を含めた3台以上の車群を考えたモデルで、この中で先頭車と追従車の2台だけを考えて場合、座標系の補正は以下ようになる。先頭車座標系に基づく慣性航法装置(ナビゲーションシステム)により演算される先頭車位置(x_{lead} , y_{lead})は、式(1)で与えられる。

$$\begin{aligned} x_{lead} &= x_{lead0} + \int l_{lead} \cdot \cos(\theta_{lead}) dt \\ y_{lead} &= y_{lead0} + \int l_{lead} \cdot \sin(\theta_{lead}) dt \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、(x_{lead0} , y_{lead0})は、先頭車の初期位置である。 l_{lead} と θ_{lead} は、先頭車の移動量である。このデータは、車車間

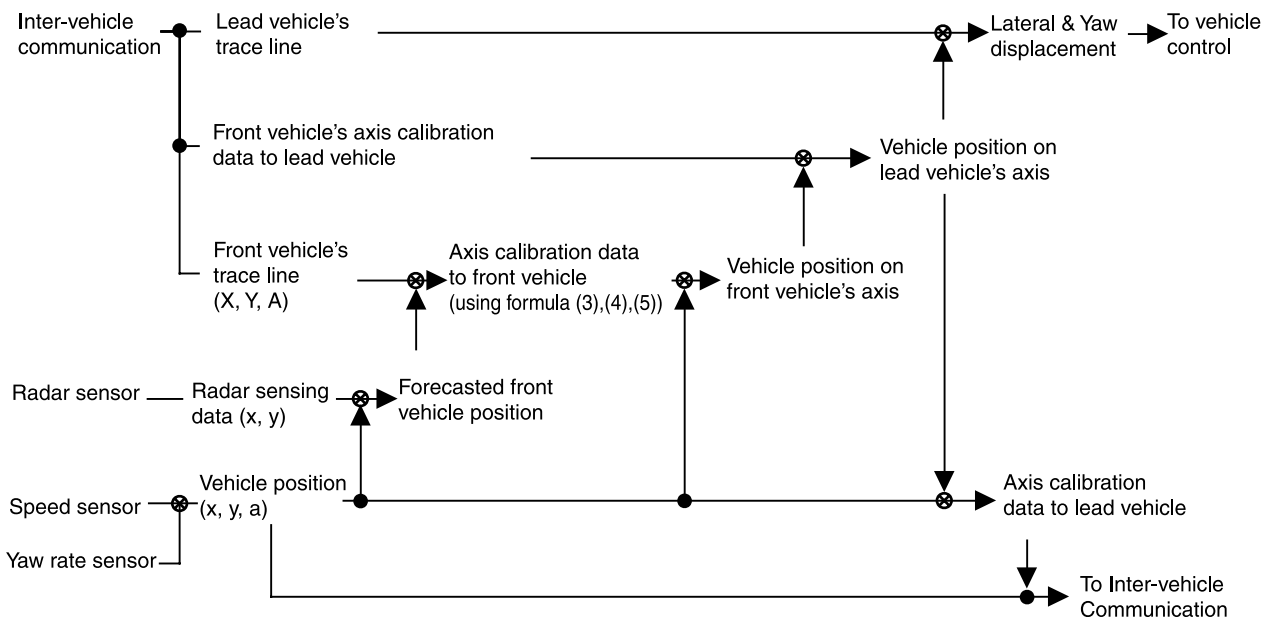


Fig.3 Axis calibration data, lateral displacement and yaw displacement calculation flow

通信を介して追従車に伝えられる。同様に、追従車位置(x_{follow} , y_{follow})は、式(2)で与えられる。

$$\begin{aligned} x_{\text{follow}} &= x_{\text{follow}0} + \int l_{\text{follow}} \cos(\theta_{\text{follow}}) dt \\ y_{\text{follow}} &= y_{\text{follow}0} + \int l_{\text{follow}} \sin(\theta_{\text{follow}}) dt \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、($x_{\text{follow}0}$, $y_{\text{follow}0}$)は、追従車の初期位置である。 l_{follow} と θ_{follow} は、追従車の移動量である。

追従車は、自車からのレーダ観測結果により推定される追従車座標系での先頭車位置を演算する。ただし、レーダでは、先頭車の重心位置の座標を直接観測できないため、先頭車後面中心位置($x_{\text{lead-r}}$, $y_{\text{lead-r}}$)を観測する。これは、式(3)で与えられる。

$$\begin{aligned} x_{\text{lead-r}} &= x_{\text{follow}} + (\text{ofst_radar} + r_{x_{\text{follow}}}) \cos(\theta_{\text{follow}}) \\ &\quad - r_{y_{\text{follow}}} \sin(\theta_{\text{follow}}) \\ y_{\text{lead-r}} &= y_{\text{follow}} + (\text{ofst_radar} + r_{x_{\text{follow}}}) \sin(\theta_{\text{follow}}) \\ &\quad + r_{y_{\text{follow}}} \cos(\theta_{\text{follow}}) \end{aligned} \quad (3)$$

また、車車間通信で伝送される先頭車位置は、重心位置である。レーダで観測できる部位と同一化するために車両の諸元情報を用いて、通信により得られる先頭車後面中心位置($x_{\text{lead-com}}$, $y_{\text{lead-com}}$)を求める。これは、式(4)にて与えられる。

$$\begin{aligned} x_{\text{lead-com}} &= x_{\text{lead}} - (\text{CarLength} - \text{ofst_radar}) \cos(\theta_{\text{lead}}) \\ y_{\text{lead-com}} &= y_{\text{lead}} - (\text{CarLength} - \text{ofst_radar}) \sin(\theta_{\text{lead}}) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、($r_{x_{\text{follow}}}$, $r_{y_{\text{follow}}}$)は、追従車に設けられたレーダと前走車との相対値である。ofst_radardは、車両重心位置からレーダ取り付け位置までのオフセット量である。CarLengthは、車長である。

(3)、(4)式で得られる二つの座標系で表現される先頭車後面中心位置は、基本的に同一であるはずである。つまり、これらの先頭車後面中心位置の偏差が、すなわち、座標形の偏差と考えることができる。この偏差は、回転移動成分の角度偏差 $\Delta\theta$ と平行移動成分の $\Delta(x, y)$ 偏差からなり、(5)式で表される。この中にはレーダの検出誤差や車車間通信の伝送遅れによる誤差、慣性航法に起因する誤差なども含まれる。

座標系の偏差は、演算開始時から存在している初期オフセットや車車間通信の伝送遅れによる誤差、慣性航法に起因する誤差などのゆっくりとした速度で変化する誤差とレーダの検出誤差のような早い速度で変化する誤差とに大別できる。今回のセンサフュージョンでは、ゆっくりとした速度で変化する誤差の検出を目的とするため、この2つ

の座標系によりあらわされる先頭車位置を時系列的に並べ、座標系の角度偏差と平行移動量を検出する。

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= k(\theta_{\text{lead-r}} - \theta_{\text{lead-com}}) \quad ; k \text{ は定数} \\ \theta_{\text{lead-r}} &= \arctan((y_{\text{lead-r}} - y'_{\text{lead-r}})/(x_{\text{lead-r}} - x'_{\text{lead-r}})) \\ \theta_{\text{lead-com}} &= \arctan((y_{\text{lead-com}} - y'_{\text{lead-com}})/(x_{\text{lead-com}} - x'_{\text{lead-com}})) \\ \Delta x &= \text{fr}(x_{\text{lead-r}}, \Delta\theta) - x_{\text{lead-com}} \\ \Delta y &= \text{fr}(y_{\text{lead-r}}, \Delta\theta) - y_{\text{lead-com}} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、($x'_{\text{lead-r}}$, $y'_{\text{lead-r}}$)と($x'_{\text{lead-com}}$, $y'_{\text{lead-com}}$)は、それぞれの前回値をあらわすものである。fr($x_{\text{lead-r}}$, $\Delta\theta$)とfr($y_{\text{lead-r}}$, $\Delta\theta$)は、それぞれ $x_{\text{lead-r}}$ と $y_{\text{lead-r}}$ を $\Delta\theta$ だけ回転補正した座標を表すものである。

追従車は検出した座標系の偏差を用いて自車の座標系を補正する。一致した2つの座標系を用いて先頭車の軌跡をトレースするために、追従車は先頭車の先行した軌跡を走行予定経路(ナビゲーションシステムにおける地図)として見立てることで、自車の位置における、走行すべき方位と存在すべき位置を得られる。

この存在すべき位置と方位と、現在の追従車の位置と方位との偏差が、現時点での車両状態量(縦変位置量、横変位置量、角度変位置量)となる。ここで、追従車の現在位置から最も近い先頭車の軌跡情報を($x_{\text{lead-t}}$, $y_{\text{lead-t}}$, $\theta_{\text{lead-t}}$)とし、現在の追従車の位置と方位を($x_{\text{follow-n-t}}$, $y_{\text{follow-n-t}}$, $\theta_{\text{follow-n-t}}$)とすると、現時点での追従車の状態量(先頭車軌跡からの横ずれ量L.E., 先頭車軌跡進行方向との角度ずれ量Y.E.)は、(6)式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \text{L.E.} &= \sqrt{(x_{\text{follow-n-t}} - x_{\text{lead-t}})^2 + (y_{\text{follow-n-t}} - y_{\text{lead-t}})^2} \\ \text{Y.E.} &= \theta_{\text{follow-n-t}} - \theta_{\text{lead-t}} \end{aligned} \quad (6)$$

さらに、追従車の現在位置から数秒先の位置を先頭車軌跡から抽出し、その位置と方位を制御目標値として用いることで、予測制御を行なうことが可能となる。この制御目標値と(6)式で得られる現時点での追従車の状態量とを制御量演算に用いることで、ICVSでは、追従車の先頭車軌跡のトレース精度が向上できた。

また、補正に用いるレーザレーダの前走車位置検出性能には、限界があり、さらにレーダの検出インターバルも長いために、レーダにより前走車が検出できない時間が発生する。この間では、最新の座標系偏差の補正量を用いて、座標系を補正しつづける。

5. テスト

前述したアルゴリズムを検証できる車両を製作し、追従性能を確認するために実走行テストを行った。

5.1. テスト車両

テスト車両としてFig.4に示すようなステアリング及びアクセル、ブレーキを制御できる小型の電気自動車を開発した。この車両に、慣性航法のために必要な車速センサとヨーレートセンサ、および追従走行に用いる車々間通信機とレーザレーダを搭載した。

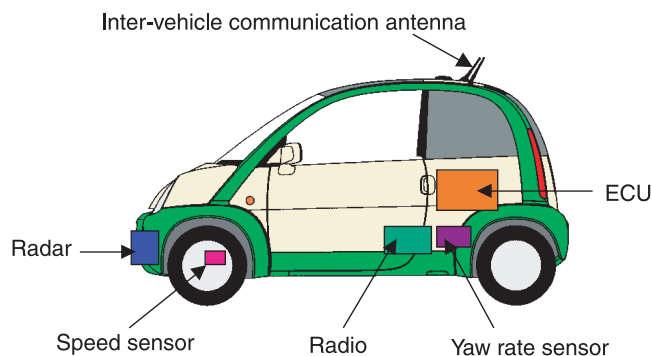


Fig.4 Test vehicle

ここで慣性航法に用いる車速センサは、車両駆動用モータの出力軸に取り付けられ、2 cm/pulseの分解能で検出できるものを使用した。また、ヨーレートセンサは、ドリフトレート1 deg/hourの光ファイバジャイロを用いた。

車々間通信は直接拡散タイプのスペクトラム拡散方式の無線機で、使用した周波数帯域は、2.4GHzである。通信方式は、ブロードキャスト方式とし、ID割付による通信順序の設定により、5台の車両が相互に通信が行えるようにした。通信周期は、30msec/台で、5台の車群では120msec/loopとなる。

通信データは車両位置、進行方向、速度、加速度などの車両状態量やステアリングの制御量などで、データ量は、先頭車が、42バイト、追従車が62バイトを使用する。これらのデータは、管理情報と合わされて、先頭車48バイト、追従車68バイトの packets として、送受される。

レーザレーダは、近赤外線帯域のレーザで、200degの広範囲をスキャンできるものを使用している。このレーダの検出サイクルは、140msec毎で、分解能は、2degとなっている。これを126degの検出範囲に絞って使用した。また、小さい半径の旋回においても安定して前走車をレーダが検出できるように、車両後方バンパ部に5×15cmの再帰性反射テープを1 m間隔で2つ配した。これにより、旋回半径4.8mの小旋回においても、安定して前走車を検出することが可能となった。

5.2. テスト方法

テストは、社内テストコースと、栃木県内にあるツインリンクもてぎ内の一般路で行った。テストにあたり、先頭車は、手動運転を行い、追従車は自動運転を行うようにし

た。車群は、先頭車を含めて、5台で構成し、車間距離4 m、速度0～100km/hとした。この時の車群を構成する車両ごとに車両の状態量と走行軌跡を記録した。

5.3. テスト結果

上述の走行モードに基づいて走行した走行軌跡をFig.5に示す。走行軌跡の一部を拡大したものをFig.6に示す。状態量をFig.7, 8に示す。走行軌跡のグラフで、先頭車と追従車(1～4番目)の軌跡が重なっていることは、追従車が先頭車の走行ラインを正確にトレースしていることを示している。

テスト結果から、5台の車群は先頭車の走行軌跡上をほぼ正確にトレースしており、当初の目標通り、座標系の偏差を補正し、安定して追従できることが確認できた。また、小さい半径の旋回を伴う交差点を模した走行やスラローム走行においても、安定して追従できることが確認できた。Fig.7, 8から、追従時の誤差は、前後±30cm、左右±20cm以内に納まることも確認できた。

さらに、連続的に長時間レーダが前走車を検出できない

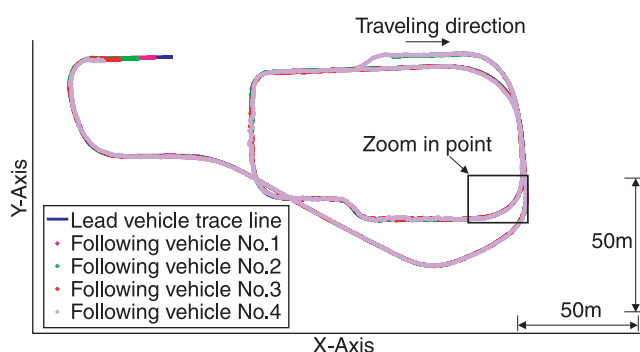


Fig.5 Comparison of trace lines between calibrated trace line of following vehicles and trace line of lead vehicle

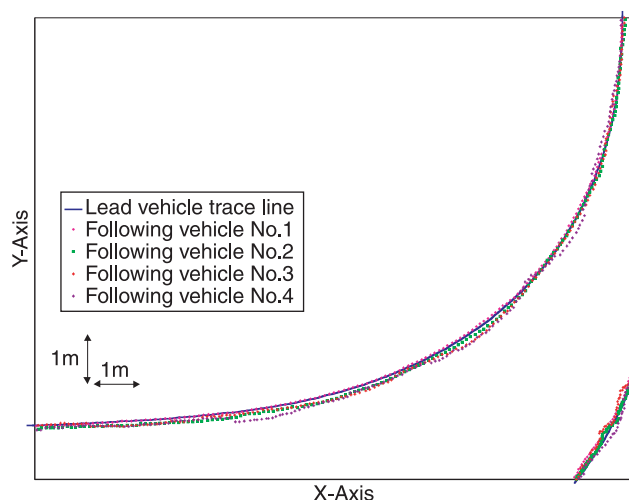


Fig.6 Comparison of trace lines between calibrated trace line of following vehicles and trace line of lead vehicle

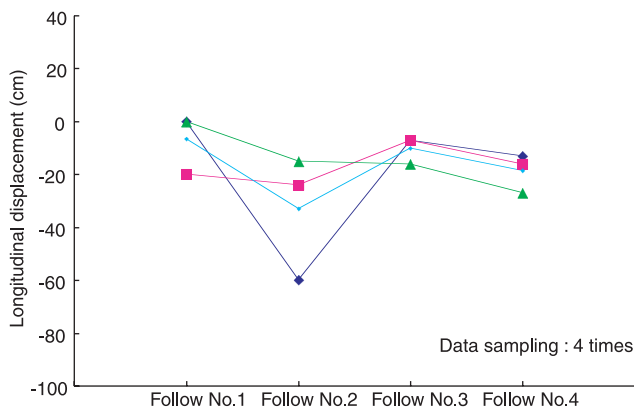


Fig.7 Longitudinal displacement when vehicle to vehicle distance is 4m

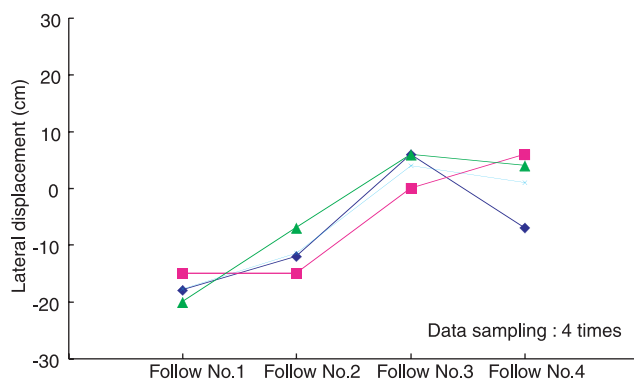


Fig.8 Lateral displacement when vehicle to vehicle distance is 4m

場合には、先頭車軌跡を正確にトレースする自動追従走行ができなくなることが確認できた。この状況下では、レーダにより座標系の補正ができず、使用している慣性航法の性能に依存した追従となるため、慣性航法の性能に応じたフェイルセーフ機能が必要であることも確認した。

以上のことから、ナビゲーションシステムを応用し、検出誤差が経過時間に影響されにくいセンサを座標系の補正として用いた追従車は、先頭車の走行軌跡を正確にトレースすることが可能であることが確認できた。

また、レーダでは、前走車を検出しにくいスラロームやクランクなどにおいても安定して、前走車に追従できることから、レーダや画像を用いたシステムのロバスト性確保のためにも、慣性航法が有効であることも確認できた。

6. 結論

ナビゲーションシステム(慣性航法)と車車間通信とレーダセンシングシステムとを協調させた先導車追従自動走行システムを提案し、以下の性能を確認することができた。

- ・ インフラストラクチャに依存することなく、追従車

は、先頭車軌跡を正確にトレースすることが可能である。

- ・ 交差点での右左折やスラローム走行のような小旋回を含む走行においても、追従車は、先頭車に追従することが可能である。
- ・ システムのロバスト性向上のために、ナビゲーションシステムを用いることが有効である。

以上のことから、ナビゲーションシステムを応用した車両制御システムは、長い直線路や緩やかなカーブが連続する高速道路への適用が可能であるばかりでなく、屈曲した道路を含めた幅広い走行条件で適用可能であることが示された。

今後は、システムのさらなる信頼性、安定性の向上をめざし研究するとともに、他のセンシングデバイスとの協調によるシステムの性能向上の可能性も研究して行く予定である。

参考文献

- 1) Mio, M., Tachibana, A. et al.: Platoon System Based on Optical Inter-Vehicle Communication, 2nd ITS WC in Yokohama, 1995
- 2) Dipl. Ing. Schulze, M.: CHAUFFEUR - THE EUROPEAN WAY TOWARDS AN AUTOMATED HIGHWAY SYSTEM, 4th ITS WC in Berlin, 1997
- 3) Gehring, O., Fritz, H.: LATERAL CONTROL CONCEPTS FOR TRUCK PLATOONING IN THE CHAUFFEUR PROJECT, 4th ITS WC in Berlin, 1997
- 4) Borodani, P., Carrea, P., Gortan, L.: Short headway control for trucks on motorways, 4th ITS WC in Berlin, 1997

■ 著 者 ■



田村 和也



石山 真人



藤巻 朋



望月 和彦