

# 特集 車車間通信を活用したカーブでの自動加減速制御\*

## Automatic Acceleration and Deceleration Control on Curved Roads Using Vehicle-to-Vehicle Communication

松本真聡                      武藤健二                      津留直彦                      伊佐治和美  
 Masato MATSUMOTO      Kenji MUTO                      Naohiko TSURU                      Kazuyoshi ISAJI

森川 翔  
 Shou MORIKAWA

Various automatic vehicle control systems have been released into the market such as adaptive cruise control (ACC) and the collision avoidance system. Additionally, Vehicle-to-Vehicle (V2V) communication, which will be commercialized soon, is expected to be applied to automatic vehicle control as a new sensor. Currently, the automatic acceleration and deceleration control (AADC) system applied to ACC etc. uses autonomous sensors, and functions on straight or gently-curved roads such as expressways. However, it cannot function continuously on tight winding roads such as mountainous roads because the autonomous sensors cannot detect the preceding vehicles. Therefore, to expand the application coverage of the AADC system to various roads, including tight winding roads, we studied the adaption of V2V communication for control via experiments using one vehicle equipped with a newly developed system and another vehicle as a preceding vehicle on a test course that simulated a tight mountainous road. Consequently, it was shown that the AADC system using V2V successively functioned under the previously described test conditions and test course. Moreover, it was shown that the linkage of information of autonomous sensors and V2V is a key technology in the case of multiple surrounding vehicles in actual roads. As the next development step, we have started studying the information linkage of sensors and V2V.

Key words : Vehicle-to-Vehicle Communication, KdB, Cooperative ACC

### 1. はじめに

現在、車車間通信 (Vehicle-to-vehicle (V2V) Communication) の標準化が世界的に進んでおり<sup>1)</sup>、日本、米国、欧州を中心として、さまざまな研究開発とその実証実験が活発に行われている<sup>2) 3)</sup>。

さらに、最近、日本国内では車車間・路車間通信を安全運転支援システムに活用するための標準規格<sup>4)</sup>の策定が終了し、実際の車載システムへ活用できる環境が整った。車車間通信で使用する電波は、レーダで 사용되는ミリ波帯よりも見通し外に回り込む性質が強く、従来のミリ波レーダまたは画像センサでは捉えられない見通し外の車両を検出できる特徴があり、出会い頭衝突回避などへの応用が期待されている。

また、見通し外の車両を検出できる特徴は、従来の車両制御技術の機能拡張にも可能性を秘めている。例えば、ミリ波レーダなどの自律センサを活用した自動加減速制御の一例であるACC (Adaptive Cruise Control) は、自律センサの検知角度範囲や計測可能距離に制約があるため、高速道路や自動車専用道など

の利用に限られているが、車車間通信により検知角度範囲や計測可能距離を補うことで、使用範囲を拡張できる可能性がある。

例えば、一般論として、車間距離を大きくとる事ができれば、燃費向上や渋滞緩和に対して効果を期待できる。車間距離を大きくとれば、自律センサだけでは高速道路とは言え先行車を見落としてしまう確率は増大するので、車車間通信の活用は有効である。

さらに、全車速ACCでは従来の40km/h以上の制御範囲から停止まで制御を拡張しているが、山岳路のようなカーブの連続する一般道への拡張は実現できていない。車車間通信を用いれば、カーブ中も先行車を検出できる。

我々はこれら従来のACCの課題を解決するために、車車間通信が有効であると考えている。そこで、ACCを山岳路等のカーブが連続する道路で使用できるように、ミリ波レーダを車車間通信で補い、カーブ路でも先行車に追従可能な車車間通信ACCの開発に取り組んだ。

\*自動車技術会の了解を得て、2012年5月「自動車技術会学術講演会前刷集」Vol. No. 55-12 20125238より一部加筆して転載

本報は、開発した車車間通信を活用したカーブ路での加減速制御の実車での評価と、その開発を通じて車車間通信の技術課題を洗い出すことを目的とする。

## 2. 車車間・路車間通信の概要

参考文献(4)での規定された車車間・路車間通信の通信方式は、同報通信(ブロードキャスト)を基本としており、周辺全方向に電波を送信し、その送信情報を周囲の全車両が一斉に受信できる。その反面、受信した周辺車両は送信車両に応答を返すことはないため、送信車両は周辺車両が送信情報を正常に受信したかは分からない。

また電波の送信手順であるアクセス方式にはCSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance)方式を採用しており、周辺車両が電波を送出していないことを確認した後、確率的に決める時間の経過を待ち、送信する仕組みをとっている。本方式により、送信情報が他車両からの電波干渉で損失することを確率的に避けることができる。また、周辺に車両が多くない状況では、通信の遅延を数ms程度に抑えることができ、車両制御に適した通信である。

本報ではFig. 1に示すように、見通し外への伝搬と低遅延性を利用して、自律センサが先行車を捕捉できなくなるような連続したカーブ路において、車車間通信を用いることで連続的に先行車両を捕捉し続ける車車間通信ACCを考案した。

このACC機能を実現するに当たって、車車間通信として懸念される課題は、ACC制御として使用するに当たり見通し外への通信距離が充分であるか、また通信の損失がACC制御に悪影響を与えないかなどが挙げられる。本報ではこれらの評価を中心として行った。

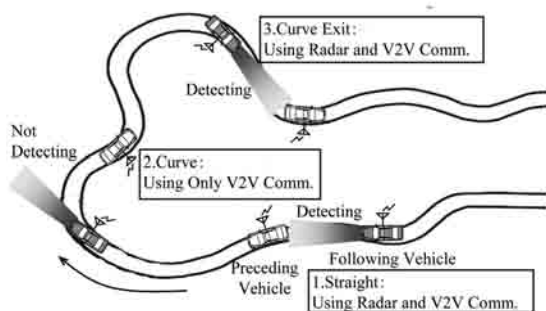


Fig. 1 Proposed ACC Using V2V Communication

## 3. 車車間通信を利用したACC制御

### 3.1. 車車間通信ACC制御概要

我々の提案する車車間通信ACCでは追従車、先行車ともに前方監視用のミリ波センサ等の自律センサと車車間通信機を備え、操舵角と車速情報を通信する。ACC制御に用いる先行車との相対距離情報は、自律センサが先行車を捕捉中は自律センサの値を使用し、自律センサが先行車をロストした場合はロスト時点の相対距離を基準に先行車との相対速度差の時間積分により推定相対距離を演算し使用する。先行車を再補足した場合は自律センサの値を使用する。尚、今回のACC制御の詳細については文献(5)を参照のこと。

しかし、このような車車間通信ACCでは、たとえば先行車がカーブ路にさしかかり高速でカーブ路を走り抜けていく場合に自車も減速することなしにカーブ路へ進入してしまう、或いは先行車が低速でカーブ路を走行してもカーブ路を抜けた後に一気に加速する場合、自車はカーブ路内走行中にもかかわらず加速を開始してしまう等、自車のドライバーに対し違和感を与える可能性がある。そこで次節3.2に示すように、ドライバーが自由に選択可能な目標横G( $G_y$ )を用いたカーブ加減速制御をおこなう。

### 3.2. カーブ加減速制御概要

Fig. 2に、車車間通信を用いたカーブ路での加減速制御の概要を示す。

先行車がカーブ路にさしかかり操舵を開始し、操舵角が $30^\circ$ 以上となった地点をカーブ路入口と判定する。車速にもよるが、この時点のカーブR( $R_{in}$ )はおおよそ110mである。この後、以下のようにカーブ減速制御を行う。

具体的には、Fig. 2や式(2)に示すように、カーブ路接近状態評価指標 $K_{dB_d}(a)$ を定義し、式(4)に示すカーブ路ブレーキ判別式( $K_{dB_d,brk}$ )を上回る地点( $D=D_0$ )に自車が到達したときに減速を開始する。カーブ路接近状態評価指標 $K_{dB_d}(a)$ とは従来から提案している補正接近状態評価指標 $K_{dB_c}(a)$ <sup>6)</sup>に対して、先行車との相対速度を目標旋回速度 $V_c$ に対する自車速度との相対速度( $V_c-V_0$ )に置き換え、さらに先行車速度を目標旋回速度 $V_c$ に置き換えたものである。目標旋回速度 $V_c$ は式(3)に示すようにカーブ路内旋回目標横G( $G_y$ )とカーブRから算出される。カーブ路接近状態評価指標 $K_{dB_d}(a)$ は $a=1$ では速度項( $V_r-a \times V_c$ )は自車速( $|V_0|$ )となり、カーブ路入口( $D=0$ )にある停止物に対

しての  $K_{dB}^{(6)}$  と同値となる。カーブ路ブレーキ判別式 ( $K_{dB, d, brk}$ ) を用い、 $R=40m$  のカーブ路における実車予備実験から  $a=0.3$  を採用した。

減速はエキスパートドライバーの減速行動を模倣し、減速開始タイミングの  $K_{dB}$  を起点とした接線で表わされる減速プロファイル<sup>7)</sup> を用いた。自車はカーブ入口までに目標旋回速度  $V_c$  まで減速する。

先行車がカーブ路から直進に移行する過程でステアリングを戻し、操舵角が  $15^\circ$  以下となった地点をカーブ路出口と判定する。この時点のカーブ半径 ( $R_{out}$ ) はおよそ  $220m$  である。自車はカーブ路出口以降に先行車速度、或いはACCセット車速に向けて加速を開始する。

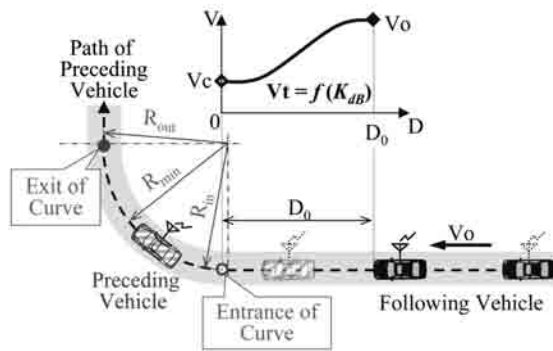


Fig. 2 Acceleration and Deceleration Control on Curved Roads

$$K_{dB, d}(a) \geq K_{dB, d, brk} \quad \dots (1)$$

$K_{dB, d}(a)$ : カーブ路接近離間状態評価指標

$K_{dB, d, brk}$ : カーブ路ブレーキ判別式

$$K_{dB, d}(a) = 10 \times \log_{10} \left( 4 \times 10^7 \times \frac{Vr - a \times Vc}{D^3} \right)$$

$$a = 0.3 \quad \dots (2)$$

$Vr = Vc - V_0$ : 目標旋回速度に対する相対速度

$Vc$ : 目標旋回速度

$V_0$ : 自車速度

$D$ : カーブ入口までの距離

$$Vc = \sqrt{R \times Gy_r} \quad \dots (3)$$

$R$ : カーブ半径

$Gy_r$ : カーブ路内旋回目標横G

$$K_{dB, d, brk} = -20.15 \times \log_{10} D + 71.72 \quad \dots (4)$$

## 4. 開発システムと実験結果

### 4.1 開発システム

Fig. 3に開発した車車間通信ACCのブロック図を示す。先行車は2.5lセダン系乗用車とし、弊社で開発した車車間通信機を搭載し、100ms周期で操舵角と車速

を送信する。追従車は4.3lセダン系乗用車であり、受信用の車車間通信機と、先行車との車間距離を計測するミリ波レーダ、3.2節に記載したACC制御およびカーブ加減速制御が実装されたPCを搭載し、このPCからの要求で車両が加減速する構成とした。また、危険防止のため、500ms以上通信が途絶すると車両制御用PCが警報音を発生し、ACC制御が自動停止する仕組みとした。

### 4.2 予備評価

車車間通信ACCを実現するには、自律センサが先行車をロストする場所でも、車車間通信が成立することが必須条件である。これを確認する予備評価として、主要な自律センサのロスト環境と考えられる見通しが取れない急カーブ、丘の頂上、高低差が発生する坂道の3箇所で、先行車と追従車の車間距離をパラメータとして、通信が到達する最小距離を測定した。今回は通信到達の条件を5回連続通信が失敗しないこととした。Table 1に示すように、3箇所とも100m以上の距離で通信が可能であることが確認できた。ACCでの車頭時間を3秒と仮定すると、車速100km/hでも車間距離が約80mであるため、車車間通信を利用したACC制御の継続には問題ないと考えられる。

Table 1 Vehicle-to-Vehicle Communication Distance

Measurement Points	Communication Distance
Tight Curve(R20)	100m
Across Hill	130m
Uphill (Vertical Interval: 10m and more)	240m

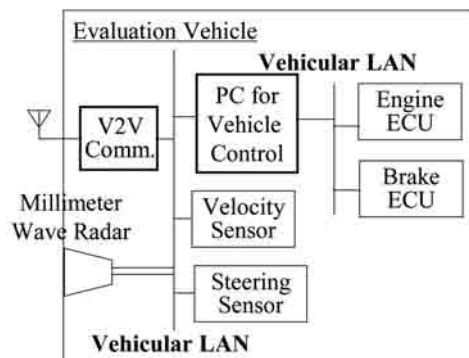


Fig. 3 Block Diagram of Developed Systems

### 4.3 実車評価

上記4.2節に記載の自律センサのロスト環境を含む山岳路を模擬したFig. 4に示す弊社テストコースを使用

し、先行車は通常走行より強めの加減速(加速度 $2\text{m/s}^2$ , 減速度 $3\text{m/s}^2$ )をランダムに発生させ $20\text{km/h} \sim \text{max}60\text{km/h}$ の範囲で走行し、追従車をACC制御およびカーブ加減速制御にて追従させたときに、車車間通信を利用したACCの作動を確認した。

Fig. 5に横軸を評価時間、縦軸を車間距離としたときの、車車間通信ACCでテストコースを約2周走行した場合の車間距離の変動を示す。車間距離は先行車速度および道路状況により $20\text{m} \sim 120\text{m}$ の範囲で変動しているものの、ACC制御は正常に継続している。評価の後半で車間距離が $120\text{m}$ 付近に達しているのは、先行車を意図的に急加速させ車間距離を取る走行パターンを行ったためである。

Fig. 6は通信の途絶時間の変動を横軸を時間、縦軸を追従車の受信間隔として示したグラフである。送信周期が $100\text{ms}$ であるので、グラフ上の受信間隔 $100\text{ms}$ を示す点は通信が連続的に成功していることを表している。また、受信間隔 $200\text{ms}$ を示す点は、1度通信が失敗したが次に正しい情報を受信できたことを意味する。今回の評価では受信間隔 $300\text{ms}$ 以上の状況は発生していない。評価終了直前に受信間隔 $200\text{ms}$ となる通信の失敗が見られるが、これは通常より車間距離が広がり、かつ急カーブを走行したときに発生したもので、連続的に通信が失敗することなく、警報が鳴動しACC制御が自動停止する $500\text{ms}$ に至らなかった。

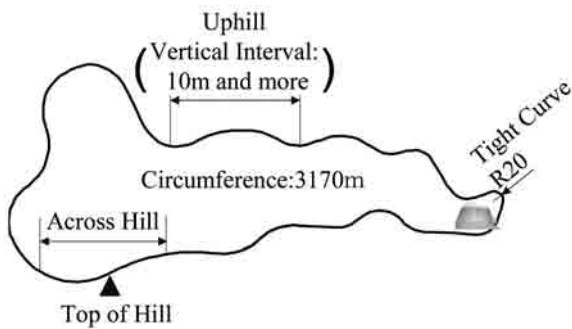


Fig. 4 Overview of Test Course

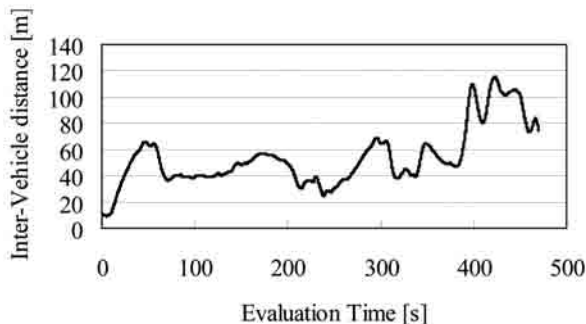


Fig. 5 Distance between Two Vehicles

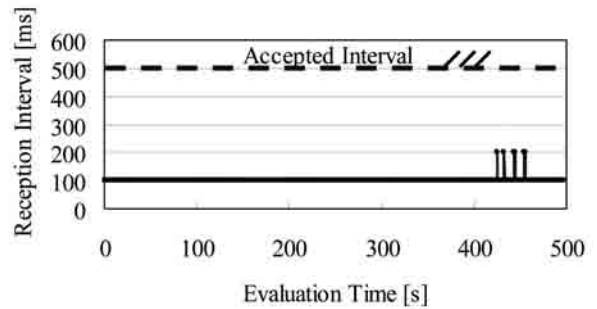


Fig. 6 Reception Interval of Following Vehicle

4.4 通信損失の影響評価

今回、 $500\text{ms}$ の通信途絶を許容したが、この妥当性を検証するため送信周期を通信途絶許容値の $500\text{ms}$ とした評価をおこなった。

評価指標として、次式で定義される余裕度  $\phi$ <sup>8)</sup>を用いる。

$$\phi = K_{ab,c}(a) - (-22.66 \times \log_{10} D + 74.71) \quad \dots (5)$$

$D$ : 車間距離

$\phi$ はブレーキ判別式<sup>8)</sup>への接近度合いを表しており、 $\phi \geq -3$ でブレーキ制御が行われる。 $\phi > 0$ はドライバが恐怖を感じブレーキを踏むレベルである。

Fig. 7には前節4.3評価と同等の送信周期 $100\text{ms}$ とした場合の $\phi$ の時間変動、Fig. 8には送信周期を $500\text{ms}$ とした場合の $\phi$ の時間変動を示す。送信周期が通信途絶許容値の $500\text{ms}$ の場合も $\phi \geq 0$ となる制御異常状態には達していない。

本実験では前述のように強めの加減速を行ったが、送信周期が $100\text{ms}$ の場合の $\phi = -2.2$ に対し、 $500\text{ms}$ の場合、 $\phi = -2.3$ と悪化が認められなかった。実際、成人男性6名(20代2名, 30代3名, 50代1名)による試乗を実施した結果でも、送信周期 $500\text{ms}$ でも $100\text{ms}$ と比較して、大きな差異は感じられないという評価を得た。

連続的に通信途絶許容値 $500\text{ms}$ ぎりぎりの状況が発生しても、制御異常に陥らず、かつ体感として危険を感じた者がいなかったことから、今回行ったACCのように車間距離を長めにとれるアプリケーションでは、通信途絶許容値を $500\text{ms}$ とすることは妥当な範囲内であると考えられる。

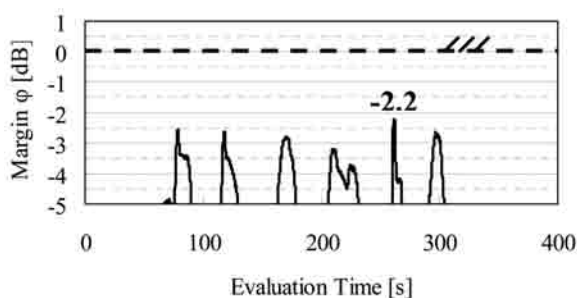


Fig. 7 Margin  $\phi$  (Interval 100ms)

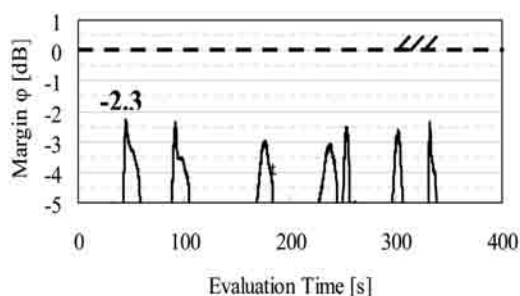


Fig. 8 Margin  $\phi$  (Interval 500ms)

## 5. まとめ

今回の評価から、自律センサがロストしやすい道路環境でも100m以上の通信距離を確保でき、車車間通信を用いてカーブが連続する山岳路でACCを継続できることを実証した。

また、通常の通信周期100msに対し、500ms程度の通信途絶であれば、ACCとしての制御異常状態に陥ることなく違和感のない制御が可能であることを確認した。

但し、今回は他車両が周囲に1台しか存在しない環境であるため、通信情報と自律センサで捕捉した先行車情報の関連付けが容易であった。しかし、実環境を考えると、周囲に数十台の車両が存在する状況は容易に予測でき、自律センサ情報と通信情報の関連付けをすることが車車間通信ACCの一つの課題である。自律センサ情報と通信情報の両方で取得できる車間距離、先行車速度、加速度などによる関連付けとその確度の評価を開始する。

## 6. 今後

上記の課題解決に加え、参考文献(5)で示した省燃費ACC制御への活用を検討する。省燃費ACCの課題である車間距離を大きくすると自律センサがロストしやすい事への対策として車車間通信を使用し実用燃費への貢献につなげたい。

## <参考文献>

- 1) IEEE Std 802.11p IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements Part11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicle Environments, (2010)
- 2) Roger Berg, “Using IntelliDrive<sup>SM</sup> Connectivity to Improve Mobility and Environmental Presentation at Signalized Intersections”, SAE Int. J. Passeng. Cars-Electr. Electr. Syst. Volume 3, Issue 2, pp.84-89, (2010)
- 3) Jun Kosai, Shugo Kato, Toshiya Saito, Kazuoki Matsugatani and Hideaki Nanba, “Prioritized CSMA Protocol for Roadside-to-Vehicle and Vehicle-to-Vehicle Communication Systems” presented at SAE World Congress & Exhibition, (2009)
- 4) 一般社団法人 電波産業会：700MHz帯高度道路交通システムARIB STD-T109 1.0版, (2012)
- 5) 伊佐治和美, 津留直彦, 森川翔：接近離間状態評価指標 (K<sub>dB</sub>) を用いたACCによる実用燃費改善, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 6-11, pp.17-20, (2011)
- 6) 伊佐治和美, 津留直彦, 和田隆広, 土居俊一, 金子弘：接近状態評価指標を用いたブレーキ開始タイミングの解析, 自動車技術会論文集, Vol. 41, No. 3, pp.593-598, (2010)
- 7) Wada, T., Doi, S., Tsuru, N., Isaji, K., and Kaneko, H., “Characterization of Expert Drivers’ Last-Second Braking and Its Application to a Collision Avoidance System”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 11, No. 2, pp.413-422, (2010)
- 8) 和田隆広, 土居俊一, 津留直彦, 伊佐治和美, 金子弘：熟練ドライバの運転行動解析に基づく減速支援制御手法, デンソーテクニカルレビューVol. 15, pp95-101, (2010)

<著者>



松本 真聡  
(まつもと まさと)  
研究開発3部  
車車間通信システム，無線通信  
を活用した車載システムの開発  
に従事



伊佐治 和美  
(いさじ かずよし)  
研究開発3部  
ドライバ特性研究，安全運転支援  
システムの開発に従事



武藤 健二  
(むとう けんじ)  
研究開発3部  
通信・センシングを活用した  
車載システムの研究開発に従事



森川 翔  
(もりかわ しょう)  
デンソーテクノ株式会社  
ドライバモデル，安全運転支援  
システムの開発に従事



津留 直彦  
(つる なおひこ)  
研究開発3部  
ドライバ特性研究，安全運転  
支援システムの開発に従事