車車間通信を利用した車群安定 ACC の研究*

山村 吉典^{*1}, 瀬戸 陽治^{*2}, 永井 正夫^{*3}

Study on a String-stable ACC using Vehicle-to-Vehicle Communication

Yoshinori YAMAMURA^{*4}, Yoji SETO and Masao NAGAI^{*4} Nissan Motor Co, Ltd. Advanced Vehicle Engineering Department,
1-1 Morinosatoaoyama, Atsugi-shi, Kanagawa, 243-0123 Japan

This study examined a control method for an ACC system capable of substantially improving string stability by means of vehicle-to-vehicle communication. The ACC system detects the operational status of each vehicle and controls the host vehicle's speed so as to obtain natural vehicle behavior. That is done in such a way that no overshooting occurs in the response characteristic of the host vehicle's speed to the lead vehicle's speed. This performance is achieved even in situations where string stability is relatively poor, such as when multiple vehicles present between the lead vehicle and the host vehicle decelerate and large vehicle speed overshoot occurs. This paper describes the effectiveness of the system and presents simulation results using driving test data to illustrate its performance.

Key Words: Automobile, Motion Control, Controller, Adaptive Cruise Control, String Stability, Vehicle-to-Vehicle Communication

1. 緒 言

従来から研究開発され商品化されている Adaptive Cruise Control (ACC) System は車間距離センサを用いた前車追従型であり, その主な目的は運転負荷の軽減にある⁽¹⁾⁽²⁾. しかし, ACC は将来普及が進むにつれ, 運転負荷軽減に加え, 交通流を改善するような車両挙動が要求されると考えられる. 交通流の乱れや疎密を抑制し, 道路の輸送効率を向上させるためには, 車間距離制御特性が先行車の車速変化を後続車に増幅して伝えない性質, すなわち車群安定となることが重要と考えられている.

本研究では, 最近各国で実用化に向けた取り組みが行われている車車間通信を用いることで, 大幅な車群安定性能の改善が可能な ACC の制御手法について検討した.

従来, 車車間通信を用いた ACC は既に多くの研究が行われてきた⁽³⁾. これらの研究では車群を構成する車両は全て車車間通信機を搭載した ACC 車両を想定し, 隊列走

行専用の制御則を前提としている. 車車間通信を利用した ACC が広く普及して隊列走行を実現するまでの過程においては, ACC 車両とドライバが運転する車両とが混走するという場面が無視できない. しかし従来の研究では, 中間車両にドライバが運転する車両を想定した場合の車群安定性の検討や, 車群安定化制御を行うことで生ずる車間距離応答の違和感に関する検討は行われていない. そこで, 本研究では ACC が対象とする車両を自車前方の複数の車両とし, これらの車両は制御特性が既知の ACC 車両ではなくドライバが運転する車両を想定した. 複数の先行車両から車車間通信によって車速や車両位置等の走行状態を検出し, 先頭車両車速に対する自車速応答にオーバーシュートが発生しないように, かつ, 自車直前の車両との車間距離応答に違和感がないように自車速を制御する. これにより, 先頭車両と自車の間に存在する複数車両の車群安定性が比較的悪い状態においても, 先頭車と自車の間で車群安定を保ち, 車群の速度低下を抑制する.

本稿では, 交通流の改善と車間距離応答の違和感の低減, 更に減速度をなるべく抑えて乗り心地を向上させるといった ACC への要求を高いレベルで実現するための

* 原稿受付 2006 年 6 月 6 日.

^{*1} 正員, 日産自動車(株) (〒243-0123 厚木市森の里青山 1-1).^{*2} 日産自動車(株) 先行車両開発本部.^{*3} 正員, 東京農工大学工学部 (〒184-8588 小金井市中町 2-24-16).

E-mail: y-yamamura@mail.nissan.co.jp

制御系評価手法を検討し、シミュレーション及び走行実験にてその有効性を確認した。

2. 車間距離センサを用いた車群安定 ACC

記号を図1のように定義する。\$i=0, 1, \dots, n-1\$ は \$n\$ 台からなる車群において第 \$i\$ 番目の車であることを表す整数、\$v_i\$ は第 \$i\$ 番目の車両の速度、\$d_i\$ は第 \$i\$ 番目と第 \$i+1\$ 番目の

Fig. 1 Vehicle string

車両との車間距離を示す。第 \$n-1\$ 番目の車両を先頭車両とし、第 \$0\$ 番目の車両を最後尾車両とする。今、第 \$i\$ 番目の車両は、第 \$i+1\$ 番目の車両の情報のみを用いて車間距離を制御すると仮定すると、先頭車両車速 \$v_{n-1}\$ から最後尾車両車速 \$v_0\$ までの伝達特性は、次式となる。

$$\frac{v_0(s)}{v_{n-1}(s)} = G_0(s) \cdot G_1(s) \cdots G_{n-2}(s) \quad (1)$$

但し、\$G_i(s)\$ は、第 \$i\$ 番目の車両が、第 \$i+1\$ 番目の車両からの情報を用いて車間距離を制御した時の速度伝達特性であり、\$v_i\$ と \$v_{i+1}\$ との関係は次式となる。

$$v_i(s) = G_i(s) \cdot v_{i+1}(s) \quad (2)$$

車間距離を一定に保つには、第 \$i\$ 番目と第 \$i+1\$ 番目の車速は定常状態において等しくなるため、\$G_i(s)\$ の定常ゲインは \$1\$ となる。しかし、\$G_i(s)\$ のゲインがある周波数において \$1\$ よりも大きくなるような特性を持つ車両が車群中に多く走行している場合、先頭車両の僅かな車速変化が次々と増幅して伝播され、後続車両が停止せざるを得ない状況に陥る可能性が生ずる。このような車速の増幅伝播による車群の速度低下を防止するには、(3) 式が成立すればよいことが知られている⁽⁴⁾。

$$\|G_0(s) \cdot G_1(s) \cdots G_{n-2}(s)\|_{\infty} \leq 1 \quad (3)$$

前方複数の先行車両の車速オーバーシュート特性を吸収するような特性を最後尾車両の速度伝達特性 \$G_0(s)\$ にもたせることで、先頭車両から最後尾車両までのトータルの速度伝達関数の \$H_{\infty}\$ ノルムを \$1\$ 以下に抑えて式 (3) を成立させることができる。

Fig. 2 Vehicle string including ACC

しかし、図2に示すように、最後尾車両を直前の先行車情報のみを用いて制御を行う ACC として以上の特性を実現するためには、先行車の車速変化に対して高応答な制御系が必要となり、先行車の車速変化や車間距離センサノイズに敏感となって乗り心地が悪化する。

3. 車車間通信を用いた車群安定 ACC

図2と同様の車群を考える。全ての車両は車車間通信機を搭載しており、最後尾の車両を ACC 車両とする。ACC 車両は車車間通信で先頭車車両の走行情報が得られるため、先頭車と ACC 車両との間に存在する車両の車群安定性が比較的に悪い状態でも、先頭車から ACC 車両までの速度伝達関数の \$H_{\infty}\$ ノルムを \$1\$ 以下にできる。今、具体的なイメージをつかむため、図3に示すような \$n=3\$ の車群を考える。

Fig. 3 Vehicle string (\$n=3\$)

中間車両の速度伝達特性を \$G_1(s)\$ とする。最後尾の ACC 車両は、先頭車両速度 \$v_2\$ から自車速 \$v_0\$ までの伝達関数が \$G_{02}(s)\$ となるように制御する。\$G_{02}(s)\$ の \$H_{\infty}\$ ノルムが \$1\$ 以下となるように決めれば、先頭車に対する ACC 車両の応答は車群安定となる。このとき、\$v_2\$ に対する \$d_0\$ の応答は、次式となる。

$$\frac{d_0(s)}{v_2(s)} = \frac{1}{s} \{G_1(s) - G_{02}(s)\} \quad (4)$$

式 (4) から、\$v_2\$ が変化したときの車間距離 \$d_0\$ の過渡応答は、\$G_1(s)\$ と \$G_{02}(s)\$ の差に依存することがわかる。\$G_1(s)\$ が比較的大きな遅れを持つ場合では、先頭車が一定速から減速するようなシーンを考えると、中間車両よりも ACC 車両の方が先に減速を開始するため、\$d_0\$ は一旦増加してから減少するという、従来の ACC にはない応答を示すようになる。

4. 制御系設計

4.1 車間距離制御系への要件 本制御では、ACC 車両のドライバが直接目視できない前方車両の挙動に応じて自車の挙動が変化する。この応答はドライバから見た場合、直前の先行車が減速していないのに自車が減速を開始することになるので、車間距離が大幅に開かないようにする必要がある。一方、自車の減速度の増加を抑

えて乗り心地を向上させるには、なるべく前方の先行車の減速を検知し、より早いタイミングで、より小さな減速度で直前の先行車との車間距離を維持できるような制御系設計が望ましい。よって、先頭車両との車群安定性を確保した上で直前車両との車間距離応答の違和感を抑えること、更にこれになるべく小さな減速度で達成することが制御系設計上のキーポイントになると考えられる。以上を要件としてまとめると、下記となる。

- (1) 先頭車両車速 v_n から自車速 v_0 までの伝達関数の H_{∞} ノルムを 1 以下とすること。
- (2) 自車直前の先行車との車間距離 d_0 が近づきすぎたり離れすぎたりせず、違和感のない特性とすること。
- (3) 上記 (1) と (2) をできるだけ小さな減速度で達成すること。

4・2 車間距離制御系設計 本検討では、以上のような要件を満たすための制御手法の一例として、応答特性を比較的簡単に調整できるモデルマッチング手法を利用した車間距離制御系を構成した。図 4 に制御系ブロック図を示す。

Fig. 4 Block diagram of ACC system

本システムにおいて車間距離制御系の制御対象は、次式となる。

$$d_0(s) = \frac{1}{s} \cdot \{v_1(s) - G_v(s) \cdot v_c(s)\} \quad (5)$$

但し、 $G_v(s)$ は車速制御系の伝達特性であり、車速指令値 v_c に対する実車速 v_0 の伝達関数が次式にマッチングされているものとする。

$$G_v(s) = \frac{v_0(s)}{v_c(s)} = \frac{\omega_v}{s + \omega_v} \quad (6)$$

v_1 は、直前車両の車速であり、次式によって先頭車から伝播される。

$$v_1(s) = G_1(s) \cdots G_{n-2}(s) \cdot v_{n-1}(s) \quad (7)$$

但し、 $G_i(s)$ ($i=1, 2, \dots, n-2$) は中間車両の速度伝達特性である。各々の車両の車速と車間距離は車車間通信によって検出できるものとする。

ACC コントローラは、フィードフォワード補償器、車間距離規範モデル演算、ドライバモデル演算、及びフィードバック補償器から構成される。フィードフォワード補償器は、先頭車両の速度 v_{n-1} から自車速 v_0 までの応答特性を車速規範モデル $G_{mv}(s)$ にマッチングさせる。フィードフォワード補償器 $G_{FF}(s)$ は次式となる。

$$G_{FF}(s) = \frac{G_{mv}(s)}{G_v(s)} \quad (8)$$

但し、

$$G_{mv}(s) = \frac{(2\zeta_{mv}\omega_{mv} - T_{gm}\omega_{mv}^2)s + \omega_{mv}^2}{s^2 + 2\zeta_{mv}\omega_{mv}s + \omega_{mv}^2}$$

であり、 T_{gm} は、先頭車から自車までの車間時間である。 ω_{mv} 、 ζ_{mv} は、フィードフォワード設計パラメータであり、 $\|G_{mv}(s)\|_{\infty}$ が 1 以下となるパラメータ集合の中で、減速度が小さくなるように値を設定する。

d_{md} は、先頭車から自車までの車間距離目標応答であり、次式で計算される。

$$d_{md}(s) = G_{md}(s) v_{n-1}(s) \quad (9)$$

但し、

$$G_{md}(s) = \frac{s + T_{gm}\omega_{mv}^2}{s^2 + 2\zeta_{mv}\omega_{mv}s + \omega_{mv}^2}$$

次に、先頭車から自車までの車間距離目標応答から中間車両の車間距離応答を差引いて自車の目標車間距離を計算する。中間車両の車間距離応答は、(10) ~ (12) 式のドライバ追従モデルを用いて求める。このモデルへの入力、第 $i+1$ 番目の車両の実車速であり、出力は、第 i 番目の車両の車間距離 $d_{h,i}$ となる。

$$\dot{v}_{h,i} = \frac{e^{-L_{h,i}/s}}{\tau_{h,i}s + 1} \cdot \{K_{1i}(d_{h,i} - T_{h,i}v_{h,i}) + K_{2i}vr_{h,i}\} \quad (10)$$

$$vr_{h,i} = v_{i+1} - v_{h,i} \quad (11)$$

$$d_{h,i} = \frac{1}{s} vr_{h,i} \quad (12)$$

(10) 式で、 $T_{h,i}$ は、第 i 番目の車両の車間時間であり、 $L_{h,i}$ 、 $\tau_{h,i}$ は、ドライバの反応時間を調整する定数、 K_{1i} 、 K_{2i} は、フィードバックゲインであり、これらの数値は代表的なドライバの応答特性に合わせて調整する。 d_h は、次式に示すように $n-2$ 台 ($i=n-1, \dots, 1$) のドライバモデルから得られる車間距離の和となる。

$$d_h = \sum_{i=1}^{n-2} d_{h-i} \quad (13)$$

フィードバック補償器は、自車直前の車両との車間距離 d_0 を目標値に一致させる。フィードバック補償器の入出力の伝達特性は次式となる。

$$G_{FB}(s) = \frac{v_{FB}(s)}{d_e(s)} = K_{10} + s \cdot K_{20} \quad (14)$$

但し、

$$d_e(s) = d_0(s) - d_c(s)$$

$$d_c(s) = d_{md}(s) - d_h(s)$$

K_{10} 、 K_{20} はフィードバックゲインである。フィードバック補償を施したときの閉ループ伝達関数 $G_L(s)$ は、次式となる。

$$G_L(s) = \frac{d_0(s)}{d_c(s)} = \frac{\omega_{FB}^2 (T_L s + 1)}{s^2 + 2\zeta_{FB} \omega_{FB} s + \omega_{FB}^2} \quad (15)$$

但し、

$$\omega_{FB} = \sqrt{\omega_v K_{10}}$$

$$\zeta_{FB} = \frac{\omega_v K_{20}}{2\omega_{FB}}$$

4.3 設計パラメータと車間距離応答の解析

ここでは、設計パラメータと車間距離応答特性の関係について解析し、4.1の要件(1)～(3)を満たすための設計パラメータ評価法を検討する。このため、車群安定性に対する評価指標に加え、要件に対する評価指標を次のようなノルムで表すことで数値化し、設計パラメータとの関係や中間車両の応答性のばらつきに対する性能劣化を解析することで、中間車両の応答性になるべく影響を受けずに高いレベルで要件を満たすことのできる設計パラメータを検討する⁹⁾。ノルム計算に用いる伝達関数の入出力信号を図5に示す。尚、後の制御シミュレーションとの関係から、ここでは車両台数を4台に限定して解析を行う。

Fig. 5 Input/output signals used in the norm calculations

4.3.1 評価指標の設定 要件(1)の指標、すなわち車群安定性の指標は、次式に示す先頭車両車速 v_3 から自車速 v_0 までの伝達関数の H_∞ ノルムとした。数値が1に近いほど目標が達成できていると評価する。

$$\|G_{vv}(s)\|_\infty = \left\| \frac{v_0(s)}{v_3(s)} \right\|_\infty \quad (16)$$

要件(2)の指標、すなわち車間距離応答の違和感の指標は、次式に示すような車間距離指令値から実車間距離までの伝達関数の H_∞ ノルムとした。数値が1に近いほど直前車両とのオーバーシュート量が少なく、目標が達成できていると評価する。

$$\|G_{vd}(s)\|_\infty = \left\| \frac{d_0(s)}{T_{hw} \cdot v_3(s)} \right\|_\infty = \left\| \frac{d_0(s)/T_{hw}}{v_3(s)} \right\|_\infty \quad (17)$$

また、要件(3)の指標、すなわち減速度の指標は、次式に示す先頭車両車速から自車減速度 g_0 までの伝達関数の H_∞ ノルムとした。数値が小さいほど目標が達成できていると評価する。

$$\|G_{vg}(s)\|_\infty = \left\| \frac{s \cdot v_0(s)}{v_3(s)} \right\|_\infty \quad (18)$$

4.3.2 フィードフォワード設計パラメータと評価指標との関係 図6に、フィードフォワード設計パラメータ ω_{mv} 、 ζ_{mv} に対する各々の指標の計算結果を示す。 $\|G_{vv}(s)\|_\infty$ が1以下となる設計パラメータを×印で示している。

(1) Unnatural headway distance response index

(2) Longitudinal acceleration index

Fig. 6 Relationship between design parameters and indexes

中間車両のドライバ追従モデルのノミナル応答は、テストコースにて取得したドライバのマニュアル追従走行

データを基に決定した。ここでは、コントローラで使用するドライバモデルは制御対象と同一とした。図6 (1)の結果から、車群安定性を確保する設計パラメータの集合の範囲内では、概略 ω_{mv} が小さい程、車間距離応答の違和感の指標が大きくなる。よって、過渡的な車間距離の増加を抑えるには、車群安定の範囲内で ω_{mv} を大きくする必要があることがわかる。図6 (2)の結果から、一般に ω_{mv} が大きい程、減速度の指標が大きくなるため、この増加を抑えるには、車群安定の範囲内で ω_{mv} を小さくする必要がある。これらの結果から、車群安定を達成するパラメータの集合では、車間距離応答の違和感と減速度の大きさはトレードオフの関係となることがわかる。

4.3.3 フィードバック設計パラメータと評価指標との関係

中間ドライバ応答のノミナルモデルに対するパラメータ変化が車間距離応答特性に与える影響を調べた。本制御系では、中間ドライバの特性ばらつきの影響を抑える役割はフィードバック補償器が担っている。そこで、フィードバック制御ゲインと前述の評価指標との関係を調べた。図7に示すように、中間ドライバの特性は、ノミナル、応答が速い、応答が遅いドライバの3種類とした。応答が速いモデルは、追従特性が車群安定となるように設定し、遅いモデルは、先行車減速時の車間距離が比較的狭くなるようにパラメータを設定した。

Fig. 7 Response of driver model

各々のドライバ応答に対し、(15)式で示したフィードバック設計パラメータ ω_{FB} と評価指数の関係を図8に示す。 ζ_{FB} は固定値とした。同図で、(a)は減速度が小さくなるように、(b)は車間距離の違和感が小さくなるようにフィードフォワード設計パラメータ ω_{mv} 、 ζ_{mv} を設定した。結果から、(a)、(b)とも ω_{FB} に対する指標の変化傾向は同等であり、車群安定性と減速度は、 ω_{FB} が大きいほど悪化する傾向となり、車間距離応答の違和感は、中間ドライバの応答に依存するものの、 ω_{FB} を大きくするに従い小さくなる傾向となる。従って、先行車の応答が比較的速い場合は、 ω_{FB} を小さく設定することで、ノミナル応答に近いレベルになると推察できるが、先行車の応答が遅い場合は、 ω_{FB} を小さくすると、車間距離応答の

違和感が大きくなり、 ω_{FB} を大きくすると、車群安定性が劣化する傾向となる。以上から、本制御系では、先行車の追従特性が比較的遅い場合における車群安定性と車間距離応答の違和感低減を同時に達成することが課題と考えられる。

Fig. 8 Relationship between feedback gains and indexes

5. 制御シミュレーション

5.1 ノミナル追従モデルを用いた制御シミュレーション

本制御の効果を検証するため、車間距離制御に必要な情報を直前の先行車のみから検出する車間距離センサ利用型ACCとの比較シミュレーションを行った。中間ドライバモデルはノミナル応答とした。本ACCのパラメータは、車群安定を達成する範囲内で比較的減速度の少なさを重視したパラメータを用いた。 ω_{mv} 、 ζ_{mv} は図8(a)と同じ値とし、 ω_{FB} は $\|G_v(s)\|_{\infty}$ と $\|G_{vd}(s)\|_{\infty}$ の増加を抑えるため、直前の車両との車間距離に定常偏差が生じない範囲でなるべく小さな値に設定した。センサ利用型ACCの追従特性は先行車に対して車群安定となるように設定した。結果を図9に示す。先頭車両の车速変化は70km/h

(a) Vehicle-to-vehicle communication type

Fig. 9 Comparative Simulation results

から 50km/h までとし、減速度は $1 \text{ [m/s}^2\text{]}$ とした。両者を比較すると、本 ACC は中間車両の車群安定性が比較的に悪い場合でも自車速のオーバーシュートがなく、更に、中間車よりも減速度の大幅な減少を実現している。

5.2 追従走行実験データを用いた制御シミュレーション テストコースにて車両 3 台によるドライバのマニュアル追従走行データを測定し、この実験データを車車間通信で得る先行車情報と見立て、最後尾に ACC 車両が追従するシーンを想定したシミュレーションを行った。

コントローラで使用する追従モデルは、別途行った実験データを基に同定した。2 台分の追従モデルは同じモデルを用いた。結果を図 10 に示す。先頭車両の車速変化は前節と同様としている。設計パラメータは、(a) は前節と同様の減速度の小ささを優先した設定とし、(b) は車間距離応答のオーバーシュートの小ささを優先した設定とした。結果から、先頭車両の減速後、中間車両は車速オーバーシュートが発生し、車速が先頭車よりも低下しているが (a)、(b) 共に ACC 車両は車速オーバーシュートが発生せず、先頭車両に対する車速低下は見られないこと、ACC 車両の減速度が他の車両と比べて抑えられていることがわかる。また、(a) は、(b) に比べて車間距離の開き度合いが大きく、減速度が小さくなっており、狙い通りの応答が得られている。これは評価指標にノルムを用いた解析が有効であることを示している。

6. 結 言

本論文では、車群安定性の大幅な向上と、違和感のない車両挙動をより小さな減速度で達成する車車間通信利用型 ACC の制御系について述べてきた。本検討では、以上の性能要件を達成するための制御系の一例として、モデルマッチング手法を用いた制御系を構築した。次に、車群安定性のみでなく、車間距離応答の違和感、減速度の指標を伝達関数のノルムで定義し、指標と設計パラメータとの関係を明らかにすることで ACC に要求される

性能をより高いレベルで実現するための制御系評価法を検討した。最後に、テストコースにて取得した車両 3 台のマニュアル追従運転時の実験データを用いて、ACC のシミュレーションを行った。その結果、狙い通りの応答特性が得られており、本評価手法が ACC への要求を高いレベルで実現する上で有効であることを確認した。本 ACC は限定されたシーンにおいては要求性能をより高いレベルで満たすと予想されるが、様々なシーンに対してより高いレベルで要求性能を満たしてゆくには、中間車両のドライバ応答の多様性に対応できるロバストな制御系設計が課題となる。

(a) Small deceleration parameters ($\omega_m=0.35, \zeta_m=0.75$) (b) Small range overshoot parameters ($\omega_m=0.60, \zeta_m=0.75$)

Fig. 10 ACC Simulation results using driving test data

文 献

- (1) T. Iijima, et al., "Development of Adaptive Cruise Control with Brake Actuation", *SAE Technical Paper* No. 2000-01-1353 (2000).
- (2) Y. Yamamura, et al., "Development of an Adaptive Cruise Control System with Stop-and-Go Capability", *SAE Technical Paper* No. 2001-01-0798 (2001).
- (3) S.E. Shladover, "Review of the State of Development Advanced Vehicle Control Systems (AVCS)", *Vehicle System Dynamics*, 24(1995), pp. 551-595.
- (4) C. Liang and H. Peng, "String Stability Analysis of Adaptive Cruise Controlled Vehicles", *JSME International Journal Series C*, Volume 43, No.3, September 2000, pp. 671-677.
- (5) Y. Yamamura, et al., "A Design Method for String Stable ACC", *Proceeding of ITS World Congress* No. 3056 (2002).