車車間通信を利用した車群安定 ACC の研究*

(第2報, モデル予測制御を用いた ACC 設計法)

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

(2nd Report, ACC Design Method Using Model Predictive Control)

Yoshinori YAMAMURA^{*4}, Yoji SETO and Masao NAGAI

^{*4} Advanced Vehicle Engineering Department, Nissan Motor Co, Ltd.,
1-1 Morinosatooyama, Atsugi-shi, Kanagawa, 243-0123 Japan

A study was made on a control method for an adaptive cruise control (ACC) system that uses vehicle-to-vehicle communication to achieve a substantial improvement in string stability and natural headway distance response characteristics at lower levels of longitudinal G. As one control strategy for obtaining such improvements, a control system was constructed in this study using a model predictive control method. ACC simulations were conducted to confirm the performance against the wide variety of driving situations of the intermediate drivers. Simulations were also conducted using test data recorded for driver following behavior in manual driving in a three-vehicle platoon on a proving ground course. The results showed that the proposed system achieved higher levels of required ACC performance with respect to string stability, natural headway distance response behavior and reduction of the rate of deceleration under a wide variety of driving situations.

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

1. 結 言

地球環境保護や温暖化防止の観点から Adaptive Cruise Control (ACC) System⁽¹⁾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。ACCの持つポテンシャルの一つに交通流の効率化があることは従来から知られており、その実現手段の一つとして車車間通信を用いた隊列走行は既に多くの研究が行われてきた⁽²⁾。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。筆者らは、第1報⁽³⁾にて ACC が対象とする車両を前方の複数の車両とし、先頭車両と ACC 車両との間にドライバが運転する車両が走行するシーンにおいて、ドライバの車群不安定による車群の速度低下を抑制する ACC の制御手法について検討した。今回、そこで課題となっていたドライバの多様な追従特性に対する性能劣化に対処するため、モデル予測制御を応用した ACC 制御系を構築した。モデル予測制御は、現在の状態を初期値としてある評価区間内の制御対象の挙動をモデルを用いて予測し、この間の評価関数を最小とする制御入力をサンプリングタイム毎に刻一刻と計算しながら制御を行う方法である。この手法は予測に用いるモデルが非線形であっても最適化ができること、評価関数の重みを実時間で変更できることなどから、中間車両のドライバ特性変化に対するロバスト性が期待できる。

本論文ではモデル予測制御を用いた車車間通信利用型 ACC について、中間ドライバの追従特性の相違に対する応答性の比較や、車群を構成する車両の挙動が予測とは大幅に異なる場合の性能評価、および実験データを用いたシミュレーションによるリアルワールドでの走行条件に対する有効性の評価を行い、本手法

* 原稿受付 2006 年 11 月 1 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、フェロー、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

が幅広い走行シーンにおいて ACC に要求される性能を高いレベルで満たすことを確認した。

2. 記号の定義

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。

Fig. 1 Vehicle string

3. 車群走行時の課題と本制御の目的

車群走行時の課題の一つに、サグやトンネル手前等でドライバーが知らない間に生じる減速が、次々と増幅して後続車両に伝達されるために生ずる車群の速度低下が知られている。このような速度低下の増幅伝播を抑制するには、次式が成立すれば良いことが知られている⁽²⁾。

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

ここで、 $\|\cdot\|_{\infty}$ は安定な伝達関数の H_{∞} ノルム、 G_i は第 i 番目の車両の速度制御特性である。ドライバーのマニュアル運転車両を含む車群において (1) 式を成立させるには、最後尾車両の速度制御特性 G_0 を前方複数の先行車の車速オーバーシュートを吸収するような特性とする必要がある。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、先行車の挙動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可能性がある。そこで、車車間通信を用いて前方複数の車両の走行状態を検出し、速度低下の増幅伝播の予測を基に自車の減速度を制御することで、急激な減速を抑制しつつ自車の必要以上の速度低下を防止することが本制御の目的となる。

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 車両のドライバーが直接目視できない前方複数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ーから見た場合、直前の先行車が減速していないのに自車が減速を開始して車間距離が開くことになる。よって、ACC 車両の直前の先行車との車間距離

応答に違和感がないように留意しなければならない。以上を車間距離制御系への要件としてまとめると、下記となる。

- (1) 先頭車両の車速 v_{n-1} 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

上記の要件 (1) ~ (3) を満足するには、自車前方のある車両が何らかの原因で減速を行った場合、その車両の減速がどのように自車直前の車両まで伝播されるかを予測しつつ、最適な操作量を決定することが重要と考えられる。第1報では、要件を満たすための手法としてモデルマッチングを応用した制御系を設計し性能評価を行った。そこで課題となった中間ドライバーの応答特性の多様性に対する制御性能の劣化に対処するため、本検討ではモデル予測制御を利用した車間距離制御系を構成した。

モデル予測制御では現在時刻 t における制御対象の状態量を初期値とし、時刻 t から $t+T$ までの制御対象の将来挙動を数学モデルによって予測し、この間の評価関数が最小となるような入力軌道をサンプリングタイム毎に演算する。実際の制御対象への入力は、時刻 t から $t+T$ までの最適入力軌道のうち時刻 t における値が使用される。

4.2.1 制御対象 図2に制御系ブロック図を示す。制御対象は点線で囲まれた部分となる。

Fig. 2 Block diagram of ACC system

自車の駆動トルク制御系には遅れが無く、指令値に応じた加速度を発生できるものと仮定すると、加速度指令値 u_0 と自車速 v_0 との関係、及び直前の先行車との車間距離 d_0 の関係式は次式となる。

$$\dot{v}_0 = u_0 \quad (2)$$

$$\dot{d}_0 = v_1 - v_0 \quad (3)$$

同図で、 G_i ($i=1, \dots, n-2$) は第 i 番目の車両のドライバー追従特性である。ドライバーの追従制御則を、車速に

比例した目標車間距離と実車間距離との偏差, 及び相對速度に応じて自車加減速度を操作するものと仮定し, 次式のようにモデル化した。

$$\dot{v}_i = k_{v_i} \cdot v_i + k_{d_i} \cdot d_i + k_{r_i} \cdot v_{i+1} \quad (4)$$

$$\dot{d}_i = v_{i+1} - v_i \quad (5)$$

但し,

$$k_{d_i} = 2 \cdot \zeta_{d_i} \cdot \omega_{d_i}$$

$$k_{r_i} = \omega_{d_i}^2$$

$$k_{v_i} = -k_{d_i} \cdot T_{h_i} - k_{r_i}$$

であり, ω_{d_i} と ζ_{d_i} は典型的なドライバの特性に合わせるため, 車間距離が短く接近速度が高いほど大きく, 逆に車間距離が長く接近速度が低いほど小さくなるように設定する⁶⁾。また, T_{h_i} は, 第 i 番目のドライバの車間時間である。本検討では T_{h_i} が実際の車間時間に徐々に近づくように実時間で修正している。

先頭車両の動特性は次式のように, ドライバが要求する目標速度 v_L に対し, 時定数 $1/\omega_L$ の一次遅れで追従すると仮定する。

$$\dot{v}_{n-1} = \omega_L (v_L - v_{n-1}) \quad (6)$$

ここで, 第 i 番目 ($i=1, \dots, n-1$) の車両と自車との関係を車群安定とするような規範モデル G_{ref_0i} を導入する。次式に規範モデルと規範応答 v_{ref_0i} との関係を示す。

$$v_{ref_0i} = G_{ref_0i}(s) v_i \quad (7)$$

但し,

$$G_{ref_0i}(s) = \frac{(2\zeta_{0i}\omega_{0i} - \omega_{0i}^2 T_{h_0i})s + \omega_{0i}^2}{s^2 + 2\zeta_{0i}\omega_{0i}s + \omega_{0i}^2}$$

であり, ω_{0i} と ζ_{0i} は各々の先行車と自車との応答性が車群安定となるように選ぶ。 T_{h_0i} は, 第 i 番目の先行車との車間時間である。(2)～(6)式と規範モデルを含んだ制御対象は次式のような形で表すことができる。

$$\dot{x} = f(x, u_0, t) \quad (8)$$

但し, x は次式のように構成されるベクトルである。

$$x^T = [v_0 \quad d_0 \quad v_1 \quad d_1 \quad \dots \quad v_{n-1} \quad v_{ref_01} \quad \dots \quad v_{ref_0(n-1)}] \quad (9)$$

4・2・2 評価関数 評価関数を次式で与える。

$$J = \int_t^{t+T} L(x(\tau), u(\tau)) d\tau \quad (10)$$

但し,

$$L(x, u_0) = q_0 (-d_0 + T_{h_0} \cdot v_0)^2 + \sum_{k=1}^{n-1} q_k (v_{ref_0k} - v_0)^2 + r u_0^2$$

であり, t は現在時刻, T は予測ホライズンの長さ, $q_0, \dots, q_{n-1}$ 及び r は重みを示すパラメータである。上式の右辺第1項は, 自車直前の先行車との目標車間距離 $T_{h_0} \cdot v_0$ と実車間距離との誤差を評価している。この項は, 直前の先行車との車間距離応答の違和感を評価しており, 要件 (2) の達成に必要な評価項である。右辺第2項は, 前方 i 番目の車両に対する自車の応答特性を車群安定とする規範応答との誤差を評価しており, 要件 (1) の達成と密接な関係がある。右辺第3項は, 加速度指令値 u_0 の大きさを評価しており, 要件 (3) の達成に必要な項である。以上のように各評価項は前述の要件を達成すべく設定するが, 本検討では様々な走行シーンで要件を満たすため, 重み $q_0, \dots, q_{n-1}$ を走行状態に応じて実時間で修正している。

4・2・3 最適化アルゴリズム (8)式のシステム

に対し, 時刻 t から $t+T$ までの区間で (10) 式を最小とする制御入力 $u \in U[t, t+T]$ を求めるため, 最小原理から必要条件を導き数値的に最適解を演算した (付録参照)。

5. 制御シミュレーション

5・1 中間ドライバの様々な追従応答特性に対する性能評価シミュレーション 中間ドライバの追従応答特性の多様性が ACC の応答特性に与える影響を調べるためシミュレーションを行った。

5・2 中間ドライバの追従応答特性 第1報と同様に, 先行車の減速に対し3種類のドライバ追従特性を想定する。想定する中間ドライバの追従特性を図3に示す。

Fig. 3 Response of driver model

ノミナル応答はテストコースにて測定したドライバの追従走行データを同定して求めており (4), (5) 式で示したコントローラのドライバ追従モデルと同じ応答とした。残りの2つのドライバ追従特性はコント

ローラの追従モデルとは異なる応答に設定しており、応答が速いモデルは追従特性が車群安定となるように、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。

5.3 性能評価シミュレーション 図4に示すように、車両4台で70km/hで一定速度走行中、先頭車両が何らかの原因で50km/hまで減速し、後続車両が次々と減速する走行シーンを想定する。先頭車の減速度は 1m/s^2 とし、ACC車両の直前車両との目標車間時間は1sとした。ここでは第1報で検討した制御手法との比較を行うが、両者とも本走行シーンにおける先頭車両減速時の車間距離 d_0 の増加分が、最大でも70km/h走行時の車間距離の20% (約24m) 以下となるように設計パラメータを調整した。

Fig. 4 Driving scene for ACC simulation

5.3.1 中間ドライバの追従応答がノミナルの場合

図5に結果を示す。2台の中間車両の応答がいずれもノミナルの場合では、(a) モデルマッチング、(b) モデル予測制御ともACC車両の車速オーバーシュートはよく抑えられており、速度低下の増幅伝播を大幅に抑制できている。

Fig. 5 Simulation results for nominal response drivers

減速開始時期が早いことに起因する車間距離の開き度合いは両者ともに違和感はないレベルと考えられるが、(b)の方が開き度合いが小さく良好であることがわかる。また、ACC車両の減速度の大きさに関しても(b)の方が(a)よりも低く抑えられている。

5.3.2 中間ドライバの追従応答が速い場合

図6に結果を示す。2台の中間車両のいずれも追従応答が速い場合では、手法(a), (b)ともに車速オーバーシュートは抑えられている。また、車間距離が離れてしまうことによる違和感も無い。しかし(a)はACC車両の減速度が直前の先行車とほぼ同様となり、車間距離が収束するのに時間を費やしている。これは、先行車になかなか近づかないというドライバの違和感に繋がる可能性がある。

Fig. 6 Simulation results for faster response drivers

5.3.3 中間ドライバの追従応答が遅い場合

図7に結果を示す。(a), (b)ともに車間距離の最大値は同等となるように設計しているため、車間距離応答の違和感に関しては同じレベルであるが、(b)は車速オーバーシュートが(a)に比べ抑えられている。また、(a)では減速度に変動が生じているが、(b)で

Fig. 7 Simulation results for slower response drivers

は変動が見られず滑らかな減速度が得られている。以上のシミュレーション結果からモデル予測制御が要件をより高いレベルで満たしていると言える。

5・4 中間ドライバの挙動が想定した伝播特性と異なる場合 本検討では、先頭車両が減速後、後続車両が次々と減速する走行シーンを想定しており、(4) 式のドライバ追従モデルについても直前の車両への追従を記述したものとなっている。しかし、実際の交通流ではある車両が必ずしも直前の車両に追従しない場合がある。そこで、以下の走行シーンを想定したシミュレーションを行った。

- (a) パターン 1: 車両 4 台で一定速走行中、先頭車が 0.5m/s^2 で加速し、車両 2 が追従せず一定速で走行
(b) パターン 2: 車両 4 台で一定速走行中、車両 2 が 1m/s^2 で減速

Fig. 8 Simulation results for different response from prediction model

結果を図 8 に示す。(a) では先頭車が加速したときにわずかな加速度指令がでているが、その後、車間距離が詰まることなく目標値に追従している。これは、

第 i 番目の車両の車間距離が開くと ω_{di} を小さくする方向にドライバ追従モデル (4) 式のパラメータが修正されること、及び先頭車両に対する規範応答重み q_3 が小さくなり、車両 2, 1 に対する規範応答重み q_2 , q_1 と車間距離誤差に対する重み q_0 が大きくなるように修正されるためである。(b) の走行条件では q_3 が大きいままでは ACC 車両は規範応答 $v_{ref,03}$ に速度を合わせようとするため、車両 2 の減速によって車間距離 d_0 が縮まる傾向となる。しかし、(a) と同様にドライバ追従モデルと重みが修正されるため、車間距離の目標値との誤差は小さく抑えられており、車両 2 の車速に対する ACC 車両の車速オーバーシュートもわずかに抑えられている。これらの結果から、中間車両のドライバ追従モデルの修正と重みを実時間で修正するアルゴリズムをモデル予測制御に組み込むことにより、より広範囲な走行シーンで要件を満たすことのできるシステムが可能と考えられる。

5・5 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受信する先行車情報と見立て、最後

Fig. 9 Simulation results using experimental data

尾に ACC 車両が追従するシーンでのシミュレーションを行った。3 台の先行車位置は RTK-GPS で測定し、データ通信周期は 100ms とした。シミュレーション条件は、車速 70km/h で走行中、先頭車両が (a) 1m/s^2 、(b) 2m/s^2 で減速するシーンとした。図 9 に結果を示す。中間車両の応答性は様々であり、車間時間や車速オーバーシュート量も実験毎に異なっている。中間車両はオーバーシュートにより約 45km/h まで速度が低下しているが、このような条件においても ACC 車両は速度オーバーシュートによる速度低下が生じていない。また、ACC 車両の目標車間距離は 50km/h において約 14m であり、定常的には目標値に一致していることがわかる。車間距離の増加も小さく、違和感はないレベルであると考えられる。減速度に関しては、4 台中最も低く抑えられており、直前車両の減速度の約半分となっている。

6. 結 言

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。本検討で得られた結果を以下にまとめる。

(1) 中間車両の追従応答がノミナルから変化した場合でも、第 1 報で用いた手法に対し、より高いレベルで要件を満たすことができる。

(2) 中間車両の挙動が予め想定した伝播特性と異なる場合でも、ドライバ追従モデルのパラメータや評価関数の重みを実時間で修正することで、より広範囲な走行シーンで要件を満たすことが可能である。

(3) 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シミュレーションを行い、狙い通りの性能が得られることを示した。

以上の結果から、本制御が車車間通信を用いた ACC に要求される性能を高いレベルで実現できるポテンシャルがあることを検証した。

文 献

- (1) T. Iijima, et al., "Development of Adaptive Cruise Control with Brake Actuation", *SAE Technical Paper* No. 2000-01-1353 (2000).
- (2) S.E. Shladover, "Review of the State of Development Advanced Vehicle Control Systems (AVCS)", *Vehicle System Dynamics*, 24(1995), pp. 551-595.
- (3) 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.
- (4) Y. Sakawa, et al., "On Global Convergence of an Algorithm for Optimal Control", *IEEE Trans*

Automatic Control, Vol.AC-25, No.6, December 1980, pp.1149-1153.

- (5) Y. Yamamura, et al., "Study on a String-stable ACC using Vehicle-to-Vehicle Communication", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 73, No.726, February 2007, pp. 379-384.
- (6) A. Higashimata, et al., "Design of a Headway Distance Control System for ACC", *Proceedings of JSAE Annual Congress*, No.114-99, October 1999, pp.5-8

付 録

x と同じ次元を持つ随伴変数ベクトル λ を用いて次式のハミルトニアンを定義する。

$$H(x, u, \lambda) = L(x, u, t) + \lambda^T \cdot f(x, u, t) \quad (\text{A.1})$$

最小原理より、制御入力 u とそれに対応する軌道 x が最適であるための必要条件は、 u と x に対応して以下の条件を満たす λ が存在しなければならない。

$$\dot{x} = f(x, u, t), \quad x(t) = x_0 \quad (\text{A.2})$$

$$\dot{\lambda} = -H_x(x, u, \lambda, t), \quad \lambda(t+T) = 0 \quad (\text{A.3})$$

$$H(x, u, \lambda, t) = \min_{u \in U} H(x, v, \lambda, t) \quad (\text{A.4})$$

本検討では以上を満たす最適解を次のアルゴリズム $\Delta^{(4)}$ を用いて求めた。

STEP0 $i=0$ とし、名目上の制御入力 u^0 を与える。

STEP1 u^0 に対応する軌道 x^0 、評価関数 $J(u^0)$ を計算し、 $i=1$ とおく。

STEP2 先に求めた x^{i-1} と u^{i-1} を用いて随伴変数ベクトル λ^{i-1} の微分方程式を逆時間方向に積分する。

$$\dot{\lambda}^{i-1} = -H_x(x^{i-1}, u^{i-1}, \lambda^{i-1}), \quad \lambda^{i-1}(t+T) = 0 \quad (\text{A.5})$$

STEP3 先に計算した x^{i-1} と u^{i-1} 、及び λ^{i-1} を用いて次式を満たす u^i を求める。

$$u^i = \text{Arg} \min_{u \in U} [H(x^i, u, \lambda^{i-1}, t) + (u - u^{i-1})^T \cdot \mu^i \cdot (u - u^{i-1})] \quad (\text{A.6})$$

$$\dot{x}^i = f(x^i, u^i, t), \quad x^i(t) = x_0 \quad (\text{A.7})$$

$$J(u^i) = \int_t^{t+T} L(x^i, u^i, t) dt \quad (\text{A.8})$$

但し、 μ^i は非負の対角行列である。

STEP4 $J(u^i) > J(u^{i-1})$ の場合は、 μ^i の要素が大きくなるように修正して **STEP3** に戻る。そうでない場合は、**STEP5** を実行する。

STEP5 $\|u^i - u^{i-1}\| < \varepsilon_u$ が成立すれば、それが最適性の条件を満たす解と判定して計算を終了し、このときの $u^i(k)$ を u_0 に代入して制御を行う。そうでない場合は、 $i=i+1$ として **STEP2** に戻る。