

エンジンモデルによる遅れを補償した縦方向車両追従制御

Longitudinal Vehicle Follow-up Control with Compensating Lag Caused by Engine Model

80221712 及川善貴 (Yoshitaka Oikawa) Supervisor 大森浩充 (Hiromitsu Ohmori)

1 はじめに

高度道路交通システム (ITS) は、安全性の向上、渋滞の減少、環境負荷の低減、新産業の創出などを目的として世界中で研究が進められている。ITS の中で中心的なシステムである自動運転支援システム (Automated Highway Systems: AHS) におけるプラトーン (一列に連なる走行車群) 制御では、プラトーン安定性 (基準車間距離 L_j [m] を設定し実車間距離との誤差が、プラトーンの後ろの自動車にいくほど小さくなること) が評価基準のひとつとなっている。従来の縦方向車両追従制御では、タイヤのスリップモデリングを簡化のために無視し、エンジンにおける 1 次遅れが考慮されておらず、データの信頼性に問題がある絶対位置の情報を必要とするなど、プラトーン安定性に関する問題点が指摘されている。本論文では、ロアーレベルをエンジン、スリップを含むモデルとし、そのプラトーン車群に 1 次遅れを補償したニューラルネットワーク (NN) を用いる手法を提案する。この制御においては、必要な情報に絶対位置を含まないため、ロアー、アッパーをあわせた全体の安定性を保証することができる。

2 車両追従問題設定

自動車追従制御におけるプラトーン走行車両 (図 1) を考える。その j 番目のモデリングは、アクセル/ブレーキ α_j を入力とし、加速度 \ddot{x}_j を出力とするロアーレベルと、加速度 \ddot{x}_j を入力とし位置 x_j を出力とするアッパーレベルで構成される (図 2)。

2.1 ロアーレベル モデリング

ロアーレベルのモデリングはさらに、エンジンモデル式 (1)、スリップモデル式 (6) の 2 式で構成されている。エンジンモデルは次式

$$\dot{w}_{e_j} = (w_{e_j} + B_j \alpha_j) / \tau_{tag_j} (\dot{x}_j) \quad (1)$$

で表される。ここで α_j [deg] は制御入力、 w_{e_j} [rpm] はエンジン速度、 τ_j [sec] は時定数である。

スリップモデルは次式よりなる。

$$v_{c_j}(w_{e_j}, p_j, v_{m_j}) = p_j w_{e_j} + v_{m_j} \quad (2)$$

$$I_j(\dot{x}_j, v_{c_j}) = 1 - (\dot{x}_j / v_{c_j}) \quad (3)$$

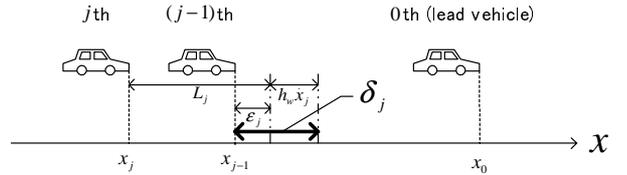


図 1: Platoon of cars - upper controller notation-

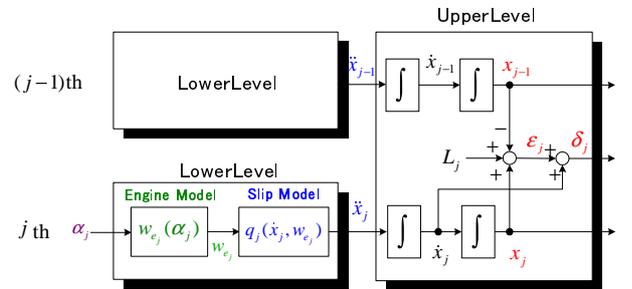


図 2: Longitudinal vehicle tracking control concept

$$F_{tr_j}(I_j) = K_{r_j} \text{sat}(I_j / I_{\max_j}) \quad (4)$$

$$\ddot{x}_j = \{F_{tr_j} - \text{sign}(\dot{x}_j)(c_j \dot{x}_j^2 + \mu_j M_j)\} / M_j \quad (5)$$

式 (2) はすべりが無い無負荷での計算速度 v_{c_j} 式であり、 w_{e_j} の一次関数 (傾き p_j , 切片 v_{m_j}) である。すべり I_j は実速度 \dot{x}_j と計算速度 v_{c_j} の比を用いて式 (3) のように定義される。式 (4) は、牽引力 F_{tr_j} の式であり、 I_{\max_j} は最大すべり係数、 K_{r_j} 最大牽引力である。式 (5) は、自動車ダイナミクスにおける運動方程式であり、 c_j は空気抵抗係数、 μ_j は回転抵抗係数、 M_j は自動車重量である。ここで「ギヤ比は一定 ($v_{c_j}(w_{e_j})$)」、「後退しない」という仮定をすると、次式のようにまとめられる。

$$\ddot{x}_j = \frac{K_{r_j}}{M_j} \text{sat}\left(\frac{1 - \frac{\dot{x}_j}{p_j w_{e_j} + v_{m_j}}}{I_{\max_j}}\right) - \frac{c_j \dot{x}_j^2 + \mu_j M_j}{M_j} \triangleq q_j(\dot{x}_j, w_{e_j}) \quad (6)$$

2.2 アッパーレベル モデリング

アッパーレベルモデルでは、次式の車間距離誤差 (理想の車間距離と実車間距離の差) ε_j, δ_j を定義する。

$$\varepsilon_j \triangleq L_j - (x_{j-1} - x_j) \quad (7)$$

$$\delta_j \triangleq (L_j + h_{w_j} \dot{x}_j) - (x_{j-1} - x_j) \quad (8)$$

L_j は基準車間距離、 h_{w_j} [sec] はヘッドウェイタイムを表す。

3 車両追従制御設計

まず，プラトーン安定性を式の上で定義する．

【定義】車間距離誤差 δ_j について伝達関数 $\hat{H}_j(s) \triangleq \frac{\delta_j(s)}{\delta_{j-1}(s)}$ を定義し， $\hat{H}_j(s)$ に対し

$$|\hat{H}_j(j\omega)| \leq 1, \quad \forall \omega \quad (9)$$

が成り立つとき，プラトーン安定である，という

制御の目的は，スリップ下での制御をしながら，プラトーン走行車がプラトーン安定を満たすとともに，ヘッドウェイタイム車間距離誤差 δ_j が零に収束することである．

3.1 アッパーレベル コントローラ

アッパーレベルコントローラとして用いるのは半自動化適応自動車制御則 (Semi-Autonomous Adaptive Cruise Control: SAACC) であり，上記の目的を満たすような理想加速度を計算することにある．理想加速度 \ddot{x}_{dj} を

$$\ddot{x}_{dj} = -\kappa_1 \ddot{x}_{j-1} - \kappa_2 \ddot{x}_j - \kappa_3 \dot{e}_j - \kappa_4 e_j - \kappa_5 \dot{x}_j \quad (10)$$

とする．ここで， $\kappa_1, \dots, \kappa_5$ は $\kappa_1 h_{w_j} = \tau_j$, $\kappa_4 h_{w_j} = \kappa_5$, $-\kappa_1 - \kappa_2 + \kappa_3 h_{w_j} = 1$ とし，さらに $\kappa_1 < 0$, $\kappa_3, \kappa_4 > 0$ とすることで， δ_j は零に収束する．また， $\kappa_3 = (1 - \kappa_1 \kappa_4) / h_{w_j}$ とすると，プラトーン安定性 (9) も達成される．

3.2 ロアレベル コントローラ

この節では次のアルゴリズムに従って， \ddot{x}_{dj} (式 (10)) が実際の加速度 \ddot{x}_j になるような理想の入力を計算する．

$$\hat{a}_j = (\tau_{lag_j} \dot{w}_{e_j} + B_j w_{e_j}) / B_j \quad (11)$$

$$\hat{\phi}_j = \dot{w}_{e_j} \quad (12)$$

$$\hat{\phi}_j = K_b \tilde{a}_{c_j} + \xi_j - y_{nn_j} + v_{2_j} \quad (13)$$

$$\tilde{a}_{c_j} = a_{c_{dj}} - a_{c_j} \quad (14)$$

$$a_{c_{dj}} = -K_V e_j + \ddot{x}_{dj} \quad (15)$$

$$\xi_j = \dot{a}_{c_{dj}} - \frac{1}{a_j} \dot{\xi}_j \quad (16)$$

$$v_{2_j} = \left\{ K_{W_{2j}} \|e_j\| + K_{W_{3j}} (\|\hat{W}_j\|_F + W_{M_j})^2 \right\} \times \tilde{a}_{c_j} / \|\tilde{a}_{c_j}\| \quad \tilde{a}_{c_j} \neq 0 \quad (17)$$

$$y_{nn_j} = \hat{W}_j^T \sigma_j(x_{nn_j}) \quad (18)$$

$$\dot{\hat{W}}_j = -S_j \sigma_j \tilde{a}_{c_j}^T - k_j S_j \|\tilde{a}_{c_j}\| \hat{W}_j \in R^M \quad (19)$$

$$x_{nn_j} = [1, e_j, \dot{x}_{dj}, \tilde{a}_{c_j}, a_{c_j}, y_{nn_j}, \|\hat{W}_j\|_F]^T \in R^7 \quad (20)$$

$$e_j = \dot{x}_j - \dot{x}_{dj} \quad (21)$$

$$\sigma_j = [1, e_j, \dot{x}_{dj}, \dots, \|\hat{W}_j\|_F, \dots, \|\hat{W}_j\|_F^m] \in R^M \quad (22)$$

重みは $\|\hat{W}_j\|_F \leq W_{M_j}$ のように制限される．また，ロバスト化された信号のゲインは $K_{W_{2j}} > 1$, $K_{W_{3j}} > k_j$ のように制限される．ここで M は節数である．

【定理】以上の制御則を用いると，フィルタリングされた追従誤差 $r_j(t)$ ，誤差 $\tilde{a}_{c_j}(t)$ ，NN 重み推定値 \hat{W}_j は UUB

であり，限界が

$$\|\tilde{a}_{c_j}\| > \frac{W_{M_j} k_j}{K_{b\min}} \|\hat{W}_j\|_F + \frac{E_{N_j}}{K_{b\min}} \quad (23)$$

で与えられる．さらに，誤差 $\tilde{a}_{c_j}(t)$ はゲイン K_b を増大させることで，任意に小さくすることができる．

4 数値例

自動車の各パラメータ値は $\tau_{lag_j} = 1$, $B_j = 2000/9$, $p_j = 65/3000$, $v_{m_j} = 20$, $I_{\max_j} = 0.1$, $K_{r_j} = 420 \times 9.8$, $c_{a_j} = 0.3$, $\mu_j = 0.005$, $M_j = 1300$, $L_j = 5$, $h_{w_j} = 0.1$ とした．また，アッパー，ロアにおける制御パラメータを $\kappa_1 = 0.5$, $\kappa_2 = -2.4$, $\kappa_3 = 1.3$, $\kappa_4 = 3$, $\kappa_5 = 0.6$, $K_V = 0.1$, $a_j = 200$, $K_b = 5000$, $k = 0.0000001$, $K_{W_{2j}} = 2$, $K_{W_{3j}} = 0$, $S_j = 100I_{35}$ とした．

このシミュレーションにおいては先導車 + 後続車 5 台の計 6 台の自動車を考える．先導車が 2.5[sec] に急ブレーキをかける．急ブレーキをかけつづけた結果，図 4 のとおり，5 秒から 7 秒にすべり現象が起きていることがわかる．その際の追従する自動車の車間距離誤差 δ_j の様子を図 6 に示す．

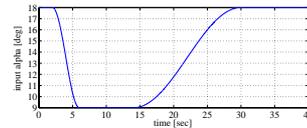


図 3: Lead vehicle's engine slip parameter α_0

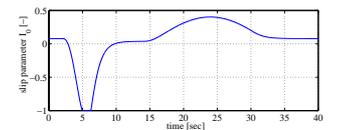


図 4: Lead vehicle's slip parameter I_0/I_{\max_0}

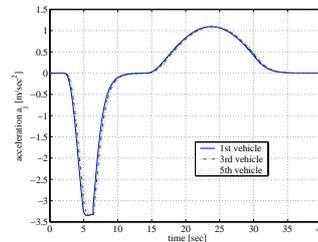


図 5: 1st, 3rd, 5th vehicle's acceleration \ddot{x}_j

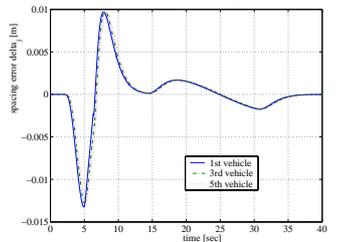


図 6: 1st, 3rd, 5th vehicle's spacing error δ_j

5 結論

本研究においてはプラトーン安定性を保証しつつ，エンジンモデルにおける遅れをも補償するようなニューラルネットワークを用いて，スリップモデリングに対する制御を提案し，シミュレーションによりその有効性を確認した．本手法の特徴としては，物理パラメータの変動に対して適応的に制御できるという点，非線形性のモデリングに対する制御ができる点，必要な情報に絶対位置を必要としない点であった．この制御により，それぞれの自動車は車間距離誤差が零に向かうこと，プラトーン安定性を保証することができる．