

ACC による車両制御システムの設計とシミュレーション

Designing and Simulation of Vehicle Control System Using Adaptive Cruise Control

服部 有里子[†] 中川 悠樹[†]
Yuriko Hattori[†] Yuuki Nakagawa[†]

1. はじめに

交通事故死者削減・渋滞低減のため、自動車の自動走行・高度運転支援技術の開発が進められている。自動車メーカー各社から、自動車の縦方向の自動運転制御である ACC (Adaptive Cruise Control: 車間距離制御装置) を搭載した車両が市販されている。

ACC は自動運転の運転操作 (アクセル, ブレーキ, ハンドル) のうち, アクセル, ブレーキの自動運転技術である。ACC は運転者が設定した速度を上限として, 前方車に追従するように自車の速度を自動的に調節する装置である。前方車が減速すれば自動でブレーキをかけて減速して一定の車間距離をキープし, 前方車が加速すればそれに合わせて自動で加速する。センサやカメラで計測される前方車との車間距離や相対速度に基づいて車間を一定に保つ制御を行っていることは知られているが, その制御アルゴリズムの詳細は公開されていない。

本研究では, ACC 車両の車両挙動を高精度で再現可能な車両制御モデルを設計し, シミュレーションにより ACC 車両の車両挙動を検証・評価した。

ACC により高速域での追突回避, 渋滞低減のため, 車間距離を最低限に短くすることができるかどうか求めることを本研究の目的としている。本研究の課題は以下の 3 点である。

- ACC による車両制御システムを解析することにより, 相対速度や目標加速度等の計測データを取り出し, 制御パラメータ値を設定すること。
- 車両の相対速度を動的に計算し, 車間距離はどれくらいまで安全であるか, 最短の車間距離を探索すること。
- 高速域の車両に対しても, ACC により車間の変化を最小限に抑え, 追突を回避できる速度と車間との関係を探ること。

以下, 2 章で関連研究, 3 章で問題設定と要求条件について述べたのち, 4 章で一般の車両制御モデル, 5 章で ACC による車両制御システムについて解説する。6 章でシミュレーションによる検証・評価について説明し, 最後に 7 章で本稿をまとめる。

2. 関連研究

既存研究として, CACC (Cooperative Adaptive Cruise Control: 通信利用協調型車間距離制御装置) を搭載したトラック 4 台を車間距離 4m で隊列走行させる実証実験がエネルギー ITS 推進事業で行われ, 安全な CACC 走行が実現できることが確認された [4] [5]。

また, 下り坂から上り坂に変わる道路上の地形の一つである「サグ部」での無意識な減速が原因で後続車両に速度の低下が伝わり発生する渋滞の対策として, ACC を

活用したサグ部の交通流円滑化の可能性について研究が進められている [1] [7]。

既存研究では実際の ACC を必ずしも模擬できておらず, 高速域の車両に対して車間距離がどれくらいまで安全であるかについての検証は行われていない。本研究では, ACC 車両の車両挙動を高精度で再現可能な車両制御モデルを設計し, 車両制御システムを解析することにより, 制御パラメータ値を設定し, 高速域の車両に対しても追突を回避できる速度と車間との関係を探した。

3. 問題設定と要求条件

3.1 車間時間

車間距離制御では, 車載センサで計測した同一車線上の前方車との車間距離や相対速度を用いて, 目標加速度を決定することを考える。

ここで, 目標車間距離 L_{des} は, 以下の式のように,

$$L_{des} = hv_0 + L_{safe}$$

一定値+速度比例値とし, その比例定数 h を「車間時間」という。車間時間は, 自車の速度で前方車の位置に何秒後に到達するかを示す時間である [3]。

3.2 制御パラメータ

自車の目標加速度は, 目標車間距離との誤差と前方車との速度の誤差 (相対誤差) からフィードバック制御により算出する。自車の目標加速度の式は,

$$a_{0des} = K_1(r - L_{des}) + K_2(v_1 - v_0)$$

となる。ここで, K_1 は車間距離誤差のフィードバックゲイン, K_2 は速度の誤差に対するフィードバックゲインである。実際の車両では, 車両の加速度は制御システムの目標加速度の指令に対して遅れをもつ。この遅れは普通車では 0.2 秒程度である [3]。

本研究では, ACC による車両制御システムを解析することにより, 相対速度や目標加速度等の計測データを取り出し, 制御パラメータ (K_1, K_2) の値を設定した。

3.3 要求条件

本研究で構築する ACC による車両制御システムでは, ACC 車両の車両挙動を高精度で再現するための車間距離制御アルゴリズムが要求される。ここで, システムが満たすべき要求条件を以下にまとめる。

- ① 車両速度の範囲は, 25~120 km/h とする。
- ② 制御システムの目標加速度の指令に対する遅れは, 0.2 秒程度とする。
- ③ 車間時間は, 1.3~2.4 秒の範囲を推移する。
- ④ 安全のための車間距離は, 7 m とする。

[†] 国立大学法人筑波技術大学, Tsukuba University of Technology

4. 一般の車両制御モデル

ACC による車両制御システムを設計する前に、まず、一般の車両制御モデルを作成する。車両制御モデルは、エンジン・トルクコンバータ (T/C) ・車両側・変速制御の 4 つのサブシステムから構成される。

エンジンにて、ペダル開度と現在のエンジン回転数を入力としてエンジントルクを計算する。エンジントルクは T/C にて出力トルクとして伝達され、余った余剰トルクはエンジン回転数の回転上昇に使用される。T/C にて計算した出力トルクから回転角加速度を計算し、回転角速度から速度に変換し、それを変速制御に送り込む。変速制御は、適切なタイミングでどのギヤ段を使うかを判断する装置である。一般の車両制御モデルを図 1 に示す。

4.1 エンジン

エンジントルク [Nm] は、シミュレーションスタート後はデータマップと無関係に 0.2 秒間、100 [Nm] のトルクを発生する。0.2 秒経過した後はデータから計算した値に切り替える。

ペダル開度 [%] と現在のエンジン回転数 N_e [rpm] を入力として、2 次元関数を近似するブロックでエンジントルク [Nm] を出力する。

4.2 トルクコンバータ

4.2.1 釣り合いトルク・出力トルクの計算

エンジン回転数 N_e [rpm]、出力回転数 N_{out} [rpm] として、以下の数式を計算する。

$$\text{駆動側速度比: } e = N_{out}/N_e \quad [0 \sim 1]$$

$$\text{被駆動側速度比: } e = N_e/N_{out} \quad [0 \sim 1]$$

ただし、 $N_{out} = 0$ のとき、 e は 0 とする。

$$\text{容量係数: } C = f_1(e) \quad [Nm/rpm^2]$$

$$\text{トルク増幅比: } T = f_2(e) \quad [Nm]$$

$$\text{釣り合いトルク駆動側: } T_{out1} = C \times N_e^2 \quad [Nm]$$

$$\text{釣り合いトルク被駆動側: } T_{out1} = -C \times N_{out}^2 \quad [Nm]$$

$$\text{出力トルク: } T_{out2} = T_{out1} \times T \quad [Nm]$$

4.2.2 トルクコンバータ (イナーシャ考慮) のモデル

エンジン回転数 N_e [rpm] は、T/C に入力されるトルク T_e [Nm] と釣り合いトルク T_{out1} [Nm] との差を使用して計算する。入力トルク T_e は出力トルクとして伝達され、余った余剰トルクはエンジン回転数 N_e の回転上昇に使用される。 N_e は次の式で計算する。

$$N_e = \int \frac{T_e - T_{out1}}{I_{ne}} ds \quad [rpm]$$

I_{ne} : 入力イナーシャ [kgm²] (I_{ne} を 0.2 [kgm²] とする)

4.3 車両側

車両側サブシステムは、入力トルク [Nm]、ギヤ段、車両重量 [kg]、タイヤ半径 [m]、勾配 [rad] の 5 つの入力から入力軸回転数 [rpm] と速度 [km/h] を算出する。

4.3.1 走行抵抗の計算

走行抵抗 R [N] には、空気抵抗 R_1 [N]、勾配抵抗 R_2 [N]、道路抵抗 R_3 [N] の 3 つの抵抗がある。

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_1 = \text{抵抗力} \times \text{車両速度}^2$$

$$= k \times s \times \rho \times \left(v \times \frac{1000}{3600} \right)^2 \times \frac{1}{2}$$

k : 空気抵抗係数 s : 前面投影面積 [m²] ρ : 空気密度 [kg/m³]

$$R_2 = m \times g \times \sin \theta$$

$$R_3 = m \times g \times \cos \theta \times C_{rr}$$

m : 車両重量 [kg] g : 重力加速度 [m/s²] θ : 勾配 [rad]

C_{rr} : 転がり抵抗係数 (アスファルトの場合は 0.01)

4.3.2 出力軸回転数の計算

車両重量 m [kg]、タイヤ半径 r [m]、走行抵抗 R [N]、入力トルク T [Nm] から出力軸回転数 n [rpm] を計算する。

車両重量、タイヤ半径から回転慣性モーメントであるイナーシャ I [kgm²] を求め、イナーシャとトルクから出力回転数を割り出すことができる。

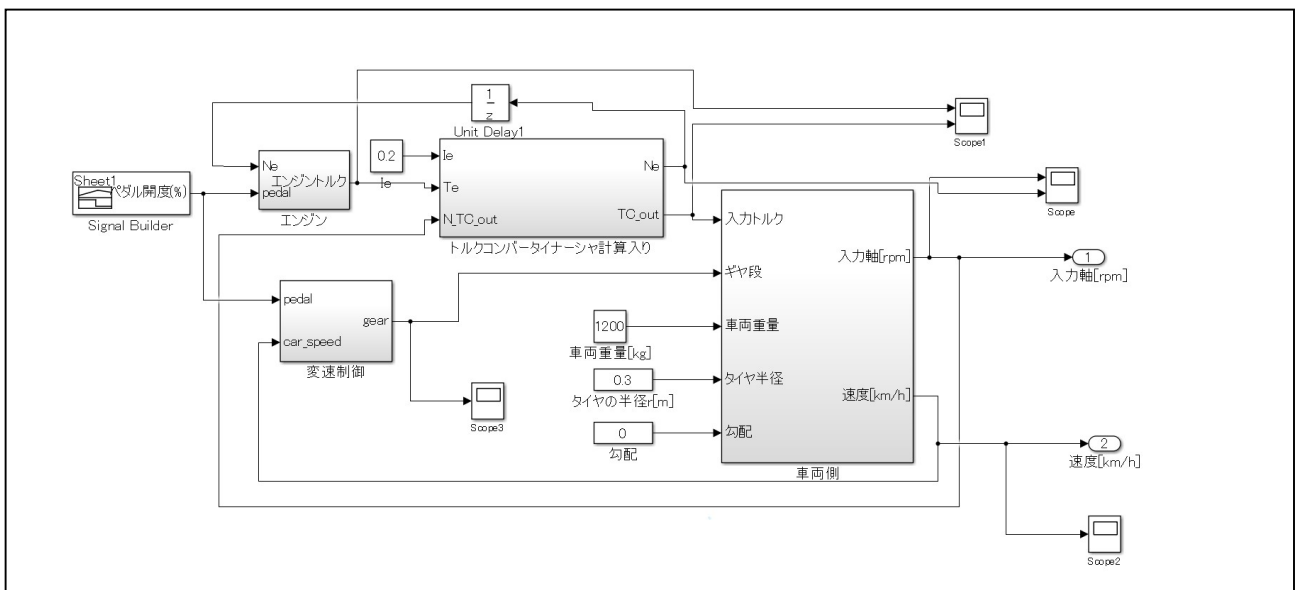


図 1 一般の車両制御モデル

イナーシャ I [kgm²] の式は次のとおりである。

$$I = m \times r^2 \quad m: \text{車両重量}[\text{kg}] \quad r: \text{タイヤ半径}[\text{m}]$$

走行抵抗によって、外からタイヤにトルクがかかり、損失トルクが発生する。よって、車両からタイヤに入るトルクから損失トルクを考慮して、タイヤにかかる正味のトルク（損失込みトルク）を計算する必要がある。

損失込みトルク T_{out} [Nm] の式は、

$$T_{out} = T - T_r$$

T : タイヤに入るトルク [Nm] T_r : 損失トルク [Nm]

次にイナーシャ I と損失込みトルク T_{out} から回転角加速度 a [rad/s²] を求める。

回転角加速度 a [rad/sec²] を求める式は、

$$a = \frac{T_{out}}{I}$$

回転角加速度 a [rad/sec²] を積分して角速度 [rad/sec] を求め、出力軸回転数 [rpm] を計算する。式は次のとおりである。

$$n = \int a \, ds \times \frac{1}{2\pi} \times 60 \quad [\text{rpm}]$$

4.3.3 速度計算

出力軸回転数 n [rpm] とタイヤ半径 r [m] から速度 V [km/h] を計算する。式は次のとおりである。

$$V = n \times (2 \times \pi \times r) \times \frac{1}{1000} \times 60 \quad [\text{km/h}]$$

4.3.4 車両側モデル

これまで計算したモデルを組み合わせることで、図 2 に示す車両側モデルが構築できる。

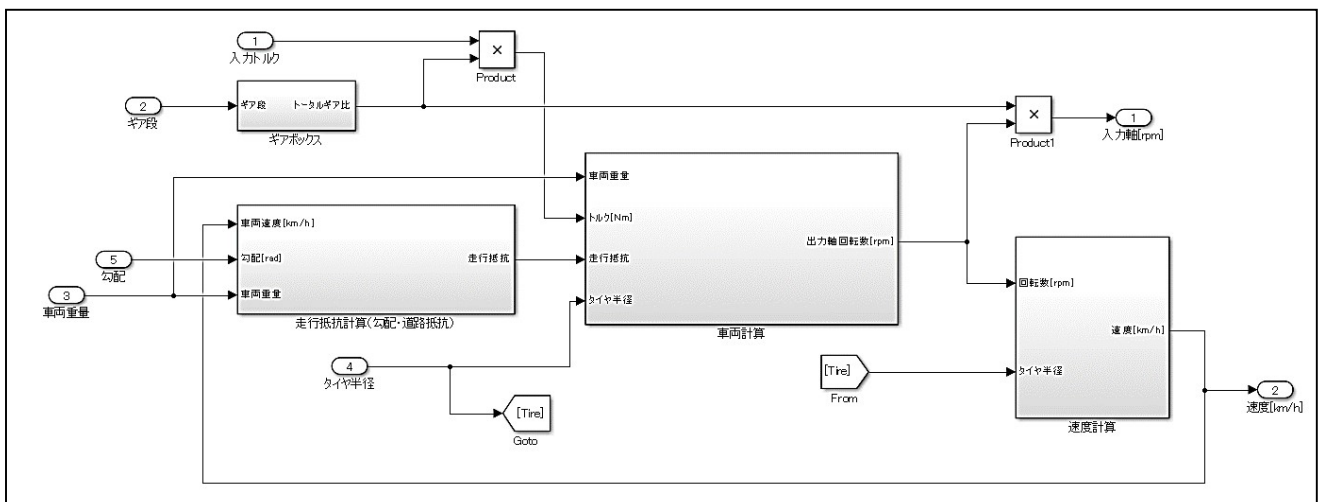


図 2 車両側モデル

4.4 変速制御

変速制御は、速度などに応じてシフトアップ・シフトダウンするかを判断する制御である。

前回のギヤ段やペダル開度、車両速度を基に新たなギヤ段へシフトする (図 3)。ペダルを踏み込み速度が上がるとき、shift1-2UP 線を通るとギヤ段が 1 から 2 へと変わる (①)。同様に shift2-3UP 線を通るとギヤ段が 2 から 3 へと変わる (②)。shift3-4UP 線を通るとギヤ段が 3 から 4 へと変わる (③)。ペダルを緩めると速度が下がってくるため、shift4-3DOWN 線を通るとギヤ段が 4 から 3 へと変わる (④) という構造である。

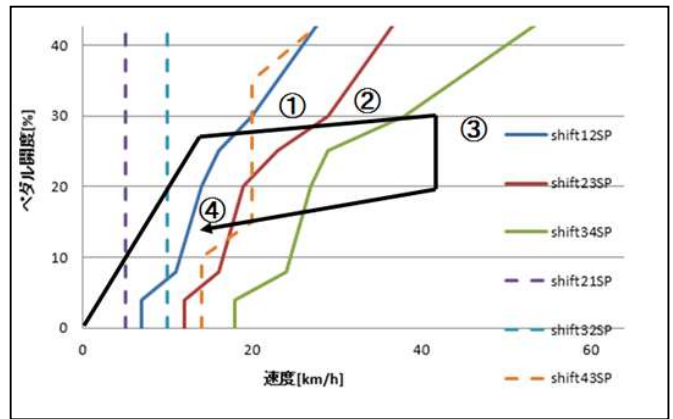


図 3 変速制御のギヤ段シフト

5. ACC による車両制御システム

車間距離制御アルゴリズム [2] [3] の出力である車間距離と、自車の目標加速度の 2 つの制御パラメータ (K_1 , K_2) の値を用いて、ACC 車両の車両挙動を高精度で再現可能な ACC の車両制御モデルを設計した。

ACC の車両制御アルゴリズムを図 4 に示す。ACC の制御アルゴリズムを一般の車両制御システムに加えることで、ACC による車両制御システムを構築した (図 4)。

5.1 自車の目標加速度の算出

自車の目標加速度は、目標車間距離との誤差と前方車との速度の誤差からフィードバック制御により算出する。自車の目標加速度の式は、

$$a_{0des} = K_1(r - L_{des}) + K_2(v_1 - v_0)$$

文献[1]では市販車の ACC の制御パラメータ値を実走により $K_1 = 0.025$, $K_2 = 0.41$ と推定している。今回は、これらのパラメータ値を用いて自車の目標加速度を求めるものとする。

5.2 車間距離の算出

車間距離は前方車の加減速度により求めると考える。

(1) 前方車が加速の場合 ($a_1 > 0$)

車両制御モデルを用いて、速度 120km/h に向けて最大加速度を近似により求める。

$$a_{1amax} = 4.91$$

前方車の加速度の範囲は、

$$0 < a_{1des} \leq a_{1amax}$$

この範囲より車間距離を求める式は以下のとおり。

$$L_{1ad} = \frac{a_{1des} T_T^2}{2}$$

(2) 前方車が減速の場合 ($a_1 < 0$)

急ブレーキによる最大減速度は文献[6]より

$$a_{1dmax} = -4.9$$

前方車の減速度の範囲は、

$$a_{1dmax} \leq a_{1des} < 0$$

この範囲より車間距離を求める式は以下のとおり。

$$L_{1ds} = \frac{a_{1des} T_T^2}{2}$$

よって、加減速度の範囲は $-0.5[G] \sim 0.5[G]$ とおく。

5.3 アクセル開度・ブレーキ制御システム

アクセル開度・ブレーキ制御システムは、まず、目標加速度から質量、慣性質量、走行抵抗により目標駆動力を算出する。次に、目標駆動力からタイヤ半径、総減速比により目標エンジントルクを算出する。目標エンジントルクから、エンジン回転数とエンジントルクのデータテーブルにより、アクセル開度とブレーキが求められる。アクセル開度・ブレーキ制御システムの処理フローを図 5 に示す。

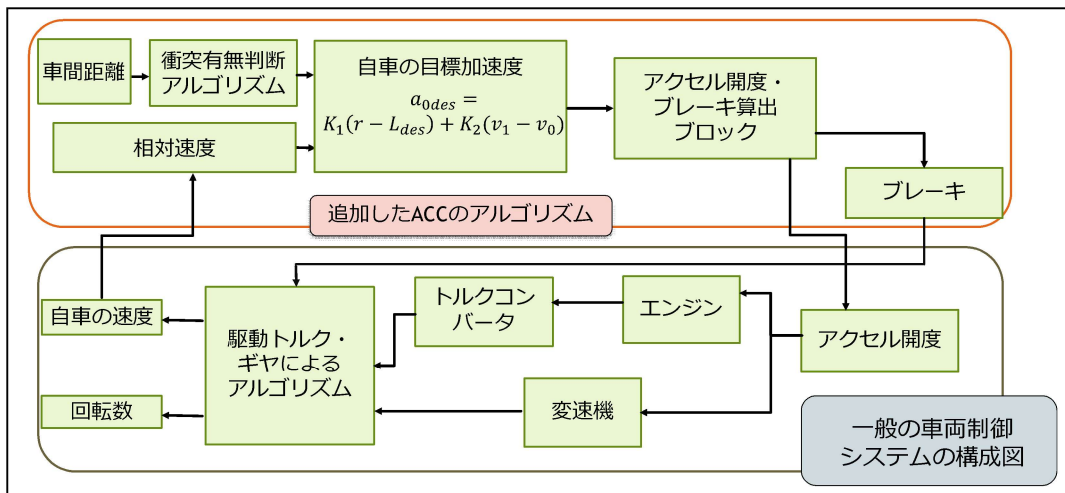


図 4 ACC による車両制御システム

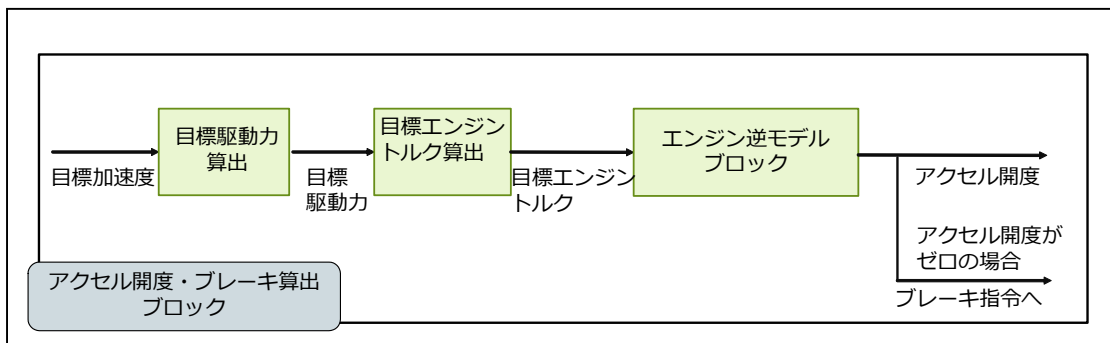


図 5 アクセル開度・ブレーキ制御システム

6. シミュレーションによる検証・評価

6.1 検証

前方車と自車の初期速度を 100km/h に設定した。その後、前方車が速度 100km/h から 50km/h まで減速する場合、車間距離は最終的に速度 50km/h において車間時間 1.3 秒を保持できるかどうか、シミュレーション検証を行った。制御パラメータ値は $K_1 = 0.025$, $K_2 = 0.41$ と設定した。ここで、前方車と自車はどちらも普通車として、車両重量は 1200kg, タイヤ半径は 0.3m とする。

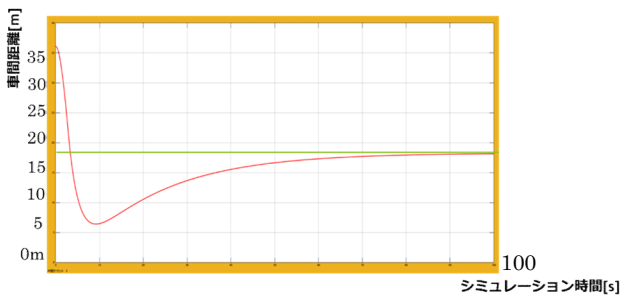


図 6 車間距離の変動グラフ

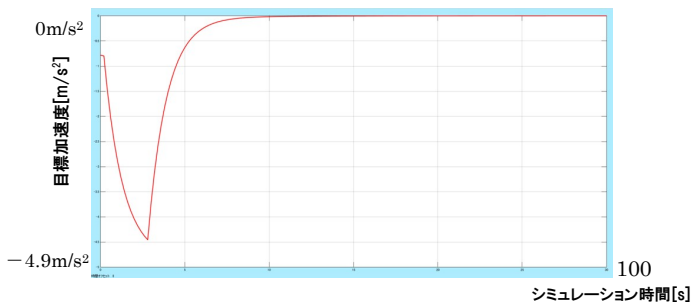


図 7 目標加速度の変動グラフ

検証の結果、車間距離は最終的に速度 50km/h において 18.1m (車間時間 1.3 秒) 付近を保持していることが分かる (図 6)。目標加速度は最終的に加速度 0m/s^2 に収束している (図 7) ことから、車間距離を保っていることも分かる。車間距離の実測値は 18.28m で理論値は 18.1m である。0.99% の誤差となったため、シミュレーション検証にほぼ間違いがないことが分かる。

6.2 シミュレーション結果

6.2.1 前方車への追従制御

前方車両が速度 120, 110, 100, 90, 80, 70, 60[km/h] で走行中に急ブレーキを踏み、 $-0.5[\text{G}]$ の減速度で速度 50[km/h] まで減速した場合を事故に見立ててシミュレーションを実行した。前方車と衝突することなく、加減速度の値が $-0.5[\text{G}] \sim 0.5[\text{G}]$ の間で推移したとして、車間距離制御アルゴリズムの出力である車間距離の値が負の場合は、事故が起こる可能性があるものとみなす。制御パラメータ値は

$K_1 = 0.025$, $K_2 = 0.41$ とおく。はじめの車間距離は加減速度の範囲の境界線に達するまでは任意の値とする。車両重量とタイヤ半径は普通車のもの (車両重量: 1200kg, タイヤ半径: 0.3m) とする。

前方車と自車の速度をどちらも 120, 100km/h に設定した。速度 120, 100km/h で追突事故になる車間時間が検証できた場合、追突事故にならない範囲も含めて車間距離をグラフに示す。

シミュレーションの結果、速度 120km/h において車間時間 1.2 秒までは追突事故にならないことが分かった。また、速度 100km/h において車間時間 1.1 秒までは追突事故にならないことも分かった。図 8, 9 にこれらの車間距離の変動グラフを示す。これらのグラフを見ると、速度 120km/h において車間時間 1.1 秒、速度 100km/h において車間時間 1.0 秒では、車間距離の変動グラフに負の値がある。つまり追突事故となることが分かる。

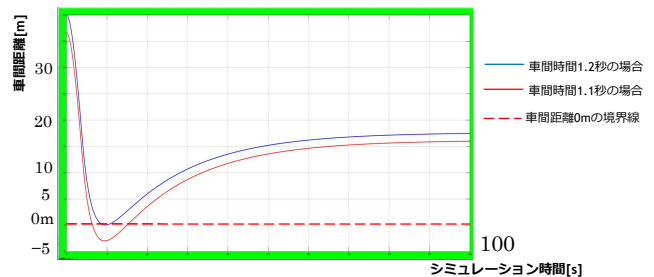


図 8 速度 120km/h の車間距離の変動グラフ

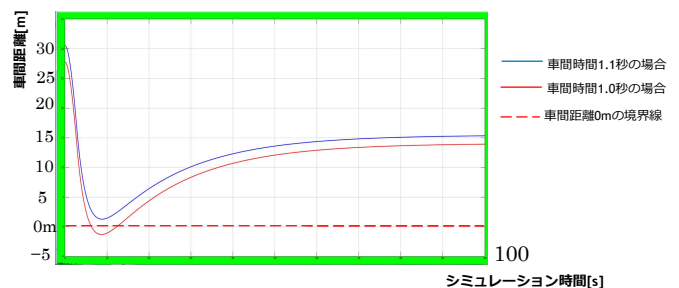


図 9 速度 100km/h の車間距離の変動グラフ

6.2.2 追い越し時の車間距離制御

次に自車速度 120km/h において、前方車が自車の道路へ追い越した時の速度が 50km/h の場合のシミュレーションを行った。車間距離は 50m から始まるとする。シミュレーション結果を図 10, 11 に示す。

図 10, 11 のグラフを見ると、車間距離 40m では、車間距離の変動グラフに負の値があることが分かる。また、目標加速度は 4 秒付近までは -4.9m/s^2 を保持していることから、実際には推移範囲を超えていることも分かる。よって追突事故となる可能性があるものとみなす。ちなみに車間距離をより細かく設定することにより検証した結果、車間距離 43m までは追突事故にならないことが分かった。

●車間距離が 40m, 45m の場合

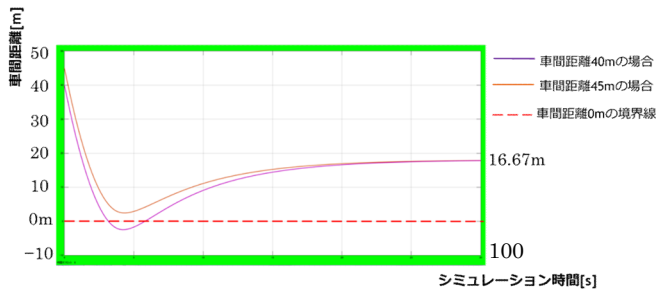


図 10 車間距離 40, 45m の場合の車間距離の変動グラフ

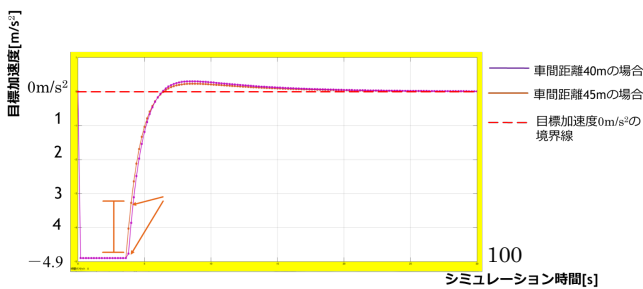


図 11 車間距離 40, 45m の場合の目標加速度の変動グラフ

参考文献

- [1] 日高健 他, “ACC を活用した高速道路サグ部の交通流円滑化”, 自動車技術会論文集, Vol.44, No.2, pp.765-770 (2013).
- [2] 慶応義塾大学 SFC 研究所, “エネルギーITS 推進事業「協調走行(自動運転)に向けた研究開発”, (2013).
- [3] 大前学, “ACC (車間距離制御装置) と CACC (通信利用協調型車間距離制御装置) のアルゴリズム”, 電学誌, 135 巻, 7 号, pp.433-436 (2015).
- [4] 今枝勇太 他, “渋滞削減のための CACC の有用性に関する研究”, 情報処理学会講演論文集 (2016).
- [5] 伊佐治和美 他, “実用燃費向上を目的とする車車通信を利用した ACC 制御”, デンソーテクニカルレビュー, Vol.17, No.5, pp.95-102 (2012).
- [6] 森田和元 他, “ドライバのブレーキ踏力アルゴリズムの提案”, 自動車技術会論文集, Vol.42, No.5, pp.1229-1234 (2011).
- [7] 鈴木一史 他, “ACC を活用した高速道路サグ部渋滞対策サービスの実証的評価”, 第 12 回 ITS シンポジウム論文集 (2014).

7. あとがき

本研究では, ACC 車両の車両制御モデルを設計し, ACC により高速域での追突回避, 渋滞低減のため, 車間距離を最低限に短くすることができるかどうか, シミュレーションにより検証・評価した。

シミュレーションにより検証した結果, 前方車への追従では, 速度 120km/h において車間時間 1.2 秒まで, 速度 100km/h において車間時間 1.1 秒までは追突事故にならないことが分かった。追い越しでは, 車間距離 43m までは追突事故になることはまずないことが分かった。よって安全で車間距離を短くしたい場合, 車間時間は 1.1~1.2 秒に設定した方がよいと考える。安全のための車間距離 7m を追加すれば追突事故にならない安全な ACC となると考える。今回は市販車の実走により推定した, 制御パラメータ値を使用しているため, 最適なパラメータ値との誤差の可能性があると見られる。また, 検証での 0.99% の誤差も車間時間が 1.3 秒より短縮できた原因の一つであると考えられる。

今後は, CACC 車両において高速域での車間距離制御により追突事故になるまでの車間距離について検証し, 本稿の ACC により検証した結果との差異について検討する所存である。