

⑩ 予防安全支援システム効果評価シミュレータ (ASSESS) の 車両モデルにおけるブレーキアシストシステムの構築

自動車安全研究領域 ※田中信壽 廣瀬 敏也 森田 和元

1. はじめに

当研究所では、ブレーキアシストシステム（以下、BAS と称す。）を評価対象とした予防安全支援システム効果評価シミュレータ（以下、ASSESS と称す。）を開発している。この ASSESS は、コンピュータ内に道路環境を再現し、バーチャルな環境内を自律的に判断して走行する車両（以下、エージェントと称す。）を出現させることで実際の交通状況と同等の環境を創出するマルチエージェントシステムで構成されている。

本研究は、この ASSESS の中で時々刻々変化する各エージェントの位置座標を算出するプログラムである車両モデルに、BAS の機能を実装することを目的とするものである。

2. 車両モデル

2. 1 概要

車両モデルは、車体の前後方向、前輪の回転及び後輪の回転の3つの自由度を持つ等価2輪車モデルで構成されている。また、制動のシミュレーション時では、ドライバの認知・判断・操作を模擬し操作量を出力するプログラムであるドライバモデルからブレーキペダル踏力の入力を受け、その値に基づき位置座標を時々刻々算出するモデルとなっている。

2. 2 制動時の計算アルゴリズム

車両モデルは、ドライバモデルからブレーキペダル踏力 F_{bp} の入力を受け、制動トルク T_{brake} を算出する。この制動トルク T_{brake} の算出は、実車両のブレーキペダル踏力と制動トルクの関係を実験によって測定し、この結果を関数化した式（以下、 $T_{brake}-F_{bp}$ 特性関数と称す。）を用いて行う。この $T_{brake}-F_{bp}$ 特性関数を得るために行った実験では、

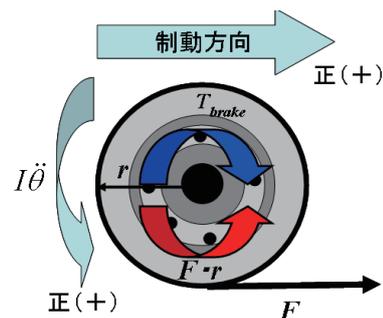


図1 制動時におけるタイヤに生じる力と回転軸周りのトルクの関係

実際にドライバにブレーキペダルを踏ませて制動をかける実験を種々の速度、減速度の条件で行った。その際、車両の前後輪には六分力計を、ブレーキペダルには踏力計を設置し、その計測値から T_{brake} と F_{bp} の相関性を求め $T_{brake}-F_{bp}$ 特性関数を導出した。次いで、この T_{brake} から、式 (1) を用いて車輪の角加速度 $\ddot{\theta}$ を算出し、この角加速度を積分して車輪の角速度 $\dot{\theta}$ を求める。この角速度 $\dot{\theta}$ から式 (2) を用いて、スリップ率 S を算出し摩擦係数 μ を求める。この摩擦係数 μ の算出は、実車両のスリップ率 S と摩擦係数 μ の関係を事前に実験によって測定し、その結果を関数化した式（以下、 $\mu-S$ 特性関数と称す。）を用いて行う。この $\mu-S$ 特性関数は、上述の $T_{brake}-F_{bp}$ 特性関数を得るために行った実験の際に同時に測定したデータ (μ の算出：制動力、垂直荷重- S の算出：車体速度、車輪速度) から、その相関性を求め導出した。次いで、この摩擦係数 μ から式 (3) 及び (4) を用いて、制動力 F (前輪： F_f 、後輪： F_r) を算出する。なお、ここまでの各計算は、前輪と後輪それぞれで行う。最後に、これら前後輪の各制動力から式 (5) を用いて、車両の減速度 α を求める。この減速度 α を積分し車両速度 V を求め、さらに、これを積分することで移動距離

L を求める。車両モデルは、この移動距離 L から最終的に位置座標を算出する。

シミュレーション結果の一例として、図 3 に、実車両が 60[km/h] の等速度運動状態から 7.0[m/s²] で減速する実験条件で制動をかけた場合に示した車両速度の時間特性（実測値：青線）と、この際に測定

$$I\ddot{\theta} = F \cdot r - T_{brake} \quad \dots (1)$$

$$S = \frac{V - r \cdot \dot{\theta}}{V} \quad \dots (2)$$

$$F_f = \mu_f \cdot M \cdot g \cdot \frac{(l_r + \mu_r h)}{(l - h \cdot (\mu_f - \mu_r))} \quad \dots (3)$$

$$F_r = \mu_r \cdot M \cdot g \cdot \frac{(l_f - \mu_f h)}{(l - h \cdot (\mu_f - \mu_r))} \quad \dots (4)$$

$$\alpha = -g \cdot \frac{\mu_f l_r + \mu_r l_f}{(l - h \cdot (\mu_f - \mu_r))} \quad \dots (5)$$

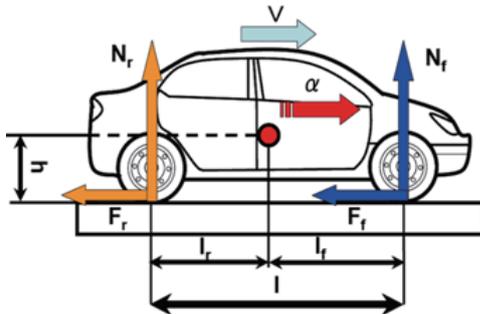


図 2 車両に作用する力

表 1 車両モデルに使用する記号

記号	記号の説明
I	車輪の慣性モーメント (kg*m ²)
θ	車輪の回転角 (rad)
T_{brake}	制動トルク (N*m)
F	制動力 (N)
S	スリップ率
V	車両速度 (m/s)
r	車輪回転半径 (m)
α	車両加速度 (m/s ²)
h	車両重心高 (m)
l	ホイールベース長さ (m)
l_f	重心から前輪までの長さ (m)
l_r	重心から後輪までの長さ (m)
N_f	前輪垂直荷重 (N)
N_r	後輪垂直荷重 (N)
F_f	前輪制動力 (N)
F_r	後輪制動力 (N)

されたドライバのブレーキペダル踏力の時間特性（図 4）を本車両モデルの入力とした場合に推定される車両速度の時間特性（シミュレーション値：ピンク線）を示した。その結果、両者はほぼ一致し、制動距離の誤差率は 1.9% であった。

また、図 5 に、同様の実験を速度及び減速度の条件を変えて行った場合の実車両の制動距離とその際に得られたブレーキペダル踏力の時間特性を用いて車両モデルが推定した制動距離との関係を示した。推定誤差率の平均は、2.29% であった。

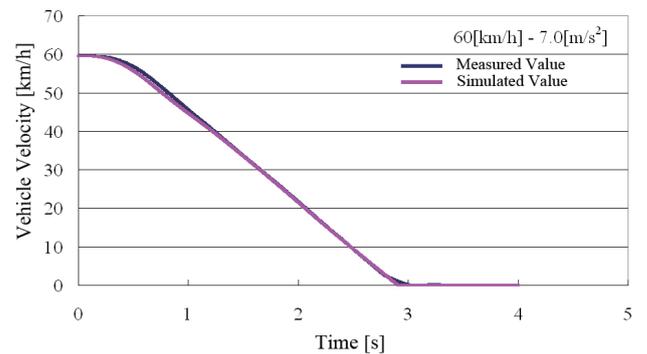


図 3 実車両の車両速度の時間特性と車両モデルが推定した車両速度の時間特性の比較

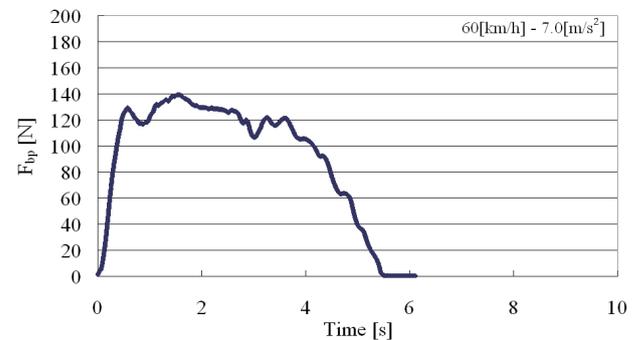


図 4 ドライバのブレーキペダル踏力の時間特性

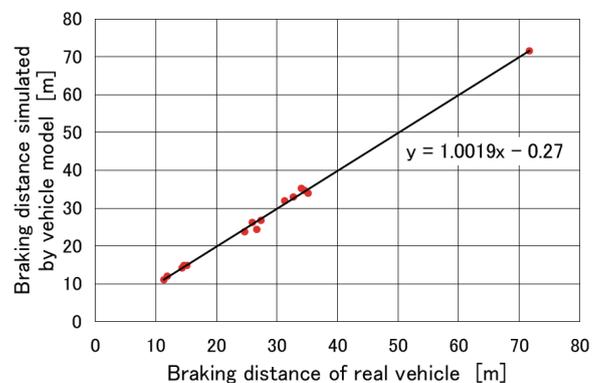


図 5 実車両の制動距離に対する車両モデルが推定した制動距離

3. BAS 機能の組み込み

3. 1 BAS 機能の設計コンセプト

BAS とは、ドライバが行うブレーキペダルの操作量から緊急ブレーキの判断を行い、緊急ブレーキが踏まれていると判断した場合に制動力を増加させるシステムである。本シミュレータでは、この機能を、車両モデルのブレーキペダル踏力から制動トルクを算出するプロセスで実現することとした。一方、今回組み込む BAS は、緊急ブレーキの判断をブレーキペダルの踏み込み速度が仕様として設定された作動閾値を越えたか否かで判断するタイプの BAS とした。このタイプの BAS は、踏み込み速度検知型 BAS と呼ばれ、多くの実車両で採用されている。

そこで、ASSESS では、ドライバモデルから出力されるブレーキペダルの踏み込み速度、もしくはそれに相当する情報が閾値を越えていた場合、そのときのブレーキペダル踏力と $T_{brake}-F_{bp}$ 特性関数から算出される制動トルクに対して、一定の値をかさ上げするメカニズムを BAS の機能として車両モデルに組み込むこととした。

3. 2 BAS 作動時の $T_{brake}-F_{bp}$ 特性関数の設計

踏み込み速度検知型の BAS が作動するか否かは、ブレーキペダル踏力には依存せず、踏み込み速度のみに依存する。そこで、車両モデルに BAS の非作動時の制動トルクを算出するための $T_{brake}-F_{bp}$ 特性関数に加え、BAS の作動時に制動トルクを算出する $T_{brake}-F_{bp}$ 特性関数を新たに組み込むこととした。

この BAS 作動時の $T_{brake}-F_{bp}$ 特性関数は、前輪、後輪ともに BAS の非作動時の $T_{brake}-F_{bp}$ 特性関数に対して一定の値を加えるものとした。

また、このかさ上げ分の一定値は、BAS 作動時における前輪と後輪の制動トルクの比と、非作動時

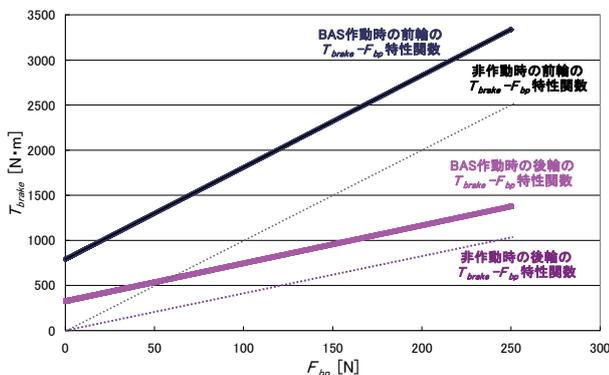


図 6 BAS 作動時の $T_{brake}-F_{bp}$ 特性関数

におけるその比が変化しないものと仮定し求めた。以下に具体的な設計方法を示す。

BAS 非作動時の前輪と後輪の $T_{brake}-F_{bp}$ 特性関数はそれぞれ式 (6) 及び (7) の形式で表すことができる。よって、BAS 作動時の前輪と後輪の $T_{brake}-F_{bp}$ 特性関数はそれぞれ式 (8) 及び (9) に示すように式 (6) 及び (7) に定数項を加える形で表すことができる。

【BAS 非作動時の $T_{brake}-F_{bp}$ 特性関数】

$$\text{前輪: } T_{brake_f} = a \cdot F_{bp} \quad \dots (6)$$

$$\text{後輪: } T_{brake_r} = b \cdot F_{bp} \quad \dots (7)$$

【BAS 作動時の $T_{brake}-F_{bp}$ 特性関数】

$$\text{前輪: } T_{brake_f} = a \cdot F_{bp} + c \quad \dots (8)$$

$$\text{後輪: } T_{brake_r} = b \cdot F_{bp} + d \quad \dots (9)$$

T_{brake_f} : 前輪制動トルク, T_{brake_r} : 後輪制動トルク

式 (6) 及び (7) より BAS 非作動時の前輪と後輪の制動トルクの比 ($T_{brake_r} / T_{brake_f}$) を、また、式 (8) 及び (9) より BAS 作動時の前輪と後輪の制動トルクの比を求め、それが同一であるとした場合、各式の係数 a, b, c, d は、式 (10) のような関係を満たさなければならない。

$$a \cdot d = b \cdot c \quad \dots (10)$$

ここで、 a と b は既存の定数 (設計値) であるので、 c もしくは d の値のどちらか決まれば式 (10) によって他方の値が決定し、BAS 作動時の $T_{brake}-F_{bp}$ 特性関数が求まることになる。

そこで、実験で求めた実車両の BAS 作動時に示す減速度データをもとに、以下の手順で c と d の値を決定した (図 6)。

- 【1】 c もしくは d のどちらか一方の値を仮定
- 【2】 他方の値を式 (10) から算出し、BAS 作動時の $T_{brake}-F_{bp}$ 特性関数を決定
- 【3】 これを車両モデルに組み込み BAS 作動時のエージェントの減速度をシミュレート
- 【4】 【3】 の結果と実験データ (BAS 作動時に実車両が示した減速度) との誤差を算出
- 【5】 誤差が小さくなるように c もしくは d の仮定値を修正し、誤差が最も小さくなるまで【2】～【5】を繰り返す

図 7 に、実車両の BAS を作動させた際の減速度の実験データと車両モデルが BAS の作動をシミュ

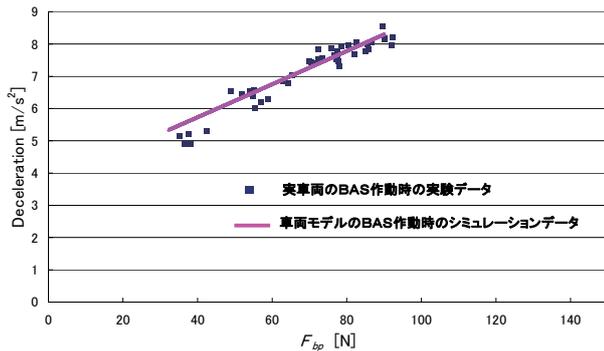


図7 BAS作動時のシミュレーション結果

$$E = \frac{1}{N} \cdot \left(\sum \frac{|\alpha_{sim} - \alpha_{exp}|}{\alpha_{exp}} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad \dots (11)$$

α_{sim} : 減速度—シミュレーション値

α_{exp} : 減速度—実験値 N : 実験データ数

レートした際の減速度を示した。式(11)よりシミュレート誤差 E は 2.5% であった。これにより、このようなコンセプトで設計された BAS の機能を車両モデルに実装することで、実車両の BAS をシミュレートすることが可能となることが確認できた。

4. まとめ

本研究では、予防安全支援システム効果評価シミュレータ ASSESS の車両モデルに組み込む BAS 機能の実装を行った。我々は、本機能を車両モデルがドライバモデルから入力されるブレーキペダル踏力から制動トルクを算出するプロセスの中で、BAS が作動した場合に制動トルクを求める新たな $T_{brake} - F_{bp}$ 特性関数を組み込むことで実現した。

その結果、制動挙動を算出するアルゴリズムは 3 自由度の等価 2 輪車モデルを使用し、かつ、組み込んだ BAS 作動時の $T_{brake} - F_{bp}$ 特性関数は単純な構成であるにもかかわらず、実車両の BAS 作動時の制動挙動を高い精度でシミュレートできることが確認できた。

このことは、組み込む BAS の特性を自由に変えても、その特性の変化に見合ったエージェントの制動挙動を本シミュレータがシミュレートできる可能性が高いことを示している。これによって、BAS の特性を ASSESS 全体のシミュレーションパラメータとすることができ、「このような BAS の特性を持った車両が何%普及した場合、普及していない場

合と比較して何%事故が低減する効果がある。」という ASSESS が目指すシミュレーションの形を実現する基盤機能を実装することができたと考える。

5. 今後の課題

本研究によって、車両モデルは、BAS の作動・非作動を問わず、いずれの場合でも車両の位置座標を実車両のそれと同等にシミュレートすることが可能となった。よって、次に本モデルに求められる機能は、緊急ブレーキを判断して BAS を作動させるメカニズムである。現在、実車両に搭載されている多くの踏み込み速度検知型 BAS は、作動・非作動を決定するブレーキペダルの踏み込み速度をマスターシリンダ圧の時間変化から検出している。そこで、本シミュレータでは、このマスターシリンダ圧の時間変化と線形関係が推測されるブレーキペダル踏力の時間変化からそれを検出することを考えている。今後は、この検出方式の妥当性を実験データから検証すると共に、この検出方式を用いた BAS の作動メカニズムをどのように車両モデルの計算アルゴリズムに組み込んでいくかを検討していく予定である。

参考文献

- (1) 自動車技術ハンドブック編集委員会, "自動車技術ハンドブック 第1分冊", pp.152-153, 2004.
- (2) 成波ほか, "緊急時のブレーキアシスト装置の効果評価について",自動車技術会秋季学術講演会前刷集, pp.15-20, 2006.
- (3) 森田ほか, "予防安全対策技術の効果評価のための交通事故発生シミュレーションプログラムの開発概要",平成19年度交通安全環境研究所研究発表会講演概要, pp.73-76, 2007.
- (4) 高木ほか, "交通事故発生シミュレーションプログラムのための車両モデルについて",平成19年度交通安全環境研究所研究発表会講演概要, pp.143-146, 2007.
- (5) N. Tanaka, et al., "Development of a Simulator to Evaluate the Effect of Active Safety Support Systems", FISITA 2008 World Automotive Congress, F2008-08-142, 2008.
- (6) T. Hirose, et al., "A Study on the Effect of Brake Assist Systems (BAS)", 2008 SAE World Congress, Brake Technology, SP-2188, 01-0824, pp.81-88, 2008.