

# 障害物回避アルゴリズム検証用ドライバモデルのロバスト性向上

佐野知広 平田光男（宇都宮大学）  
藤本茂希（本田技術研究所） 足立修一（慶應義塾大学）

## Robustness Improvement of a Driver Model for Evaluation of Obstacle Avoidance Algorithm

\*Tomohiro Sano, Mitsuo Hirata (Utsunomiya University)  
Shigeki Fujimoto (Honda R & D Co.,Ltd.) and Shuichi Adachi (Keio University)

**Abstract**— In this paper, a robustness improvement of a driver model for the obstacle avoidance algorithm is considered. We propose a driver modeling method using the hybrid modeling technique based on multiple data with different vehicle speed. It is confirmed that the proposed method can improve the robustness to the speed change of the vehicle by simulations.

**Key Words:** Driver model, hybrid modeling, support vector machine, robustness

### 1 はじめに

近年、自動車・二輪車メーカーや関係省庁が共同で ASV (Advanced Safety Vehicle) の積極的な研究、開発が行われてきた。その結果、多くの ASV 技術が実用化され交通事故の死者数は減少傾向にある。しかし、交通事故発生件数は依然として横ばいのため、交通事故発生件数を減らすべく、予防安全技術の研究、開発が盛んに行われている。その 1 つに障害物回避支援システムがある。これは、前方の障害物を回避する際のドライバの操作遅れを、ステアリングやブレーキの協調制御によって補うシステムである。しかし、そのようなシステムを開発するための試験車両は改造車とみなされることから、容易に公道試験が行えないという問題がある。そこで、障害物回避支援システムの回避支援アルゴリズムを検証するための小規模交通流シミュレータの必要性が高まってきた<sup>1)</sup>。

小規模交通流シミュレータでは、人間の運転を模擬するドライバモデルが必要となる。これまで提案されたドライバモデルは、運転行動そのものを解析するためのものや<sup>2)</sup>、ドライバの運転特性を考慮したシステムを構成するためのもの<sup>3)</sup>がほとんどであった。回避支援アルゴリズム検証用のドライバモデルは、与えられた回避シーンの検証ができればよく、必ずしも、人間の運転挙動を厳密に再現する必要はない。また、シミュレーション時間や取り扱いやすさといった点も考慮する必要がある。そこでわれわれは、ハイブリッドモデルに基づく回避支援アルゴリズム検証用のドライバモデルを提案し、シミュレーションにより回避シーンを再現するドライバモデルが構築できることを示した<sup>1)</sup>。しかしながら、その後の研究で自車の速度変化によって、モデルが破綻する場合があるということがわかった。障害物を回避する際、ブレーキングによって減速することも多いため、速度変化に対してロバストでなければならない。

そこで、本研究では、自車速度変化に対して破綻しないロバストなドライバモデルを構築する手法を提案する。そして、シミュレーションにより、本手法の有効性を検証する。

### 2 小規模交通シミュレータ

本研究で取り扱う小規模交通シミュレータの構成を Fig. 1 に示す。図において、仮想走行環境及び車両モデルは CarSim と呼ばれる車両シミュレーションソフトを用いる。一方、回避支援アルゴリズム及びドライバモデルは制御系シミュレーションソフトである Simulink によって実現する。そして、Simulink から CarSim を呼び出すことで、Fig. 1 全体のシミュレーションを行う。このとき、本研究では Fig. 1 のドライバモデルの構築が目的となる。

CarSim では、仮想走行環境上に走行コースを設定し、それに沿うように自車両を走らせることができる。しかし、これでは、障害物が近づいた時、走行コースから外れて自律的に回避動作を行うことはできない。回避支援アルゴリズムを検証する際には、具体的なシナリオを想定して行うことになるので、次のようにして、自律的なドライバモデルを構築することとした。

- (1) 回避行動が起こりうる走行環境を CarSim 上に構築し、回避動作が正しく行える走行コースを設定する。
- (2) CarSim 上で (1) で設定した走行コースに沿って自車両を走らせ、ステアリング角、及びドライバが得るであろう各種知覚情報（たとえば、障害物との相対距離、相対速度など）の時系列データを取得する。
- (3) ドライバモデルを構築するために最低限必要な知覚情報を選定し、それらを入力とし、ステアリング角を出力とする自律的なドライバモデルをハイブリッドモデリング及び SVM(Support Vector Machine)

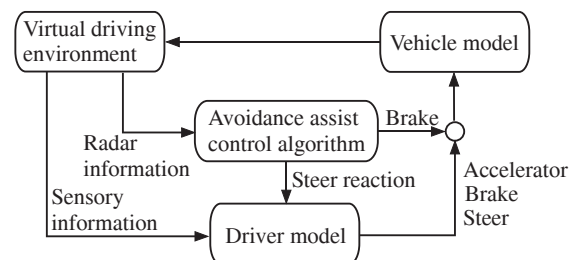


Fig. 1: Small-scale traffic stream simulator

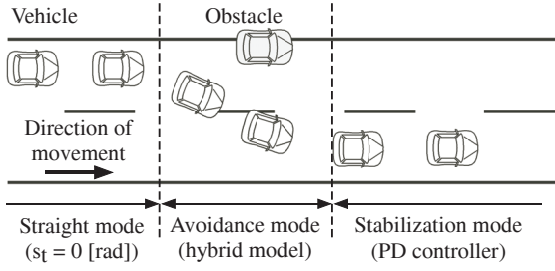


Fig. 2: Driving scenario

を用いて構築する。

- (4) (3) で構築したドライバモデルを Fig. 1 の小規模交通シミュレータに組み込み、シミュレーションを行う。

### 3 走行シナリオと入出力データの取得

本研究では、停止車両を障害物とした Fig. 2 の走行シーンについて考える。具体的には、自車両が片側 2 車線の道路の左車線を走行中に前方の停止車両に気づき右車線に回避する、というシナリオである。ドライバが得られる知覚情報、つまり、ドライバへの入力としては停止車両との前後相対距離  $x$  [m], 前後相対速度  $v_x$  [m/s], 左右相対距離  $y$  [m] を用いる。入力としてこの 3 つを選んだ理由は、文献 5) において、ドライバの回避行動はこれら 3 つが最も本質的な知覚情報であることが報告されているためである。また、本稿ではステアリング操作のみで停止車両を回避するという状況を考えているため、ドライバの出力としてステアリング角  $s_t$  [rad] のみを用いる。

本シナリオにおける回避行動は、Fig. 2 に示すよう、直進モード、回避モード、安定化モードの 3 つのモードに分割できると仮定する。直進モードでは、ステアリング角を 0 rad に保持する。また、安定化モードでは、右車線へのレーントラッキング問題と考え PD 制御器をドライバモデルとする。一方、回避モードは、ハイブリッドモデルを用いて構築する。また、各モードの判定は SVM を用いることとする。

### 4 回避モードのハイブリッドモデリング

#### 4.1 モデル構造

本研究では、ハイブリッドモデルの一種である区分的線形モデルを用いて回避モードにおける運転行動をモデリングする。前節で示したシナリオにおいて、回避モードがさらに 2 つの操作モードからなると仮定し、ドライバモデルの構造を次式のように定義する。

$$\text{Mode A } s_t[k] = a_1 x[k-1] + a_2 v_x[k-1] + a_3 y[k-1]$$

$$\text{Mode B } s_t[k] = b_1 x[k-1] + b_2 v_x[k-1] + b_3 y[k-1]$$

ここで、 $k$  は時刻であり、 $a_i, b_i$  ( $i = 1 \sim 3$ ) は未知パラメータである。つまり、各未知パラメータ、及び各モードの切り替え条件を求める必要がある。

#### 4.2 K-means 法を用いたモード分割

得られた入出力データをモード分割するための手順を Fig.3 に沿って以下に簡単にまとめる<sup>6)</sup>。

- Step 1 収集されたデータに対して、Fig.3 (1) のように、各データセットに対し距離の近い複数個のデータで局所集合を作る。

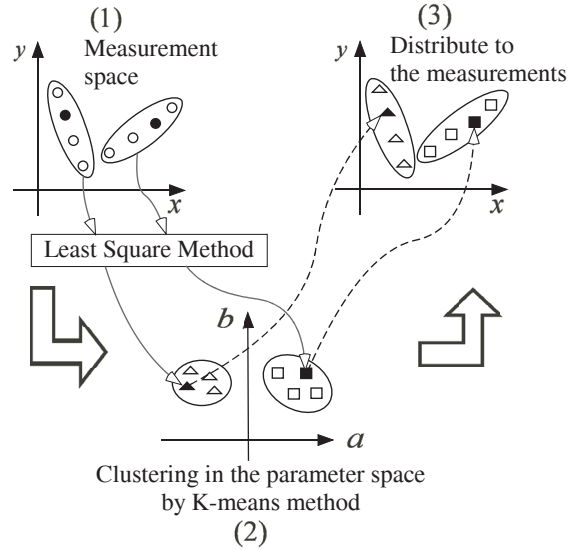


Fig. 3: Clustering procedure

- Step 2 Step 1 で得られた各局所集合に最小二乗法を適用することで、データ空間からパラメータ空間へ写像する (Fig.3 (1) Fig.3(2))。
- Step 3 Step 2 で得られたパラメータ空間上のデータに対して K-means 法を適用することによりクラスタリングする (Fig.3 (2))。
- Step 4 パラメータ空間におけるクラスタリング結果を元のデータに当てはめる (Fig. 3 (3))。そして、クラスタリング後の各モードのデータに対して最小二乗法を適用し、各モードのパラメータ  $a_i, b_i$  ( $i = 1 \sim 3$ ) を求める。

### 4.3 SVM による切り替え条件の推定

回避モードにおける Mode A と Mode B の切り替え条件の判定は、Fig. 3(3) のデータ空間上でおこなう。本研究では、すべてが仮想環境上で行われるため、雑音の影響は非常に小さい。そこで、SVM の中で最も単純な手法であり、線形分離可能なデータにのみ機能する最大マージンクラス分類器を用いる<sup>7, 8)</sup>。また、直進モード、回避モード、安定化モードの判定にも同じ手法を用いる。以下では、最大マージンクラス分類器について簡単に説明する。

Fig. 4 に示すように、入力データ  $x_i \in \mathbb{R}^n$  と、それに対応する 2 値のクラスラベル  $y_i \in \{-1, +1\}$  からなるトレーニングデータ  $\{x_i, y_i\}_{i=1}^N$  を、次式で与えられる線形識別関数  $f(x)$  で分離することを考える。

$$f(x) = w^T x_i + b$$

ここで、 $w$  は分離超平面の法線ベクトルであり、 $b$  はバイアス項である。いま、データが線形分離可能であるとすると、

$$w^T x_i + b \geq +1, \quad \text{if } y_i = +1 \quad (1a)$$

$$w^T x_i + b \leq -1, \quad \text{if } y_i = -1 \quad (1b)$$

を満たす  $w, b$  の組が無数に存在する。それらの中で、汎化能力が最も高い超平面は、超平面から一番近いサンプルと超平面との距離 (マージン)  $\gamma$  が最大となる

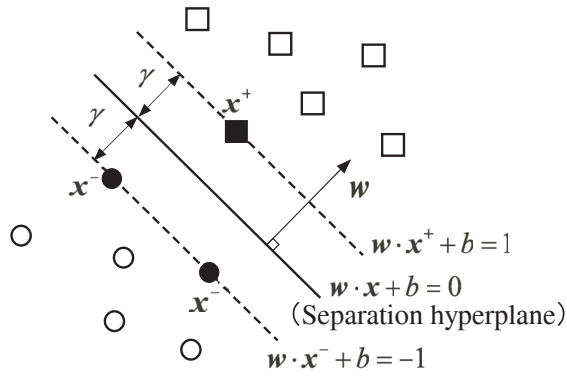


Fig. 4: Maximal margin classifier

超平面であることが知られている．したがって，式 (1) を満たす  $w, b$  の中で

$$\gamma = \frac{1}{\|w\|}$$

を最大にするものが解となる．

## 5 ドライバモデルのロバスト性向上を考慮したハイブリッドモデリング

### 5.1 ロバスト性向上のためのモデリング手順

文献 1) では，一つの回避シーンに対して一つのデータセットを用いてドライバモデルを構築した．そして，得られたドライバモデルを，構築用のデータセットの自車速度と同じ速度で駆動したところ，構築用の回避行動を問題なく再現できることを確認した．しかし，回避動作中にブレーキをかけるなどして自車速度が少しでも変化すると，回避行動を再現できないことがあった．そこで，本研究では，幅広い自車速度変化に対して破綻しないロバストなドライバモデルを構築するために，自車速度が異なる複数のデータセットを用いてハイブリッドモデリングを行うことを提案する．

提案手法を Fig. 5 に示し，手順に従って説明する．

**Step 1** CarSim を用いて自車速度がそれぞれ 50, 60, 70 km/h の 3 つのデータセットを生成する．そして，各自車速度のデータセットに対して，パラメータ空間上でモード分割を行う．そして，その結果を用いて，データ空間上で Mode A, Mode B に分割する (Fig. 5(a)) ．

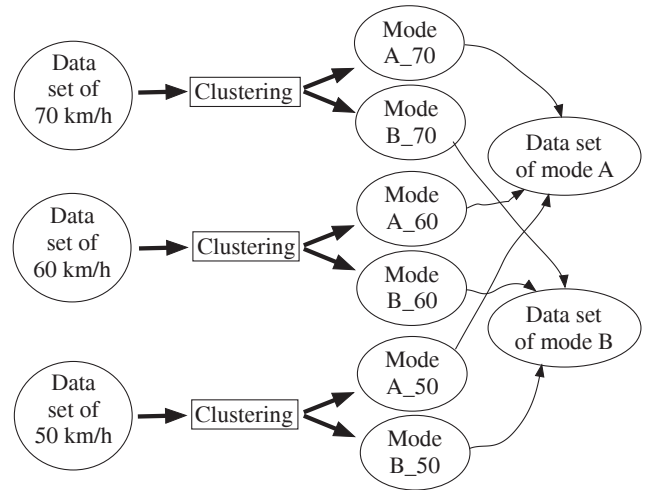
**Step 2** Step 1 で求めた Mode A, Mode B の各データに対して最小二乗法を適用し，各モードのパラメータを求める (Fig. 5(b)) ．

**Step 3** Mode A と Mode B の切り替え条件を SVM により求める (Fig. 5(c)) ．

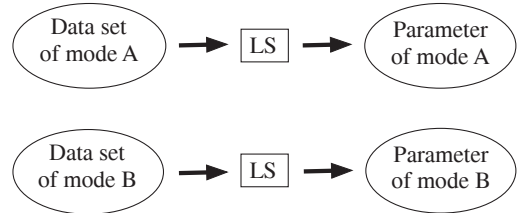
**Step 4** さらに，直進モードと回避モードの切り替え条件，及び，回避モードと安定化モードの切り替え条件を，SVM を用いてそれぞれ求める (Fig. 5(d)) ．なお，ここでは，直進モード 回避モード 安定化モードの様にモード移行がシーケンシャルに行われると仮定している．

### 5.2 モデルの妥当性の検証

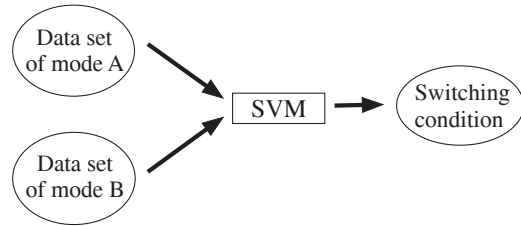
まず，直進モード，回避モード，安定化モードの切り替えが SVM により正しく推定されているかどうかの評価を行う．そこで，自車速度 50, 60, 70km/h 対



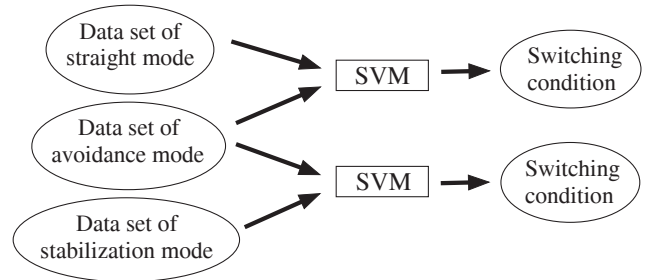
(a) Step 1



(b) Step 2



(c) Step 3

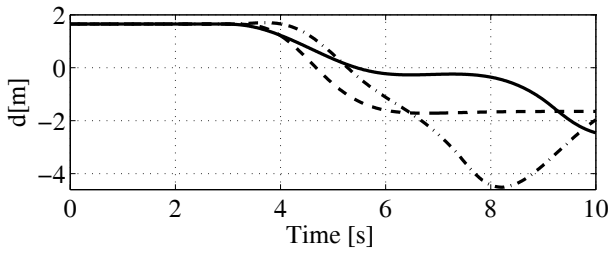


(d) Step 4

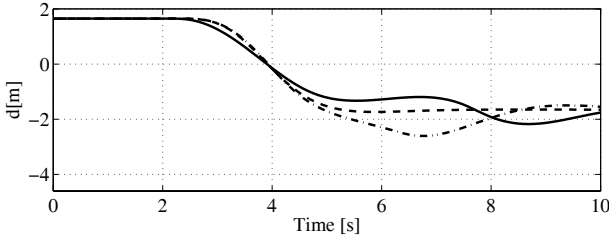
Fig. 5: Modeling procedure for robustness improvement of vehicle velocity change

して，推定された回避モードの開始及び終了時刻を真の値と比較した．結果を Table 1 に示す．自車速度が 50, 60, 70 km/h のいずれの場合においても，誤差が 0.02 秒以内に収まっており，十分な精度で推定ができています．

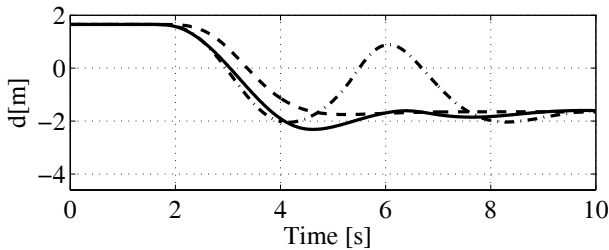
次に，前節の手順に沿って構築したドライバモデル (提案法) と自車速度が 60 km/h のデータセットのみを用いて構築したドライバモデル (従来法) とを比較することによって提案法の有効性を検証する．そこで，得られたドライバモデルを Fig. 1 の小規模交通流シミュ



(a) Velocity 50km/h



(b) Velocity 60km/h



(c) Velocity 70km/h

Fig. 6: Vehicle trajectories (solid line: proposed method, dashdot line: conventional method, dashed line: CarSim)

レータに搭載し、自律的に回避動作を行わせたときの結果を Fig. 6 に示す。ただし、ドライバモデルの評価のため、回避支援アルゴリズムは動作させていない。図において、 $d[m]$  は道路のセンターライン上を  $0\text{ m}$  としたときの自車両の横位置を表し、 $d = 1.65\text{m}$  の時は左車線の中央、 $d = -1.65\text{m}$  の時に右車線の中央に位置する。また、実線が提案手法、一点鎖線が従来法、破線が CarSim で設定した回避コースを走らせたときの応答である。これらの図より、従来法では、自車速度が  $50$  や  $70\text{km/h}$  になると、走行軌跡が大きく乱れているのがわかる。一方、提案手法の結果をみると、自車速度が  $60$  及び  $70\text{km/h}$  の場合では、設定したコースとほぼ同様の回避動作が得られている。自車速度が  $50\text{km/h}$  の場合は、多少応答が乱れているが、停止車両に接触することなく、回避が行われている。

さらに、 $50 \sim 70\text{ km/h}$  の各自車速度 ( $1\text{ km/h}$  刻み) において、CarSim で設定した回避コースを走らせたときの自車両の応答と、ドライバモデルを用いて回避動作を行わせた場合の自車両の応答の RMSE (Root Mean Square Error) を求めた。結果を Fig. 7 に示す。自車速度が高速の場合においても低速の場合においても、従来法よりも提案法の方が RMSE が小さいことが確認できる。以上の結果から、提案法により自車速度変化に対するロバスト性が向上していることが確認できた。

Table 1: Start and finish time of avoidance mode

Velocity	Start/finish	Correct	Estimated	Error
50 km/h	Start	2.90s	2.89s	-0.01s
	Finish	7.19s	7.17s	-0.02s
60 km/h	Start	2.17s	2.16s	-0.01s
	Finish	6.23s	6.23s	0.00s
70 km/h	Start	1.64s	1.63s	-0.01s
	Finish	5.60s	5.58s	-0.02s

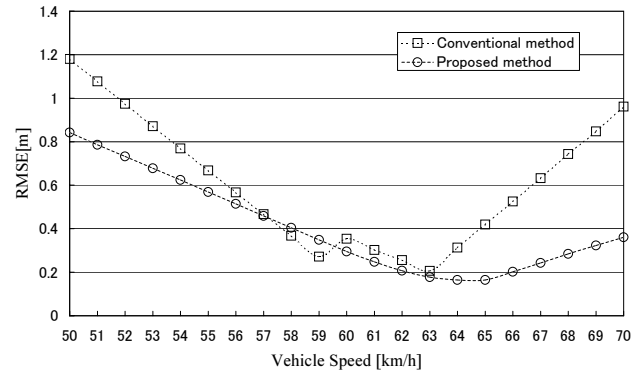


Fig. 7: Vehicle velocity vs RMSE of vehicle trajectory

## 6 おわりに

本稿では、障害物回避支援システム構築のための回避アルゴリズム検証用のドライバモデル作成において、幅広い自車速度変化に対してロバストなモデルを構築する手法を提案した。具体的には、自車速度が異なる複数のデータセットを用いてハイブリッドモデリングを行う手法を示した。シミュレーションの結果、1つのデータセットのみを用いてモデリングした場合よりもロバスト性が向上していることが確認できた。本手法は、得られるドライバモデルが回避シーンに依存してしまうが、簡単な線形モデルと線形な切り替え条件だけでドライバモデルが表現できるので、回避アルゴリズム検証用のドライバモデルとしては十分であるといえる。

謝辞 藤原幸広氏、照田八州志氏 ((株) 本田技術研究所) には本研究を進めるにあたり大変お世話になった。ここに記して感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 佐野, 山中, 平田, 足立, 藤原: ハイブリッドモデリングによる障害物回避アルゴリズム検証用ドライバモデルの構築, 第 50 回システム制御情報学会研究発表講演会, 307/308 (2006)
- 2) 鈴木, 山田, 早川, 土田, 津田, 藤波: ハイブリッドシステムによる運転行動のモデル化, 第 5 回計測自動制御学会制御部門大会予稿集, 59/62 (2005)
- 3) 高橋 宏: ドライバの個性を考慮した運転支援制御, 計測と制御, Vol.45, No.3, 237/242 (2006)
- 4) 稲葉 正太郎: 交通事故と人間工学, コロナ社 (1988)
- 5) M.Koashi et al.: Measurement and Modeling of Collision Avoidance Behavior of Drivers Using Three Dimensional Driving Simulator, SICE Annual Conference, 1779/1783 (2003)
- 6) G.Ferrari-Trecate, M.Muselli, D.Liberati, M.Morari: Identification of Piecewise Affine and Hybrid Systems, Proceedings of the American Control Conference, 3521/3526 (2001)
- 7) N.Cristianini, J.Shawe-Taylor: An introduction to Support Vector Machines, Cambridge University Press (2000)
- 8) 足立 修一: MATLAB による制御のための上級システム同定 (第 13 章), 東京電機大学出版局 (2004)