

ハイブリッドシステム論による 前方車追従行動におけるモデル予測型アシスト制御の実現

三上 晃 司*・奥田 裕 之*・鈴木 達 也*
田崎 勇 一*・伊佐治 和 美**・津留 直 彦**

Modeling of Driving Behavior and Design of Model Predictive Assisting Control
Based on Hybrid System Framework

Koji MIKAMI*, Hiroyuki OKUDA*, Tatsuya SUZUKI*,
Yuichi TAZAKI*, Kazuyoshi ISAJI** and Naohiko TSURU**

In recent years, there has been a growing demand in the automotive industry for a unified design principle of assisting system to prevent rear-end collisions. This paper presents a new framework of the assisting system design based on a mixed logical dynamical system description which unifies the piecewise ARX model of the driver and the dynamical model of the car. Then, the design problem is formulated as a mixed integer linear programming. As a result, an assisting system, which takes into account the function of the driver's motion control and decision making, is realized.

Key Words: safety, driving behavior, hybrid system, assisting control

1. はじめに

近年、安心・安全な車社会を実現するキーテクノロジーの一つとして、個人適合型の運転アシスト系に対する要求が高まっている。個人適合型の運転アシスト系設計問題を客観性を伴いながら体系化するためには、車を一種の「人間-機械系」として捉え、定量化された個々のドライバ特性に基づいて運転アシスト系を開発・設計することが必要となる¹⁾。

自動車の予防安全技術は、これまでも広く研究開発が行われている。運転支援を考えるにあたって、各ドライバの特性を考慮に入れる必要があることは疑う余地がないが²⁾、現状で実現されている運転支援システムの多くはドライバの個人特性を明示的に考慮しているとは言い難く、平均的なドライバを支援するシステムが主である。この最も大きな要因は、ドライバの個人特性を定量的かつ客観的に反映したモデルが十分に整備されていない点に起因していると考えられる。

筆者らは従来研究において、判断が離散的な論理情報処理、操作が連続的な運動情報処理である点に着目し、判断と操作

が混在した統一的な運転行動モデルを、(連続・離散)ハイブリッドシステムの視点から提案し、パラメータ同定論を駆使することでその有用性を立証してきた³⁾。また、前方車追従行動における有力なリスク認知情報の一つとして接近離間状態評価指標 KdB を提案し⁴⁾、ハイブリッドシステムモデルに組み込むことで、汎用性の高い運転行動モデルを提案した⁵⁾。

本論文では、これらの運転行動モデルに関する一連の成果に立脚して、最適なアシスト量の設計問題をハイブリッドシステムの最適化の視点から定式化する。さらに、実時間で最適化を実行するモデル予測制御⁶⁾の考え方を導入することで、個人適合型の運転アシスト系の実現手法を提案する。具体的には、前方車追従運転行動を対象とし、まず、PieceWise AutoRegressive eXogeneous (PWARX) モデルに基づいたハイブリッドシステムの同定論を適用することで、KdB を認知情報として含んだ運転行動モデルを数理的に表現する。得られた PWARX モデルは、ドライバの認知・判断・操作の各側面が統一的な枠組みの中で表現されているという点において、汎用性の高いモデルと言える。つぎに、PWARX モデルとして記述された運転行動モデル、および車両モデルを、Mixed Logical Dynamical System (MLDS)⁷⁾として表現し、アシスト量の最適化問題を混合整数線形計画問題 (Mixed Integer Linear Program: MILP) に帰着する。MLDS はハイブリッドシステムの最適化においてデファクトスタンダードになりつつあるシステム表現であり、論理変数と連続変数が混在し

* 名古屋大学工学研究科 名古屋市中千種区不老町

** (株)デンソー 刈谷市昭和町 1-1

* Faculty of engineering, University of Nagoya, Chikusa-ku, Nagoya

** DENSO CORP., 1-1, Showa-cho, Kariya-shi

(Received July 23, 2009)

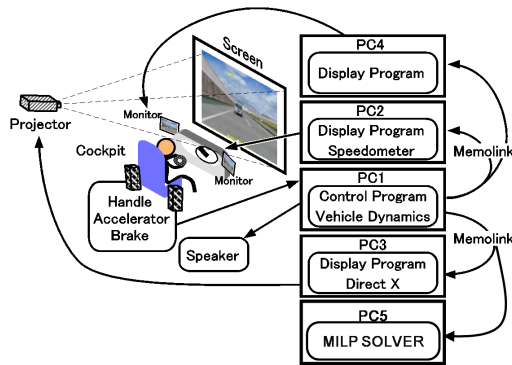


Fig. 1 Configuration of driving simulator (DS)



Fig. 2 Driver's seat of DS

た系の最適化に適した表現である。さらに、モデル予測制御の考え方に基づいて、アシスト量最適化問題を実時間で実行することにより、ドライバの判断、操作特性を明示的に考慮したアシスト系を実現し、その有用性をシミュレータ実験を通して検証する。

2. データ取得と想定タスク

2.1 データ取得

Fig.1 にデータ取得に用いたドライビングシミュレータ (DS) の構成図を示す。本研究で用いた DS は PC1 ~ PC5 の 5 台のパーソナルコンピュータで構成され、三次元視覚情報を提示可能なプロジェクタ (DepthQ) を前方画面の表示に用い、実際のステアリング、アクセル、ブレーキ、スピードメータを持ち込んで、仮想コックピット環境を構築した。Fig.2 に運転席の様子を示す。

ハンドル・アクセル・ブレーキの各操作量についての情報は、USB を介して PC1 に転送され、PC1 内でそれらの操作量と車両のダイナミクスに基づいて車両の位置、姿勢を計算する。計算結果はメモリンクを介して PC2, PC3, PC4, PC5 に転送され、各 PC (2-4) において画面情報を作成後、PC3 はプロジェクタから前方のスクリーンへ、PC2 と PC4 は左右配置された液晶にサイドミラーへそれぞれ運転環境を表示する。PC5 は後述する最適化問題をリアルタイムで解き、アシスト量の計算結果を PC1 へと転送する。本 DS では、16[msec] ごとに以上の計算を繰り返す。

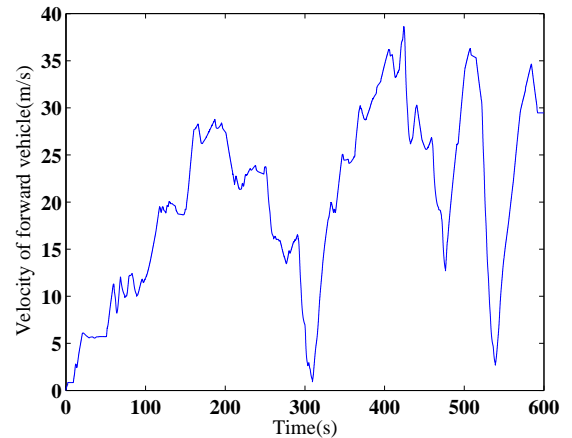


Fig. 3 Velocity of forward vehicle

2.2 想定タスク

本研究では、前方車への追従運転行動を対象とする。想定環境としては、片側二車線で、無限遠に伸びる直進のみ的高速道路環境を用意した。前方車は全試行について Fig.3 に示した速度パターンに従い走行し、自車の 30[m] 前方に存在した状態でスタートする。手順として、最初に、アシストのない車における 7 人の被験者の走行データからそれぞれの被験者の前方車追従行動モデルを構築し、得られたモデルに基づいてアシスト系を設計する。つぎに、アシストを実装した車において同様に前方車追従運転を行い、アシストの有無による運転行動の違いを考察する。なお、本実験においては危険回避を目的としているので、ブレーキによるアシストのみを検証する。

3. ブレーキアシスト量の最適化問題

3.1 前方車追従行動モデルの入出力変数

前方車追従行動をモデル化するに当たり、以下のようにドライバの入出力変数を定義する⁵⁾。

入力 (知覚) 情報

- u_1 : 接近離間状態評価指標 (KdB)[dB]⁴⁾
- u_2 : 前方車と自車の車間距離 [m]
- u_3 : 前方車と自車の相対速度 [m/s]

$$\mathbf{u} = [u_1 \quad u_2 \quad u_3]^T \quad (1)$$

出力 (操作) 情報

- y : 自車加速度 [m/s²]

KdB はドライバの網膜に映る前方車の背面積の変化率を表わしており、次式で定義される。

$$u_1 = \begin{cases} 10 \times \log(-\kappa) & \text{if } \kappa < -1 \\ -10 \times \log(\kappa) & \text{if } \kappa > 1 \\ 0 & \text{if } -1 \leq \kappa \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

ただし、

$$\kappa = 4 \times 10^7 \times \frac{u_3}{u_2^3} \quad (3)$$

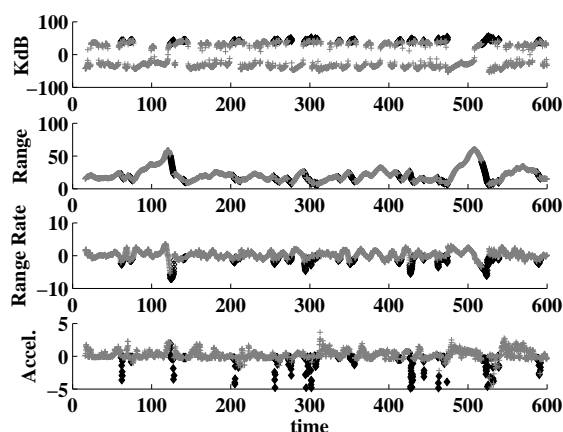


Fig. 4 Result of mode segmentation (time-series data)

である．KdB はリスク認知指標の一つであり，その有用性は文献⁵⁾においても認められている．以降においては， u_1, u_2, u_3, y はモデル化を行う前に正規化された値を用いることとする．

3.2 PWARX モデルによる表現とモード分割

前節の入出力の定義に基づいて，ドライバの前方車追従行動を PWARX モデルを用いて表現する．PWARX モデルは離散的なモードと連続的なモデル (ARX モデル) を組み合わせたモデルで，ハイブリッドシステムの中でも代表的なシステム同定用のモデル表現の一つである⁸⁾．本論文では，(4) 式のような PWARX モデルを用いて運転行動の同定を行った．なお，同定を行う前にすべての変数を正規化した．また，PWARX モデルのモード数は，後述する最適化問題における計算負荷の観点から，2 モードとした．

$$y(i) = \begin{cases} \theta_{11}u_1(i-1) + \theta_{12}u_2(i-1) + \theta_{13}u_3(i-1) \\ \quad + \theta_{14}y(i-1) & \text{if } [(u(i-1), y(i-1)) \in C_1] \\ \theta_{21}u_1(i-1) + \theta_{22}u_2(i-1) + \theta_{23}u_3(i-1) \\ \quad + \theta_{24}y(i-1) & \text{if } [(u(i-1), y(i-1)) \in C_2] \end{cases} \quad (4)$$

具体的なパラメータ同定手法としては文献⁸⁾の手法を用いたが，詳細は紙面の都合上省略する．DS 上での実験を通して得られたデータのモード分割結果を Fig.4 ~ Fig.6 に示す．黒の点をモード 1，灰色の点をモード 2 と定義する．(4) 式において， i は時系列データのインデックスを， θ は各 ARX モデルのパラメータを示している．また， C_1, C_2 はそれぞれ，回帰ベクトル $(u(i-1), y(i-1))$ が張る 4 次元空間内の部分空間を表わし，それぞれモード 1 とモード 2 に対応する．また，Fig.4 において，縦軸は上から順に KdB，車間距離，相対速度，自転車加速度，横軸は時間を表わしている．Fig.5 は，縦軸が相対速度，横軸が車間距離となっている．Fig.6 は，縦軸が車間距離，横軸が KdB となっている．図を見ると，モード 1 はドライバにとって危険回避操作を行うモードと解釈で

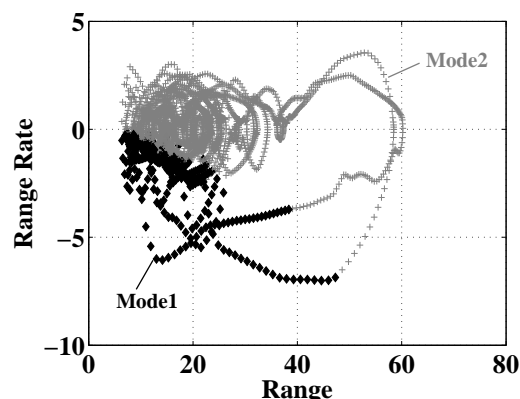


Fig. 5 Result of mode segmentation (Range-Rangerate)

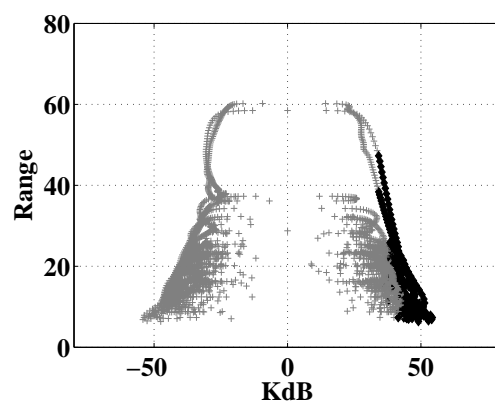


Fig. 6 Result of mode segmentation (KdB-Range)

き，次節以降ではモード 1 にあまり滞在しないようなアシスト設計について検討する．

また，(4) 式において， C_1, C_2 の境界面を次式のような線形不等式で表現する． η は線形不等式のパラメータを表わしている．

$$\begin{cases} [(u, y) \in C_1] \Leftrightarrow \\ \quad S(i) = \eta_1 \cdot u_1(i) + \dots + \eta_4 \cdot y(i) + \eta_5 > 0 \\ [(u, y) \in C_2] \Leftrightarrow \\ \quad S(i) = \eta_1 \cdot u_1(i) + \dots + \eta_4 \cdot y(i) + \eta_5 \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

したがって，(4) 式は次式のように書き改められる．

$$\begin{cases} y(i) = \theta_{11} \cdot u_1(i-1) + \dots + \theta_{14} \cdot y(i-1) & \text{if } [S(i-1) > 0] \\ y(i) = \theta_{21} \cdot u_1(i-1) + \dots + \theta_{24} \cdot y(i-1) & \text{if } [S(i-1) \leq 0] \end{cases} \quad (6)$$

Fig.7 に，モード遷移条件を表わした分離面の例を示す．以降，(5) 式の $S = 0$ をモード境界面と呼ぶ．なお，一度モード分割がなされれば， θ_{I_j} や η_i はそれぞれ，最小二乗法やサポートベクタマシンを用いることで容易に求めることがで

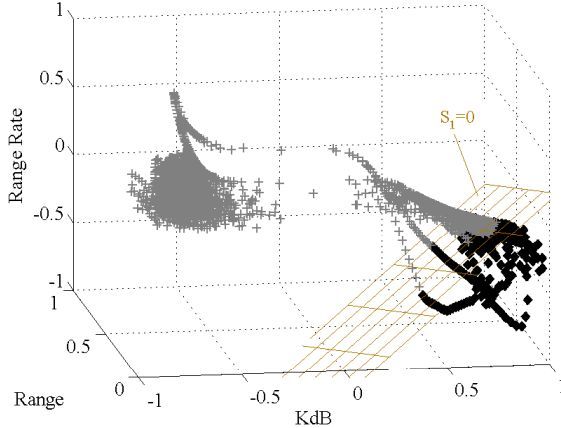


Fig. 7 Mode switching hyper planing

きる。

3.3 PWARX モデルから MLDS 表現への変換

前節で得られた前方車追従行動モデルの PWARX 表現には, if 文が含まれており, 最適化には適さない. そこで本節では, PWARX 表現を MLDS 形式⁷⁾に変換し, 最適化問題を定式化する. まず, 二値変数 $\delta(i)$ ($\delta(i) \in \{0, 1\}$) を用いて, 以下のように if 文と, 論理変数を関連づける.

$$\begin{cases} [\delta(i) = 1] \Leftrightarrow [S(i) > 0] \\ [\delta(i) = 0] \Leftrightarrow [S(i) \leq 0] \end{cases} \quad (7)$$

MLDS における基本的なアイデアの一つは, これを以下のような等価な不等式表現に書き換えることである.

$$\begin{cases} S(i) \leq S_M \cdot \delta(i) \\ S(i) \geq \epsilon + (S_m - \epsilon) \cdot (1 - \delta(i)) \end{cases} \quad (8)$$

ここで, S_M, S_m はそれぞれ, S の最大値と最小値を表わす.

また, $\delta = 0, \delta = 1$ によって入出力特性の切り替えを表現するため, 補助変数 z を, 論理変数 $\delta(i)$ と変数 u, y の積として導入する.

$$\begin{cases} z_{11}(i) = \delta(i) \cdot u_1(i) & z_{12}(i) = \delta(i) \cdot u_2(i) \\ z_{13}(i) = \delta(i) \cdot u_3(i) & z_{14}(i) = \delta(i) \cdot y(i) \\ z_{21}(i) = (1 - \delta(i)) \cdot u_1(i) & z_{22}(i) = (1 - \delta(i)) \cdot u_2(i) \\ z_{23}(i) = (1 - \delta(i)) \cdot u_3(i) & z_{24}(i) = (1 - \delta(i)) \cdot y(i) \end{cases} \quad (9)$$

たとえば補助変数 $z_{11}(i)$ は, $\delta(i) = 1$ ならば $z_{11}(i) = u_1(i)$ となり, $\delta(i) = 0$ ならば $z_{11}(i) = 0$ となる. しかしながら, (9) 式は変数同士の積を含む非線形制約式となるので, (8) 式と同様に等価な不等式群を作ることを考える. たとえば, $z_{11} = \delta \cdot u_1$ に関しては, 次式のような等価な不等式群で表現できる.

$$\begin{cases} z_{11}(i) \leq u_{1M} \cdot \delta(i) \\ z_{11}(i) \geq u_{1m} \cdot \delta(i) \\ z_{11}(i) \leq u_1(i) - u_{1m} \cdot (1 - \delta(i)) \\ z_{11}(i) \geq u_1(i) - u_{1M} \cdot (1 - \delta(i)) \end{cases} \quad (10)$$

ここで, u_{1M}, u_{1m} はそれぞれ, u_1 の最大値と最小値を表わす. このように定義された補助変数 z を用いると, (6) 式の前方車追従行動モデルは以下のように書き改められる.

$$\begin{aligned} y(i) = & \theta_{11} \cdot z_{11}(i-1) + \dots + \theta_{14} \cdot z_{14}(i-1) \\ & + \theta_{21} \cdot z_{21}(i-1) + \dots + \theta_{24} \cdot z_{24}(i-1) \end{aligned} \quad (11)$$

すなわち, (6) 式のシステムは, 線形等式表現である (11) 式と線形不等式表現である (8) 式, (10) 式 ($z_{11} \sim z_{24}$ の等価不等式表現群) の組み合わせ (MLDS 表現) で記述できる.

3.4 アシスト量最適化問題の MILP としての定式化

前節で述べた前方車追従行動の MLDS 表現を用いて, アシスト量の最適化問題を混合整数計画問題 (MILP) として定式化する. 最初に, アシスト量を加えた運転行動モデルを (12) 式に示す.

$$\begin{aligned} y(i) = & \theta_{11} \cdot z_{11}(i-1) + \dots + \theta_{14} \cdot z_{14}(i-1) \\ & + \theta_{21} \cdot z_{21}(i-1) + \dots + \theta_{24} \cdot z_{24}(i-1) + z_{as}(i) \end{aligned} \quad (12)$$

ここで, z_{as} はアシスト量であり, $\delta_1 = 1$ の場合に働き, それ以外は 0 とする. すなわち, 危険モードに入ったときのみアシストが働くとする. また, 自車の車両モデルは前後方向のみの運動であることから, 自車の速度を v_o , 位置を p_o , 自車加速度の正規化係数を y_{max} , サンプリング周期を $T[s]$ とおき, 次式で近似的に表現する.

$$\begin{cases} v_o(i) = v_o(i-1) + y(i-1) \cdot T \cdot y_{max} \\ p_o(i) = p_o(i-1) + v_o(i-1) \cdot T \end{cases} \quad (13)$$

ここで, アシスト量最適化問題を定式化するためには, 前方車の位置等の情報が必要となる. そこで, 前方車の速度を線形予測し, 前方車の位置を計算することで, 数ステップ先の車間距離, 相対速度の予測を行う. 前方車の速度を v_f , 位置を p_f , 車間距離の正規化係数を d_{max} , 相対速度の正規化係数を v_{max} とおくと, これらの変数には以下の関係がある.

$$\begin{cases} p_f(i) = p_f(i-1) + v_f(i-1) \cdot T \\ u_2(i) = (p_f(i) - p_o(i))/d_{max} \\ u_3(i) = (v_f(i) - v_o(i))/v_{max} \end{cases} \quad (14)$$

以上をふまえて, 車両およびドライバモデルを含んだアシスト量の最適化問題は (15) 式 ~ (18) 式のような混合整数線形計画問題 (MILP) として定式化出来る.

アシスト量最適化問題

Given:

$$\mathbf{u}(1), y(1), v_f(i), p_f(i) \\ (\omega > 0, i \in \{1, 2, \dots, K\}) \quad (15)$$

Find:

$$\mathbf{u}(2), \dots, \mathbf{u}(K), y(2), \dots, y(K), \delta(1), \dots, \delta(K) \\ z(1), \dots, z(K), z_{as}(1), \dots, z_{as}(K) \quad (16)$$

which minimize:

$$J = \sum_{i=1}^K (\omega \cdot z_{11}(i) - z_{as}(i)) \quad (17)$$

subject to:

$$(8), (10), (12), (13), (14) \text{ 式} \\ (z_{as} \leq 0, \delta \in \{0, 1\}) \quad (18)$$

ここで, K は horizon と呼ばれ, 最適化の対象となる予測区間を表わす. 評価関数の第一項は危険度へのペナルティ項であり, モード1における KdB である z_{11} の総和とした. 第二項はアシストに対するペナルティ項である. アシストはブレーキのみであるので, $z_{as} \leq 0$ であることに注意されたい. ω は重みであり, ω が大きい場合は, より z_{11} を減らそうとするため, 積極的なアシストが働くことになる.

3.5 実時間最適化によるモデル予測制御の実現

モデル予測制御は, Receding Horizon 制御とも呼ばれ, 出力の予測区間および入力を決定する区間を1サンプル時間ずつ先にずらしながら, 実時間の最適化問題を繰り返すことで制御入力を得る制御手法である⁶⁾.

本研究では, 観測とアシスト量出力の周期を 200[msec] とし, 入力情報は毎ステップ観測できるとする. 現時点の時刻を (i) とするとき, 本実験で行ったモデル予測制御の実行手順は以下の通りである.

- (1) 現時刻 (i) における前方車の速度, 加速度, 自車の位置, 速度, 加速度の情報を取得する.
- (2) 取得した情報を基に MILP を解き, 5 ステップ先までの環境情報および最適アシスト量を計算する.(ただし, 用いるのは1ステップ分のアシスト量のみである)
- (3) 最適アシスト量 $z_{as}(i)$ の情報に基づき, つぎのサンプル時刻 $(i+1)$ の時点まで, 最適アシスト量を加える.
- (4) アシストを加えた自車加速度に基づき, 自車の速度, 位置が変化する.
- (5) 現時刻を $(i+1)$ とし, (1) に戻る

以上の (1)~(5) を繰り返し行うことで, DS 上でモデル予測制御を実現した. モデル予測制御の実現においては, 実時間で MILP を解かねばならないが, MILP は一般に計算コストが高い. Table1 に, horizon を変えた時の MILP の計算時間の変化を示す(単位は [msec]). horizon が5までは安定して 200[msec] 内で計算を終えることが確認できたため, 本論文では horizon (予測区間) を 5step (1[sec]) と定めた.

実験の際の人間とアシスト系の構成図を Fig.8 に示す. ここで, アシスト量は最適化により算出された加速度アシスト

Table 1 Computational time of MILP

horizon	average	max
3	65.864	119.832
5	101.212	182.209
7	135.510	272.423
12	188.704	1190.005
15	282.251	4940.494

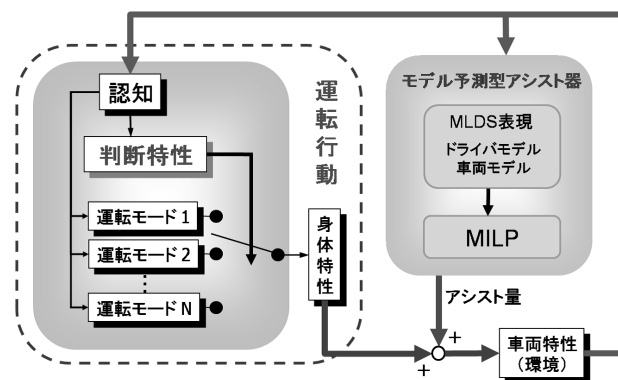


Fig. 8 Configuration of Assisting system

をペダル操作量に変換して実現している.

4. 実験結果

平常車運転時の挙動とアシスト車運転時の挙動を比較するために, 平常車運転時の実験データより得られたモード境界パラメータをあらかじめ算出しておき, モード境界面 S の正負により, アシスト車運転時のデータをモード分割した. 平常車運転時の各被験者のモデルパラメータを Table2, 3 に示す. また, アシスト車運転時の結果を Table4~Table6, および Fig. 9~Fig.12 に示す.

Table 2 Identified parameter θ

Examinee	"mode" I	θ_{I1}	θ_{I2}	θ_{I3}	θ_{I4}
A	1	-0.0636	0.3056	0.1684	0.9485
	2	0.0023	-0.0001	0.0252	0.9592
B	1	0.0128	-0.0282	0.0209	1.0855
	2	-0.0006	-0.0005	0.0152	0.9859
C	1	-0.0029	0.0161	0.0187	1.0307
	2	0.0001	0.0004	0.0035	0.9945
D	1	-0.0432	0.3707	0.5041	1.1641
	2	-0.0022	-0.0018	0.0419	0.9775
E	1	-0.0802	0.6904	0.3381	0.7581
	2	-0.0042	0.0030	0.0143	0.8913
F	1	-0.0435	0.2728	0.2245	0.9354
	2	-0.0028	-0.0011	0.0310	0.9403
G	1	-0.0152	0.0622	0.0676	1.0772
	2	0.0024	-0.0007	0.0207	0.9851

Table2 は, 3.2 章のシステム同定により得られた PWARX モデルの各モードにおけるパラメータを表わしている. θ_{I4} は出力の再帰項の係数であり, ドライバの操作の時定数と関連が深いと考えられる. また θ_{I1} θ_{I2} θ_{I3} の各パラメータは

Table 3 Estimated parameter η

Examinee	η_1	η_2	η_3	η_4	η_5
A	14.568	-29.203	-20.295	-17.226	-7.2514
B	28.777	-9.9842	-10.991	-3.5544	-16.692
C	25.338	-27.115	-20.737	-10.254	-11.161
D	21.277	-24.391	-28.721	-26.670	-14.977
E	56.096	-10.781	-11.077	-6.0384	-42.382
F	34.635	-18.949	-29.176	-14.960	-26.803
G	16.008	-13.947	-28.902	-9.2771	-12.161

Table 4 Average of KdB included in Mode 1

Examinee	without assist	with assist	inc. or dec.
A	43.40	40.56	decrease
B	38.19	34.29	decrease
C	35.58	39.20	increase
D	47.75	47.36	decrease
E	45.43	43.78	decrease
F	42.95	40.31	decrease
G	37.41	36.46	decrease

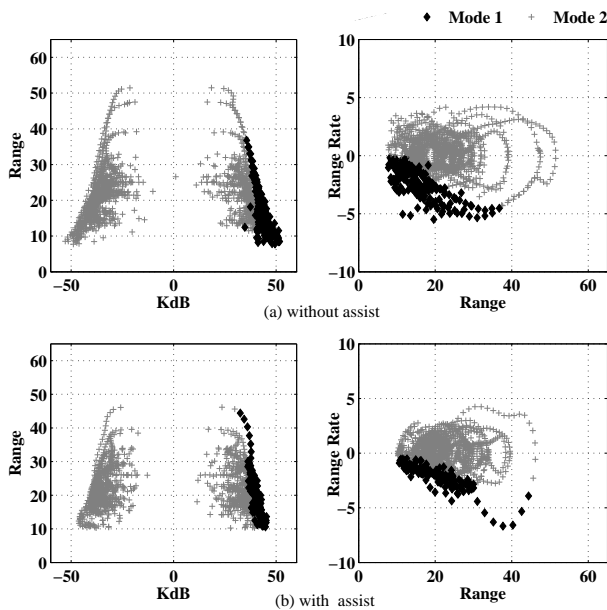


Fig. 9 Effect of assist(driver A)

Table 5 Average of brake pedal operation by human (m/s^2)

Examinee	without assist	with assist	inc. or dec.
A	0.3375	0.2528	decrease
B	0.2680	0.2241	decrease
C	0.2917	0.1735	decrease
D	0.3866	0.6249	increase
E	0.2613	0.2549	decrease
F	0.2677	0.1575	decrease
G	0.2711	0.2158	decrease

それぞれ ARX モデルの入力 (KdB, 相対速度, 車間距離) に関する係数を表わしており, 各項に対する制御ゲインに相当する. 一方, Table3 は, モード境界面のパラメータを表わ

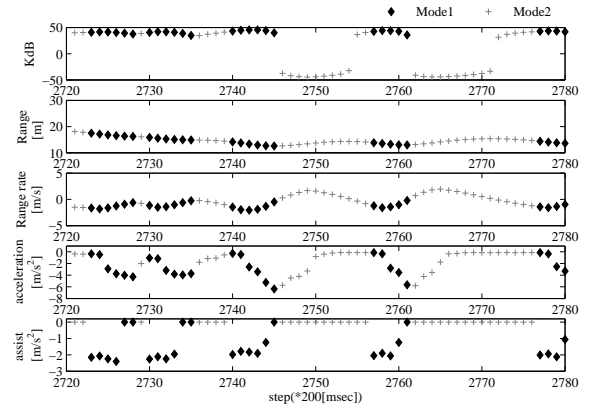


Fig. 10 Data profiles with proposed assist(driver A)

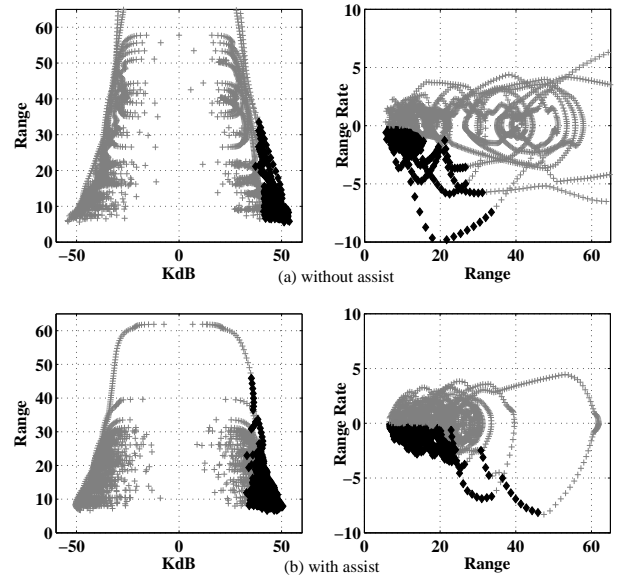


Fig. 11 Effect of assist(driver E)

している. η_i は各項がモードの切替条件に与える影響の大きさを示している.

Fig.9, 11 において, アシストなし, ありのそれぞれの場合について, 左図は車間距離 - KdB の空間, 右図は, 相対速度 - 車間距離の空間でのデータ分布とモード分割結果をそれぞれ示す. また, Fig.10, 12 において, アシストありの場合の時系列データを示す. 縦軸は上から順に KdB, 車間距離, 相対速度, 自車加速度, アシスト量, 横軸は時間を表わしている. なお, アシスト量は最適化計算により得られた値であり, 自車加速度に上乘せすることになる. Table4, Fig. 9 を見ると, アシスト導入後は KdB が全体的に減少する傾向にあり, Mode1 の領域が狭まっていることから, 提案手法によるアシストの効果が確認できる. また, Fig.10 より, 車間距離が短く相対速度が負である場合において, 危険を回避しようとするアシストが働いていることがわかる. 特に, 本手法では任意の物理的制約を課すことが可能なため, 車間自

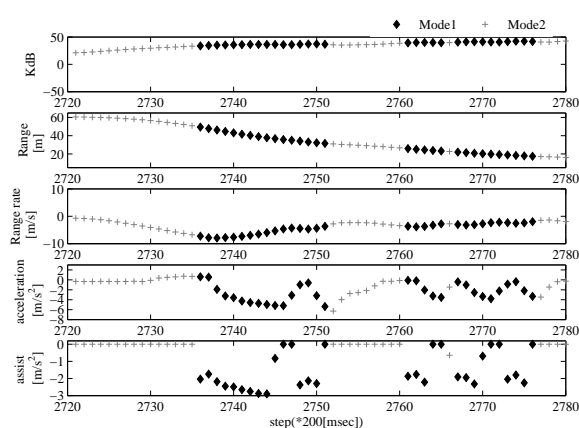


Fig. 12 Data profiles with proposed assist(driver E)

Table 6 Number of data included in Mode 1

Examinee	without assist	with assist	inc. or dec.
A	395	215	decrease
B	372	228	decrease
C	429	295	decrease
D	257	402	increase
E	362	413	increase
F	390	154	decrease
G	295	288	decrease

動制御システムの技術指針として重要な指針である，上限減速度 ($-2.5[m/s^2]$) を常に満足しながらアシストを実現できている．さらに，Table5を見ると，アシスト導入後は人間が行っているブレーキ操作が少なくなっており，ドライバの負担が小さくなっていることがわかる．以上より，提案手法の有用性が確認できる．

しかしながら，実験においては，Mode1の滞在時間（データ点数）が多くなる場合も見受けられた (Fig.11, 12)．Table6の被験者 D,E がその例である．これは，アシストが働くことによって，より危険な領域は減少するが，被験者が一種の安心感を覚え，Mode1とMode2との境界領域で運転を行う傾向が見られたためである．すなわち，アシストが働くことにより，ドライバの判断特性が変化し，アシストシステムに対するある種の依存により危険モードでの滞在時間が長くなる可能性があることを示している．なお，主観的な評価として操作感についてのアンケート調査を行ったところ，7名全員からほとんど違和感を感じない，運転に支障はないとの回答を得た．

5. おわりに

本研究では PWARX モデルを用いて前方車追従行動のモデル化を行い，MLDS 形式への変換を通してアシスト量の最適化を混合整数計画問題として定式化した．また，モデル予測制御の考え方に基づいてドライビングシミュレータにオンラインでのアシスト量最適化を実装し，その有用性と実用可

能性を検証した．

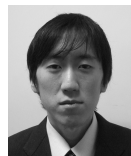
運転の慣れやアシストへの依存といった要因に対する対応，実際の車両に支援システムを搭載した際の評価が今後の課題である．

参考文献

- 1) 土居俊一: ドライバの運転特性評価の現状と将来. 自動車技術, Vol.58 No.12, pp.4-9(2004)
- 2) 永井正夫: アクティブセーフティ技術の展望. 自動車技術, Vol.57 No.12, pp.4-8(2003)
- 3) J.H.Kim, S.Hayakawa and T.Suzuki, et al: Modeling of Driver's Collision Avoidance Maneuver based on Controller Switching Model, IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics, Vol.6, pp1131-1143(2005)
- 4) 伊佐治和美, 津留直彦, 和田隆広, 今井啓介, 土居俊一, 金子弘: 前後方向の接近に伴う危険状態評価に関する研究(第1報) - ドライバ操作量に基づく接近離間状態評価指標の提案 - . 自動車技術会論文集, Vol.38, No.2, pp.25-30(2007)
- 5) T.Akita, T.Suzuki, S.Hayakawa and S.Inagaki: Analysis and Synthesis of Driving Behavior based on Mode Segmentation, Proc. of Int. Conf. on Control, Automation and Systems, pp.2884-2889(2008)
- 6) 大嶋, 小河: モデル予測制御 - 1 - 基礎編, 発展の歴史と現状. システム/情報/制御, Vol. 46, No. 5, pp.286-293(2002)
- 7) A.Bemporad and M.Morari: Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints, Automatica, Vol.35 pp.407-427(1999)
- 8) G.Ferrari-Trecate, M. Muselli, D. Liberati and M. Morari: A clustering technique for the identification of piecewise affine system, Automatica, Vol.39, pp.205-217(2003)

[著者紹介]

三上晃司



1986年7月生まれ．2009年3月，名古屋大学工学部機械・航空工学科卒業．同年4月同大学大学院工学研究科博士課程前期課程機械理工学専攻に入学．現在に至る．ハイブリッドシステム論に基づく人間行動モデルを用いたアシストシステムの設計に関する研究に従事．

奥田裕之(学生会員)



1982年5月生まれ．2007年3月，豊田工業大学大学院工学研究科博士前期課程先端工学専攻修了．同年4月名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程機械理工学専攻に入学．現在に至る．主にハイブリッドシステム論に基づく人間行動のモデル化，生体信号処理，および人間行動モデルの知的システム設計への応用に関する研究等に従事．電気学会会員．

鈴木 達也 (正会員)



1964年1月生まれ。1991年名古屋大学大学院博士課程後期課程電子機械工学専攻修了。工学博士。同年名古屋大学工学部助手。2000年同助教授。2006年同教授。現在に至る。この間、1998年から1年間、U.C.Berkeley 客員研究員。ハイブリッドシステム論に基づく知的システムの実現や人間行動のモデル化に関する研究に従事。1995年電気学会論文賞、2008年 ICCAS Outstanding paper award、2009年計測自動制御学会論文賞(友田賞)などを受賞。電気学会、電子情報通信学会、日本機械学会、システム制御情報学会、日本ロボット学会、日本人間工学会、IEEEの各会員。

田崎 勇一 (正会員)



1980年5月21日生まれ。2008年3月東京工業大学大学院情報理工学研究科博士課程卒業。2008年 Honda Research Institute Europe 客員研究員。2009年4月より名古屋大学工学部工学研究科助教。ハイブリッドシステム論および歩行ロボットの研究に従事。博士(工学)。IEEE、日本ロボット学会会員。

伊佐治 和美 (正会員)



1979年新潟大学工学部機械工学科卒業。(株)デンソーシステム開発部。主に衝突安全系・予防安全系のシステムおよびコンポーネント開発に従事。現在はドライバ特性の研究ならびに安全運転支援システムの開発に従事。2008年に自動車技術会賞論文賞を受賞。自動車技術会会員。

津留 直彦 (正会員)



1978年横浜国立大学工学部電気工学科卒業。(株)デンソーシステム開発部。主にブレーキ系のコンポーネント開発、制御系開発、そして予防安全系のシステム開発に携わり、現在はドライバ特性の研究ならびに安全運転支援システムの開発に従事。2008年に自動車技術会賞論文賞を受賞。自動車技術会会員。

.....