

次世代自動車地域産学官フォーラム
講演資料

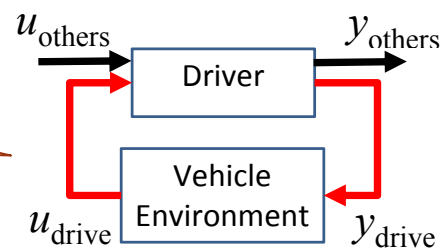
運転行動モデル ～その考え方と可能性～

平成23年10月11日

鈴木達也

1

運転行動のモデル化



運転行動モデルの基本的考え方

- 環境情報から動作情報へのマッピングとして捉える
- 「認知」「判断」「動作」各機能から構成される



2

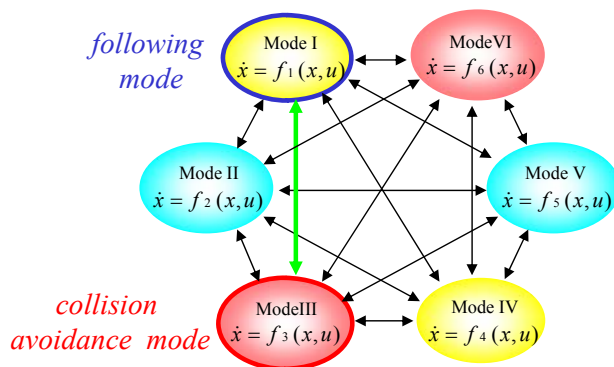
システム科学的視点

どんな複雑な行動も **primitive な運動素 (moveme)** と運動素間の遷移で表現できるのでは？

Primitive motion: 時間駆動/連続系 (運動制御)

Mode transition: 事象駆動/離散系 (判断)

(連続/離散) Hybrid Dynamical System model



運動制御と判断を共通のデータから同時にモデル化可能

6つの運転モードが遷移することで運転行動を表現

3

HDSのシステム同定モデル

1. Piecewise ARX (PWARX) model
区分的ARXモデル
2. Hierarchical PWARX model
階層的モード分割(モード数可変)
3. Probability weighted ARX model
あいまいなモード分割を表現
4. Stochastic switched ARX model
HMMの離散状態にARXモデルを組み込む

(2,3,4は独自開発)

4

Piecewise ARX (PWARX) model とアシスト制御系設計

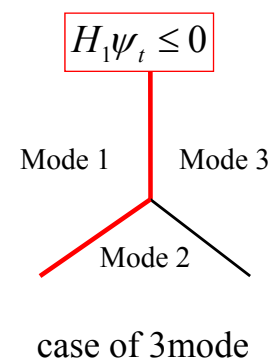
5

Piecewise ARX (PWARX) model

複数の ARX model が切り替わる

$$\begin{cases} y_t = \theta_1^T \psi_t & H_1 \psi_t \leq 0 & (\text{Mode 1}) \\ y_t = \theta_2^T \psi_t & H_2 \psi_t \leq 0 & (\text{Mode 2}) \\ \vdots & \vdots & \\ y_t = \theta_N^T \psi_t & H_N \psi_t \leq 0 & (\text{Mode N}) \end{cases}$$

$$\psi_t = (r_t^T, 1)^T$$



モード遷移条件は超平面 H_i で与えられる

$$u_t \rightarrow \text{PWARX} \rightarrow y_t \quad \{r_t, y_t\}_{t=1}^T \rightarrow \theta_i, H_i \quad (i = 1, \dots, N)$$

連続ダイナミクス (運動制御) : θ_i

離散ダイナミクス (判断) : H_i

6

高速道路における前方車追従行動

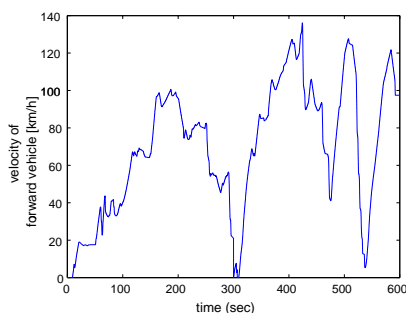
前方車追従行動(10分間)



- 走行環境
直進のみの高速道路
- 被験者11名
- 先行車両の条件

前方車は0~138km/hの間で連続的に変化する速度パターンに従って走行.

10分間走行し、環境情報とペダル操作量(アクセル・ブレーキ操作量)を計測する.

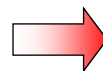


1. PWARXモデルによるモデル化
2. モード数の増加に伴う変化
3. アシスト制御系の設計

7

入力情報(知覚情報)の定義

相対速度 (V_r)
車間距離 (D)
前方車の面積変化率 (KdB)



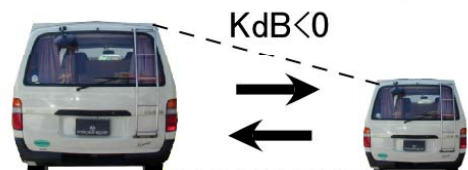
モデルの入力として用いる

KdB とはドライバーの網膜に映る前方車の背面積の変化率

$$KdB = 10 \times \log \left(\left| \frac{dS}{dt} \right| \times \frac{1}{5 \times 10^{-8}} \right) \quad \frac{dS}{dt} \propto -\frac{2}{D^3} \times V_r$$



$$KdB = \begin{cases} -10 \times \log \left(\left| -2 \times \frac{V_r}{D^3} \times \frac{1}{5 \times 10^{-8}} \right| \right) & V_r > 0 \\ 10 \times \log \left(\left| -2 \times \frac{V_r}{D^3} \times \frac{1}{5 \times 10^{-8}} \right| \right) & V_r < 0 \end{cases}$$



($D=100m$, $V_r=-0.1m/sec$ が人間の面積変化率の検出限界($KdB=0$))

ドライバーが危険と認識する度合いを定量的に表現する.

8

追従行動のPWARX model

Mode 1

$$y(k) = a_1 u_1(k-1) + b_1 u_2(k-1) + c_1 u_3(k-1) + d_1 y(k-1)$$

if $(u(k-1), y(k-1)) \in C_1$

Mode 2

$$y(k) = a_2 u_1(k-1) + b_2 u_2(k-1) + c_2 u_3(k-1) + d_2 y(k-1)$$

if $(u(k-1), y(k-1)) \in C_2$

Mode N

$$y(k) = a_N u_1(k-1) + b_N u_2(k-1) + c_N u_3(k-1) + d_N y(k-1)$$

if $(u(k-1), y(k-1)) \in C_N$

出力... y : ペダル操作量

入力... u_1 : KdB u_2 : 車間距離 u_3 : 相対速度 (k は時系列データの番号)

—モデル化の手順—

操作

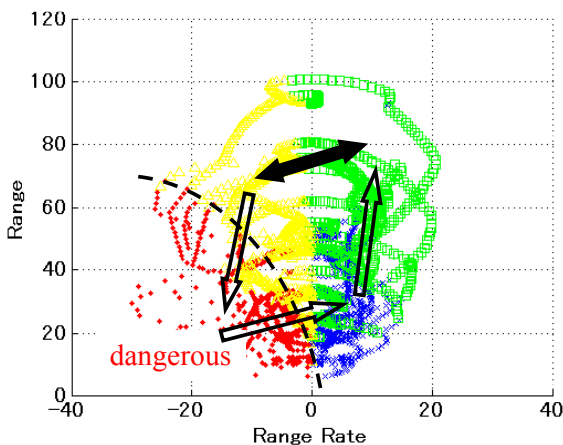
- ① クラスタリングによって入出力空間をモード分割。
- ② 各モードで最小二乗推定を施しパラメータ同定を行う。

判断

- ③ SVMによってモード間の分離面を求める。

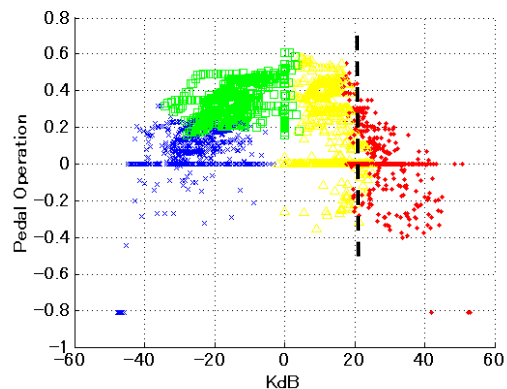
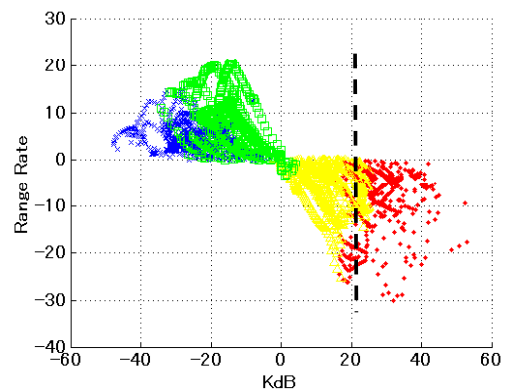
モード分割結果 (データ空間)

4 mode model



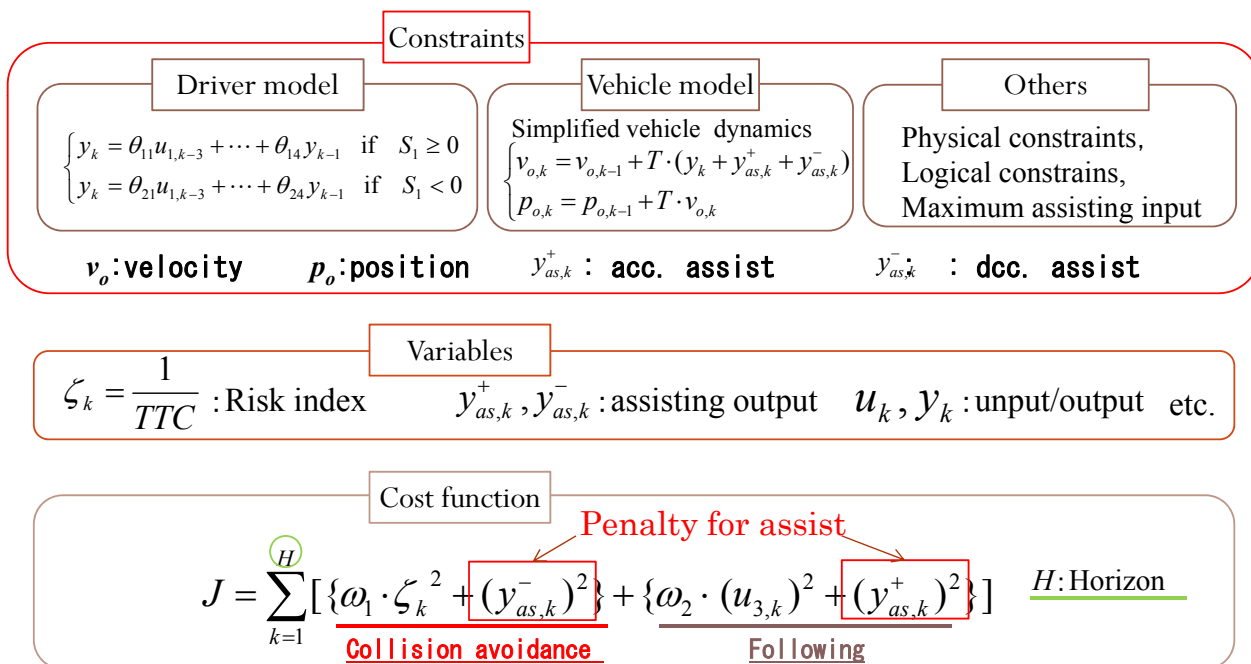
- Mode A : 危険回避
 - Mode B : 回避準備
 - Mode C : 加速追従
 - Mode D : 回避直後
- 車間距離: 小
 相対速度: 負
 KdB: 大
 ブレーキ操作: 大

赤モードへの遷移条件はKdBが支配的



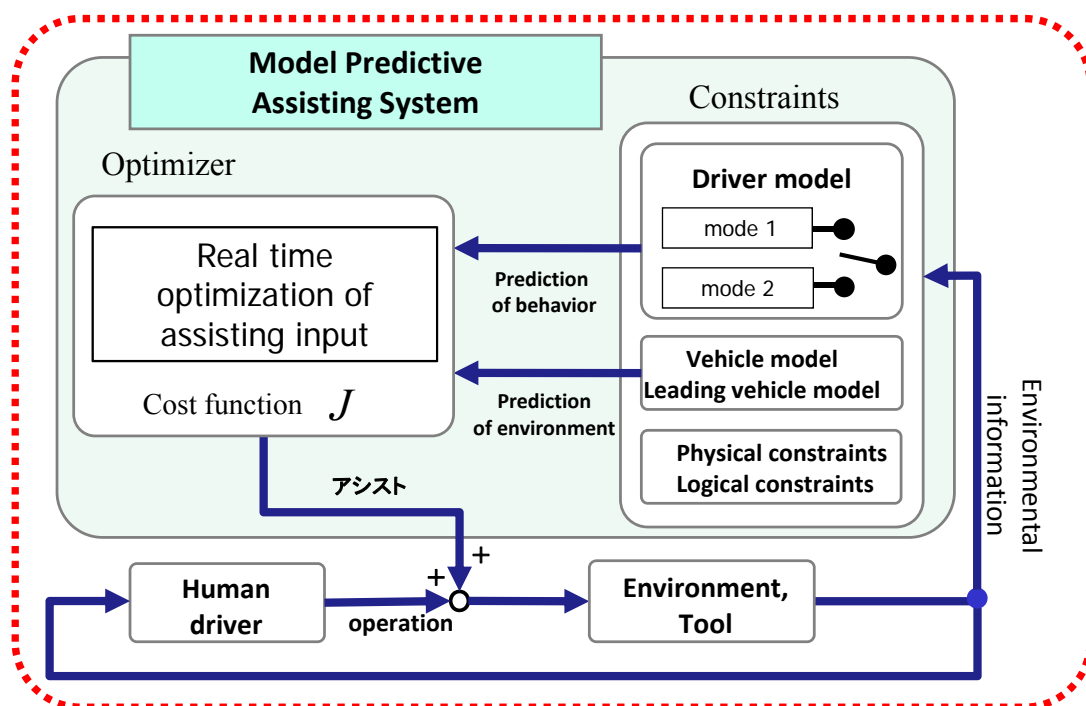
アシスト制御系 (最適化ベース)

拘束条件下におけるアシスト入力の最適化



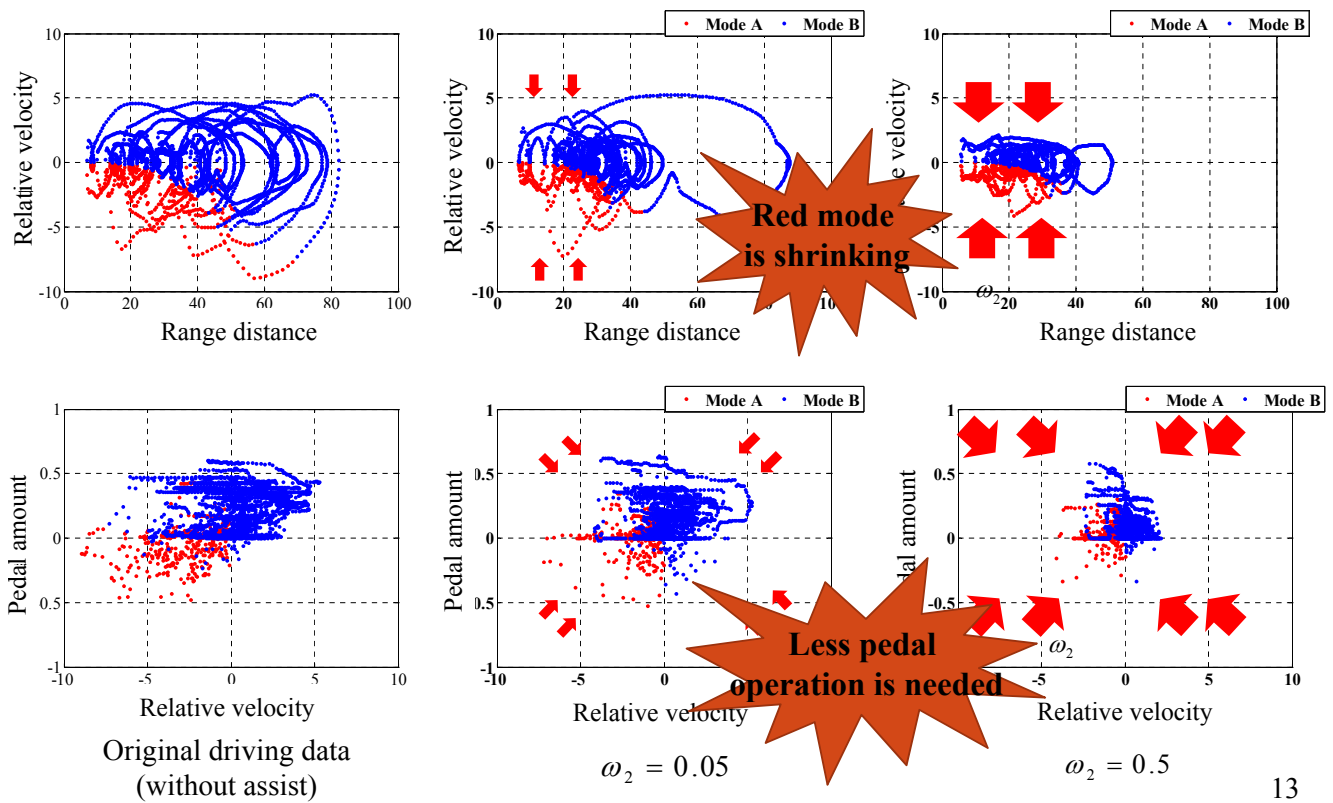
11

モデル予測型アシスト制御系のアーキテクチャ



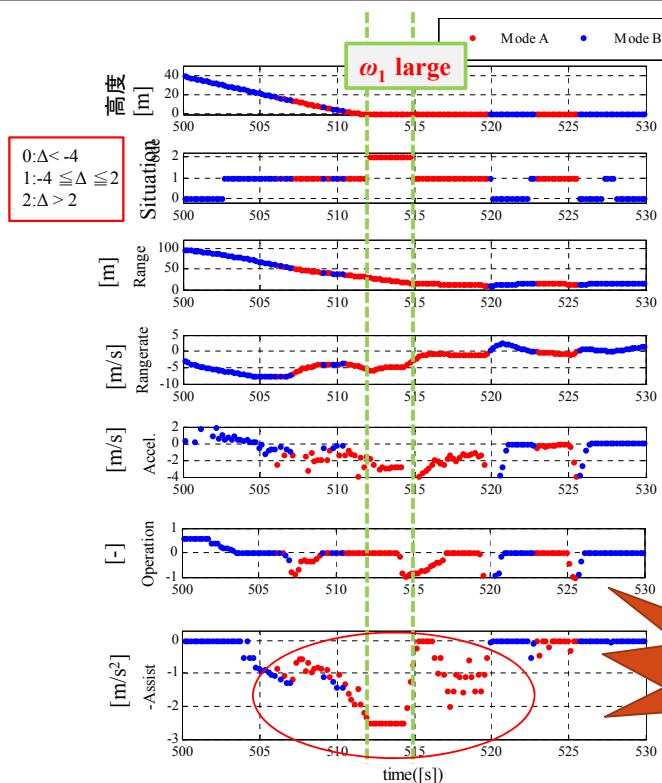
12

アシストの効果



13

アシスト付き運転データ (下り坂)

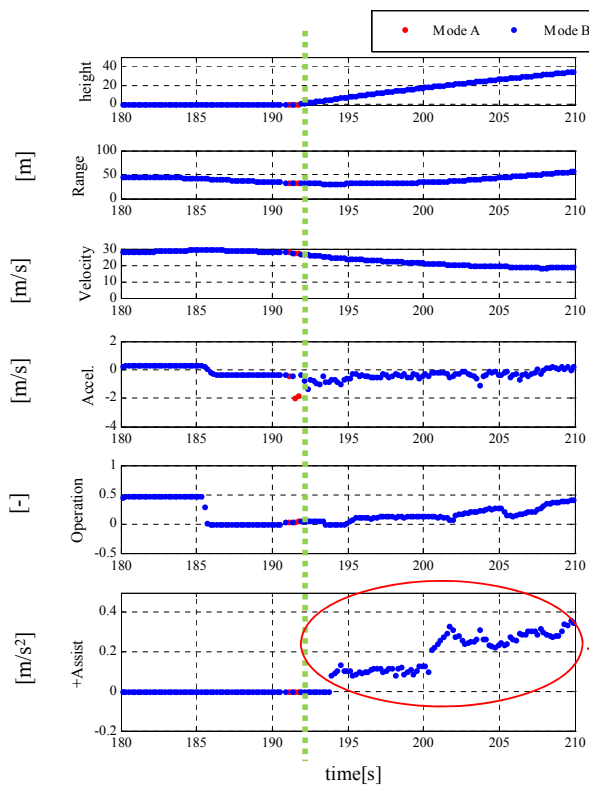


Movie



14

アシスト付き運転データ (上り坂)



Movie



アクセラ
アシスト

15

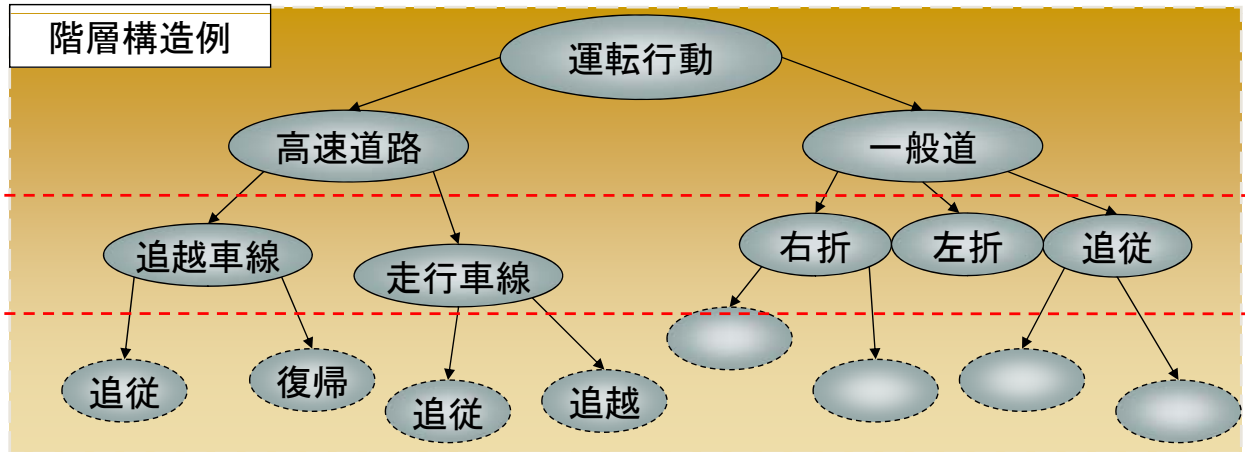
Hierarchical PWARX
(Hi-PWARX) model
と階層的モデリング

16

運転行動の階層性

より複雑な行動様式に対応するために...

モード分割に一貫性のある階層性を持たせる



階層性を考慮することで用途に応じた柔軟な行動モデルが得られる

想定した高速道路環境

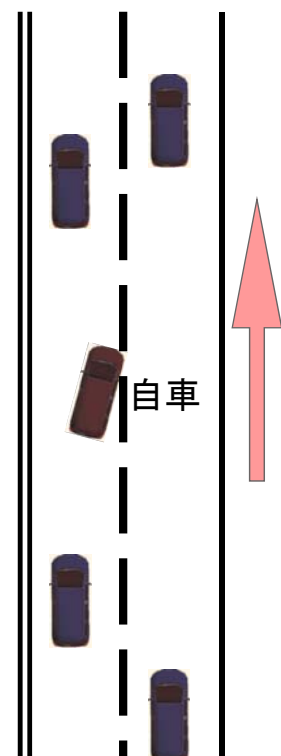
- 片側2車線の無限直線高速道路.
- 走行車線, 追越車線ともに自車両以外に各10台ずつの他車両がランダムな車間距離・相対速度にて走行している.
- 他車両の車線変更は無い.



他車速度

走行車線車
70~85[km/h]

追越車線車
90~110[km/h]



入出力の定義

入力

$$u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \end{pmatrix} \begin{array}{l} : \text{前方車との車間距離} \\ : \text{前方車との相対速度} \\ : \text{前方車との左右相対位置} \\ : \text{自車のヨー角} \\ : \text{KdB} \\ : \text{左サイドミラー注視時間} \\ : \text{右サイドミラー注視時間} \end{array}$$

出力

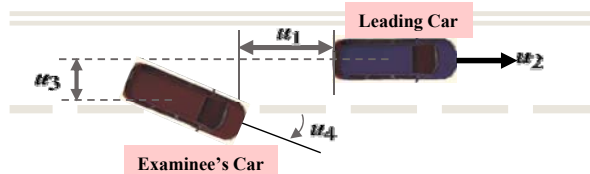
$$y = \begin{pmatrix} y_{st} \\ y_{pe} \end{pmatrix} \begin{array}{l} : \text{ステアリング量} \\ : \text{ペダル量} \end{array}$$

回帰ベクトル

$$r_t = \begin{pmatrix} u_{t-1} \\ y_{t-1} \end{pmatrix}$$

パラメータ

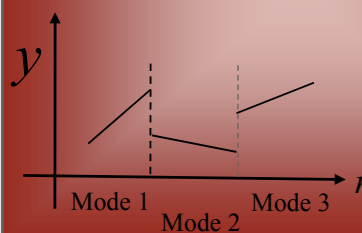
$$\theta = \begin{pmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} \\ \theta_{21} & \theta_{22} \\ \vdots & \vdots \\ \theta_{91} & \theta_{92} \end{pmatrix}$$



PWARX

(PieceWise AutoRegressive eXogenous)

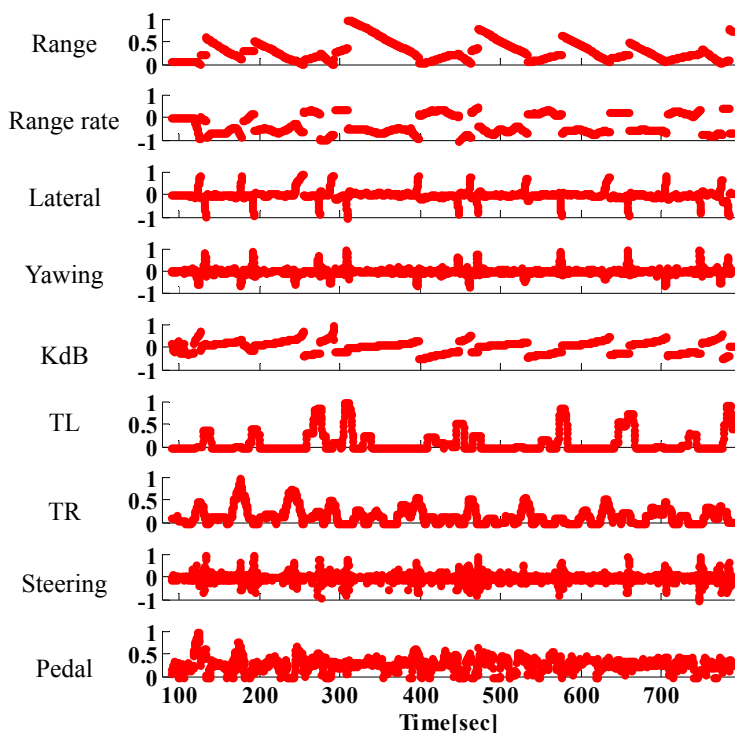
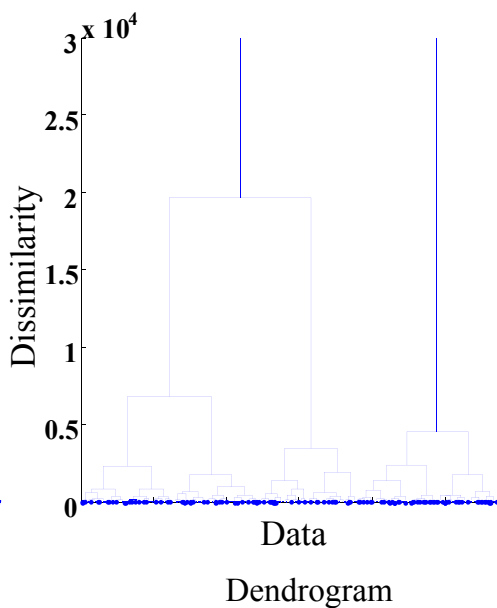
$$y_t = \begin{cases} \theta_1^T r_t & \text{if } r_t \in C_1 \quad (\text{Mode 1}) \\ \theta_2^T r_t & \text{if } r_t \in C_2 \quad (\text{Mode 2}) \\ \vdots & \\ \theta_S^T r_t & \text{if } r_t \in C_S \quad (\text{Mode } S) \end{cases}$$



Mode数Sは
事前に決めず
可変とする

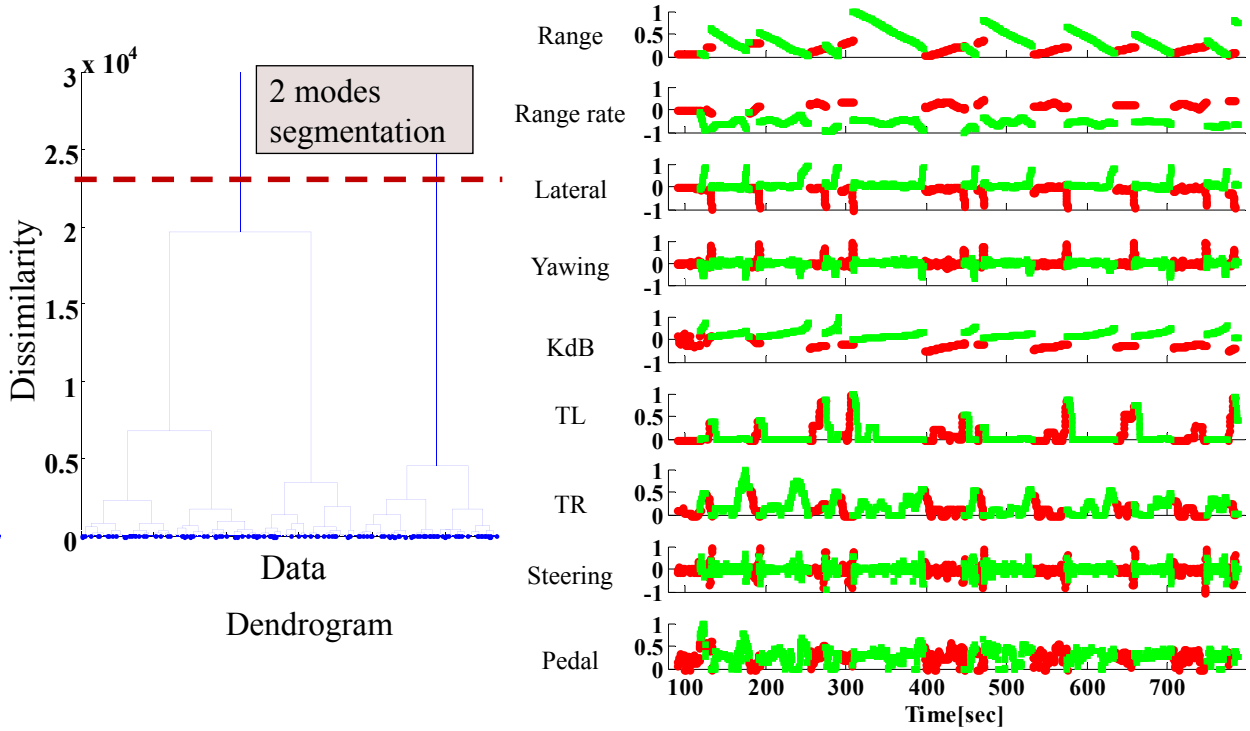
19

観測データ

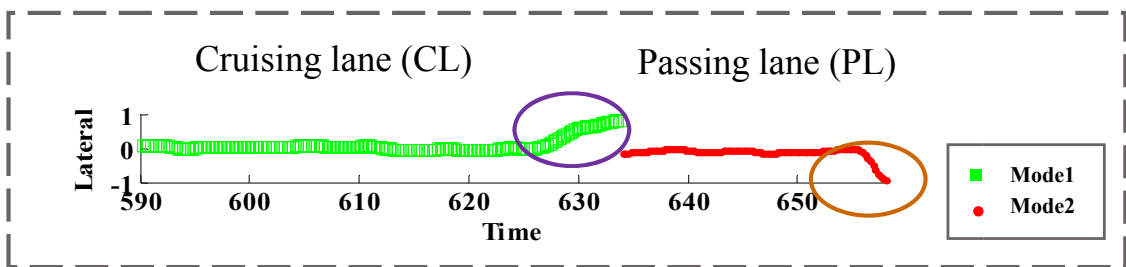


20

クラスタリング結果(2 mode)

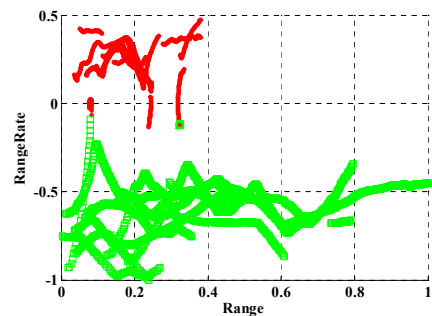


2mode モデルの解釈

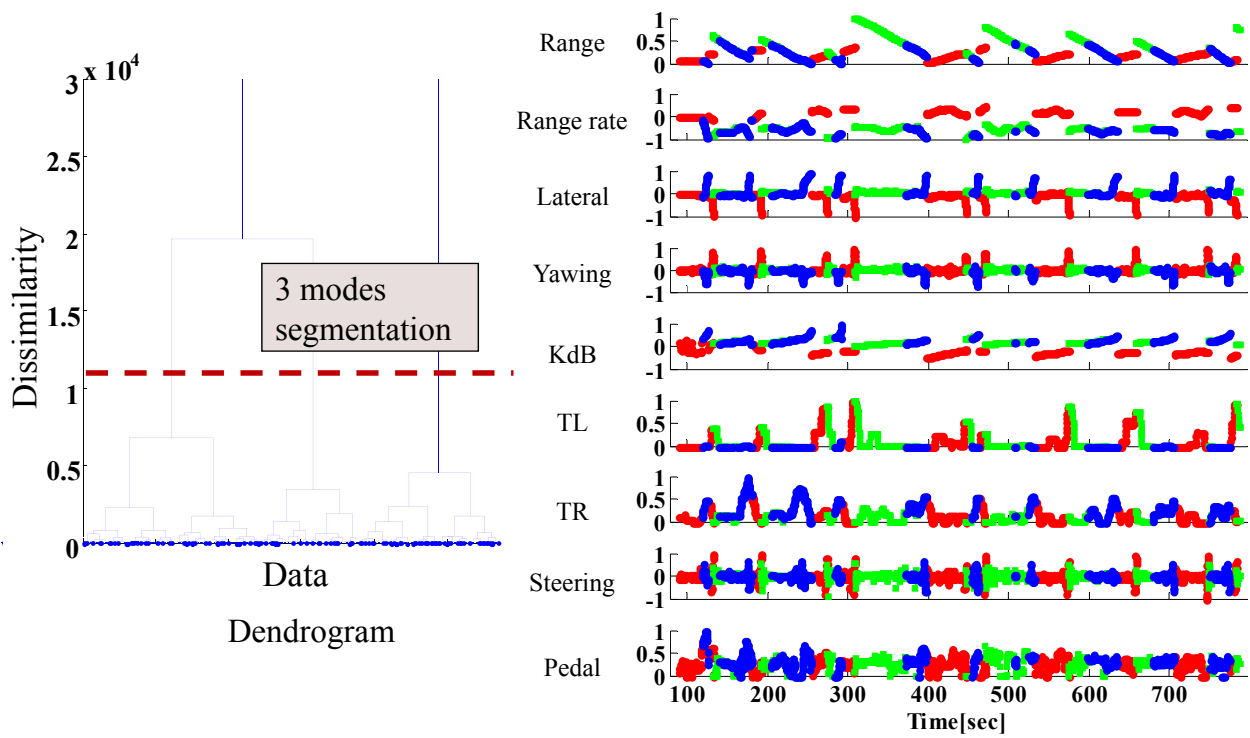


Driving behavior can be divided...

- Two symbols {
- Mode 1** 走行車線における追従行動と追越行動を含むモード。
 - Mode 2** 追越車線における追従行動と復帰行動を含むモード。

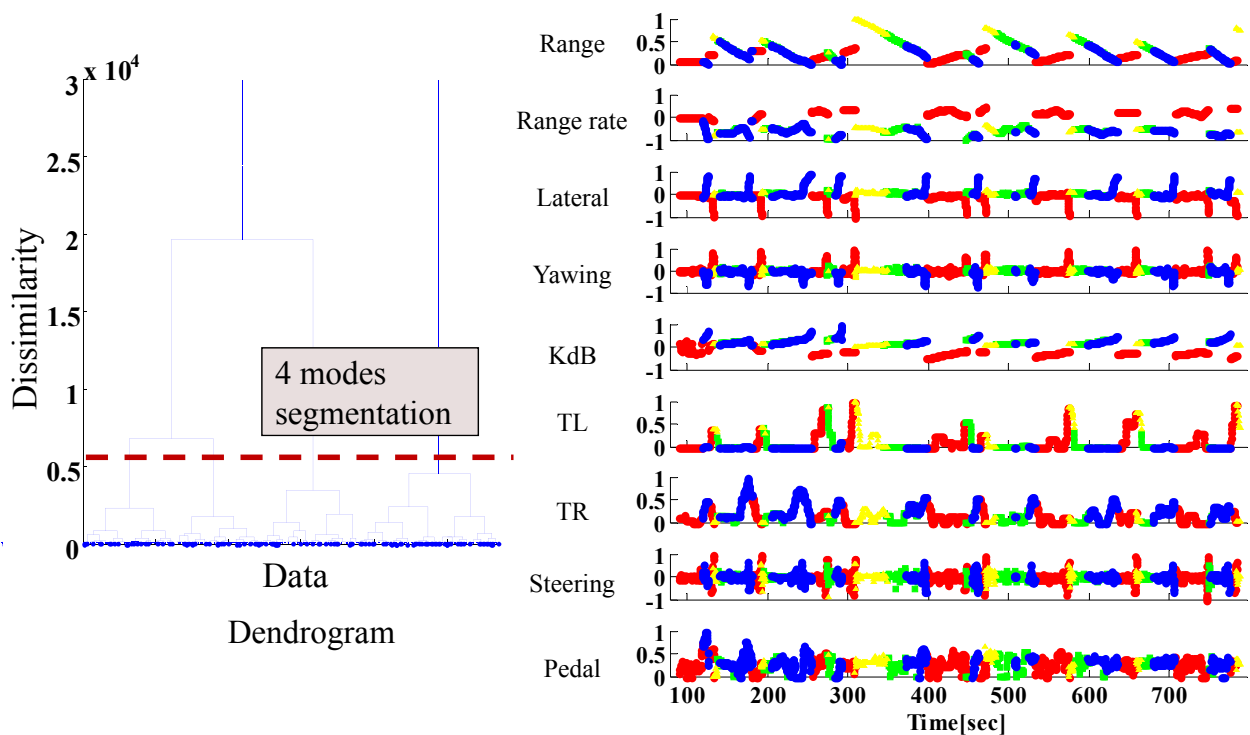


クラスタリング結果(3 mode)



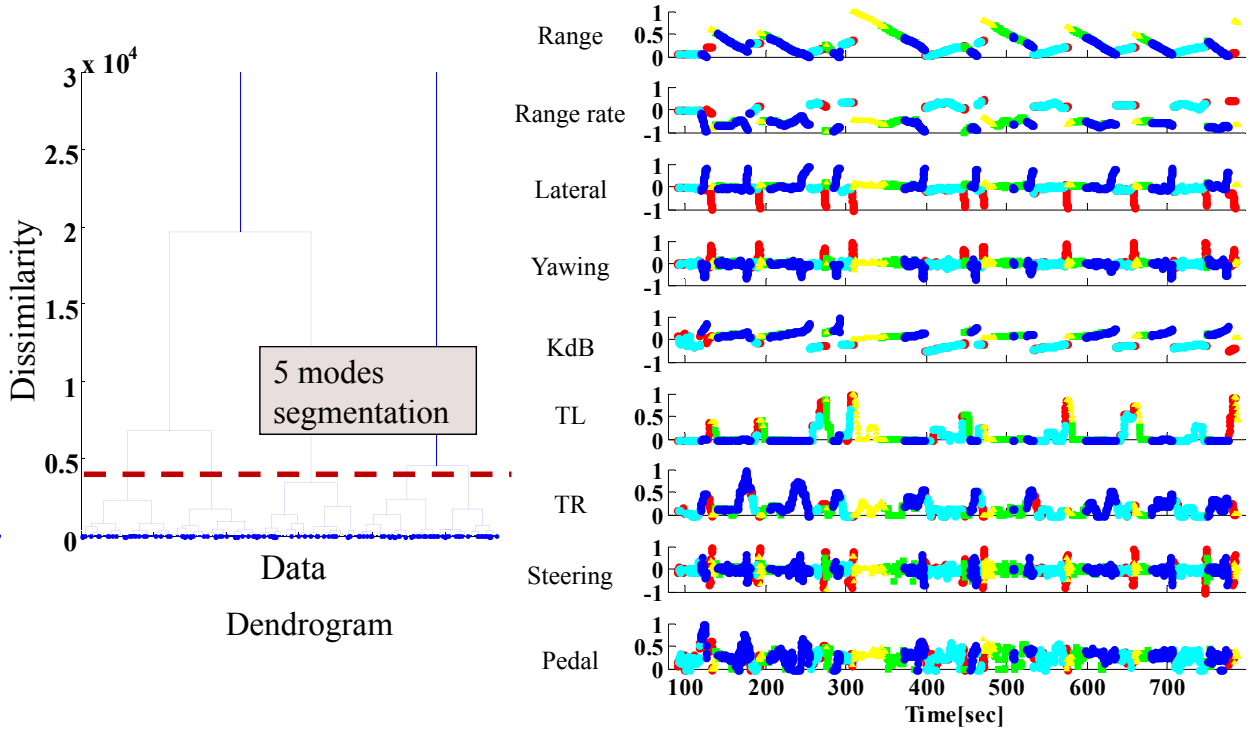
23

クラスタリング結果 (4 mode)



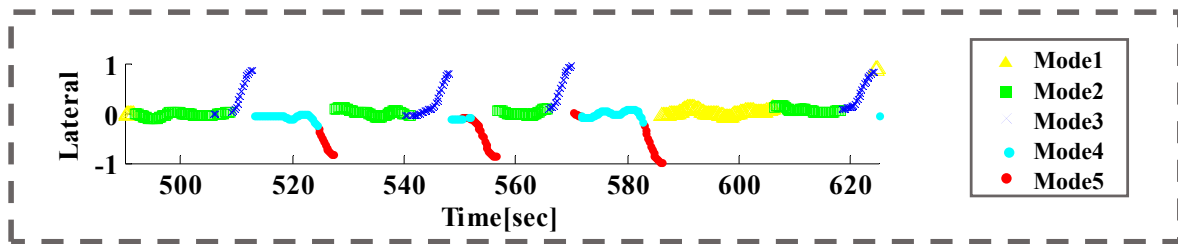
24

クラスタリング結果 (5 mode)

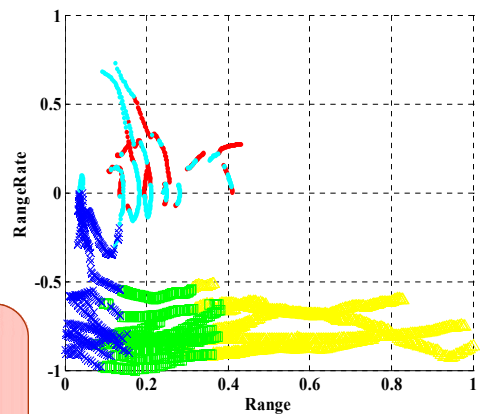
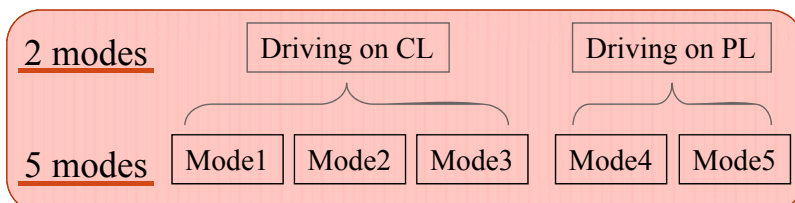


25

5mode モデルの解釈

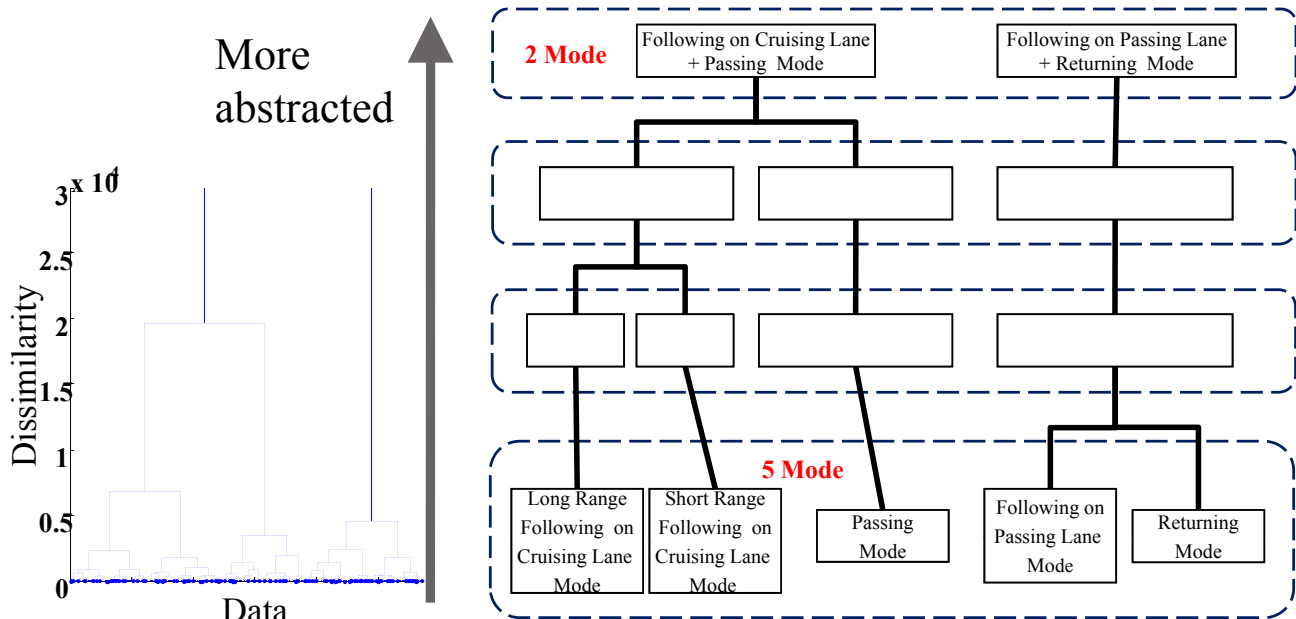


- Five symbols
- ▲ Mode 1 : 走行車線における遠距離追従 (Free driving)
 - Mode 2 : 走行車線における近距離追従
 - × Mode 3 : 追越車線への車線変更
 - Mode 4 : 追越車線における追従
 - Mode 5 : 走行車線への車線変更



26

同定された階層構造



観測データと入出力特性に基づくクラスタリングから自動的に一貫性のある階層構造が得られる

27

Probability Weighted ARX (PrARX) model と判断特性の評価

28

Probability weighted ARX (PrARX) model

$$y_k = \sum_{i=1}^S P_i \theta_i^T \varphi_k + e_k$$

Softmax function

$$P_i = \frac{\exp(\eta_i^T \varphi_k)}{\sum_{j=1}^S \exp(\eta_j^T \varphi_k)} \quad (\eta_s = 0)$$

Sample

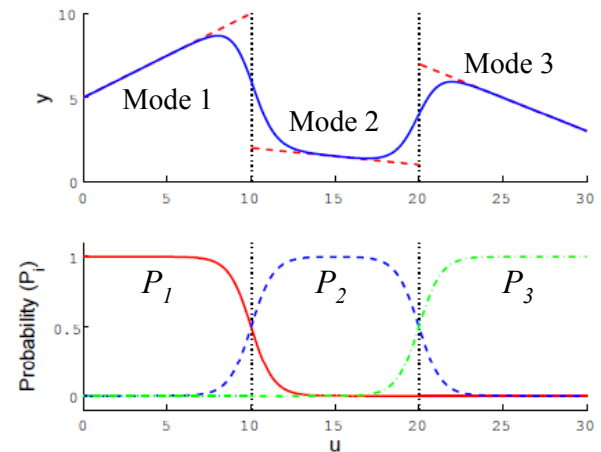
$$\theta_1 = \begin{bmatrix} 0.5 \\ -5 \end{bmatrix} \quad \theta_2 = \begin{bmatrix} -0.1 \\ 3 \end{bmatrix} \quad \theta_3 = \begin{bmatrix} -0.4 \\ 15 \end{bmatrix}$$

$$\eta_1 = \begin{bmatrix} -3 \\ 45 \end{bmatrix} \quad \eta_2 = \begin{bmatrix} -1.5 \\ 30 \end{bmatrix}$$

softmax function による連続化

複数の ARX モデルが softmax function で表される確率で重みづけ合成されている。

Sample model ($r. \in \mathcal{R}^1$ 3Mode)



9

PrARX model のエントロピー

PrARX model では、モード分割の確率的あいまいさが定量的に評価可能

Pi のエントロピー

D_H : Considered region

$$H(P) = - \int_{\varphi \in D_H} \sum_{i=1}^S P_i \log(P_i) dx$$

エントロピー:

あいまいさの定量的尺度
(モード間の確率的重なりを定量化)

Driver A

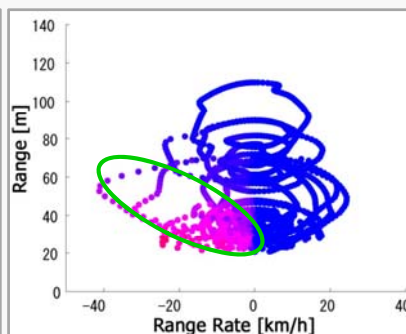
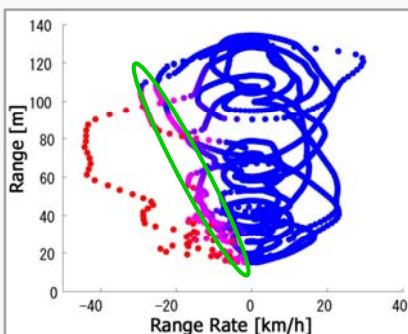
0.8273

Driver B

2.2440

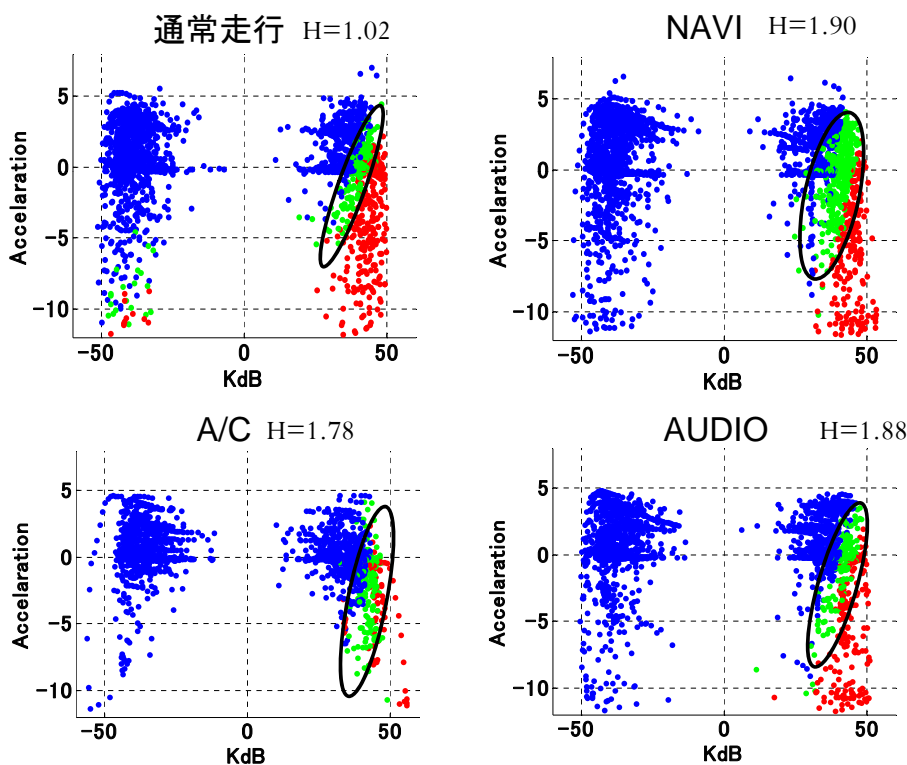
Driver A : エントロピーが小さい
→ モード間の重なりが小さい

Driver B : エントロピーが大きい
→ モード間の重なりが大きい



運転行動の視点から見れば
エントロピーの大小は判断に
おけるあいまいさを表す指標
とみなせる。

機器操作によるエントロピーの変化



＜ エントロピーの値 ＞

① 操作なし
② A/C
③ AUDIO
④ NAVI

↑ 小
↓ 大

緑色のあいまいな領域 からも確認できる。

Acceleration: 加速度
正・・・アクセルを踏んでいる
負・・・ブレーキを踏んでいる
KdB: 危険度指標
大きい・・・危険(急接近)

赤: 危険回避状態
青: 追従状態
緑: 上記のどちらも取り得る判断があいまいな状態

H: エントロピー
大きいほど判断が曖昧

31

まとめと今後の展望

HDSモデルによる運転行動理解

複雑な(に見える)行動を単純な動作とその切り替えで表現することで、理解しやすさと表現能力の高さを併せ持ったモデルとなり得る。

1. 動作系と判断系の同時理解、アシスト設計
2. 階層的行動理解
3. 判断能力の定量化
4. 行動認識、個人認証

記号接地問題を意識することなく信号(実世界)から記号(抽象化世界)への変換が可能

32