

1 序論

近年, ITS (Intelligent Transport System: 高度道路交通システム) に関する研究が盛んに行われている [1]. ITS における開発分野の一つとして, 安全運転支援システムがある. 個々のドライバの特性に応じた運転支援を目的としているため, 運転中のドライバの刻々と変化する状態を把握することが重要となる.

本報告では車両と走行車線とのズレに対するドライバのステアリング操作に基づいて, ドライバの伝達関数モデルを導出し, 集中力低下状態での操舵特性の変化を検出する.

2 システム同定法

外部励起信号が観測できない場合に有効な閉ループ部分空間同定法の一つである SSARX 法 [2] を採用し, 人-自動車系の閉ループ系システムにおけるドライバモデルの同定を行う.

2.1 SSARX 法

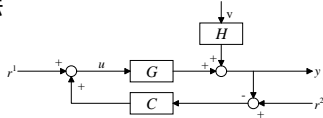


図 1 閉ループ系

図 1 に示すような閉ループ系を考える. G は同定対象, C はフィードバック制御器, r^1, r^2 は外部生起信号である. 信号 u, y はサンプル可能であるとする. v は未知の白色雑音とし, r^1 と r^2 は無相関と仮定する. G は安定とする. H は安定かつ逆も安定と仮定する. 図 1 より, (u, v) から y への入出力関係とフィードバック入力はそれぞれ以下のように表される.

$$y = Gu + Hv, \quad u = r^1 + C(r^2 - y) \quad (1)$$

2.2 同定手順

(1) 式の入出力関係が次の状態空間表現をもつイノベーション形式で表されると仮定する.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + Kv_k \\ y_k &= Cx_k + Du_k + v_k \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 式を変形すると,

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \tilde{A}x_k + \tilde{B}u_k + Kv_k \\ y_k &= Cx_k + Du_k + v_k \end{aligned} \quad (3)$$

を得る. ただし, $\tilde{A} := A - KC, \tilde{B} := B - KD$ とし, \tilde{A} は安定と仮定する. 本手法の特徴は (2) 式を使わず (3) 式だけを使って次の行列線形回帰式を得るところにある.

$$\begin{aligned} y_s(k) &= \tilde{O}x_k + \tilde{D}u_s(k) + \tilde{K}y_s(k) + v_s(k) \\ &= \tilde{O}\tilde{L}p_k + \tilde{D}u_s(k) + \tilde{K}y_s(k) + e_s(k) \end{aligned} \quad (4)$$

ただし, $e_s(k) := [e_k^T \dots e_{k+s-1}^T]^T := \tilde{O}\tilde{A}^s x_{k-s} + v_s(k), p_k := [y_s^-(k)^T \ u_s^-(k)^T]^T$ とし, $\tilde{O}, \tilde{D}, \tilde{L}, \tilde{K}$ はそれぞれ以下の通り定義する.

$$\tilde{O} = \begin{bmatrix} C \\ C\tilde{A} \\ \vdots \\ C\tilde{A}^{s-1} \end{bmatrix} \quad \tilde{D} = \begin{bmatrix} D & & & \\ C\tilde{B} & D & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ C\tilde{A}^{s-2}\tilde{B} & \dots & C\tilde{B} & D \end{bmatrix}$$

$$\tilde{L} = [K \ \tilde{A}C \ \dots \ \tilde{A}^{s-1}K \ \tilde{B} \ \tilde{A}\tilde{B} \ \dots \ \tilde{A}^{s-1}\tilde{B}]$$

$$\tilde{K} = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ CK & 0 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ C\tilde{A}^{s-2}K & \dots & CK & 0 \end{bmatrix}$$

(4) 式の第 $(i+1)$ ブロック行 ($i = 0, \dots, s-1$) が

$$y_{k+i} = \sum_{j=1}^{s+i} C\tilde{A}^{j-1}K y_{k+i-j} + \sum_{j=1}^{s+i} C\tilde{A}^{j-1}\tilde{B}u_{k+i-j} + Du_{k+i} + e_{k+i}$$

と書けることに注目すると, s を十分大きくするとき (4) 式は ARX モデルを積み重ねて作られていることがわかる.

以上より, SSARX 法の同定手順は次の通りである.

- 1) (u, y) から次数が $2s$ の高次 ARX モデルを求める.
- 2) 求めた高次 ARX モデルの係数を使って \tilde{D}, \tilde{K} の推定値 $\hat{\tilde{D}}, \hat{\tilde{K}}$ を作る.
- 3) (4) 式より,
$$z_k := y_s(k) - \hat{\tilde{D}}u_s(k) - \hat{\tilde{K}}y_s(k) \approx \tilde{O}\tilde{L}p_k + v_s(k) \quad (5)$$
 を考慮して, CCA 法と同様に z_k と p_k の正準相関解析を行い, \tilde{L} の推定値 $\hat{\tilde{L}}$ を求め, 状態推定 $\hat{x}_k = \hat{\tilde{L}}p_k$ を得る.
- 4) 状態推定 \hat{x} と (2) より, (A, B, C, D, K) とイノベーション v_k を推定する.

3 ドライバモデル同定

ドライバの操舵特性に関するモデルを同定する. ドライビングシミュレータを用いて, ドライバは 1 周約 3500m のオーバルコースを 10 周走行してもらう. 道路上にはスラロームとレーンチェンジの動作を模した目標軌道を表示し, その軌道を正確に追従してもらう. 奇数周は運転のみ, 偶数周は運転に加えて, 2 桁 + 1 桁の計算タスクを課す. また走行後には, 走行時の集中の度合いに関してアンケート形式で評価してもらう. 本実験は普通自動車免許を有する被験者 6 名 (男女各 3 人) で行った. 実験により得られたデータに関して, 車両の目標軌道に対する差分を入力 u とし, 操舵角度を出力 y とする. 尚, r^1 を目標軌道, $r^2 = 0, C$ を車両のモデルと想定し, ドライバの操舵特性を示す伝達関数モデル G を同定する.

同定可能となるためには, 入力信号のパワースペクトル $\Phi_u(\omega)$ が, 伝達関数の次数 n の 2 倍となる $2n$ 個の周波数点でゼロでない値をとらなければならない. 本実験では, その入力信号のパワースペクトル (図 2) において, ゼロではない値をとっている周波数が全ての信号において 10 個以上あるため, 5 次系の可同定は保証される. また, 次数の決定方法については, SSARX 法の手順 (3) における正準相関解析により, 正準相関係数を求め, 今回は 0.3 以上の相関係数を取り上げるものとする (図 3). その際, 取り上げた相関係数の数が次数となる.

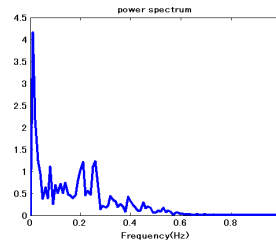


図 2 入力信号: パワースペクトル

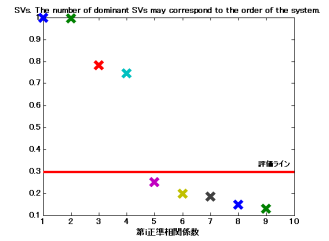


図 3 正準相関係数

4 モデル分析

同定したドライバモデルに関して, 周波数応答 (図 4) を用いて評価を行った. 入力信号のパワースペクトルよりシステムが励起されている $0.1 \sim 3[\text{rad/sec}]$ の周波数域においてモデルを評価する. 被験者 6 名の内, 2 名 (共に男性) において集中力低下時の応答変化を検出した. 通常時に比べて, 集中力低下時は高周波域で, ゲインにばらつきが発生すると共に, ゲインの低下を確認した. 経験的に集中力低下時には車両のふらつきや急な操作が見受けられる場面があるが, その現象はドライバ伝達関数の周波数応答の違いから言及することが可能である. また, 応答変化が現れた被験者が 2 名であった点に関しては, 今回全員に同じ量の計算タスクを与えていたため, 個人の並行処理能力の違いによって, 変化の現れなかった 4 名の被験者に対しては操作へ影響を与えるまでの負荷ではなかったことがアンケートから推察された.

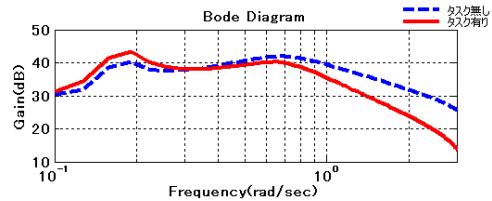


図 4 被験者 D: ボード線図 (ゲイン)

5 結論

人-自動車系の閉ループ系システムにおいて, ドライバの伝達関数を SSARX 法を用いて導出し, ドライバの集中力低下状態を周波数応答の違いから検出した. ドライバの集中力低下を引き起こすタスクの負荷量を十分に見積もることや, システムが十分励起できる入力信号によって同定することでドライバ伝達関数をより正確なものにしていくことが今後の課題である.

参考文献

- [1] ITS Japan: <http://www.its-jp.org/>
- [2] 奥 宏史, 田中 秀幸: "閉ループ部分空間同定法", システム/制御/情報, Vol. 50, No. 3, pp. 106-111, 2006