

# 複数変量の制御を含む手動制御課題における 簡易な手動操作説明モデルの構築

藤井文武 (理工学研究科機械工学専攻) 西村隆宏 (理工学研究科機械工学専攻)

## Development of a simple mathematical model describing manual control action of a human operator performing multivariable manual control tasks

Fumitake FUJII (Mechanical Engineering, Graduate School of Science and Engineering)

Takahiro NISHIMURA (Mechanical Engineering, Graduate School of Science and Engineering)

**Abstract** A human driver is expected to make multiple decisions and/or to perform multiple operations in parallel when he/she is driving a car. The driver has to track the desired road path while following the speed limit, and put appropriate distance with other cars and pedestrians to avoid collisions. The driver has also to cope with the changes of car response characteristics which might be caused by variations of weather, number of passengers and road conditions. A number of researches have been conducted to establish a mathematical model which describes the control action of a human driver under the context of model predictive control theory. This paper handles the same problem of modeling control action of a human subject engaged with a multiobjective control task. A two dimensional tiny driving simulator has been developed to analyze control action of the human subject trying to accomplish designated task under several different scenarios. Proposed model is a linear regression model where extrapolated physical variables expressing relations with other cars are incorporated as quantities related to control action of a human subject. Analysis of manual control action while he/she was operating a 2D driving simulator to complete the assigned task indicates that the proposed model not only provides an inference on how human control action is synthesized but also clarifies how much manual control action would rely on prediction might vary depending on the operator's experience and control scenarios.

**Key words:** Pilot Model, Manual Predictive Control, Regression Analysis, Principal Component Analysis

### 1 はじめに

人間が制御システムにおける制御器としての役割を担う手動制御系において、人間が行う制御動作を定式化して表現する研究は、いわゆるパイロットモデル<sup>1)2)</sup>と呼ばれる、十分に慣れ親しんだ制御対象に対して反射的に行う制御動作を表現するモデルの構築に端を発し、現在に至るまで半世紀以上にわたり継続的に研究者の興味を集め続けている課題である。現在では、より複雑な手動制御課題や、ロボットと人間の協調支援を行うための基礎研究として、時間の推移に伴い変化する状況と複数の情報を実時間で認知・判断して適切な操作を加える人間の高度な処理能力を表現する計算モデルの構築に向けた検討が続けられている。そのような課題の一つに、人間の自動車運転行為のモデリングがある。

自動車の運転においては、瞬時における自車制御量の目標値への追従のみが運転操作の目的となるのではなく、同じ道路上を走行する他車両や歩行者との接触回避、天候による路面状況変化への対応、飛び出しなど不測の

事態へのリスク管理など複数の処理を並列的に行う運転操作が要求されるため、常に数秒先の状態の予測を行いながら現時刻の操作量を決定する予測運転を行うのが良いとされる。MacAdam<sup>3)</sup>は、線形時不変システムに対する重み付き有限時間最適制御問題が、重み関数の選択によってはモデルを用いて計算された未来の予測誤差のフィードバック制御に帰着されることを示し、人間が行う自動車の車線追従走行制御との類似性を示唆している。この例のように、人間による自動車の運転は予測をその要素として含むと考えるのが自然であり、実際の操作量発生スキームがモデル予測制御のそれと高い類似性を有することから、人間の自動車運転操作をモデル予測制御の枠組みで表現する研究が多数試行されている。

例えば Keen and Cole<sup>4)</sup>は、車両の前後輪の滑り角の複数の値について導出された車両旋回運動の線形近似モデルと運転者の筋神経系の応答特性を組み合わせたモデルを用い、目標軌道と車両位置間の追従誤差の二乗和を予測ホライズン上で最小化するという定式化を行ったモデル予測制御問題を、ドライバのステアリング操作を説明するモデルの構築に利用している。また、Qu<sup>5)</sup>らは、

車両の操舵時の応答性を支配する路面の摩擦係数の不確定性を考慮し、目標軌道と車両位置の間の追従誤差の期待値をホライズンの中で最小化するステアリング入力操作を決定する確率的モデル予測制御の枠組みを、路面状況の不確定性を踏まえたドライバの操作量決定スキームのモデルとして提案した。

実際の自動車の運動は複雑なモデルに支配されており、ドライバの運転操作スキルを表現するモデルの構築に、長年の運転経験により体得した車両応答特性に関する理解を表現するモデルを明示的に組み込んだモデル予測制御問題の操作量決定のしくみを利用しようとするのは極めて自然なことであると言える。しかし一方で、自動車の運転操作においては、自車両単独走行の状態では理想の運動軌跡に自車両を追従させるだけでなく、時々刻々変化する他車両群と自車両との関係を適切な状態に保つことも重要な目的となる。その際、ドライバは他車と自車の相対位置および相対速度の時間変化を考慮に入れて操作を行うと考えられるが、これも瞬時値のフィードバックのみではなく、これらの変数の過去の履歴と予測未来値が利用されているものとするのが妥当であろう。ただし、他車両の状態を検出するほぼ唯一の手段が視覚情報であることを考えると、他車両との相対位置・速度の予測に他車両のダイナミクスモデルを利用すると考えるのは難しく、対象となる変数の履歴から生成できる値の利用に限界ではないかと推測される。

そこで本研究では、この考え方に基づいて、時々刻々変化する状況に対応しながら課された運転タスクを遂行する人間の運転操作行為を説明する簡単な構造の数式モデルの構築を試みた。提案するモデルは、自車と複数の他車との相対速度および距離を説明変数とし、その回帰により操作者の操作量を説明しようとするものであるが、その際、回帰式に含める説明変数として変数の過去の履歴だけでなく、補外により生成した未来の予測履歴をも含めることを特徴とする。このデータ群に対して主成分分析法を応用したデータ解析を行い、全体の状況を概観した上で重要な部分にウェイトを割いて情報処理と判断・行動を行うという人間の高度な適応的操作用を表現することのできる数値モデルを構築するべく検討を行ったので、その結果を報告する。

## 2 2次元運転シミュレータの構築

複数の制約や目標を満たしつつ実時間で判断と操作を行う必要のある手動制御課題の例として、自動車の運転操作を考える。本研究では、Windows PC上で動作する

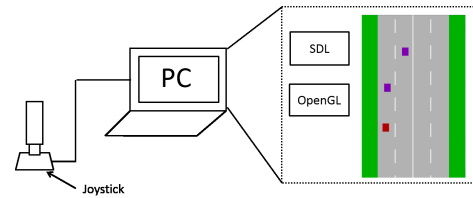


Fig.1 A two dimensional car driving simulator

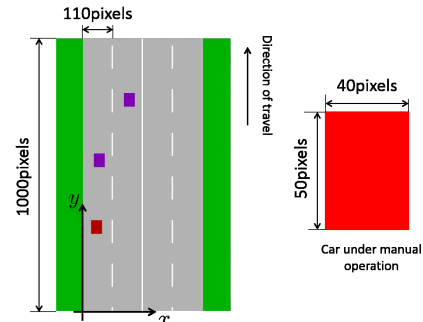


Fig.2 Geometrical information of displayed objects in the simulator screen

簡易な運転シミュレータソフトウェアを開発し、被験者に擬似運転タスクを課して運転操作データを取得した。

構築したシミュレータの構成を Fig.1 に示す。本ソフトウェアの開発には、windows 上のマルチメディアプログラミング API の一つである SDL<sup>(6)</sup> を利用した。シミュレータの画面には、道路、自車および定められたシナリオに沿って出現、走行する他車が描画される。自車の走行は PC に接続された 2 軸ジョイスティックの操作により制御することが可能で、前後方向軸の操作により加減速が、左右方向の操作により車線変更ができる。走行状況を表示するため、道路のグラフィックスは自車の走行速度に応じたスピードで縦方向にスクロールするように構成した。

描画内容の詳細を Fig.2 に示す。画面上の 16[pixel] を現実の 1.0[m] に相当する長さと考えて、車を表す長方形と車線幅の pixel 数を決定した。この長さ換算に従い、自車の最高走行速度が 100[km/h] 相当となるようにスクロールスピードの最高値を定めた。この図からもわかるように本シミュレータで模擬する環境は高速道路等自動車専用道路での走行であり、路肩の部分からの障害物の急な飛び出しは設定していない。また車は絶えず画面上部に向けて前進方向に走行する状況だけを考慮、負の車速および逆スクロールも実装していない。

画面上における自車の中心点の座標を  $(x_m, y_m)$ 、走行速度を  $v_m$  とした時、自車の画面上での軌跡は、 $a_m$  をジョイスティック操作により自車に与えられる加速度、

$u_x^m$  を自車の  $x$  方向の位置,  $\omega$  を車線変更に伴う遅れを表す定数として

$$\begin{aligned}\dot{v}_m &= a_m \\ \dot{y}_m &= v_m \\ \dot{x}_m &= -\omega x_m + \omega u_x^m\end{aligned}\quad (1)$$

なる連立微分方程式により計算される。自車の加速度入力  $a_m$  は  $\pm 6$  [m/s<sup>2</sup>] の範囲で加えられるよう設定した。なお、実際の自動車運転においては、平坦路を走行する場合でもアクセルオフで惰行すると路車間の摩擦や抵抗により徐々に車速が減少していく。これに対応する状況を作り出すため、ジョイスティックの加減速軸の中立点では微小な負の加速度が発生するようにしている。これにより、被験者は自車を一定速度で走行させようとすると中立点でない点においてスティックを保持する必要があることに注意しておく。

一方、シミュレータの画面上には、自車の他にあらかじめ定められたシナリオに沿って走行する他車を  $q (\geq 1)$  台出現させることができるように構成した。実際の道路上では、自車以外の他車もその周辺の状況に応じて適応的に運転操作されており、他車の挙動は他の他車の挙動の影響を受ける。そのような他車の挙動を表すモデルとして、追従対象となる先行車に追従走行する挙動を表現することのできる追従走行モデル<sup>7)</sup> を利用した。他車  $i$  ( $i = 1, \dots, q$ ) の挙動を支配する追従走行モデルは

$$\begin{aligned}\dot{v}_i &= k_1^i \cdot (y_p^i - y_i - h_i \cdot v_i) + k_2^i \cdot (v_p^i - v_i) \\ &\quad + k_v^i \cdot (v_i^* - v_i) \\ \dot{y}_i &= v_i \\ \dot{x}_i &= -\omega x_i + \omega u_x^i\end{aligned}\quad (2)$$

なる 3 つの線形微分方程式から構成されている。ここで、 $y_p^i$  と  $v_p^i$  はそれぞれ車両  $i$  の同一車線上の先行車となっている車両の位置と速度を表す。  $h_i$ ,  $v_i^*$ ,  $u_x^i$  はそれぞれ車両  $i$  の目標車頭時間, 目標走行速度, 目標走行車線位置であり, 他車の走行特性はこれらのパラメータを変更することで変化させることができる。なお, 他車  $i$  に対応する先行車が存在しない場合には  $k_1^i = k_2^i = 0$  と置いて, 他車  $i$  の加減速がその目標速度  $v_i^*$  への追従のみを目的として行われるようにした。

### 3 線形予測を含む運転操作説明モデルの構築

本章では, 他車の挙動を含む自車の周辺環境の変化に適応的に対応して判断し操作する人間の運転操作を説明するモデルの構築について述べる。Keen and Cole と Qu らはともに, ドライバの運転操作の説明モデルとし

てモデル予測制御の枠組みを利用するにあたり, タイヤが発生する横力変化を表現できる自車モデルを利用している。これは, モデリングの対象とする操作がステアリング操舵であることから必然の選択であると言える。しかし, 今回製作したシミュレータは車両の姿勢変化を計算していないので, シミュレータの操作を行う被験者にとっては自車両と他車両との関係の制御が操作上の課題となる。

そこで今回は, 自車の加減速および車線変更の操作量を説明するための変数として, 自車と他車  $i$  ( $i = 1, \dots, q$ ) の間の相対速度と相対距離のみを用いることにした。データ解析におけるサンプリング周期を  $T$  とし, 時刻  $kT$  における他車  $i$  と自車の相対距離  $d_i[k]$ , 相対速度  $r_{vi}[k]$  を用いて時刻  $kT$  における加減速の操作量  $U_a[k]$  の説明を試みる。説明に用いるデータのウィンドウは,  $kT$  を基準にして過去  $MT$  秒と未来  $PT$  秒の計  $(P + M)T$  秒間に設定した。このウィンドウに含まれる  $kT$  より未来の  $PT$  秒分のデータは, 実際の運転行為においては利用できないもので, ドライバはこれを補外等の簡易な予測に相当する動作で補っているものと想像される。今回はその補外モデルとして, 時間に関する一次式

$$\hat{d}_i = a_d t + b_d \quad (3)$$

$$\hat{r}_{vi} = a_r t + b_r \quad (4)$$

を利用することとした。ただし上式の  $t = 0$  は時刻  $kT$  に対応し, その意味でこの式は時刻  $kT$  における操作量についての解析ウィンドウのみで局所的に有効な補外式である。後に示す被験者の運転行為の解析にあたっては, 補外式の係数  $a, b$  は, 実際に観測可能な過去  $MT$  秒のデータから最小二乗法を用いて定めた。

以上の準備の下, ドライバの操作を説明するモデルを

$$\begin{aligned}U_a[k] &= \sum_{i=1}^q \sum_{t=-M}^0 (C_{i,t} d_i[k+t] + f_{i,t} r_{vi}[k+t]) \\ &\quad + \sum_{j=1}^q \sum_{n=1}^P (C_{j,n} \hat{d}_i[k+n] + f_{j,n} \hat{r}_{vi}[k+n]) + e[k] \\ &= r^T[k] \cdot \theta + e[k]\end{aligned}\quad (5)$$

と置く。ここで  $r[k]$  は時刻  $kT$  での運転操作の説明に用いられる説明変数からなるベクトルで,

$$\begin{aligned}r^T[k] &= [d_1[k-M] \cdots d_1[k], \hat{d}_1[k+1] \cdots \hat{d}_1[k+P] \\ &\quad r_{v1}[k-M] \cdots r_{v1}[k], \hat{r}_{v1}[k+1] \cdots \hat{r}_{v1}[k+P] \\ &\quad d_2[k-M] \cdots d_2[k], \hat{d}_2[k+1] \cdots \hat{d}_2[k+P] \\ &\quad \cdots\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & d_q[k-M] \cdots d_q[k], \hat{d}_q[k+1] \cdots \hat{d}_q[k+P] \\ & r_{vq}[k-M] \cdots r_{vq}[k], \hat{r}_{vq}[k+1] \cdots \hat{r}_{vq}[k+P] \end{aligned} \quad (6)$$

で与えられる。また、線形結合の係数ベクトル  $\theta$  は

$$\theta = [C_{1,-M}, C_{1,-M+1}, \dots, C_{1,P}, f_{1,-M}, \dots, C_{q,-M}, \dots, f_{q,P}]^T$$

となる。式 (5) を用い、時刻  $kT$  からの  $s$  サンプルをデータの解析対象ウィンドウとすれば、

$$\begin{bmatrix} U_a[k] \\ U_a[k+1] \\ \vdots \\ U_a[k+s-1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r^T[k] \\ r^T[k+1] \\ \vdots \\ r^T[k+s-1] \end{bmatrix} \theta + \begin{bmatrix} e[k] \\ e[k+1] \\ \vdots \\ e[k+s-1] \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$= R \cdot \theta + e$$

と表現することが出来る。

この回帰式表現に基づいて主成分分析を行う。実対称行列  $R^T R$  には、直交行列

$$W = [h_1, h_2, \dots, h_{n_c}] (h_i \in R^{n_c}, n_c = 2q(P+M+1)) \quad (8)$$

が存在し、

$$\begin{aligned} W^T (R^T R) W &= \Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n_c}) \\ & (\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{n_c} \geq 0) \end{aligned}$$

となるようにできる。この  $W$  を用いれば、式 (7) は

$$\begin{aligned} U &= RW \cdot W^T \theta + e \\ &= Z \cdot \varphi + e \end{aligned} \quad (9)$$

と書きなおすことができる。ここで  $\lambda_1, \dots, \lambda_r$  に対して  $\lambda_{r+1}$  以降の固有値が極めて小さいとすると、 $Rh_k = 0$  ( $k = r+1, r+2, \dots, n_c$ ) と見なすことができるので、 $R$  から対応する説明変数を省いた

$$Z_R = R[h_1, h_2, \dots, h_r] \quad (10)$$

を定義し、新しい線形回帰式

$$U = Z_R \cdot \varphi_R + e_R \quad (11)$$

を考えれば、この最小二乗解  $\hat{\varphi}_R$  は

$$\hat{\varphi}_R = (Z_R^T Z_R)^{-1} \cdot Z_R^T \cdot U \quad (12)$$

で与えられる。これを利用し、第  $r$  主成分までを用いて作成した  $\hat{U}$  を作ると、

$$\hat{U} = Z_R \hat{\varphi}_R \quad (13)$$

が得られる。最後に、もともとの物理的意味がある  $\theta$  で  $\hat{U}$  の説明を行うために、改めて回帰式  $\hat{U} = R \cdot \theta + e$  を考え、その最小二乗解を求めると

$$\bar{\theta} = (R^T R)^{-1} R^T \cdot \hat{U} \quad (14)$$

が得られる。シミュレータの操作者が注視していた説明変数は、ドライバに要求されるタスクとドライバが操作する車の周辺にいる他車の挙動により変化するものと考えられるが、式 (14) の  $\bar{\theta}$  の時刻に伴う変化から、各時刻においてどの説明変数が操作量決定に大きく寄与したのかを把握することができる。

#### 4 実験シナリオの設定

本研究の目的は、課題の良好な達成に予測が必要不可欠な要素となる手動制御課題について、その遂行中に発生する状況の変化に適応的に対応して操作する人間の能力を定量的に示す数学モデルを構築することにある。そのため、解析対象となる手動操作データを取得する際には、予測が不可欠な要因として含まれており、かつ遂行中に状況の変化する課題を複数設定して操作データを取得する必要がある。そこで今回は、2章で説明したシミュレータに、以下に説明する4種類の異なる走行課題を設定し、それへの被験者の対応操作状況を記録して解析することにした。これにより、自車両と他車両(群)との相対的な位置・速度の関係変化の下で課題を遂行するにあたり、操作者が重視する説明変数の選択の動的な変化が定量的に把握され、利用した説明変数に関する操作者の操作行動の説明モデルが構築される。

今回の研究では、2名の20歳代の男子大学生A、Bに被験者として協力して貰った。二人とも運動機能及び視覚は正常であるが、被験者Aはこのシミュレータの操作に習熟しているのに対して、被験者Bは簡単な練習を行ってすぐに指示された課題を行ってもらった。この両名には、他車にぶつからないようにしながら自車と他車群との間の車間距離を適正に保ちつつ、前方の他車を車線変更して追い抜ける状況だと判断できれば速やかに追い越し動作を行うよう指示した。他車両群が自車の前方を遮ってしまい現実的に追い越しが不可能な走行を行う場合でも、そのような状況を予告せず同一の指示を行っている。

以上により取得された自車両および他車両群の走行データに対して、前章で説明したデータ解析を行い、式 (14) で定義される  $\bar{\theta}$  の特徴が時間的にどのように変化したかを観察した。なお、今回は他車は車線変更を行わず、割り当てられた車線をシナリオ終了まで走行し続けるよう設定している。なお、他車両群の挙動の変化は主として一つの車両の走行速度に変化を与えることで、式 (2) により連鎖反動的に発生する。種となる他車両の速度変化は、その目標走行速度  $v_i^*$  をあらかじめ用意した

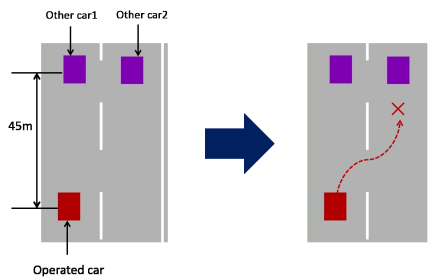


Fig.3 Prepared Scenario 1

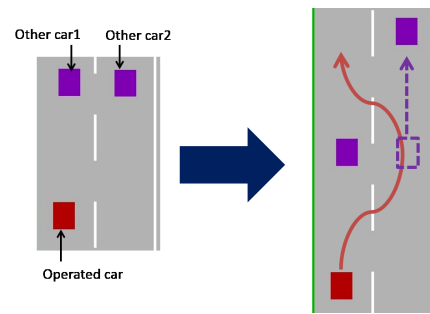


Fig.5 Prepared Scenario 3

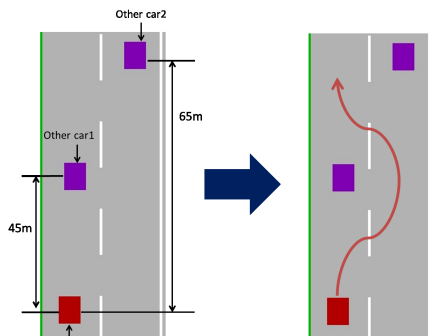


Fig.4 Prepared Scenario 2

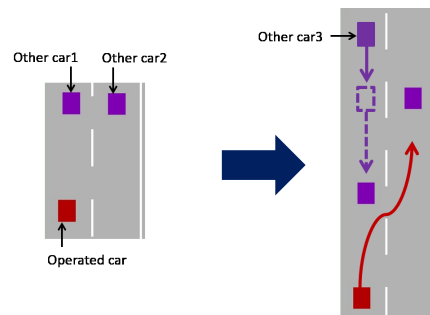


Fig.6 Prepared Scenario 4

条件に沿って変化させることで発生させた。

#### 4.1 シナリオ 1 (自車が他車を追い抜けない場合)

シナリオ 1 では、Fig.3 左に示すように自車から約 45[m] 前方の位置に他車 2 台がどちらも車速 12.5[m/s](45[km/h]) で左車線と右車線で並走している状況において、被験者は自車の速度 12.5[m/s] で操作を開始する。しかし 2 台の他車は所定時間の間初期速度を保った状態で並走を続けるため、被験者はこれらの車両を追い抜くことが出来ない。この状況においては、被験者は他車群との車間距離を衝突しないように保つことを目的に操作を行うと考えられる。

#### 4.2 シナリオ 2 (自車が最初から追い抜ける状態)

シナリオ 2 でも、Fig.4 左に示すように 2 台の他車が画面に現れる。これら 2 台の車両に設定される目標速度はともに 12.5 [m/s] で加減速もない点は前シナリオと同一であるが、操作開始時において他車両が配置される初期位置が、左車線の他車は自車の約 45[m] 前方、右車線の他車は自車の約 65[m] 前方となっており、自車はすぐに右車線より追い抜き操作を開始することができる。

#### 4.3 シナリオ 3 (操作開始一定時間後に追い抜ける状態 1)

シナリオ 3 における車両群の初期設定は、Fig.5 左に示すようにシナリオ 1 のそれと同一である。しかしながら、本シナリオにおいては、操作開始から一定時間が経過すると右車線の他車が加速を始め、最終的には同図右に示すように 16.7[m/s] まで加速する。これにより左車線と右車線の他車との相対距離が開き追い抜き操作ができる状態に変化する。

#### 4.4 シナリオ 4 (操作開始一定時間後に追い抜ける状態 2)

シナリオ 4 における初期設定も、Fig.6 左に示すようにシナリオ 1 および 3 のそれと同一である。しかし本シナリオでは、同図右に示すように操作開始後所定の時間が経過すると左車線に速度 11.1[m/s] の 3 台目の他車が出現する。これにより自車の前方にいる他車 1 の車速が下がるため、自車は他車 1, 3 を追い抜くことができる状況に変化する。



Fig.7 Time variation of  $\bar{\theta}$  of subject A in Scenario 1

5 走行操作結果の解析

本章では、被験者に実際にシミュレータを操作して貰い得られた操作結果を、第3章で説明した手法により解析した結果について説明する。

実験システムは、マイクロソフト社の Windows 7 OS がインストールされた PC 上に構築した。シミュレータの描画更新と入出力処理およびロギングを行う繰り返し実行部の実行周期は一定とはならないが、今回利用した環境では一制御周期の実行時間はほぼ 60[ms] 前後の値を取っていた。これを等時間間隔のデータとするため、各変数についてサンプル点間を直線補間した上で 100[ms] 間隔で再サンプリングし、解析対象データとした。

説明変数に加えるデータは、過去 1[s] と未来の予見値 1[s] の計 2 秒間分を利用した。これにより、操作量説明式には、他車 2 台が現れるシナリオで 84 個、他車 3 台が現れるシナリオでは 126 個の説明変数が含まれることとなる。以下に示す結果では、最終的な操作量説明式 (14) で得られる係数ベクトル  $\bar{\theta}$  が表す、各説明変数が操作量に占める寄与の大きさとその時間的変化を把握しやすくするため、各時刻ごとにベクトル  $\bar{\theta}$  の要素の最大値を 1 として正規化し、その上で 0.8 以上の値となる全要素を色づけ表示した。 $\bar{\theta}$  を計算する過程において主成分分析により次数の低減化を図っているが、式 (10) の  $r$  は

$$\lambda_{r+1} < 0.01\lambda_1$$

を満たす最小の  $r$  として定めた。なお、以下に示す解析結果では、 $\bar{\theta}$  の時間推移を表す表の 1 列当たりの時間が 1[s] となるように、解析結果の時系列をダウンサンプリングした上で表示していることに注意する。

5.1 シナリオ 1 の操作解析の結果

被験者 A がシナリオ 1 で行った操作を解析した結果を Fig.7 に示す。この図は、 $\bar{\theta}$  の値を列ベクトルとして

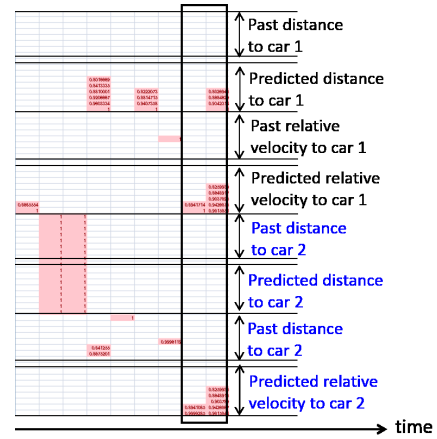


Fig.8 Time variation of  $\bar{\theta}$  of subject A in Scenario 2

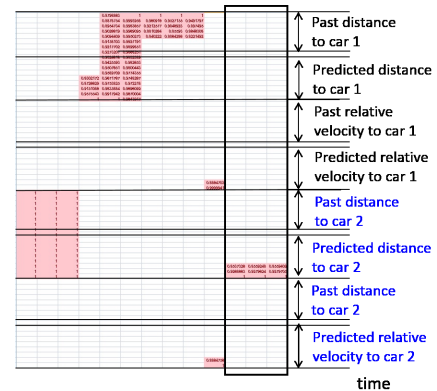


Fig.9 Time variation of  $\bar{\theta}$  of subject B in Scenario 2

並べた上で、上述の正規化と着色処理を行ったものである。同一の説明変数の種別（相対距離もしくは相対速度）については、列の上にあるものほど早い時刻の変数と対応している。過去の記録データと式 (3) および (4) で生成される予見値との間にある一行は、それが  $t = kT$  に対応する  $\bar{\theta}$  の要素であることを表している。

図より、被験者 A はこのタスクにおいて主に相対速度を注視しながら操作を行っていると推測できる。時折相対距離に重みが移動するフレームがあるが、これは 2 章で述べたように、一定車速を維持するためにはジョイスティックを中立ではないところで保持しなければいけないことが原因で生じる自車速のゆらぎにより、相対距離が意図以上に短くなったことが原因であると考えられる。相対距離に重みが移動した次のフレームでは、必ず相対速度の最も未来の予測値に最大の重みが与えられている点は極めて興味深い。

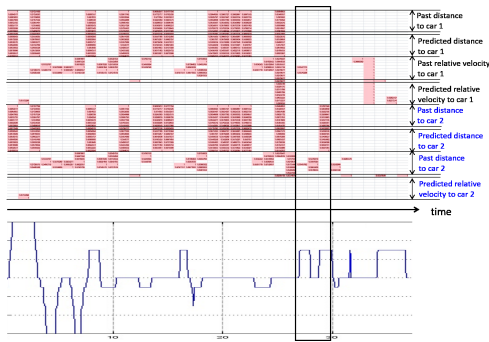


Fig.10 Time variation of  $\bar{\theta}$  of subject A in Scenario 3

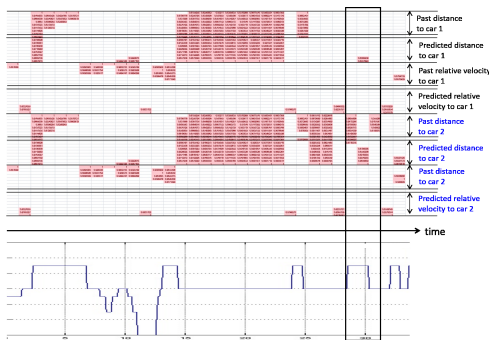


Fig.11 Time variation of  $\bar{\theta}$  of subject B in Scenario 3

### 5.2 シナリオ 2 の操作解析の結果

シミュレーションに十分に慣れている被験者 A の操作の解析結果を Fig.8 に、不慣れな被験者 B の操作データの解析結果を Fig.9 に示す。この両図には太枠で囲まれた領域があるが、これが他車の追い抜き操作を行っているところに対応している。

操作になれている被験者 A は、追い抜きに至るまでの時間帯と追い抜き中の両方で 2 台の他車の挙動に対してバランスの取れた注意配分を行っている様子が観察できる。一方で、操作経験が乏しい被験者 B はほとんどのフレームにおいて距離に注意が集中しており、かつ短い時間での注視の切り替えが行われていない様子が見て取れる。一般に自動車運転の初心者は熟練者に比べて余裕がないため、複数の注視対象にバランスよく注意を払えないということが言われるが、操作対象の動特性は全く異なるものの、この結果も同種の理由によるものと考えられる。

### 5.3 シナリオ 3 の操作解析の結果

シミュレーションに十分に慣れた被験者 A のデータ解析結果を Fig.10 に、不慣れな被験者 B のデータ解析結果を Fig.11 に示す。図の下部には、それぞれの操作者

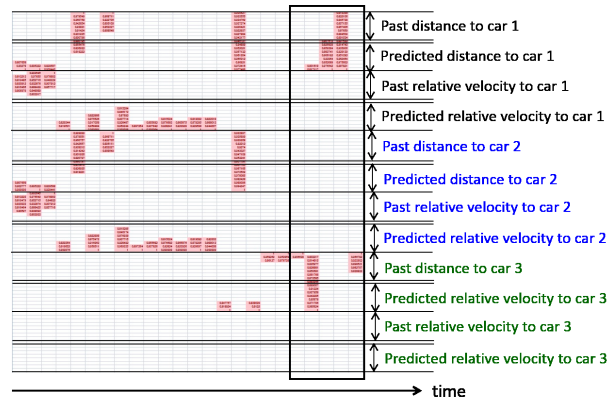


Fig.12 Time variation of  $\bar{\theta}$  of subject A in Scenario 4

が行った加減速操作の入力指令の様子を、時間軸を合わせて記入した。なお、図中に記入された太枠内の領域の意味は、先のシナリオ 2 で示した図と同一で、追い抜き操作中であることを表している。両図とも、シナリオ初期の追い抜き操作発生前、先行車への追走を強いられる時間帯に、他車 1, 2 に対する相対距離の重みのみが高くなっている領域が散見される。これは被験者 A, B に共通して発生しているが、車間距離が適正で相対速度値が 0 近傍の値を取る状態を維持できていることが原因であると考えられる。値が 0 となる説明変数群は主成分分析による説明変数の個数低減の過程で省略されるため、結果に寄与しない。

一方、この時間帯で加減速の操作を行っているときに過去の速度履歴の重みが高くなるのは、自らが行った加減速の操作が適切かどうかを相対速度の履歴で確認しつつ調整する動作の表れと推測される。追い抜き動作中に、注視の対象が先行車 1 から 2 へ移ると考えられるが、これがデータ上でも示されている。このシナリオの操作結果については、経験の多少は操作の本質的な差となって表れていないと判断される。

### 5.4 シナリオ 4 の操作解析の結果

このシナリオにおける被験者 A の解析結果を Fig.12 に、被験者 B の解析結果を Fig.13 に示す。追い越し操作の図示については前例と同一である。追い越しに至る前の操作に関して、被験者 A は相対速度の予見値に高い重みがついている時間が長いのにに対して、被験者 B の操作データ解析結果では高い重みのついた説明変数に一貫性がないことは注目に値する。

一方、追い抜き動作についても、被験者 A の操作データからは、新たに表れた他車 3 とそれにより挙動が変化した他車 1 の両方が時分割で操作量に寄与しているのに

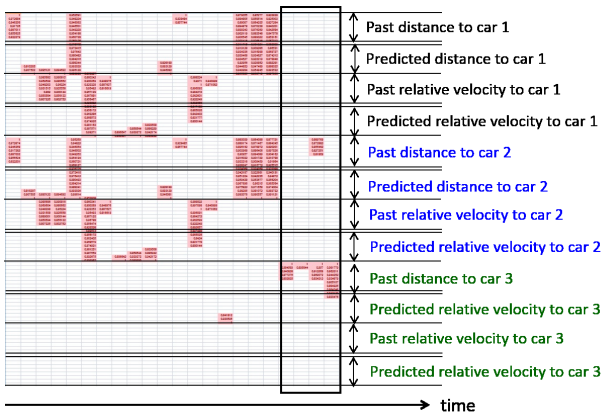


Fig.13 Time variation of  $\bar{\theta}$  of subject B in Scenario 4

対し、被験者 B では新たな他車 3 の挙動が支配的に説明因子として抽出されている点が興味深い。

## 6 まとめ

本研究では、操作者が注視・制御すべき複数の変数があるような手動制御課題において、課題の進行と制御量の変化に連れて変わっていく説明変数の操作量への寄与の状況を、定量化して表現することのできる簡易な操作量説明モデルを提案した。また、本研究のために作成した簡易な 2 次元の車両走行シミュレータを用い、複数の異なる状況に対応して課題を遂行する被験者の操作を解析することで、1 タスク内で発生する状況の変化に応じて操作量決定に高い寄与を示す変数が変化していくことを示した。これは、解析結果により手動制御課題への操作の熟達度が説明できる可能性を示唆するものである。

本研究では、シミュレータに対して行った被験者の操作を説明するための  $\bar{\theta}$  の変化を追跡することが目的であったが、このようにして得られる  $\bar{\theta}$  の信頼性が上がれ

ば、将来的な運転者の支援にも活用が可能である。そこで今後はまず被験者を増やし、また異なる典型的な走行シナリオについて同様の解析を行うことにより、人間の手動操作における適応的注視分配能を説明できるモデルの確立に継続して取り組んでいく。

## 参考文献

- 1) D.T.McRuer and H.R.Jex, "A Review of Quasi-Linear Pilot Models," IEEE Trans. Human Factors in Electronics, Vol.8, No.3, pp.231-249, 1967
- 2) 北川 敏男, 喜安 善市, 人間-機械系, 共立出版株式会社, 1970
- 3) C.C.MacAdam, "An Optimal Preview Control for Linear Systems," Trans. ASME J. Dynamic Systems, 1980
- 4) Steve D. Keen, David J. Cole, "Steering control using model predictive control and multiple internal models," Proceedings of AVEC - The 8th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2006
- 5) Ting Qu, Hong Chen, Yan Ji, Hongyan Guo, "Modeling Driver Steering Control Based On Stochastic Model Predictive Control," Proc. IEEE Int. Conf. SMC, pp.3704-3709, 2013
- 6) <http://www.libsd1.org/>
- 7) 西羅 光, 川邊 武俊, 自動車の最適経路生成, 計測と制御, Vol.45, 2006
- 8) Jan M. Maciejowski, 足立 修一 (訳), 菅野 政明 (訳), モデル予測制御, 東京電機大学出版局, 2005
- 9) 古川武典, 電動車椅子走行時における操作モデルの構築に関する研究, 山口大学修士論文, 2011