

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330298

研究課題名(和文)人間行動モデルに基づく人間との親和性の高い自律走行車両運動制御システム設計手法

研究課題名(英文) Design Method of Autonomous Vehicle Control System that Operate Similar to a Human based on Human Behavior Model

研究代表者

早川 聡一郎 (Hayakawa, Soichiro)

三重大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50288552

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はドライバに類似した運転を行う自律走行車両運動制御システムを設計する手法の実現を目的とした。このため、精度の高いモデルの存在しなかった旋回行動モデルについて、ハイブリッドシステム表現に基づいたフィードバック構造の新しい旋回行動モデルを提案し、シミュレーションによる高精度な旋回行動が実現できることを確認した。また、このようなドライバの最小の運転行動要素である運転行動モデルを集め、所望の運転状況下の運転行動を実現するための運転行動群モデルについて構造と設計手法を提案し、シミュレーションによりその有効性を検証した。これによりドライバに類似した運転行動を行う車両運動制御システムが実現できた。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is to realize the design technique of the control system that operate similar to a human driver for autonomous vehicle. To achieve this aim, the turning operation model with a feedback control based on the hybrid system was proposed. By using driving simulator, highly accurate turning operation was verified. Then, it is necessary to realize driving behaviors for the target long time driving situations by using these driving behavior models. To realize it, the multi driver model that include many driving behavior models and the design method were proposed. The effectiveness of the proposed model was verified by using the driving simulator.

From these results, the vehicle control system that operates similar to a human driver was realized.

研究分野：人間行動解析

キーワード：ハイブリッドシステム 人間行動 運転行動 システム同定 行動モデル 行動解析

### 1. 研究開始当初の背景

現在、自動車の自律走行に関する研究が盛んに行われているが、その研究内容は多岐に渡っている。その研究の中で車両運動制御システムに着目した研究は殆ど無い。車両運動制御システムは現状では通常の機械システムの制御システム設計の観点で構築されており、その制御システムが行う車両の運転操作は人間の運転操作と乖離しており、人間との運転特性の差異が実用化の際に交通安全面で問題化すると考える。

このため、自律走行車に人間に類似した運転行動を行う制御システムを実装する必要があるが、人間が運転の際に使用している外部環境情報は不明なものが多く、人間の運転行動のモデル化を行い、それを自律走行車制御システムへ適用する研究はほとんど行われていない。こうしたことから、ドライバの使用する外部環境情報を明らかにし、人間の運転行動のモデル化とその制御システムへの適用による、ドライバに類似した運転実現を目指した研究を行う必要があると考えた。

### 2. 研究の目的

自律走行車の運転挙動は車両運動制御システムにより決定されるが、人間の運転特性を陽に考慮した設計手法が無いため人間とは異なる運転挙動を取る。そのため、人間が運転する自動車と同じ空間を走行する際、人間が予測できない運転をすることで事故を引き起こしうる。そこで、人間が運転時に判断や操作に使用している外部環境情報を、その運転状況毎に解明し運転行動を明確にし、それに基づき人間の運転行動をシンプルかつ精度良く再現でき、車両運動制御システムへの適応が容易なハイブリッドシステム表現により数値モデル化して導出する必要がある。そのモデル構造概略を図1に示す。このハイブリッドシステム表現モデルは離散的な判断と連続的な複数の動作の組み合わせで表現され、車両運動制御システムと構造が類似している。よって、モデルが同定できれば車両運動制御システムへの実装が容易というメリットがある。そのようなドライバ運転行動モデルに基づき、人間に類似した運転を行う自律走行車用車両運動制御システムの設計手法実現を目的とし、ドライビングシミュレータ(以下 DS と略す)による走行実験により提案手法の有効性を示す。

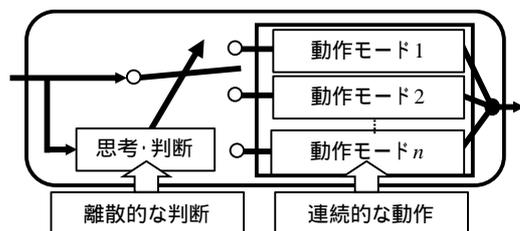


図1 ハイブリッドシステム表現に基づく人間行動モデル

### 3. 研究の方法

(1)ドライバの運転行動のモデル化に関する研究の中で、特に交差点などでの旋回運転行動は、ドライバの運転行動戦略や使用外部環境に不明な点が多かったことから、軌道再現精度の良い旋回行動モデル設計を行い、ドライバに類似した運転行動の実現を目指す。ドライバが旋回時に使用している外部環境情報を把握するため、DSであることを活用し、走行時の交差点周辺の道路環境の道路構造物を段階的に削減していき、視線計測装置を用いてドライバが旋回中に使用している外部環境情報を確定する。確定した外部環境情報に基づき、運転行動モデル中の操作モード数の決定と、ステアリング操作モデル構造の決定を行い、旋回行動モデルを設計する。そして、運転情報に基づきモデルを導出し、導出された旋回行動モデルをドライビングシミュレータの車両運動制御システムに実装して、その有効性を検証する。

(2)これまでの研究で図1に示すような、ドライバの運転時の最小運転行動要素を再現する運転行動のモデル化に関する研究をいくつか行っていた。しかし、それ以上の複数の要素を含んだ長時間の一連の自動車運転走行を再現するには、それら最小要素の運転行動モデルを複数組み合わせた新しいモデル構造を新たに設計する必要がある。そこで、ハイブリッドシステム表現された運転行動モデルを複数組み合わせる構築する運転行動群モデル構造とその設計法を新たに提案する。

高速道路走行、複数車線を有する信号のある道路走行、信号の無い狭所道路走行など、各種の走行シーンに対して運転行動群を構築し、現在の走行シーンに合わせた運転行動群モデルを選択して走行することを考える。そして、この走行シーンに対応して、前方車追従走行、一定速走行、信号あり交差点右折、信号無し交差点左折など、モデル構築者の主観に基づき意味のあるサブ運転行動群に切り分けを行う。このようにして定められたサブ運転行動群を、さらに最小要素となる運転行動として切り分け、この運転行動毎にハイブリッドシステム表現に基づいた運転行動モデルを構築することで、目的とする運転行動群モデルが設計できることになる。

本研究では具体的な走行シーンに対して運転行動群モデル設計を行い、走行データよりモデルを導出し、導出した運転行動群モデルをDSの車両運動制御システムに実装して、ドライバに類似した運転が再現できるか、提案運転行動群モデルの有効性検証を行う。

### 4. 研究成果

#### (1)旋回行動モデル

##### 旋回行動モデル構造の決定

まず、旋回中にドライバが使用している外部環境情報を割り出す必要がある。DSで視

線計測装置を用いて実験を行うことで、旋回中にドライバがどのような外部環境情報を見て旋回操作を行っているか検討を行った。その結果、交差点進入開始時にはドライバは交差点中央のゼブラゾーン付近を注視しており、そのゼブラゾーンにある程度接近すると、その後は目標とする進入車線を注視していることが確認された。また、ドライバの通常の旋回時のステアリング操作は、ステアリングの切り込み、ステアリング角維持、ステアリングの切り戻しと3つの操作で構成される。これに加えて、前述の注視点移動のタイミングをモード切替点に含めることで、切り込みで2モード、ステアリング角維持で1モード、切り戻しで2モードの合計5モードで構成されるモデル構造とした。また、モード1はゼブラゾーン付近の中間目標点を経由点としており、それ以外のモードは全て最終目標点となる旋回先の走行車線進入口を目標点とした。

各操作モードで使用する旋回操作モデルは、ドライバが旋回時には車外前方視界の横方向変位量に基づいたステアリング操作を行っているとの検討結果から、ステアリングの角速度を出力するフィードバック構造を有するモデル形式とすることとし、

$$\dot{u}(t) = K_{Pi} \theta_e(t) + K_{Ii} \int \theta_e(t) dt + K_{Fi} \theta_F(t)$$

と定めた。ここで、 $\theta_e(t)$ は目標点における予測車体角度と $\theta_D(t)$ [deg]との差であり、その $\theta_D(t)$ は現在の車体角度 $\theta(t)$ [deg]と目標点での目標車体角度 $\theta_T(t)$ [deg]との差である。また、予測車体角度は以下の式で与えられる。

$$\dot{\theta}(t) \cdot \frac{d(t)}{v(t)} + \frac{\ddot{\theta}(t)}{2} \cdot \left[ \frac{d(t)}{v(t)} \right]^2$$

ここで、 $d(t)$ は目標点までの残り距離、 $v(t)$ は自車速度である。現在の車両位置から見える目標点方向角度である $\theta_T(t)$ [deg]と $\theta(t)$ の差が $\theta_F(t)$ [deg]である。また、 $K_{Pi}$ 、 $K_{Ii}$ 、 $K_{Fi}$ が人間に類似した運転を実現するために導出するパラメータとなる。

また、判断モデルについてもドライバの視線計測結果に基づき決定し、モード1は交差点中央のゼブラゾーンまでの残り距離と自車速度に基づいた判断モデルとし、モード2からモード5は旋回開始点からの車両変位と車体角度に基づいた判断モデルとした。これらは、SVMを用いることで切替超平面を導出し、それを切替判断条件式として用いる。

#### 旋回行動モデル同定

DSを用いて交差点での右折旋回行動の情報収集実験を行った。使用した交差点は片側三車線の交差点であり、被験者1名の各走行車線への旋回運転行動を収集した。

収集した運転情報を用いて、前述した各モードの旋回操作モデルの3つのパラメータと各モードの切替条件式の係数を導出した。導出された旋回行動モデルを図2に示す。この旋回行動モデルに対して、中間経由点と最終

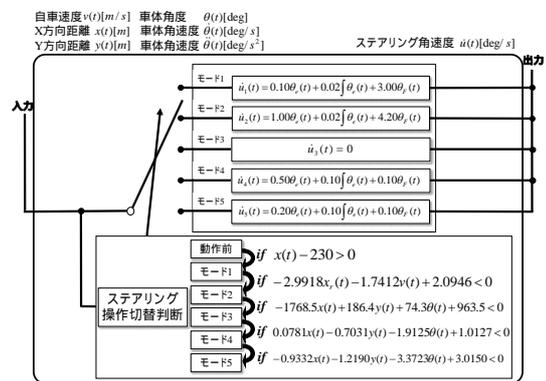


図2 導出した旋回行動モデル

目標点を与えることで、3つの任意の車線への旋回操作が実現できる。

#### 自律走行実験結果

市街地コースにて行った本提案モデルの有効性検証実験の例として、第1走行車線への旋回結果を図3に示す。ドライバモデルの旋回走行軌跡は、モード1を橙色、モード2を緑色、モード3を赤色、モード4を水色、モード5を紫色で示している。ドライバの走行軌跡は青色の点線で示している。図中の+印は中間目標点を、図中○印は最終目標点を示している。ドライバの軌跡はモデル同定に用いた5本の走行データを平均化したものである。この結果を見ると、よくドライバの運転軌道を再現できているのが確認できる。また、各走行車線への旋回実験結果に基づき提案旋回行動モデルの各目標点との誤差評価結果を表1に示した。これを見ると、ドライバの実際の走行時の平均化された軌道に対する最大誤差であるドライバ誤差と比較して、ほぼそれ以下に抑えられており、どの車線への旋回行動も良く目標点に追従できドライバに類似した旋回が再現できていることを確認した。また、ステアリング操作など

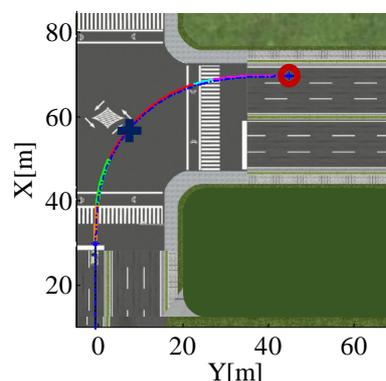


図3 第1走行車線への旋回走行軌跡比較

表1 目標点上での追従誤差

目標点誤差 [m]	中間目標点		最終目標点	
	モデル誤差	ドライバ誤差	モデル誤差	ドライバ誤差
第1走行車線	0.283	0.449	0.078	0.145
第2走行車線	0.456	0.233	0.046	0.265
第3走行車線	0.276	0.312	0.042	0.150

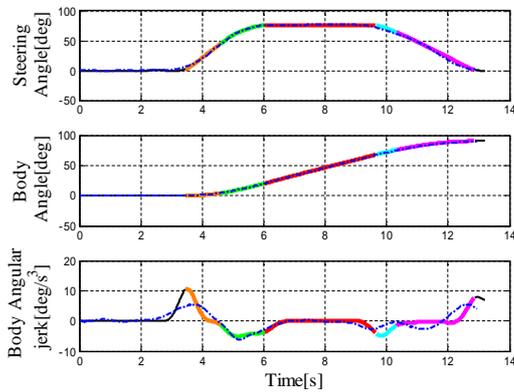


図4 ドライバと制御システム結果比較

の時間変化を図4に示す。このグラフは縦軸が上から、ステアリング角度[deg]、車体角度[deg]、車体角躍度[deg/s<sup>3</sup>]を示している。青点線がドライバの操作を、実線がドライバモデルの結果を示しており、車体角躍度では多少差異が生じているが、ステアリング操作、車体角挙動はほぼ一致しておりドライバに類似した運転操作が実現できたと言える。

(2) 運転行動群モデル

運転行動群モデル設計手法

従来の運転行動モデルを組み合わせ、長時間の一連の運転行動を実現する、運転行動群モデルの設計手法を以下に示す。

- (a) 実現したい運転行動群モデルに対するドライバの運転情報を収集する。
- (b) 収集データに基づき、行動群モデルを構成するサブ行動群モデル数を決定する。
- (c) 各サブ行動群モデル内にある運転行動モデル数を、クラスタリング手法などに基づき決定する。
- (d) 各運転行動モデルの運転行動内容と必要とする外部環境情報を決定する。
- (e) 各運転行動モデルを従来使用している運転行動モデル同定手法より導出する。
- (f) サブ行動群モデル間の遷移条件を収集データより決定する。

以上の手順により所望の運転行動を行う運転行動群モデルが導出できる。以下、具体的な走行状況を対象にモデル化を行い、上記設計手法の有効性を検証する。

運転行動群モデルのモデル導出

提案行動群モデルの有効性を検証するため、運転要素が比較的少ない高速道路走行を対象とした。運転行動群モデルを導出するため、DSにて高速道路コースを走行し、1名の被験者による運転情報収集実験を行い、得られた運転情報に基づいてモデル導出を行う。まず、運転行動群モデルの構造について検討し、巡航走行行動群と前方車追従行動群の二つのサブ行動群に分けることにした。そして、各サブ行動群に含まれる運転行動数を検討し、巡航走行行動群が3つの運転行動、前方車追従行動群が4つの運転行動で構成される

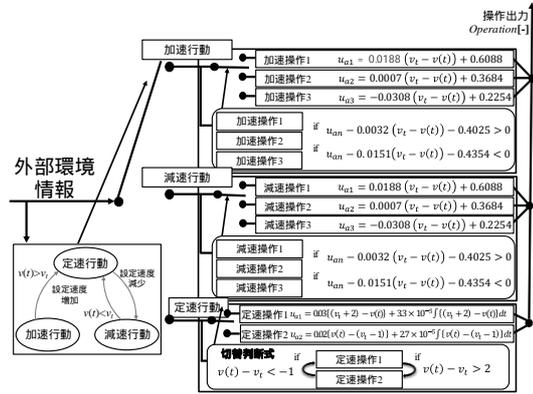


図5 導出した巡航走行行動群モデル

ことを確認した。

そして、それらの各運転行動に合わせて収集した運転データを分割し、各運転行動のモデル導出を行った。導出した巡航走行行動群モデル例を図5に示す。(前方車追従行動群モデルも導出しているがスペースの都合上省略する。) 最小運転要素である各運転行動モデルは図1で示したようなハイブリッドシステム表現で導出されており、その運転行動モデルを3つ組み合わせると一つのサブ行動群モデルを構成している。

同定した前方車追従行動群モデルと巡航走行行動群モデルと、シミュレーションのために初期の走行開始時に必要となる発進・加速モデルとを組み合わせると運転行動群モデルの状態遷移図を図6に示す。図中に示される遷移条件は収集した運転情報に基づき導出した。

車両は停止した状態から発進し、設定目標速度まで加速し目標速度に達したら、前方車が居なければ巡航走行行動群に遷移し、定速行動を開始する。設定目標速度は上位制御システムにあたる行動プランナーから指示が送られる。設定目標速度の変更がなされた場合に、その目標速度に合わせて加速・減速行動を行ない目標速度に到達したら定速行動に戻る。そして、巡航走行行動群で運転中に前方100m以内に車両が検知された場合、前方車追従行動群に遷移する。行動群中の操作なし行動から開始し、前方車の走行状態に合わせて運転行動モデルを推移して追従運転

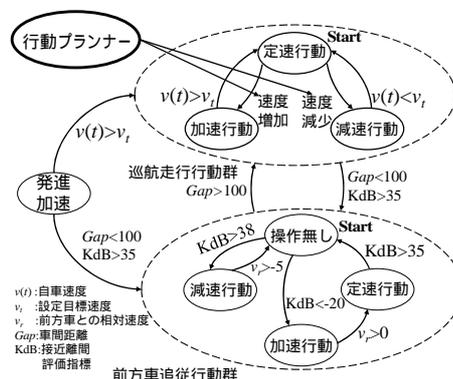


図6 運転行動群モデル状態遷移図

を行なう。そして、前方車が車線変更などで100m以内に存在しなくなれば巡航走行群に戻るというような運転行動を行う。

#### 運転行動群モデルの有効性検証

導出した高速道路走行運転行動群モデルをDSの自律走行制御システムに実装し、走行実験を行った。図7にその一部の結果を抜粋して示す。このグラフの横軸は時間[sec]を示しており、縦軸は上から自車速度[km/h]、自車加速度[G]、アクセル・ブレーキ操作量[-](正がアクセル操作、負がブレーキ操作)、車間距離[m]、接近離間評価指標 KdB[dB]を示している。図中の青線はモデル同定に使用した人間のドライバの運転結果を、紫線は車両運動制御システムによる自律走行結果を示しており、両結果が類似していることが確認できる。0秒からしばらくは車間距離が大きいため巡航走行行動群モデルにて目標一定速度100km/hを維持しての走行を行っている。そして、一定速走行を行いつつ前方車に接近し、45秒付近で行動プランナーより80km/hへ目標設定速度減少指示があり減速を行い、また定速走行に戻っている。70秒直前に100km/hへ設定速度増加指示により増速を始める。そして、増速中に巡航走行行動群から前方車追従行動群への遷移条件である前方車との車間距離100m以下、KdBが35より大きくなるという条件が満たされ行動群が追従行動群へ遷移し、行動群の操作無し行動から運転走行を開始し、その後減速行動や加速行動を行い、前方車に追従するよう運転操作をしているのが確認できる。

このように提案した運転行動群モデルを車両運動制御システムに実装し自律走行をさせた結果、ドライバに類似した走行を再現でき、提案モデルの有効性が検証できた。

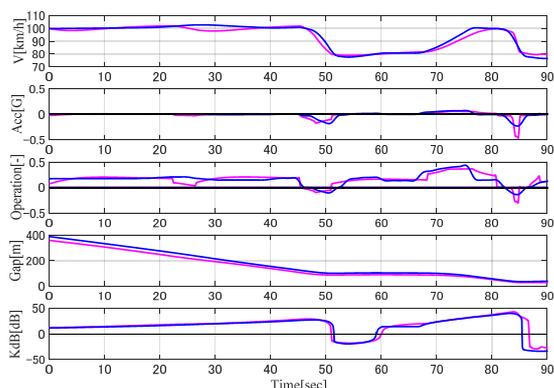


図7 自律走行実験結果

#### (3)まとめ

これまでモデル化が困難であったハイブリッドシステム表現に基づく巡回行動モデルを提案し、その有効性を検証した。さらに、ドライバの長時間の運転行動を再現するため運転行動群モデル構造とその設計法を提案し、複数の運転要素を含んだ一連の運転行

動を再現できることを検証した。これらの結果より提案するドライバ運転行動モデル設計手法の有効性を示した。

このように、目的としていたハイブリッドシステム表現に基づいた運転行動モデルを、DSではあるが自律走行車の車両運動制御システムに適用し、人間に類似した運転を実現でき研究目標は達成できた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計8件)

竹中 慶二、水谷 謙太、早川 聡一郎、池浦 良淳、複数運転行動モデルを有するドライバ運転行動モデルの有効性検証、日本機械学会東海支部第66期総会・講演会、2017年3月14日、静岡大学浜松キャンパス(静岡県浜松市)

小嶋 友輔、早川 聡一郎、水谷 謙太、池浦 良淳、外部環境情報選択に基づくドライバ巡回行動モデルの構築と有効性検証、第17回システムインテグレーション部門講演会、2016年12月15日、札幌コンベンションセンター(北海道札幌市)

小嶋 友輔、早川 聡一郎、水谷 謙太、池浦 良淳、外部環境情報選択に基づくドライバ巡回行動モデルの構築、自動車技術会2016年秋季大会学術講演会、2016年10月20日、札幌コンベンションセンター(北海道札幌市)

水谷 謙太、早川 聡一郎、小嶋 友輔、池浦 良淳、複数運転行動モデルを実装した自律走行車両運動制御システムの有効性検証、平成28年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、2016年9月12日、豊田工業専門学校(愛知県豊田市)

小嶋 友輔、早川 聡一郎、水谷 謙太、池浦 良淳、外部環境情報選択に基づくドライバ巡回行動モデルの選定、ロボティクス・メカトロニクス講演会2016、2016年6月9日、パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

他3件

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ss.mach.mie-u.ac.jp/member/hayakawa/>

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

早川 聡一郎 (Hayakawa Soichiro)

三重大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50288552

##### (4)研究協力者

小嶋 友輔 (Kojima Yusuke)