

論文・解説

17

視認行動と運転操作に基づくドライバー体調急変の 早期検知技術

Early Detection of Deterioration of Driver's Physical Conditions from Driver's Viewing Action and Driving Action

桑原 潤一郎^{*1} 岩瀬 耕二^{*2} 岩下 洋平^{*3}
 Junichiro Kuwahara Koji Iwase Yohei Iwashita
 山本 康典^{*4} 一杉 正仁^{*5}
 Yasunori Yamamoto Masahito Hitosugi

要 約

運転中の体調変化による死亡事故は全体の約 10%を占めるといわれており、昨今においてもドライバーだけでなく周囲の人を巻き込む凄惨な事故が発生している。このような事故を防止するには、早期にドライバーの体調変化を検知し、ドライバーの早期救命や周辺の二次被害防止に向けた対応が必要である。

マツダでは、人間中心の自動運転技術である Mazda Co-Pilot Concept（普段はドライバーの能力を最大限に発揮することを助け、危険が生じた場合にはクルマがオーバーライドして安全を確保）に基づき、ドライバーの走る喜びや安心・安全を最大化することを目指しており、その一環として、万が一ドライバーが運転できないと判断した場合には自動運転に切り替え、周囲を含めて安全な状態を確保する技術を開発している。本稿では、ドライバーの体調変化による運転機能低下をとらえる技術と今後の展望について紹介する。具体的には、運転機能低下を通常運転からの逸脱として検知するため、通常の視認行動や運転操作を規定するドライバーモデル（以下、モデル）を構築した。また、体調起因の死亡重傷事故の約 3 割を占める脳卒中を例に、後遺症をもつりハビリ患者及び健常者のドライビングシミュレータ運転データからステアリング操作や視認行動が異なることを明らかにし、体調変化による運転不能前の検知の実現可能性を確認した。今後は実交通環境への適用や検知性能向上のための取り組みを進め、早期商品化を目指す。

Abstract

About 10% of fatal traffic accidents is caused by the deteriorations of drivers' physical conditions during driving. In order to prevent such fatal accidents involving surrounding people, it is necessary to detect sudden changes in driver's physical conditions at an early stage. We aim to maximize safety as well as driving pleasure, centering on Mazda Co-Pilot Concept, a human-centered autonomous driving technology. As part of this technology, we have been developing a technology that allows the car to take over driving operations when it detects driver's disability of driving. Here we introduce the technology of earlier detection of driver's worsened conditions to prevent accidents.

Key words : Human Engineering, Driver Condition, Driver Attention, Driver Model

1. はじめに

平成 30 年における国内の交通事故死者数は 3,532 人であり、先進安全技術の進歩によってその数は減少傾向にあるが、未だ多く死亡事故が発生している。これら死亡事故の原因は安全運転義務違反等のヒューマンエラーが多くを占めており、脇見やふらつきに対して警報

する安全システムの開発等の対応が進んでいる。一方、ドライバーの意思では防ぎようのない運転中の体調急変が全体の約 1 割を占めると報告されており⁽¹⁾、実際に周囲の人を巻き込む重大な事故が発生している。このような事故を未然に防止するため、国土交通省はドライバーの異常姿勢、閉眼、ハンドル無操作に基づき、体調急変による運転不能状態を検知するドライバー異常時対応シ

*1~4 統合制御システム開発本部
Integrated Control System Development Div.

*5 滋賀医科大学
Shiga University of Medical Science

システムのガイドラインを2018年に策定した。更に、意識消失に至らずとも運転に影響が出ている状態を早期に検知するための検知指標も2019年にガイドラインへ追加された。実際に体調起因事故原因の約3割を占め⁽²⁾、年間約29万人が罹患する脳卒中では、視野障害や運動障害等で一部の運転機能が低下した状態で運転を継続し、最終的に事故に至った事例も報告されている⁽³⁾。以上より、ドライバーの意識消失をとらえることも重要だが、ドライバーの運転機能低下を早期に検知して事故の未然防止やドライバーの救命に努める必要があると考える。Mazda Co-Pilot Conceptでは意識消失による姿勢崩れに加え、運転不能の予兆となる運転に関する人の機能低下を、視認行動や運転操作等から検知し、いざという時は運転の主導権をドライバーから自動運転システムへ切り替えることで事故の未然防止やドライバーの救命の実現を目指している (Fig. 1)。本稿では、ドライバーの機能低下検知機能を実現するため、通常の視認行動や運転操作をモデル化し、そこからの逸脱より運転機能低下を検知できることを、後遺症をもつ脳卒中患者のドライビングシミュレータ (以下、DS) 運転データで検証した結果、及び実走行環境への適用を検証した結果について紹介する。なお、本稿に結果を掲載している全ての実験は、マツダ (株) 及び滋賀医科大学の協力先である近江温泉病院の倫理委員会の承認を得た上で、事前に被験者へ実験内容を書面にて説明し、インフォームドコンセントを得て実施した。

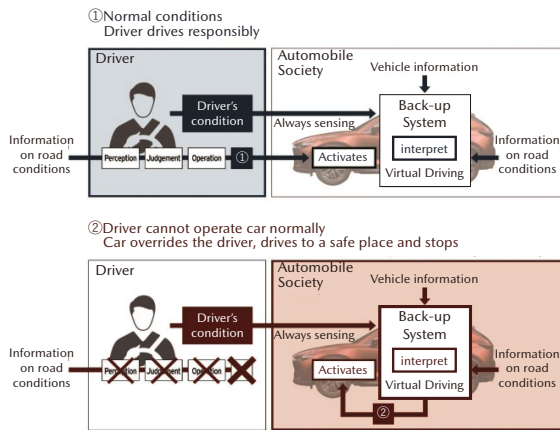


Fig. 1 Mazda Co-Pilot Concept

2. 検知のアプローチ

運転不能の予兆を検知するためには、脳卒中等の症状が運転機能に与える影響を理解する必要がある。運転の機能的側面に着目すると、物陰からの飛び出しに備えて徐行する等の予測的な運転を行う高次機能、道路に沿って車線を走行する等の低次機能、運転姿勢の保持等の不随意機能に大別できると考える (Fig. 2)。

疾患の種類やその症状、及び走行環境によって各機能

にさまざまな影響が出ることが想定される。あらゆる走行環境で疾患による運転機能の低下をとらえるためには、機能低下により変化が現れる視認行動や運転操作などの意識的な行動変化、姿勢維持などの無意識的な反応変化などを用いた統合的な判定が有効である。しかし、原因疾患から人体が受ける影響はさまざまであるため、疾患ごとに運転特性変化を明らかにする必要がある。そこで、個別に検知方法を検討するのではなく、“通常運転からの逸脱”という観点でドライバーの機能低下を検知することとした。上記考えに基づいた運転機能低下検知の実現には、まず通常のドライバーの視認行動や運転操作を規定する必要がある。そのため、まずは人のメカニズムに基づいた視認行動モデルや運転操作モデルを規定し、これらからの逸脱としてドライバーの機能低下をとらえるアプローチをとる。本稿ではこのうち、高次機能と低次機能に関連する視認行動と運転操作のモデル化、及びそれらに基づく運転機能低下検知技術開発の取り組み状況について説明する。

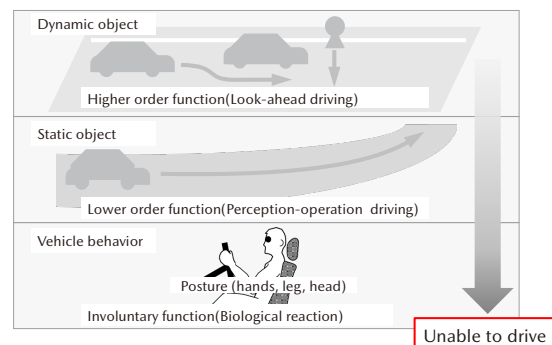


Fig. 2 Driving Functions

3. 視認行動による機能低下検知技術

3.1 視認行動モデル構築と妥当性検証

(1) 視認行動モデル構築

人は注意を向けた個所に視線を向けると言われている⁽⁴⁾。注意には視覚刺激に受動的に注意が惹きつけられるボトムアップ注意と、目標刺激に能動的に注意を向けるトップダウン注意がある⁽⁵⁾。運転中は目立つ個所に向けられたボトムアップ注意と危険個所等の見るべき個所に向けられたトップダウン注意が働き、最も多く注意を向けた個所に視線を向けると考えられる。

ボトムアップ注意として、人は目立つ対象に注意を引かれる特性をもつ。そのため、運転中の走行風景の顕著性 (目立ち度合) の算出可能な方法のひとつである Ittiらのサリエンシーマップ⁽⁶⁾を基に、運転中の速度増加に伴い有効視野が感度低下する人間の特性 (Fig. 3) を考慮した顕著性の指標 (以下、サリエンシー指標) を検討した⁽⁷⁾ (Fig. 4)。ここで、Fig. 3は感度が高い箇所を青色、低い箇所を赤色で示している。また、Fig. 4は顕著性が

高い箇所を赤色、低い箇所を青色で示している。

一方、トップダウン注意として、人は運転中にリスクとなる対象を見つけた場合、対象へ注意を向けつつその他の対象にも注意を残して周辺状況も含めて把握できるよう行動する。そのため、このようなリスクが一定以上高い走行環境においては、サッケード（素早い眼球運動）の振幅が一定以上の水準に保たれるという特性も考慮する必要がある。

以上より、体調急変の影響によってドライバーの高次機能が低下した場合、トップダウン注意の割合が減少してボトムアップ注意の影響が強まると想定され、サリエンス指標の増加やサッケード振幅の減少が表れると仮定した。なお、リスクの高さは自動走行の経路生成でも応用されるリスクポテンシャル（Risk potential method, 以下、RP）法⁽⁸⁾を用いて定量化した。

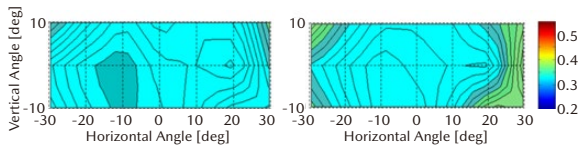


Fig. 3 Sensitivity Map of Saliency

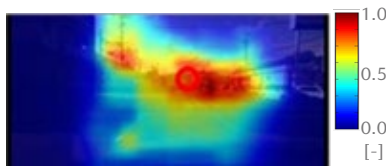
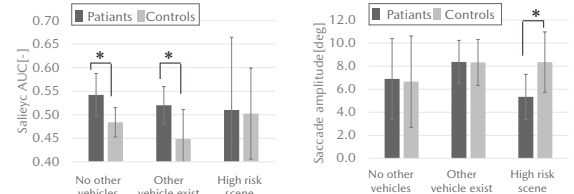


Fig. 4 Improved Saliency Map

(2) モデルの妥当性検証

構築したモデルの妥当性、及び高次機能低下にともなう視認行動変化の仮説を検証するため、脳梗塞により高次機能障害（注意障害）を発症した患者のDS運転中の視認行動を分析した。実験は安全を考慮して定置型のDSを用いた。被験者には通常の運転タスクのみを行ってもらい、その際の視認行動を計測した。視線はTobii社製Glass2（サンプリングレート100Hz）を用いた。被験者は患者5名、健常者4名であった。走行環境は、カーブや交差点を含む単独走行や周辺他車両がいる標準的な市街地とし、1回の走行時間は被験者の負担を考慮して5分程度とした。解析は、走行環境を単独走行時、先行車存在時、駐車車両追い越し時（高リスク）の3つに分割し、走行環境ごとにサリエンス指標とサッケード振幅を計算した。その結果をFig. 5に示す。

単独走行及び周辺車両がある状況では、患者群で有意にサリエンス指標が大きい結果であった。これらの走行環境では、患者群は進行方向に加えて周辺の樹木等のサリエンスが高い（目立つ）エリアを見る傾向があった。健常者群は周辺のサリエンスが高いエリアの影響をあまり受けずに危険探索を適切に行っていたため、サリエンス指標が患者に比べて小さかった。この理由に



(a) Saliency Indicator (b) Saccade Amplitude
Fig. 5 Confirmation Result of Visual Behavior

ついて、高次機能が低下している患者はボトムアップ注意が有意になり、目立つ対象へ視線を向ける頻度が多くなったためだと考える。また、駐車車両を追い越し状況では患者群のサッケード振幅が有意に小さい結果（ $p = 0.044 < 0.05$ ）であった。健常者群では危険対象以外の周囲にも視線を向ける傾向があったのに対し、患者群では危険対象に視線が集中する傾向があった。患者群は注意障害の影響で複数の対象への注意配分が十分にできなかったためだと考える。以上より、構築した2つの視認行動モデルが想定していた走行環境において有効であることを確認できた。

3.2 視認行動に基づく機能低下検知可能性確認

3.1節で得られた被験者のDS運転時のデータを用いて、注意障害患者群を体調急変による機能低下が生じている状態、健常者群を正常状態として機能低下検知ロジックの検証を行った。機能低下検知ロジックは3.1節で規定した2つの視認行動モデルにそれぞれ判定閾値を設け、注視箇所の顕著性が一定水準以上、あるいはリスク発生時のサッケード振幅が一定以下になる場合に検知するものとした。その結果、精度（True Positive+True Negative）は時間割合にして80.5%となり、全体的に精度よく検知できていることを確認した（Table 1）。患者群に対して未検知が生じたのは、直進走行時に進行方向とその周辺を注視した場合や周辺交通が少ない交差点右左折時に左右の安全確認を行っていた場合など適正に周辺を見ることができていた場合であった。一方、健常者群に対して誤検知が生じたのは、停車中に周囲の運転に関連のない風景を見た場合や自転車進路に侵入しようとしているトラックを注視しサッケード振幅が減少した場合など危険対象の動静を把握するためにしばらく注視が持続した場合であった。

Table 1 Result of Model Accuracy

		Predicted Values	
		Positive (Patient)	Negative (Control)
Actual Values	Positive (Patient)	35.5%	14.5%
	Negative (Control)	5.0%	45.0%

3.3 実交通環境への適用可能性検討

実交通環境ではDSと違い、さまざまな交通状況が発生する。構築した視認行動モデルに基づく機能低下検知ロジックの課題を洗い出すため、実車運転へ適用して誤検知性能を確認した。実験は市販車にドライバーモニタカメラを設置して計測を行った。走行コースは一般的な市街地、高速道路、ワインディング路、住宅地を含む全長約65km、走行時間2h程度のコースとした。被験者は正常な健康状態を有する20~50代の5名(Sub.1~5)とした。検証結果をFig. 6に示す。提案モデルは正常ドライバーを機能低下が生じている状態と判定した誤判定率は平均10%程度であった。

実車環境で誤判定が生じた支配要因は以下であり、それぞれが生じた割合は①が65%、②が35%であった。
 ①リスクが低い走行環境において、先行車や対向車などの通常運転中に見る対象物を見た場合。
 ②渋滞による低速走行時や大型トラックに追い越される際などのリスク高い走行環境で危険対象を注視し続けた場合。

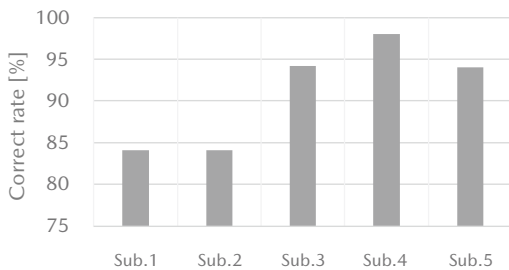


Fig. 6 Correct Rate of Each Subjects

上記原因について、本モデルでは注視対象物の種類や距離といったトップダウン注意の要素や年齢、運転経験等の個人差に関わる要因を組み込んでいないこと、漫然や覚醒低下などの一時的な状態変化と区別できていないことがある。一時的な状態変化に対しては、車側からの注意喚起に対してドライバーが正常状態に復帰したかを判定することで一時的な状態変化と異常状態を判別できると考える。また、トップダウン注意の要素と個人差に関わる要因の組み込みについては、対象物の情報はADAS (Advanced Driver-Assistance Systems) 用のセンシングカメラなどから容易に取得できるため、ドライバーが注意を向けた対象が通常運転中に見る対象物であるかを判定すること、個人差要因については、個人ごとに普段の状態を学習して 普段の状態からの逸脱を検知した場合に異常予兆と判定することで解決できると考える。

4. 運転操作による機能低下検知技術

4.1 運転操作モデル構築と妥当性確認

(1) 運転操作モデル構築

運転行動には単調な走行環境で行う車線維持や速度調

整等の低次機能に基づく行動と、複雑な走行環境で行う周辺確認や予測等の高次機能に基づく行動がある。本稿では、このうち低次機能に基づくステアリング操作モデルについて説明する。ドライバーを車両の制御装置とみなした制御工学ベースのモデルは数多く提案されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。しかし、実際はカーブの曲率や車速等の環境・車両因子に応じてドライバーの運転特性(制御ゲイン)が変化しているため、従来のモデルを実環境へ適用するのは困難である。そこで、ドライバーの運転特性が環境・車両因子から受ける影響も含めて表現したモデルを構築した⁽¹¹⁾(Fig. 7)。基本は前方注視モデルであり、曲率に対するステアリング操作量を規定するフィードフォワード(以下、FF)ゲインに加え、車線内での横位置や横速度に対する2つのフィードバックゲイン(以下、FB)から構成されている。更に、各ゲインの基本値に環境・車両因子の影響による変動値を加算する構造とし、運転特性の変化も含めて表現したモデルである。上記の影響は解釈可能な機械学習モデルを構築可能な階層ベイズでモデル化し、各ゲインの値、及び環境・車両因子の影響は、全員に共通する固定効果と個人による変量効果をそれぞれ学習可能とした。各因子とゲインには非線形な関係が含まれることが想定されるため3次式で定義するものとした。ひとつのゲインに対するモデル式と変数の定義を式(1)(2)、及びTable 2に示す。

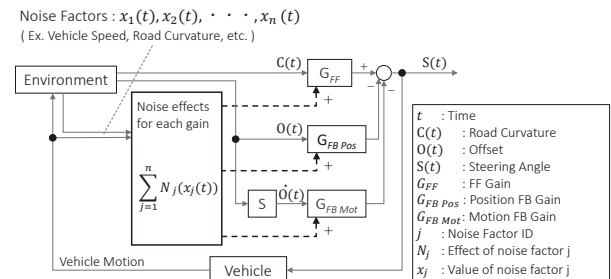


Fig. 7 Steering Model incl. Driving Characteristics

$$G_i(t) = G + \zeta_i + \sum_{j=0}^n N_{ij}(x_j(t)) \tag{1}$$

$$N_{ij}(x_j(t)) = (a_j + a_{ij})x_j(t)^3 + (b_j + \beta_{ij})x_j(t)^2 + (c_j + \gamma_{ij})x_j(t) \tag{2}$$

Table 2 Hierarchical Bayes Model Variable Definitions

	Meanings		Meanings
i	Subject ID	N_{ij}	Effect of noise factor j for the gain
j	Noise factor ID	$x_j(t)$	Value of noise factor j at time t
$G_i(t)$	Control gain at time t	n	Number of noise factors
G	Fixed effect of the gain	a_j, b_j, c_j	Fixed effects of coefficients
ζ_i	Random effect of the gain	$\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}$	Random effects of coefficients

(2) モデルの妥当性検証

モデルの妥当性検証のため、ステアリング操作に大きく影響すると考えられる左同名半盲（両眼の視野が左半分見えなくなる症状）を発症した患者の運転操作解析結果を説明する。計測環境は3.1節で述べたものと同じであり、被験者は20代～40代の健常者4名（Sub.1～4）と40代の左同名半盲患者1名（運転リハビリ開始直後）とした。本来は、個人ごとに通常状態での制御ゲインを学習した上でモデルによる操作推定を行うべきだが、疾患発症前の患者の運転特性を知ることはできない。そのため、今回は健常者の制御ゲインの平均値をモデルに適用して各被験者の操作を推定し、実操作との誤差を求めた（Fig. 8）。その結果、患者は健常者に比べて誤差分布が広く、機能低下状態では想定どおりドライバーの操作と構築したモデルに乖離が生じることを確認できた。

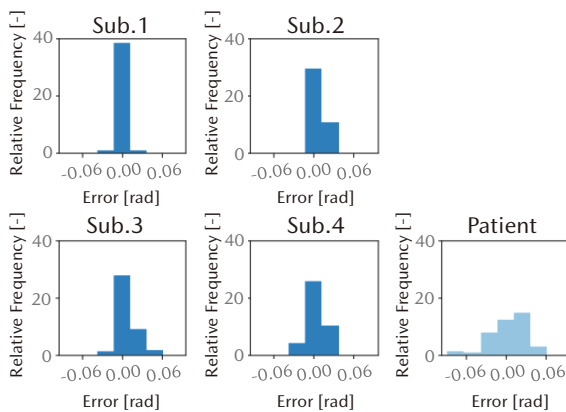


Fig. 8 Distribution of Steering Operation Estimation Error

4.2 ステアリング操作に基づく機能低下検知可能性確認

通常操作を規定したモデルとドライバーの実操作の乖離から視野障害による運転機能低下を検知できることを確認する。単に推定誤差の大きさやその分散を評価指標とすると、想定していない走行環境や一時的な脇見等で大きな誤差が発生した際に誤判定する可能性がある。そこで、モデルからの乖離度合いの数値手法として、確率分布の違いを指標化できるカルバックライブラー情報量（以下、KLD）を用いる。一定時間の誤差分布を確率分布としてとらえ、あらかじめ学習しておいた普段の誤差分布と比較し、誤差が拡大した場合に運転機能が低下したと判断する。なお、KLDは正の値のみをとるが、誤差の拡大のみをとるために誤差分布が学習データよりも縮小する場合は負の値として計算した。また、KLDを計算する際の比較対象には、健常者4名の誤差分布を平均したものを用いた。その結果、患者はKLDが健常者の18倍以上となり、通常運転からの逸脱による運転機能低下の検知可能性を確認できた（Fig. 9）。

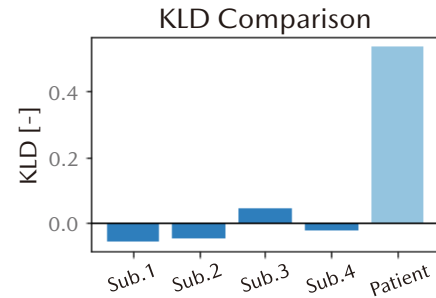


Fig. 9 Evaluation Result of Estimation Error

患者のステアリング操作とモデルによる推定値を Fig. 10 に示す。モデルでは2秒時点でステアリングを右に切る（操舵角がマイナスになる）と推定されているが、患者は4秒時点でステアリングを大きく切っている。車線内での自車位置の知覚には周辺視で獲得した情報が使われるとの報告⁽¹²⁾より、視野にとらえた左右車線の距離バランスが重要だと考えられる。視野半減によって片方の車線をとらえられなくなったため、感度が大幅に低下したと推察される。また、直線区間での車線中央からのずれ量（Fig. 11）は健常者平均0.1mに対し、患者は0.28mであることから、患者は位置知覚感度が低下していることで車線中央からのずれ量の知覚が遅れ、車線逸脱を防ぐために大きな操舵をしたと解釈できる。

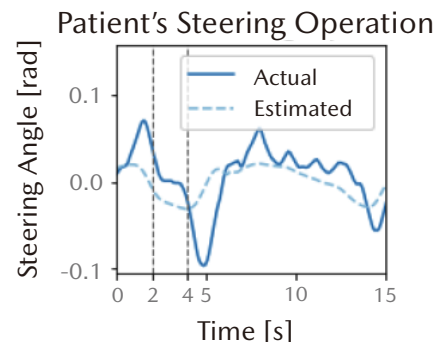


Fig. 10 Patient's Steering Operation

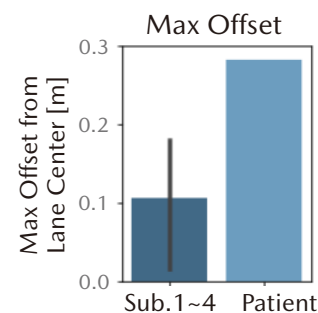


Fig. 11 Maximum Offset in Straight Section

4.3 実交通環境への適用可能性検討

従来の運転操作モデルに対し、環境・車両因子による運転特性変化を織り込んだ効果を確認するため、実車運転データへ検知ロジックを適用した。計測には市販車を

使用し、運転操作と前方カメラによる車線認識情報を含む CAN 情報、と車両前後の映像を 100ms 周期で計測した。コースは高速道路約 230km (首都高, 中央道, 東名高速), 住宅地や山岳路を含む神奈川県的一般道約 60km とし、被験者は 30~50 代男女 9 名 (Sub.1~9) の健常者とした。その結果、走行環境や車両状態による運転特性の変化を表現した階層ベイズ適用後は、操作推定誤差のばらつきが平均 43.8% 減少した (Fig. 12)。これに伴い、局所的に KLD が患者水準以上であった走行環境で同水準を下回ることを確認できた。その一例を Fig. 13 に示す。

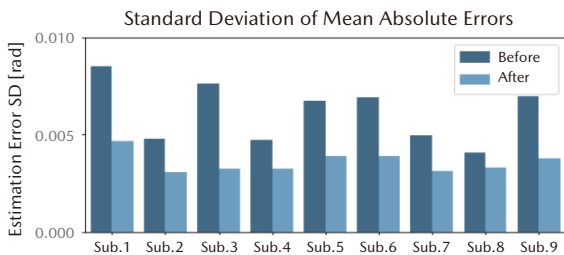


Fig. 12 Improvements of Prediction Accuracy Stabilities

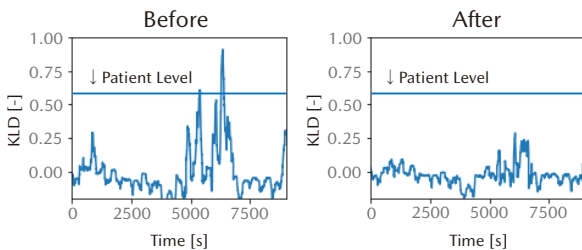


Fig. 13 KLD Improvement of Sub.9

階層ベイズで学習した環境・車両因子の影響の一例として、車速が各ゲインに与える影響を Fig. 14 に示す。FF ゲインと車速は 2 次関数的な比例関係になった。これは車速が上がるほどスリップアングルが増加し、車両の向きを変えるために必要な操舵量が増加することから、曲率に対する操舵量の比である FF ゲインが速度の増加に伴い大きくなることを表現していると解釈できる。FB ゲインは双方とも車速と反比例の関係であった。これは車速が上がるほど修正操舵が小さくなる現象を表現していると解釈できる。モデル改良前に KLD が大きく計算されたのは高速でカーブが連続する区間 (東名高速の御殿場 IC ~ 大井松田 IC 間) であることより、このような状況での運転特性の変化をモデル化したことで推定誤差を減少できたと考えられる。

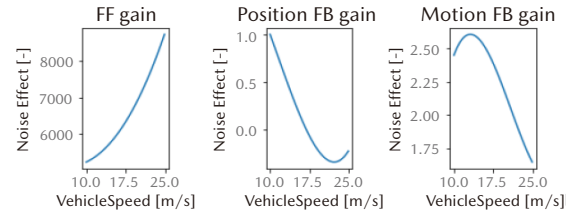


Fig. 14 Effect of Vehicle Speed on Each Gain

5. おわりに

本稿では、人間の高次機能に基づく視認行動モデルと、低次機能に基づく運転操作モデルの構築、及びそれらに基づいた機能低下検知技術について紹介した。今後は無意識的な姿勢維持などの不随意機能の変容をとらえる技術も併せて、あらゆる体調急変による運転機能低下を検知可能な技術の開発を進め、早期商品化を目指す。また、眠気や漫然状態、加齢による影響など、ドライバーの状態をきめ細かに推定可能にし、より安心・安全なクルマ社会を実現していきたい。

参考文献

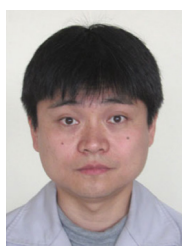
- (1) 一杉：処方薬と自動車運転—適切な処方と療養指導—, YAKUGAKU ZASSHI, Vol.137, No.3, pp.309-313 (2017)
- (2) 武原ほか：脳卒中・脳外傷者のための自動車運転, 東京, 三輪書店, 2013, 151p
- (3) Inoue T et al. : Rate of Stroke Onset While Driving and Subsequent Collision, J Stroke Cerebrovasc. Dis., Vol.27, Issue9, pp.2553-2554 (2018)
- (4) Benjamin T et al. : Yabus, eye movements, and vision, i-Perception, Vol. 1, pp.7-27 (2010)
- (5) Anne T et al. : A feature-integration theory of attention, Cognitive Psychology, Vol.12, Issue 1, pp.97-136 (1980)
- (6) Laurent I et al. : A Model of Saliency-Based Visual Attention for Rapid Scene Analysis, IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 20, No.11, pp.1254-1259 (1998)
- (7) 岩瀬ほか：視線挙動の変容に基づく体調異常推定方法の検討, 自動車技術会論文集, 51 巻, 6 号, pp.1006-1011 (2020)
- (8) 兎ほか：人工ポテンシャル法による周辺車両との関係性を考慮した車線変更推定, 自動車技術会 2016 年春季大会学術講演会講演予稿集, pp.1397-1402 (2016)
- (9) 景山ほか：高度運転支援システムに向けたドライバモデル構築に関する研究 第 3 報 ドライバの運転特性評価, 公益社団法人自動車技術会 2016 年秋季大会学術講演会公演予稿集, pp.1825-1828 (2016)

- (10) 西郷ほか：先行車追従時のドライバモデルに基づく個別適合型運転状態診断手法に関する考察，日本機械学会論文集，Vol.80，No.815，p.TL0216 (2014)
- (11) 桑原ほか：視野障害に起因する運転操作変容の検知方法の検討，自動車技術会論文集，52巻，2号，pp.349-354 (2021)
- (12) Nakashima R et al. : Egocentric Direction and Position Perceptions are Dissociable Based on Only Static Lane Edge Information, *Frontiers in Psychology*, Vol.6, 1837 (2015).

■著者■



桑原 潤一郎



岩瀬 耕二



岩下 洋平



山本 康典



一杉 正仁