

眠気検知・予測技術に基づくドライバーモニタシステム

Driver Monitoring System Based on Drowsiness Detection/Prediction Technology

式井 慎一
Shin-ichi Shikii

砂川 未佳
Mika Sunagawa

楠亀 弘一
Koichi Kusakame

望月 誠
Makoto Mochizuki

北島 洋樹
Hiroki Kitajima

下村 義弘
Yoshihiro Shimomura

要 旨

現在の眠気を検知する技術とともに、ドライバーの周囲温度に基づいて10分～15分先の眠気を予測可能なことを実証した。現在の眠気を検知する技術は、ドライブシミュレータを用いて取得した実験参加者（計48名）の運転中の顔画像から得た瞬目の波形から、60のパラメータを抽出し分析することで、正答率83%を実現した。さらに、12名の実験から、実験参加者の周囲の温熱環境と10分～15分先の眠気との間に相関を有することを見いだした。これらの技術により、ドライバーの眠気の深まりを事前に検知することが可能になる。これらの技術を用いたドライバーモニタシステムを開発することで、覚醒状態を高く維持したまま、快適に目的地まで到着できるコックピットを実現できる。

Abstract

We successfully developed a drowsiness estimation technology and verified that the prediction of the upcoming drowsiness after approximately 10–15 min could be estimated by using the driver's environmental temperature. Regarding the current drowsiness estimating technology, we achieved 83 % accuracy by using 60 parameters extracted from eye blink waveform derived from facial images of 48 subjects. Moreover, we determined the correlation relationship between the drowsiness level after approximately 10–15 min and the environmental temperature from the experiments of 12 subjects. We can estimate the increase in the drowsiness level beforehand by using these technologies. Thus, a driver monitoring system that enables comfortable driving without feeling drowsy can be realized.

1. はじめに

日本における交通事故の発生件数は、平成13年の約95万件をピークに平成27年には約54万件まで減少した[1]。しかし高速道路における単位距離当たりの死者数は減少傾向になく、また死亡事故の発生原因は、居眠り運転を含む漫然運転が最も多いためである[1]。このことから、ドライバーの眠気を高精度に検知することは、眠くなりやすい長距離運転においても事故の発生をこれまで以上に抑制することにつながると考えられる。

また、自動運転レベル4、5の完全自動運転車の登場が現実味を帯びてきているが、完全自動運転車の割合は2025年頃であっても極めて限定的と予測されており、依然としてほとんどの自動車の運転に人が介在し続けていると考えられる。さらには、今後拡大するレベル2、3の自動運転においては、人が運転に介在する割合がこれまで比べて減少するため、ドライバーはより眠くなりやすい環境に曝（さら）されることになる。このことから、ドライバーの眠気対策に関するニーズは、従来よりもさらに高まっている。

このような背景から、ドライバーモニタの開発が加速している。ドライバーモニタとはドライバーの眠気や運転に対する集中度などの状態検知装置のことで、例えば

眠気の深まりを検知した場合には、警報などでドライバーに安全運転を促す装置が既に上市されている。このドライバーモニタは、世界で展開されている自動車安全テストのなかで最も厳しいとされているEuroNCAP（European New Car Assessment Programme）において、安全性の判断基準の1つとして2020年頃に適用される見込みであり、今後さらなる市場拡大が期待されている分野の1つでもある。

しかし従来から上市されていた眠気検知技術は、例えばドライバーのステアリング操作などの行動指標を元に算出するものが多かったが[2]、眠気レベルが比較的深くなった段階で検知するため、その段階からの覚醒を促すためには、どうしても警報などの急に覚醒させる手段に頼らざるを得ず、運転中の快適さを損なうという問題が生じていた。またセンシングする手段として、カメラ画像や眼電位から計測した瞬目^(注1)を元に算出したもの[3][4]や、近年では脳波を用いたもの[5]など、さまざまな技術が提案されているが、このなかで眼電位や脳波は接触での計測が必要であり、やはり運転中の快適さを損なうという課題があった。筆者らは非接触かつ検出デバイスの汎用性の観点で、カメラで撮影した顔画像に着目した。

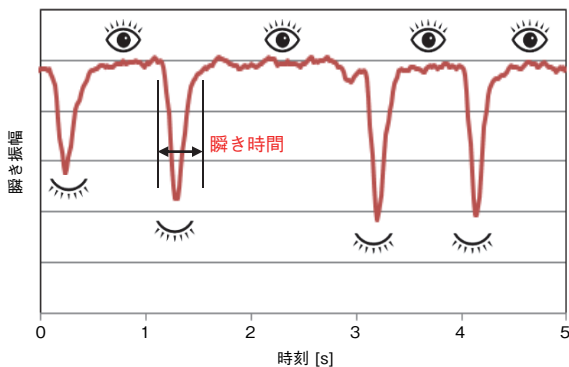
(注1) しゅんもく。瞬（まばた）きのこと。

今回筆者らは、カメラで撮影した顔画像を基に、まず現在の眠気検知技術の高精度化に取り組んだ。顔画像のなかでも特に瞬目に注目し、高精度化のために新しくパラメータを検討した。さらには眠気レベルに対して瞬目から抽出した各パラメータは、必ずしも線形に変動するわけではないと考え、非線形特性を考慮して分析することで、高精度化を試みた。さらに現在の眠気検知技術とともに、以後の眠気の推移を予測する技術の開発を試みた。

2. 眠気検知技術

2.1 瞬目に基づく眠気推定技術

カメラで撮影したドライバーの顔画像から顔の特徴点を抽出することで、さまざまなパラメータを得ることができる。例えば、眼の周囲からは瞬目波形を時系列で得ることができ、口の周囲からは欠伸（あくび）などによる口の開きの波形を得ることができる。今回は表情のなかでも通常は不随意運動として扱うことができる瞬目に着目した。瞬目波形の一例を第1図に示す。画像認識技術により抽出した人の顔特徴点のうち、左目の上下位置、目尻と目頭位置の座標を求め、上下間距離を目頭と目尻間距離で割った比率を毎フレーム抽出し、時系列に配列することにより作成した。瞬（まばた）きをすることにより、開眼しているときに対して波形は下側に振れている。この波形から例えば瞬き時間であれば、1回の瞬目にかかる時間として波形を分析することで算出される。これ以外でも瞬目波形からは、従来使われてきた、PERCLOS（閉眼時間割合）やLongrate（長時間瞬目数割合）、瞬目回数など[7]以外にも独自パラメータを含めて、合計20種類の特徴量を定義した。瞬目波形から眠気を推定する方法として、重回帰分析を用いた。また、瞬目特徴量のなかには、所定の眠気レベルに達するまでは大きくは変動しないが、所定の眠気レベルを超えたあたりか



第1図 瞬目波形の一例

Fig. 1 Example of eye blink waveform

ら大きく変動する場合も考えられ、必ずしも眠気レベルに対してリニアには変動しないと考えるべきである。そこで今回は、眠気レベルの増大に伴い特徴量が飽和する場合と、眠気レベルの増大に伴い加速度的に特徴量が変動する場合を考慮して、各特徴量を累乗した特徴量と自然対数をとった特徴量も追加することとした。これにより、瞬目特徴量は3倍の合計60個となり、下記の式に則り60個の説明変数を元に重回帰分析を実施した。分析においては、多重共線性の観点から2つの説明変数間の相関係数が0.7を上回る場合は、眠気レベルに対する相関係数が大きい方を選択した。絞り込んだ特徴量はさらにAIC（赤池情報量基準）により特徴量を絞り込んだうえで重回帰分析を実施した。これらの結果、同じ特徴量は、例えば自然対数と累乗の2つが選ばれることはなく、最も精度の高くなる1つが選ばれた。

$$\text{眠気レベル} = \sum_{n=1}^{20} A_n \times X_n + \sum_{n=1}^{20} B_n \times (X_n)^t + \sum_{n=1}^{20} C_n \times \ln(X_n) + d \quad \dots \dots (1)$$

ここで、 X_n は各特徴量、 A_n 、 B_n 、 C_n は各係数で d は定数項、 t は累乗の次数である。各瞬目特徴量は、3分間の瞬目波形から統計的に処理して抽出した。

2.2 眠気の実値、定量化方法

眠気レベルの実値は、従来から広く用いられている、北島ら[7]が提案した5段階の等間隔尺度を用いて、評定者が印象・直感で評定する手法を用いている。5秒おきに眠気レベルを評定するが、5秒おきの静止画ではなく、動画を連続して観察したうえで5秒おきの顔画像から評定する。評定後確認した各レベルの特徴を以下に示す。

1. 眠くなさそう
 - ・視線の動きが速く頻繁である。瞬きの周期は安定している。動きが活発で身体の動きを伴う
2. やや眠そう
 - ・視線移動の動きが遅い。唇が開いている。
3. 眠そう
 - ・瞬きはゆっくりと頻発。口の動きがある。座り直しあり。顔に手をやる。
4. かなり眠そう
 - ・意識的と思われる瞬きがある。頭を振る。肩の上下動など無用な体全体の動きあり。欠伸（あくび）は頻発し、深呼吸も見られる。瞬きも視線の動きも遅い。
5. 非常に眠そう
 - ・瞼を閉じる。頭が前に傾く。頭が後ろに倒れる。

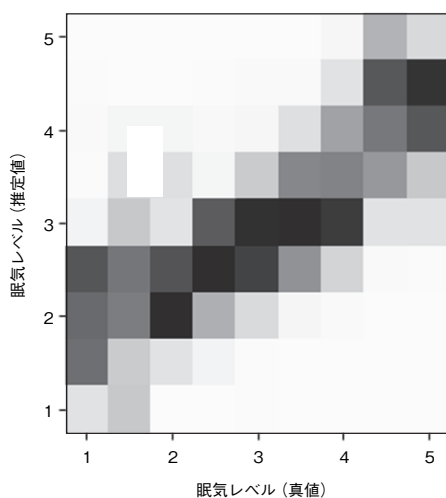
2.3 実験内容

実験参加者はメーカー勤務の技術者48名とした。事前のアンケートにより普通運転免許を保有している人を選定した。また、実験前日には十分な睡眠をとってもらい、事前に実験目的などは通知せず、先入観のない状態で実施した。実験に際しては、社内の倫理審査委員会の承認のもと、実験参加者には事前にインフォームドコンセントを行ったうえで実施した。ドライブシミュレータを約1時間運転するタスクにて、実験参加者48名に対して運転中の顔画像を撮影した。顔画像は、実験参加者の前面に配置したカメラ（画素数640×480、フレームレート60 frames/s）にて撮影した。

瞬きは通常1分間に15回程度であるため、所定時間窓幅（3分）内で瞬目波形から抽出したパラメータの平均値を用いた。その際の眠気レベルも、同様に所定時間窓幅内の平均値を用いて分析した。また、データは5秒おきに処理を行った。また、分析に用いる眠気レベルの真値は、2.2節で述べた方法に従い求めた。

2.4 眠気検知精度

2.3に従い重回帰分析により検証した結果を第2図に示す。第2図は横軸に眠気レベルの真値（表情評定値）を、縦軸に重回帰式から算出した眠気レベル推定値を取った。5秒おきに処理しているため、トータル約3万点をプロットしている。従来研究での真値に対する推定精度は、標準誤差（RMSE：Root Mean Square Error、眠気レベルの真値に対する眠気レベル推定誤差の標準偏差値）で表すと0.91であったが[6]、0.70まで低減することができた。また正答率を眠気レベルの算出値が眠気レベルの真値に対して

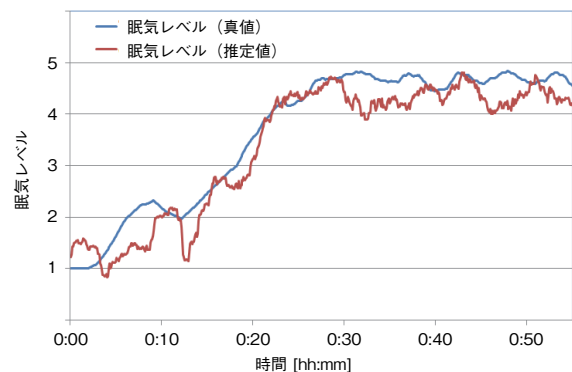


第2図 眠気推定値と真値の関係

Fig. 2 Relationship between estimated drowsiness level and true value

±1の範囲に入っている割合としたとき、正答率は83%であった。

第3図に、約1時間の実験中に眠気レベルが1から5まで満遍なく推移した実験参加者1名の眠気推定値と真値（表情評定値）の時系列データを示す。約1時間の運転中に徐々に眠気が増大し、それに合わせて低い眠気レベルから高い眠気レベルでおおむね±0.5の範囲に推定できていることがわかる。また、使用したパラメータのうち、独自パラメータを含む2つのパラメータは、累乗項で選ばれた。これらの特徴量は、眠気レベルが低い段階において相対的に感度が高いと言えることから、これらの特徴量を採用して推定式を作成することで、早期の眠気レベルの推定に有利な推定式を作成できたと考える。またPERCLOSは対数項で選ばれていることから、浅い眠気に対する感度が低いとする従来報告[8]を支持する結果と考える。



第3図 眠気レベルの推移比較

Fig. 3 Comparison of the time series of drowsiness level

3. 眠気予測技術

人は周囲環境によって眠気を感じる度合いが異なってくる。経験上、例えば寒冷な所では眠気は感じにくく、快適な所では眠気を感じやすくなる傾向にあると思われる。この点に着目し、人の暑い寒い感覚（温冷感）と以後の眠気の推移との間に相関を有するのではと仮説を立てた。上述の仮説が正しいかどうかを検証するため、実験室内環境にて種々の温熱環境下で実験を行い、以後の眠気と放熱量の関係を調査した[9]。

温冷感は、体からの放熱量と相関を有することが明らかになっている[10]。これは、基礎代謝や震えなどによる体内からの産熱量と、汗や対流などによる体の表面からの放熱量との熱収支から説明できる。熱収支のバランスが崩れた場合に人は暑がったり寒がったりする。例えば、冬場に薄着をして体の表面からの放熱量が体内から

の産熱量を上回る場合は、『寒い』と感じることで温かい所へ移動するなどの行動を取り、熱収支のバランスを取ろうとする。暑い場合はその逆である。通常、運動中などを除けば体からの産熱量はおおむね一定である。よって、体からの放熱量がわかり、その放熱量が所定の値よりも多ければ寒く、少なければ暑いと温冷感を推定できる。通常この放熱量は、赤外線アレイセンサで取得した人の表面温度と、周囲温度から算出できる。この場合、着衣表面からの放熱量を体からの放熱量とみなせるため、異なる着衣量であったとしても着衣量によらずに温冷感を推定できるという利点を有している。

3.1 眠気予測の実験内容

上記仮説の検証結果を、被験者実験の結果を用いて示す。被験者実験は、実験参加者が座位にてパソコン上でのトラッキングタスク（移動する点をマウスマウスカーソルで追尾するタスク）を15分間行い、その際に第1表のデータを取得した。なお、本研究においては脳波も同時に計測しているが、本稿においては、脳波は用いず顔画像から評定した眠気レベルのみを用いた。実験参加者は成人男性12名とした。

第1表 眠気予測実験取得データ

Table 1 Data acquisition for drowsiness prediction experiment

測定対象	測定手法	詳細	処理方法
眠気レベル	脳波	・3箇所 (Cz, Fz, Oz)	眠気指標として α波割合を算出
	カメラ (顔画像)	・640×480画素 ・30 frames/s	タスク終了後に 顔画像から眠気レベル を客観評定
放熱量 (温冷感)	赤外線 アレイセンサ	・320×256画素	タスク終了後に 画像処理にて算出

温熱環境として下記5条件を設定した。各実験参加者は各温熱条件にてトラッキングタスクを行うことになるが、実験参加者間で温熱環境の順番を入れ替えることでカウンターバランスを取った。また、サーカディアンリズムの効果を除外するために、実験参加者1名に対して1日に実施する温熱環境条件は1条件として5日行い、実験時間は同じ時間とした。

- ・環境温度 28℃／着衣量 中着
- ・環境温度 22℃／着衣量 厚着
- ・環境温度 22℃／着衣量 中厚
- ・環境温度 22℃／着衣量 薄着
- ・環境温度 16℃／着衣量 中着

着衣量は、薄着が半袖シャツと薄手ズボン、中着が長袖シャツとトレーナー上下、厚着では中着にさらにダウ

ンジャケットを着用する。

体からの放熱量は外気温と体の表面温度の温度差に比例すると考え、下記の式から算出した。

$$H = (h_r + h_c) \times (T_{cl} - T_r) \dots\dots\dots (2)$$

H：体からの放熱量 [W/m²]

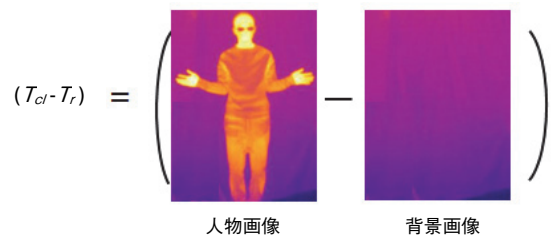
h_r：放射熱伝達率[W/m²°C]

h_c：対流熱伝達率[W/m²°C]

T_{cl}：体、着衣の表面温度[°C]

T_r：外気温度[°C]

ここで、h_r、h_cは別途実験から求めた定数である。また、T_{cl}-T_rは、第4図のとおり赤外線アレイセンサの画像から背景画像の差分を取得することで、人物画像領域のみの各画素値の温度を求め、各画素値の値を平均化することにより、体、着衣の表面温度 (T_{cl}) と外気温度 (T_r) の差分の平均値を求めた。

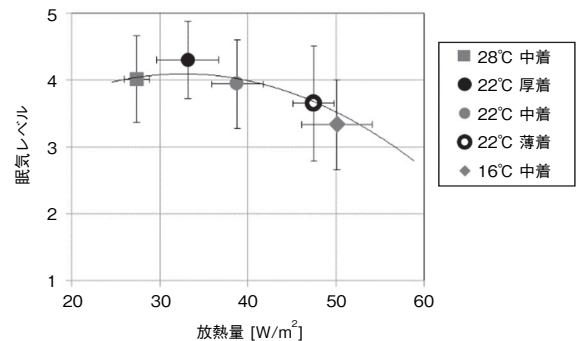


第4図 体からの放熱量の算出

Fig. 4 Calculation method of heat loss from body

3.2 眠気予測の検証結果

実験の結果得られた眠気と放熱量の関係を第5図に示す。縦軸は眠気レベルであり、15分間行ったタスクの後半5分間 (10分～15分) の各実験参加者の平均眠気レベルを、温熱条件ごとに平均化してプロットした。横軸は放熱量である。また、近似曲線は平均化前の全点に対して算出したものである。

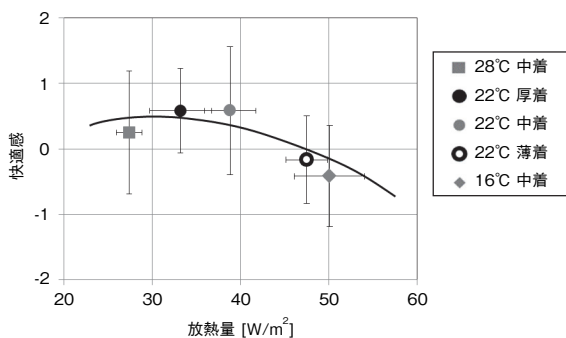


第5図 放熱量と10～15分後の眠気レベルの関係

Fig. 5 Relationship between heat loss and drowsiness level after 10-15 min

タスク初期の平均眠気レベルは各温熱環境条件においていずれも約2.2であったため、例えば最も寒い16°C、中着条件では、タスク中に眠気レベルは1.1程度しか上昇しなかったが、22°C厚着条件では、眠気レベルは2.1程度上昇したことがわかる。

第6図には放熱量と快適感の関係を示す。快適感には+3：非常に快適、+2：快適、+1：やや快適、0：どちらとも言えない、-1：やや不快、-2：不快、-3：非常に不快、で定義した7段階にて定義しており、タスクの終了時に実験参加者に口頭にて回答してもらうことで得た。このグラフから、放熱量が31 W/m²において、温熱的に最も快適と感じていることがわかる。また、眠気レベルのピークは33 W/m²と、快適感のピークと非常に近いことから、快適な環境は、眠くなりやすい環境であると言える。眠気レベルは、放熱量が増える、すなわち寒くなるにつれて低下しており、寒い環境であるほど覚醒度が高く維持されていることがわかる。以上のことから、仮説どおり快適な環境ほど眠くなりやすく、寒い環境ほど覚醒度を高く維持しやすい傾向にあることがわかった。さらに、放熱量がわかると、第5図の回帰曲線に基づき、着衣の量によらず10分～15分後の眠気レベルも予測可能と考えられる。



第6図 放熱量と快適感の関係
Fig. 6 Relationship between heat loss and thermal comfort

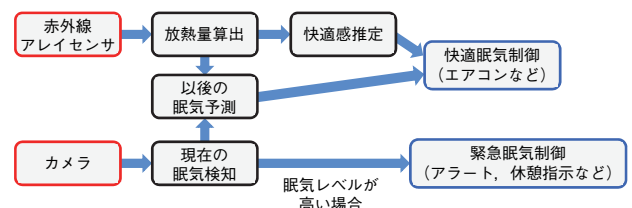
さらに、第6図において、放熱量が45 W/m²以上になると快適感がマイナスとなり不快になることがわかる。以上のことから、放熱量が45 W/m²を上回らない範囲にて放熱量を可能な限り高くなるようにエアコンなどを制御することで、快適感を損なわずに眠なりにくい環境を実現できると考えられる。

4. まとめ

顔画像から抽出した瞬目波形を用いて、現在の眠気を検出する技術を開発した。また、赤外線アレイセンサか

ら算出した放熱量と10分～15分後の眠気レベルの関係から、10分～15分後の眠気レベルを着衣の量によらず予測可能なことを示した。また、放熱量と快適感の関係から、放熱量を所定の値になるようにエアコンなどを制御することで、眠気を検知・予測するだけでなく、快適感を損なわずに覚醒度を高く維持しやすい環境を実現可能なことを示した。

これらの技術を組み合わせることで、例えば第7図、第8図に示すようなドライバーモニタシステムを構築できる。まず、赤外線アレイセンサからドライバーの放熱量を算出する。さらにカメラから得た顔画像から現在の眠気を検知する。次に、算出された放熱量と現在の眠気を元に以後の眠気推移を予測する。そして以後の眠気が所定のレベルよりも高くなると予測した場合は、放熱量から算出された快適感が不快にならない範囲でエアコンなどを制御することにより、快適に覚醒状態を維持させることができる。一方で、現在の眠気レベルが既に高い場合は、例えばアラートや休憩指示をドライバーに出すなどにより、対策することが考えられる。



第7図 ドライバーモニタシステムの概念図
Fig. 7 Conceptual diagram of driver monitoring system



第8図 ドライバーモニタシステムのイメージ図
Fig. 8 Image of driver monitoring system

また、本技術はドライバーモニタ以外でも、オフィスや学校などの高い覚醒度が必要とされる場所においても有効と考えられ、多方面への展開も期待される。

眠気予測技術に関しては、今回はドライバー周囲の温

熱環境に着目したが、もちろんこれ以外にも眠気の推移に影響するパラメータは、空気質や照明環境など、多く存在すると考えられる。これらのパラメータを踏まえることで、今後さらに高精度に眠気を予測することができると考えられる。

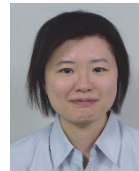
参考文献

- [1] “平成27年中の交通死亡事故の発生状況及び道路交通法違反取締り状況について,” 政府統計の総合窓口, https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=dataset&toukei=00130002&stat_infid=000031400408, 参照 Oct. 20, 2018.
- [2] 伊藤敏行 他, “車載情報機器に関する自工会安全性ガイドラインの策定とステアリングエントロピー法による運転者負荷評価,” 国際交通安全学会誌, vol. 26, no. 4, 2001.
- [3] 大見拓寛, “運転者の居眠り状態評価の画像センサ,” 人工臓器, vol. 42, no. 1, pp.99-103, 2013.
- [4] 吉岡英明 他, “まばたき波形を利用した傾眠防止: I 磁気センサー法 (MAG) による波形計測,” 人間工学, vol.19, pp.182-183, 1983.
- [5] 寺田佳久 他, “脳波によるドライバー注意散漫状態推定技術の開発,” パナソニック技報, vol. 57, no. 3, pp.73-75, 2011.
- [6] S. Hachisuka et al., “Drowsiness Detection Using Facial Expression Features,” SAE technical Paper 2010-01-0466.
- [7] 北島洋樹他, “自動車運転時の眠気の予測方法についての研究 (第一報, 眠気表情の評定法と眠気変動の予測に有効な指標について),” 日本機械学会論文集 (C編), vol. 63, no. 61, pp.93-100, 1997.
- [8] 技術情報協会 (編), ドライバ状態の検出, 推定技術と自動運転, 運転支援システムへの応用, 技術情報協会, 東京, 2016, p.259.
- [9] 大友香穂里 他, “温熱条件と照度条件の複合環境が覚醒度に与える影響,” 日本生理人類学会第75回大会抄録集, 千葉市, p.59, June 2017.
- [10] 式井慎一 他, “冬期における温熱的快適性に関する研究 その2,” 第38回人間-生活環境系シンポジウム報告集, 長崎県西彼杵郡, p.281, Dec. 2014.

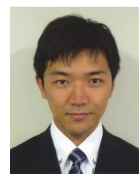
執筆者紹介



式井 慎一 Shin-ichi Shikii
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部
Engineering Div.,
Automotive & Industrial Systemes Company



砂川 未佳 Mika Sunagawa
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部
Engineering Div.,
Automotive & Industrial Systemes Company



楠亀 弘一 Koichi Kusukame
パナソニックデバイスシンガポール
Panasonic Industrial Devices Singapore



望月 誠 Makoto Mochizuki
パナソニックASヨーロッパ有限会社
Panasonic Automotive Systems Europe GmbH



北島 洋樹 Hiroki Kitajima
(公財) 大原記念労働科学研究部
The Ohara Memorial Institute for Science of Labour



下村 義弘 Yoshihiro Shimomura
千葉大学 大学院工学研究院
Graduate School of Engineering, Chiba University
博士 (工学)