

運転士の支援に向けた眠気検知手法の開発

水上 直樹* 長峯 望** 中曽根 隆太**
 畠山 直*** 羽山 和紀***
 蔡 東生# 董 然##

Drowsiness Detection Technique for the Support of the Train Operation of the Train Driver

Naoki MIZUKAMI Nozomi NAGAMINE Ryuta NAKASONE

Naoki HATAKEYAMA Kazunori HAYAMA

Dongsheng CAI Ran DONG

This study aims at development of a system which outputs warning information depending on the estimated degree of the drowsiness of a train driver. Based on the quantity of eyeblink characteristic data of a subject operating a driving simulator, we established an estimation equation of the drowsiness, using the principal component regression analysis. By the spectrum analysis, we also found out that the minute up-and-down movement of the face occurred when drowsiness occurred, and confirmed that there was a high correlation between the index given by the minute up-and-down movement and a sleepiness rating level. We experimentally produced a device which emits alerts such as the attention awakening to a driver depending on the drowsiness degrees.

キーワード：列車運転士，運転支援，覚醒レベル，眠気検知，瞬目特徴量，ヒルベルト-ファン変換

1. はじめに

今日の鉄道では、ATS（自動列車停止装置）やATC（自動列車制御装置）などの保安装置の整備により、運転士の眠気による注意力の低下が重大な事故に直結する可能性は大幅に減っている。しかし、運転中の前方監視や運転速度規制下における速度制御などは、運転士の注意力に頼っている場合もあり、運転中に生じる眠気に関する問題は、安全・安定輸送のためには軽視できない。運転士が眠気により注意力を欠いたり、居眠りした状態で運転することのないように、覚醒レベルがある程度以下に下がった場合、すなわち一定程度以上の眠気が生じた場合、アラームで運転士自身に知らせることなどにより、運転士を支援することが望まれる。近年、自動車分野では、画像処理技術などの進展により、ドライバーの眠気や居眠りを検知する技術の実用化が図られつつあるが、列車運転士を対象として、カメラと運転士の顔の相対的位置関係、運転士の着座姿勢、指差喚呼などを伴う確認動作および求められる精度の高さなど、鉄道特有の条件に対応した眠気の検知システムは現存しない。

本研究は、列車運転士の眠気の程度（眠気度）を推定し、ある程度以上の眠気が検知された場合にアラームを発出するシステムの開発を目指している。

1.1 画像処理技術を用いた眠気度推定システム

自動車分野では、運転中のドライバーの状態を監視し、その情報をドライバーへの警告、運転支援に活用するため、眠気や居眠りの発生を検知するシステムが、以前より強く望まれていた。このため、種々のセンサによって眠気などを検知する手法の研究がなされてきた^{例えば1) 2) 3)}。ドライバーに電極などのセンサを装着して検知する手法は、時に拘束感を与えたり、長時間にわたりノイズが入らないように良好な接触状態を保つことが難しい。このため、ドライバーに拘束感を与えない非接触な方法として、車内に設置したカメラでドライバーの顔を撮像し、その画像から、眠気や居眠りなどを検出する方式の実用化が図られている^{4) 5)}。この技術的背景としては、ビデオカメラなどのデジタル画像機器の高性能化とコンピュータの処理能力の向上に伴い、顔画像のデジタル処理を容易に行うことが可能になってきたことがある。顔画像上から、目や鼻、口の端点の位置を検出する技術は一般に顔特徴点検出（Facial Feature Detection）、または、顔器官検出（Facial Parts Detection）と呼ばれ、顔認証などの顔画像処理を実現する上で重要な役割を担っている。この技術を用いることで、まぶたの上下間隔（距離）の情報をほ

* 人間科学研究部 人間工学研究室
 ** 信号・情報技術研究部 画像・IT研究室
 *** 人間科学研究部 安全性解析研究室
 # 筑波大学 システム情報系
 ## 筑波大学 システム情報工学研究科

特集：人間科学

ばリアルタイムに得ることができ、これをもとに、瞬き（瞬目）の回数や目の開き度合（開眼度）などを算出することができる。瞬きに関する特徴量（瞬目特徴量）は、眠気とある程度の相関があることが知られている。これらの特徴量を用いて、眠気の程度を推定するシステム（本稿では、眠気度推定システムと記述）が提案されている^{2) 3) 6) 7) 8)}。

しかしながら、列車運転士と自動車ドライバーでは、運転中の着座姿勢やその姿勢変化の程度などが異なり、両者における眠気度推定式のパラメータも異なることが考えられ、自動車で用いられるシステムをそのまま列車に適用できるとは限らない。

1.2 眠気度推定システムの開発の経緯

これまでに鉄道総研では、列車の前方線路内の支障物や、その他得られた異常情報に基づき、運転操作に関する意思決定支援を行う運転士支援システムの基盤技術の開発を行った⁹⁾。この一環として、運転士の眠気度を捉えてアラームを発出するための基本的な枠組みを作った。当該検討においては、既存技術を活用し、列車運転シミュレータを運転中の被験者の顔画像から瞬きに関する特徴量を求め、眠気度を推定する式を作成した。しかしながら、眠気度推定式は、個人毎に大きく異なり、誰にでも適用できる汎用性を持つものとはできなかった。また、運転台に装備可能なコンパクトな装置構成ではなかった。本研究では、これらの課題解決に向けた検討を行った。

2. 眠気度推定式の作成

2.1 列車運転シミュレータを用いた眠気試験の概要

眠気度の推定式を作成する目的で、目が覚めている状態から居眠りに近い状態までの幅広い眠気の程度における瞬目特徴量のデータを取得するため、以下に述べるように、被験者に列車運転シミュレータを運転させる試験を実施した。

被験者は、鉄道総研等の職員8名である。これまでの経験から、被験者が休養を十分に取れている状態では、列車運転シミュレータの運転中に眠気を催すことを期待しにくいと考えられた。このため、深夜早朝の時間帯、または、前夜の睡眠時間を制限（その人の通常睡眠時間より、少なくとも2時間以上短くなるように制限）して日中の時間帯に試験を行った。後者の場合、サーカセミアリズム（概半日リズム）から、眠気の発生しやすい時間帯である13時半～16時頃において、昼食摂取後に実施した。

シミュレータでの運転操作が被験者にとって難しかったり、‘面白さ’や‘やりがい’を覚えたりするものであると眠くなりやすいため、所定の停止位置に容易に停

車でき、運転に‘単調さ’や‘飽き’が感じられるように、事前に2日間から5日間の練習を行わせた。

試験当日には、日中に実験概要と目的を説明し、本試験の直前に、練習として、約12分間の運転走行を行ってから本試験を行った。運転は、A駅からB駅までを1系列とした約12分間の運転を、6系列繰り返すものである。なるべく単調な運転とするため、原則、ノンストップの運転とした。

被験者には、地上信号の確認と、駅間の運転速度に従った運転および停車駅における所定位置への停車を指示した。ここで、各運転操作の実施の厳格さや高いレベルの運転パフォーマンスを被験者に求めると、眠気が生じにくくなることが想定された。このため、信号機や速度メータの確認、所定位置への停車などの実施状況は確認するものの、運転パフォーマンスは問わなかった。指差喚呼のタイミングについても、基本を教えるだけで任意とした。

運転台に被験者の顔を撮影する運転台カメラと近赤外線照明（3章で詳述）を取り付け、運転中における被験者の顔画像の記録を行った（図1）。また、試験の様子を記録するために、運転台から見て左前方（運転シミュレータのスクリーン手前）に、ビデオカメラを設置し、動画撮影を行った。被験者には、運転開始前および、1系列終了毎に、眠気に関する主観評価を行わせた。

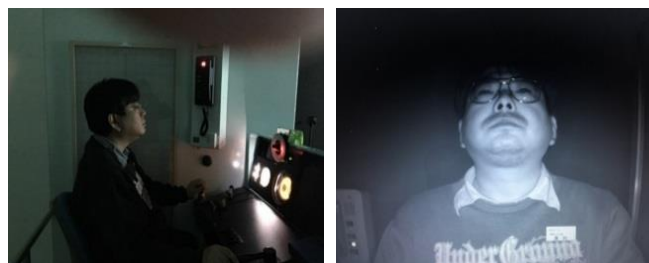


図1 シミュレータの運転の様子と被験者の顔画像

2.2 眠気度の評価基準

眠気度を推定する式を作成するためには、眠気と関連のある指標（例えば瞬目特徴量）を用いて推定した眠気度（以下、眠気推定値とする）が、正しく眠気の程度を示しているかを判断する外的基準が必要となる。現状、眠気を客観的に評価する絶対的な基準はないが、自動車分野における各種研究をはじめ、多くの先行研究では、被験者の顔表情画像を第三者が観察して眠気段階を推定する「顔表情評定」³⁾が用いられている。これは、事前にトレーニングを積んだ評価者に被験者の顔画像を見せ、表1に示す瞬きや動作の基準に従って、評価者が評定値を記入するものである。この方法は、被験者の主観評価とも相関が高い。今回の検討においても、眠気度の外的基準として、顔表情評定による評定値（以下、眠気表情評定値という）を用いた。事前に訓練を受けた評

価者（1名）が2.1節で得られた被験者の顔画像をみて、運転開始から終了まで、5秒毎に眠気表情評定を行った。

表1 顔表情評定における眠気表情評定値の評価基準

評定値	眠気段階ごとのまばたきその他動作の基準
1	眠くなさそう。視線の移動が早く頻繁、動きが活発で身体の動きを伴う
2	やや眠そう。唇が開いている、視線移動が遅い
3	眠そう。瞬きはゆっくりと頻繁、口の動きがある
4	かなり眠そう。意識的と思われる瞬きがある。頭を振る。あくびが頻発
5	非常に眠そう。顔を閉じる、頭が前に傾く、または頭が後ろに倒れる

2.3 瞬目等の特徴量の抽出と選定

2.3.1 顔動画からの瞬目等の特徴量の抽出

本検討では、顔動画から、顔器官の輪郭検出、開眼度などの特徴量を抽出するために、既存の画像処理ライブラリ「OKAO Vision」（オムロン社製）を用いた。これは、アプリケーション側から入力された画像データに対して、顔検出、顔器官検出、顔器官輪郭検出などを実行するものである。当ライブラリは、高速、かつ高精度な顔特徴点検出、頭部姿勢推定が可能である。まず、入力した顔画像から顔器官各部位のPixel座標などをログとして数値出力させるプログラムを作成した。

眠気度の推定に用いる瞬目などの特徴量を選定するため、最初に、先行文献^{1) 2) 3), 6) 7) 8)}から指標を抽出し、前出のプログラムを改良して、「顔画像特徴量抽出プログラム」を作成した。本プログラムにより、顔撮像動画を入力データとして、フレームごとに眠気度推定式に用いる閉眼時間割合（単位時間あたりの閉眼時間の割合）、瞬目回数（単位時間あたりの瞬目の回数）、瞬目持続時間（瞬目時の目を閉じている時間）、顔の向きなどの瞬目等の特徴量（以下、瞬目等特徴量とする）のデータを得る。

その瞬目等特徴量データと2.2節で求めた眠気表情評定値のデータを、眠気度推定式の作成に用いるデータセットとした。眠気度の推定精度の低下を防ぐため、顔抽出の検出精度の信頼度が50%以下のフレームをデータから除外した。

2.3.2 眠気度推定式に用いる瞬目等特徴量の選定

推定式に用いる瞬目等特徴量を絞り込むため、眠気表情評定値と各瞬目等特徴量の相関係数を求めた。相関係数の絶対値が大きい（1に近い）ほど、眠気度との関係が強い。本検討で、眠気と関係すると考える特徴量（以下、眠気特徴量とする）は、その選定する個数も考慮しつつ、相関係数の値が、絶対値0.2以上のものとした。データ

セットにおいて、この値より相関係数の絶対値が大きい瞬目等特徴量を推定式の説明変数として採用した。この結果、推定式の検討に用いる主な特徴量は、開眼度、開眼度の標準偏差、閉眼時間割合、顔の向きなどであった。

2.4 主成分回帰分析を用いた眠気度推定式の作成

眠気度の推定式は瞬目等特徴量の線形和として、

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (1)$$

y：眠気度

x_n：瞬目等特徴量

a_n：各瞬目等特徴量のパラメータ

a₀：定数項

と表現する。

各瞬目等特徴量間には相関が高い組み合わせがあるため、重回帰分析によりパラメータ推定すると、推定が不安定になることが予想される。そこで、パラメータ推定の安定性を確保するために主成分回帰分析を行った。パラメータの推定結果を表2に示す。

表2 パラメータの推定結果

特徴量名	パラメータ値	平均	標準偏差	標準化係数
定数項	4.7843	—	—	—
左開眼度	-0.0003	216.39	87.60	-0.022
左開眼度の移動平均（短）	-0.0008	216.38	78.25	-0.066
左開眼度の移動平均（長）	0.0001	286.00	85.09	0.005
左開眼度の標準偏差	0.0052	46.61	38.89	0.203
右開眼度	-0.0018	213.50	86.53	-0.156
右開眼度の移動平均（短）	-0.0021	213.52	79.99	-0.169
右開眼度の移動平均（長）	-0.0029	268.79	69.49	-0.203
閉眼判定値	0.0295	0.62	0.48	0.014
左閉眼判定値（実値）	0.0279	0.65	0.48	0.013
右閉眼判定値（実値）	0.1847	0.65	0.48	0.088
閉眼時間割合（移動平均）	0.4619	0.54	0.42	0.194
閉眼時間割合（直近値）	-0.0795	0.52	0.59	-0.047
顔の向き上下	0.0348	10.43	8.94	0.311

※) 表中の（短）、（長）は、移動平均の幅の大小2種を示す

眠気度の推定に影響の大きい瞬目等特徴量は、顔の向き上下、左開眼度の標準偏差、右開眼度、右開眼度の移動平均（短）、右開眼度の移動平均（長）、閉眼時間割合（移動平均）などであった（表2）。本法により求めた眠気度の推定値を、以下、眠気推定値(A)とする。眠気推定値(A)と眠気表情評定値との相関係数は0.705であった。

2.5 周波数特徴を用いた眠気度の特徴量の作成

2.5.1 ヒルベルト変換

本節では、前節における主成分回帰分析を用いた眠気度の推定とは異なる、新たな推定方法の検討結果を示す。瞬目等特徴量のデータに対して、周波数分解能が高く時間追従性に優れたヒルベルト変換を適用し、眠気に関連して観察される周波数特徴を新たな眠気特徴量

特集：人間科学

とすることを試みた。最初にヒルベルト変換の概要を説明する。

ヒルベルト変換は非線形な単色波（狭帯域信号）を、周波数-時間空間に変換するものである。短時間フーリエ変換では、時間・周波数の分解能が制限されるが、ヒルベルト変換では、正確な時間ごとの周波数（瞬時振幅と瞬時周波数）が計算できるという利点がある。しかし、単色波信号にしか有効でないため、適用できる信号は限られていた。これを解決するため、ファンらは、任意の信号にヒルベルト変換を適用する目的で、有色波を経験的に単色波（狭帯域信号）に分解する「経験的固有モード分解」(Empirical Mode Decomposition: EMD)を提案した。これにより、分解された各モード（単色波信号: 固有モード関数 (Intrinsic Mode Function: IMF と呼ぶ))に、ヒルベルト変換が適用できるようになり^{10) 11)}、有限個の固有モード関数の瞬時周波数信号に分解することができる。ただし、経験的固有モード分解 (EMD) 自体は、経験的な分解であり、必ずしも信号を単色波に正確に分解できるわけではなく、マルチチャンネルデータや別チャンネルにノイズデータをいれて分解することにより、分解精度を上げられることが経験的に知られている。

ファンらは、EMD は、全ての信号が有限な固有モード関数 (IMF) と残余 (これを信号の”トレンド”と呼ぶ) で構成されると仮定し、式 (2) によって表現した。

$$x(t) = \sum_n C_n(t) + r(t) \quad (2)$$

上記、 $C_n(t)$ は固有モード関数 (Intrinsic Mode Function: IMF), $r(t)$ は残余で信号のトレンドとも呼ぶ。固有モード関数 (IMF) とは、以下の二つの条件を満たす関数である。

- ① 信号の極値の数と零交差の数が等しいか差が1である。
- ② 任意の時刻において極大値を結ぶ包絡線と極小値を結ぶ包絡線の平均値が0である。

ヒルベルトスペクトル解析は、元信号に対して上記の経験的固有モード分解を行い、得られた各固有モード関数に対して、ヒルベルト変換し、瞬時振幅と瞬時周波数を求め、この結果を、横軸に時間、縦軸に周波数、振幅をカラースペクトルで表示するものである。

2.5.2 ヒルベルト変換を用いた眠気パターンの抽出

非線形である人間の動作に、ヒルベルト変換を適用することで、本変換の優れた解析精度を示した先行研究がある¹²⁾。筆者らは、この時間-周波数領域の分析において優れた特徴をもつヒルベルト変換

を用い、瞬目等特微量からその瞬時周波数を計算し、眠気に関連して観察されるパターンを検出する処理フレームを提案した。別途実施した (2) 式におけるトレンドの解析により、左目の開眼度、右目の開眼度、顔の上下角度、視線の上下角度は、眠気という同一の‘メカニズム’で発生 (変動) していると考えられる。この場合、多くのチャンネルデータを多変数経験的固有モード分解にかけることで分解精度が上がる。従って、本研究では、瞬目等特微量のデータとして、左目の開眼度、右目の開眼度、顔の上下角度、視線の上下角度について、多変数経験的固有モード分解を行った。これにヒルベルト変換を適用し、時系列にスペクトル解析を行い、眠気発生時に特徴的に生じる周波数的特徴を探索した (図2)。

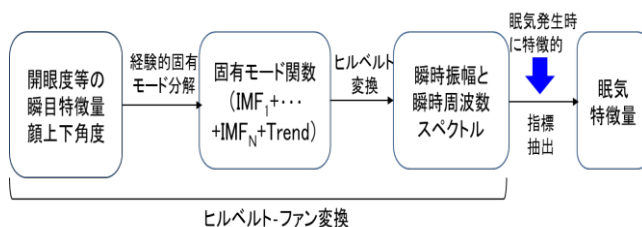


図2 ヒルベルト変換を用いた周波数特徴の検出

図3は眠気の程度が高い時の結果を示したもので、横軸は経過時間 (秒)、縦軸に周波数、カラースペクトルで振幅を示している。一次、二次の各固有モード関数 IMF1, IMF2 において、眠気発生時に特徴的な周波数モードが現れることがわかった。眠気の強い時間帯において、1.5Hz から 2Hz 付近に現れる周波数特徴を動画で確認したところ、眠気が発生していない時には見られない、顔の上下の揺れ (いわゆる ‘こっくり’ していると考えられる様子) が認められた。以下、この顔の上下の揺れを顔の微細動揺とする。

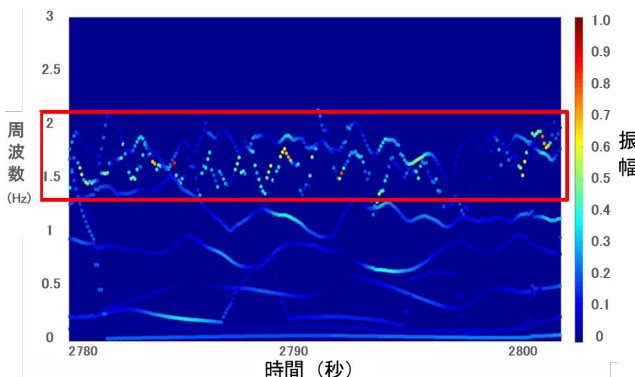


図3 眠気が強い時のスペクトル解析による顔微細動揺

2.5.3 顔の微細動揺の周波数特徴による眠気特微量

本研究では、表1に示した眠気表情評定値を眠気度の「基準値」として、眠気検出アルゴリズムの探索を行っ

ている。眠気表情評定では、5秒間隔で評定値を記録するため、抽出された前述の眠気パターン（周波数的特徴）を用いて、ヒルベルト変換の解析も同じ5秒間で加重平均周波数アルゴリズム(WAFA)¹²⁾を採用を行った。ここでは、振幅の閾値を一定にすることで、単位時間あたりの顔の微細な上下動揺をカウントした。振幅の閾値を決める基準は、眠気のない状態から居眠りの状態までが連続して得られた1名のデータを用い、正規化した振幅を、0.1刻みで調べ、眠気表情評定値との相関係数が最も高くなった0.3を閾値として選んだ。顔の微細な上下動揺をカウントする区間は5秒間とし、この動揺回数の時系列変化を、1秒ごとに区間を移動して求めた。これを1秒あたりの動揺回数に変換し、新たな眠気度の推定値（以下、眠気推定値(B)とする）とした。

この微細動揺による眠気推定値(B)の経時的変化を示したものが図4である。眠気の基準とした眠気表情評定値と眠気推定値(B)の相関係数は $r = 0.89$ であった。

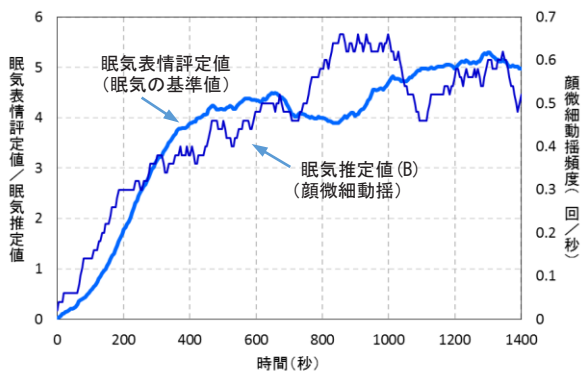


図4 シミュレータ運転時の眠気推定値(B)と眠気表情評定値

2.6 眠気推定値の検証

今回、主成分回帰分析を用いた眠気度の推定方式と、周波数特徴による眠気度の推定方式を示した。これら2つの眠気度の推定方式に対して、パラメータ推定に用いなかった1名の眠気試験のデータで推定精度の検証を行った。

この検証用のデータを用いて、主成分回帰分析による推定式で求めた眠気推定値(A)と、基準となる眠気表情評定値との相関を調べると、相関係数 $r = 0.55$ と高くはなかった。眠気表情評定値=5のような強い眠気が発生している時の推定精度は高いものの、眠気度が低い時の推定精度は低い。

一方、顔の微細動揺の周波数特徴による眠気推定値(B)と、眠気表情評定値との相関は、相関係数 $r = 0.94$ と高かった(図5)。グラフをみると、眠気表情評定値が4のレベルまでは、眠気推定値(B)と眠気表情評定値は概ね一致しているが、眠気表情評定値が5のレベル

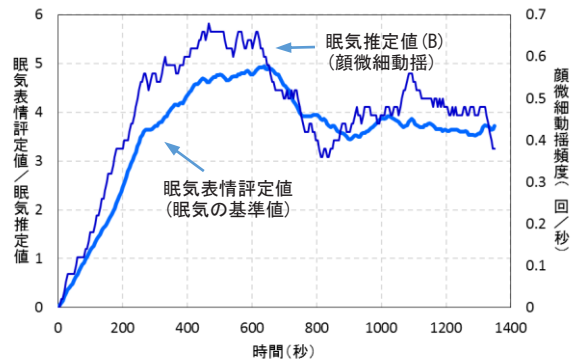


図5 シミュレータ運転時の眠気推定値(B)と眠気表情評定値

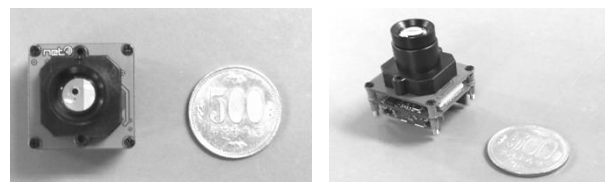
に近付くと、眠気推定値(B)が上回り、強い眠気の際には、「高め」の推定値が出力されている。

今後、検証データを増やし、2つの推定手法のそれぞれの特徴を分析のうえ、これらを組み合わせた眠気推定方式について継続して検討する必要がある。

3. 眠気度推定システムの試作

3.1 カメラの選定と設置位置の検討

カメラについては、実用化を念頭に、運転台への取り付けのためのサイズおよび画像処理のための取得画像の解像度およびフレームレートを考慮し、近赤外カメラを選定した(図6)。このカメラと赤外線照明装置を用いて、暗い場所でも顔を抽出できることを確認した。



正面から見た図

斜め上方から見た図

図6 運転台への取り付けを考慮したカメラ

データ取得に影響する要因の一つにカメラと運転士の顔の相対的位置関係がある。このため、カメラを運転台パネルの上段、中段、下段付近に設置した時のデータ取得状態を調べた(図7)。座高の異なる複数の被験者で検討したところ、運転台カメラの設置位置は、運転台パネル下部より、運転台パネル上部に設置の方がデータの取得率がよいことがわかった。

3.2 眠気度推定システムの構成

これまでの内容をもとに、眠気度の信号に応じて、警報を発出する眠気状態推定システムを試作した。

システムの基本構成を図8に示す。トンネル、夜間、西日などの影響を受けにくい撮影手法を構築するため、

特集：人間科学

近赤外カメラと赤外線照明器を用いた。照明器から照射される赤色波長成分を除去するため、近赤外カメラ前面に可視光カットフィルタを装着した。処理用コンピュータは産業用 Box コンピュータとした。システム全体として、運転台に装備可能なコンパクトな装置とした（図9）。



図7 カメラ設置位置の検討



図8 眠気度推定システムの基本構成

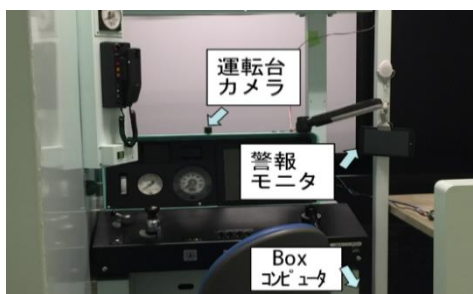


図9 眠気度推定システムの外観

4. まとめ

列車運転中の運転士の眠気の程度を推定し、一定程度以上の眠気が発生した場合に、警告情報を出力するシステムの開発を目的とし、以下の結果を得た。

(1) 列車運転シミュレータを運転中の被験者の顔の画像解析により、瞬目などの特微量から眠気特微量を抽出し、主成分回帰分析により眠気度の推定式を作成した。この推定式とは別に、瞬目などの特微量データに対して、ヒルベルト変換を適用し、周波数的特徴を眠気特微量として用いる処理フレームを作成した。スペクトル解析により、眠気の発生時には、顔の微細な上下動揺が生じていることを見出

し、これによる眠気推定値(B)と眠気表情評定値に高い相関がみられることを確認した。

(2) リアルタイム処理を前提として、カメラを選定した上で、その設置位置について検討し、眠気度の信号に応じて運転士に注意喚起の警報を発する装置を試作した。

今後は、個人差への対応について深度化を図り、光環境条件への対策及びアラームの出し方などについての検討を行うとともに、システムの検証試験を実施する予定である。

文献

- 1) 望月正人, 杉浦康司: 実車走行評価に応用可能な生理計測・評価技術; 自動車技術 56, pp.33-38, 2002
- 2) 今井章博, 小栗宏次: 居眠り運転時の特徴的な眠気推移傾向を組み込んだ眠気レベル推定手法の提案; 電子情報通信学会論文誌 D Vol.J96-D No.4 pp.1012-1019, 2013
- 3) 北島洋樹, 沼田仲穂, 山本恵一, 五井美博: 自動車運転時の眠気の前測手法についての研究 (第1報, 眠気表情の評定法と眠気変動の前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.613, pp.93-100, 1997
- 4) デンソー: 商用車向けにドライバーの運転状態を検出する「ドライバーステータスマニター」を開発, <https://www.denso.com/jp/ja/news/news-releases/2014/140403-01.html> (参照日: 2018年12月11日)
- 5) 日刊工業新聞電子版: 「アイシン精機, 運転手の居眠り検知装置を単独商品化」, <https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00272618?isReadConfirmed=true>, 2013 (参照日: 2018年12月11日)
- 6) 田多英興, 福田恭介, 山田富美雄: まばたきの心理学, 北大路書房, 1991
- 7) 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 42 巻第 1 号, 2013
- 8) 白石修一郎, 高橋正也 (監修), 大見拓寛 (執筆): 睡眠マネジメント第3章眠気検知システム開発, pp.309-321, 2014
- 9) 佐々木君章: 特集 知能列車による安全性・信頼性向上; RRR, Vol.72, No.7, 2015
- 10) Norden E. Phang: Hilbert-Huang Transform and Its Applications. Interdisciplinary Mathematical Science, Vol.16, 2014.
- 11) J. Niu Y. Liu W. Jiang X. Li G. Kuang: Weighted average frequency algorithm for Hilbert-Huang spectrum and its application to micro-Doppler estimation. IET Radar Sonar Navig., 2012, Vol. 6, Iss. 7, pp. 595-602, 2012.
- 12) Ran Dong, Dongsheng Cai, and Nobuyoshi Asai. 2017. Nonlinear Dance Motion Analysis and Motion Editing using Hilbert-Huang Transform. In Proceedings of CGI'17, Yokohama, Japan, June 27-30, 2017, 6 pages.