

瞬き・姿勢情報を融合した高精度ドライバー眠気推定 - 弱い眠気から強い眠気までの全段階を見分ける -

Comprehensive Driver Drowsiness Level Detection Model Combining Multimodal Information: For the Entire Range of Drowsiness Stages from Weak to Strong

砂川 未佳
Mika Sunagawa

式井 慎一
Shin-ichi Shikii

仲井 渉
Wataru Nakai

望月 誠
Makoto Mochizuki

吉岡 元貴
Mototaka Yoshioka

北島 洋樹
Hiroki Kitajima

要 旨

これまで検知困難であったごく弱い眠気状態を含む、眠気のすべての段階を検知可能な眠気推定技術を開発した。ドライバーの瞬き(まばたき)情報と姿勢情報を融合させることで、弱い眠気の検知精度を従来手法から16.5%向上させた(F1スコア0.358→0.523)。姿勢情報を用いることで、眠気による脱力が引き起こす無意識な姿勢の悪化を捉えることができると考えられる。本技術により、ドライバー自身も気づかないほどの弱い眠気から強い眠気までのすべての段階の眠気を高精度に検知でき、ドライバーの状態に応じた最適なサポートの提供が可能になる。

Abstract

We have successfully developed a drowsiness detection model that can detect early stage drowsiness more accurately than before by 16.5% (from F1-score 0.358 to 0.523), by combining drivers' blinking and posture information. Posture information was considered so as to reflect the loosening of the body's muscle engagement when drivers get drowsy. This new technology can detect weak levels drowsiness that the drivers themselves are not aware of, as well as strong levels drowsiness. Future applications of this method include not only warning systems but also adaptive support systems tailored to the drivers' circumstances.

1. はじめに

日本における交通事故の発生件数は減少を続けているが、いまだ年間約2700件の死亡事故が発生しており、その発生原因は、居眠り運転を含む漫然運転が10年以上連続で最多となっている[1]。一方、近年は自動運転車の開発が進んでいるが、ドライバーが介入しない完全自動運転車の割合は2025年ごろであっても極めて限定的と予測されており、依然としてドライバーが運転にかかわる状況が続くと考えられる。また、普及が見込まれるレベル2,3の半自動運転においては、緊急時にはドライバーが運転に介入する必要があるにもかかわらず、ドライバーがシステムを過信して必要な対応ができない可能性が指摘されている[2]。このことから、ドライバーが安全に交代できる状態かどうかをモニタする技術がますます求められている。

このような背景のもと、これまで数多くの眠気検知技術が開発されてきた。従来の眠気検知技術としては、例えばドライバーのステアリング操作などをもとに眠気状態を判別するものがある[3]。しかし運転操作行動にまで眠気の影響が表出し始めるのは眠気がかなり強まってからであり、そのような状態からドライバーを覚醒させるためには、警報音などの不快な手段をとらざるを得なかった。より弱い眠気の段階で検知して危険を未然に防ぐ

ため、比較的弱い眠気を反映するといわれる瞬きや心拍などの生体情報を利用した眠気検知技術も提案されている[4][5]。特に瞬きはカメラを用いて非接触に計測できるという利点がある。これまで筆者らは、カメラ画像による瞬き情報を用いた眠気検知技術を開発し、83%という高い推定精度を実現してきた[6]。しかしながら、瞬き情報を用いてもなお、弱い眠気の検知精度は低いという課題があった。

本稿では、より弱い眠気を反映しうる指標としてドライバーの姿勢に着目した。そして、姿勢やその他眠気指標の眠気に対する感度の違いを考慮し、弱い眠気に対して感度の良い指標と強い眠気に対して感度の良い指標を組み合わせることで、すべての段階の眠気を網羅的に検知できるようにした眠気検知モデルを実現した[7]。

2. 眠気検知技術

2.1 眠気の定量化方法

眠気を評価する方法としては、例えば脳活動を計測することが考えられる。しかしながら、精度良く脳活動を計測するためには拘束式の計測器が必要であり、日常的な活動のなかで計測するには問題がある。非拘束な眠気の評価方法として広く用いられているものに、北島らが提案した表情に基づく評価方法がある[8]。これは訓練さ

れた評定者がドライバーの表情から眠気を判断する方法であり、5段階の等間隔尺度で評価される。各眠気レベルとその特徴を第1表に示す。眠気レベルは脳活動との高い相関が示されており[9]、脳の眠気の状態を非拘束に評価できる代替手段として使用できる。これまで、この評定で得られた眠気レベルを真値とし、カメラやステアリング操作などのセンサデータからドライバーの眠気レベルを推定する眠気検知技術の開発が試みられてきた。

第1表 眠気レベルと各レベルでの行動特徴

Table 1 Drowsiness level and typical behaviors

| 眠気レベル | 特徴 ([8]より一部を抜粋) |
|---------------|--------------------------------|
| 1: まったく眠くなさそう | 視線の動きが速く、頻繁である。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。 |
| 4: かなり眠そう | 意識的と思われる瞬きがある。あくびが頻発。 |
| 5: 非常に眠そう | 瞼(まぶた)を閉じる。頭が前に傾く。頭が後ろに倒れる。 |

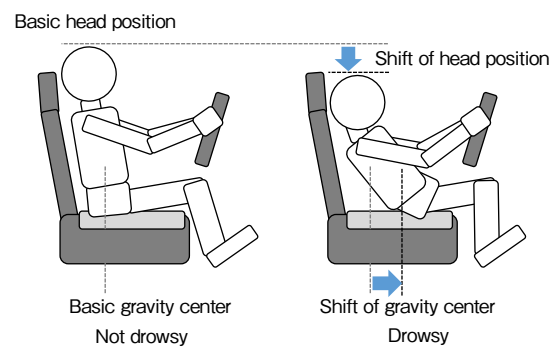
一般に、眠気レベルが2から3になると事故が急増するといわれており、レベル3になればドライバーに対し何らかの注意喚起を行う必要がある。一方で、ドライバーが覚醒状態にあるときに誤って注意喚起が行われると、ドライバーにとっては非常に煩わしい。したがって安全で快適なドライバーサポートを実現するためには、レベル3までの弱い眠気を精度良く判定できることが求められる。しかしながら、この早期の弱い眠気の段階をセンサデータから判別することは実現できていなかった。

2.2 眠気指標とその特性

これまで眠気検知技術において用いられてきた指標は、運転操作を反映した運転指標と、ドライバーの生体情報を反映した生体指標に大別される。運転指標には、アクセル操作回数や車体の横ブレ量などがある。これらは眠気が強まると急激に悪化するが、眠気が弱い間はほぼ変化がない。生体指標には、瞬き指標や心拍などの生理指標が含まれ、瞬き指標には、瞬きの所要時間、瞬きの回数などがある。瞬き指標は比較的弱い眠気から徐々に変化し始めるが、はっきりと変化するのは眠気が強まってからである。生理指標には、呼吸間隔や心拍変動などがある。これらは神経活動を反映するため弱い眠気を反映するとされるが、個人差や変動が大きく安定的でないという問題があった。

2.3 姿勢指標と提案する眠気検知モデル

本稿では、弱い眠気を検知するための新たな指標として、運転中のドライバーの姿勢に着目した。姿勢は中枢神経系によって維持されているため[10]、眠気に伴う神経系の変化が姿勢に表れると期待される。例えば第1図のように、眠くなると力が緩み気づかぬうちに徐々に姿勢が悪くなることもある。また反対に、姿勢自体が眠気の進行に影響することが示唆されている[11]。因果関係については本稿では議論しないが、眠気と姿勢が相関をもち、本人も気づかないほどの弱い眠気が姿勢に表れる可能性が考えられる。



第1図 姿勢変化の例 [7]

Fig. 1 Example of presumed changes in posture [7]

そこで筆者らは、これまで眠気検知で利用されてきた瞬き指標に加え、姿勢指標を検知モデルに追加することで、従来よりも早期の弱い眠気を精度良く検知できるモデルを提案する。また、強い眠気において大きな変化を示す運転指標や、安定性に欠けるものの弱い眠気を反映するとされる生理指標についても、適切な重みをもって用いることで眠気の全段階を高精度に検知できるモデルを提案する。本稿で用いる眠気指標と分類ごとの略語を第2表に示す。2.2節で述べたように眠気指標は非線形的な性質を示すため、眠気検知モデルには非線形に対応できるサポートベクトル回帰モデルを採用した。

第2表 眠気指標

Table 2 Drowsiness index

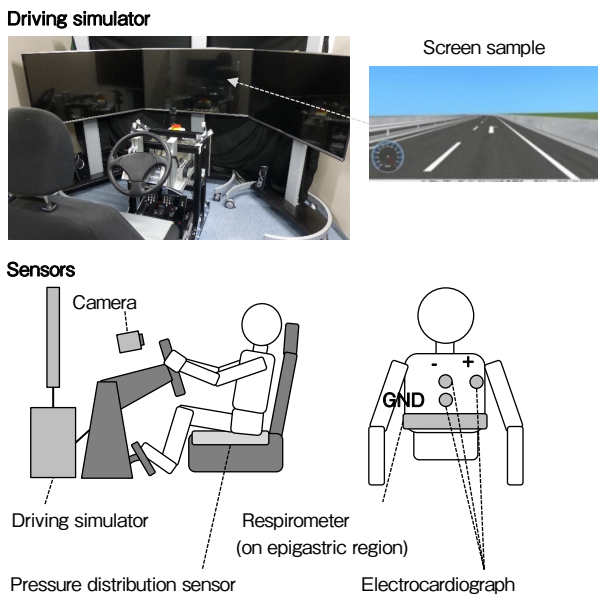
| 指標分類 (略語) | 具体的な指標 |
|-----------|-----------------|
| 運転指標 (VH) | アクセル操作回数、横ブレ量など |
| 瞬き指標 (BL) | 瞬き時間、瞬き回数など |
| 生理指標 (PH) | 呼吸間隔、心拍変動など |
| 姿勢指標 (PS) | 重心位置変動、頭部位置など |

3. 実験

3.1 データ収集

眠気検知モデルの構築および検証のため、ドライビングシミュレータを用いた運転実験によりデータを収集した。実験には普通運転免許を保有する49名が参加した(平均年齢 38.8 ± 5.7 歳, 男性26名, 女性23名)。参加者には前日十分な睡眠をとってもらい、インフォームドコンセントを行ったうえで実施した。また、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、事前に社内の倫理審査委員会の承認を受けた。

第2図にドライビングシミュレータによる実験環境を示す。走行コースはカーブを含む単調な高速道路の周回コースとした。走行中はコース上に一定速度で走行する先行車両が提示され、参加者には先行車両を追尾するように運転してもらった。また、運転中は通常の運転と同じく眠らないように指示した。運転環境に慣れるため、10分ほど練習走行を行ったのち、本走行を行った。本走行の時間は約1時間であった。実験は14時から16時の間に行われ、室温は 24°C に管理した。



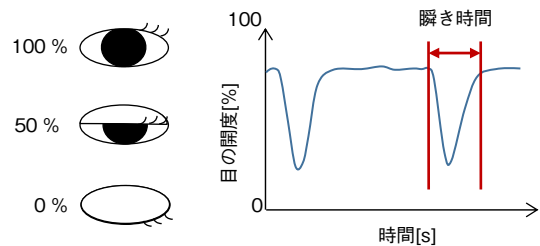
第2図 実験環境[7]
Fig. 2 Experimental environment [7]

運転中、参加者の前方に配置したカメラにより参加者の顔画像を撮影した(画素数 640×480 , フレームレート 60 frames/s)。また、ドライビングシミュレータのペダルとステアリングの状態を10 Hzで記録した。参加者には心電計測装置と呼吸計測装置を装着してもらい、それぞれ200 Hzで計測した。座席には圧力センサを設置し、5 Hz

で圧力分布を記録した。

計測したデータに対し、第2表に示した眠気指標の算出を行った。瞬き指標は顔画像をもとに以下の手順で算出した。まず画像認識技術により顔画像からドライバーの顔特徴点を抽出し、そのうち左目の上下瞼(まぶた)間距離と目尻目頭間距離の比を目の開度とした。第3図に示すような開度の時系列データから瞬き1回ごとのパラメータを求めた。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)内で検出された瞬きのパラメータの平均値を瞬き指標値とした。他の眠気指標についても同様に窓幅3分で指標値を算出した。運転指標については、ドライビングシミュレータのペダルおよびステアリング操作をもとに、3分間のアクセル操作回数などを算出した。生理指標は心電データおよび呼吸データをもとに、3分間の心拍回数や平均呼吸間隔などを算出した。姿勢指標はシートセンサと顔画像をもとに算出した。具体的には、シートセンサ上での平面圧力分布重心をドライバーの身体重心位置とみなし、3分間の重心位置のばらつきなどを算出した。また、画像認識技術により顔画像上のドライバーの頭部中心座標を抽出し、3分間の平均頭部位置座標などを算出した。

また、撮影した顔画像に対して、北島ら[8]に従い眠気評定を行った。1人の参加者の顔画像につき2人の評定者が5秒おきに評定を行った。すべての評定において、評定者2人の評定の一致係数は0.8以上であった。評定者2人の評定値を3分間平均したものを眠気レベルの真値とした。



第3図 目の開度変化と瞬き指標
Fig. 3 Eye open ratio and blink index

3.2 眠気検知モデルの学習と評価

実験で収集したデータを用いて、眠気指標を入力として眠気レベルを推定する眠気検知モデルを学習し性能を評価した。眠気レベルごとのデータ点数の偏りがモデルの学習・評価に影響するのを避けるため、各眠気レベルのデータをダウンサンプリングして点数を均一化した。また、用いる指標はあらかじめL1正則化により選別した。

各指標を用いた場合のモデルのパラメータ調整および評価は、被験者ごとにデータを分けたダブル交差検証に

より行った。具体的には、まず被験者を10組に分け、うち9組のデータのみをさらに分けて交差検証によりモデルのパラメータを選択した。選ばれたパラメータであらためて9組の全データによりモデルを学習し、学習したモデルにより残り1組のデータを推定することを繰り返した。最終的に得られた全組の推定結果のF1スコアによりモデルを評価した。本稿では特に弱い眠気における推定精度を検証するため、以下のように眠気レベルごとのF1スコアを算出した。

$$F1(i) = \frac{2 \times \text{precision}(i) \times \text{recall}(i)}{\text{precision}(i) + \text{recall}(i)} \dots\dots\dots (1)$$

ここで*i*は眠気レベル、*precision*(*i*)は眠気レベル*i*と推定したデータのうち推定結果が正しかったデータの割合、*recall*(*i*)は真値の眠気レベルが*i*であるデータのうち推定結果が正しかったデータの割合である。また、レベルごとのF1スコアの平均をモデル全体の推定精度とした。

4. 実験結果と考察

提案モデルおよび各指標分類を用いた場合の推定精度を第3表および第4図に示す。第3表に示すように、単一モーダルの指標を用いた場合は、瞬き指標による推定精度が最良となった。第4図は、瞬き指標単体と、瞬き指標にその他のモーダルを加えた場合の眠気レベル別の推定精度を示している。従来手法[6]と同様に瞬き指標のみを用いた場合では、眠気レベル3以下の弱い眠気段階の推定精度が、4以上に比べて相対的に低くなっている。これに対して本稿の提案手法である瞬き指標に姿勢指標を加えたモデルでは、眠気レベル3以下の推定精度が向上し、レベル4以上と同程度の精度まで改善できていることがわかる。具体的には、レベル3以下の平均F1スコアが0.358

から0.523へと16.5%改善された。一方で、瞬き指標に生理指標を加えたモデルと、瞬き指標に運動指標を加えたモデルでは、眠気レベル3以下のF1スコアに大きな改善は見られなかった。これらの結果から、姿勢指標のみが弱い眠気の推定精度向上に効果があるといえる。また、第3表に示すように、すべての指標分類を用いた場合に最も精度が高くなった。第4図にて眠気レベル別の詳細を確認すると、瞬き指標と姿勢指標のみの場合に比べて、眠気レベル4および5での精度がさらに向上しており、強い眠気レベルにおいて高い感度を示す運動指標の特性をうまく取り込んでいると考えられる。

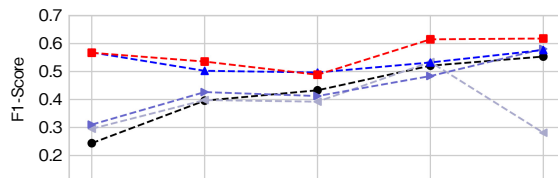
本稿では2人の評定者によって判断された評定値の平均を眠気の実値としたが、評定者同士の評定値にはばらつきがあった。平均値が眠気レベル3以下の弱い眠気に対

第3表 指標分類の組み合わせごとのF1スコア[7]

Table 3 F1 score of all modality combinations [7]

| 指標分類組み合わせ | | | | 平均F1スコア |
|-----------|----|----|----|---------|
| BL | | | | 0.429 |
| | PS | | | 0.236 |
| | | PH | | 0.121 |
| | | | VH | 0.227 |
| BL | PS | | | 0.536 |
| BL | | PH | | 0.380 |
| BL | | | VH | 0.443 |
| | PS | PH | | 0.252 |
| | PS | | VH | 0.343 |
| | | PH | VH | 0.213 |
| BL | PS | PH | | 0.553 |
| BL | PS | | VH | 0.544 |
| BL | | PH | VH | 0.445 |
| | PS | PH | VH | 0.272 |
| BL | PS | PH | VH | 0.565 |

BL：瞬き指標、PS：姿勢指標、PH：生理指標、VH：運動指標



| 指標分類組み合わせ | Level 1 | Level 2 | Level 3 | Level 4 | Level 5 |
|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ● 瞬き指標 | 0.244 | 0.396 | 0.433 | 0.521 | 0.554 |
| ▲ 瞬き指標 + 生理指標 | 0.296 | 0.398 | 0.392 | 0.534 | 0.281 |
| ▲ 瞬き指標 + 運動指標 | 0.310 | 0.427 | 0.413 | 0.484 | 0.581 |
| ▲ 瞬き指標 + 姿勢指標 | 0.569 * | 0.503 | 0.497 * | 0.532 | 0.577 |
| ■ 瞬き指標 + 姿勢指標 + 生理指標 + 運動指標 | 0.567 | 0.536 * | 0.489 | 0.615 * | 0.618 * |

第4図 眠気レベル別F1スコア (*は各レベルにおけるベストパフォーマンス値) [7]

Fig. 4 F1 score by drowsiness level (The best performance for each level is highlighted with a *.) [7]

する評定者間のばらつきは、強い眠気に対するばらつきよりも大きかった(それぞれ分散0.217, 0.131)。すなわち、弱い眠気は強い眠気よりも顔画像から判断しづらいといえる。評定は顔上の特定の部分にとらわれず顔全体を見るようにして判断される。このとき評定者が得られる情報には、瞬きなどの顔上の特徴以外にも首まわりの筋肉の緩みや頭部のわずかな傾きなども含まれる。これらは眠気に伴う脱力によって生じるものであり、評定者はそのような特徴も無意識に捉えて眠気を判断していると考えられる。特に弱い眠気では強い眠気ほどの明瞭な特徴がないため、このようなわずかな特徴が重要な判断要素となっている可能性が高い。本稿で提案した瞬きと姿勢情報を組み合わせた眠気検知手法は、評定者が捉えていると考えられる顔上の顕著な挙動である瞬きと、評定者が捉えうるわずかな脱力を反映する姿勢情報を組み合わせたことで、評定者により近い高精度な判定が実現できたと考えられる。

本稿ではドライビングシミュレータ運転中の眠気推定に姿勢指標が有用であることを示した。姿勢指標には眠気による脱力が反映されていると考えられる。実車環境では眠気による変化に加え、車体振動や加減速による瞬間的な姿勢の変動が含まれると考えられる。そのため、走行に起因するノイズを除去し、長期的な姿勢の変化を解析すれば、実車においても本稿と同様の姿勢変化傾向が得られると考えられる。今後、提案手法の実車への展開に向けたさらなる検証を進めていく必要がある。また、本手法はオフィス環境での眠気検知への適用も考えられる。PC作業中など、着座で前方のディスプレイを注視しつつ手作業をする状況はドライビングシミュレータの運転と共通点が多い。具体的には検証が必要であるが、本眠気検知手法の応用先として期待される。

5. まとめ

本稿では、特性の異なるマルチモーダル情報を組み合わせることで、弱い眠気から強い眠気まで全段階の眠気を高精度で推定できる眠気検知モデルを実現した。

本技術により、ドライバーの眠気が弱い段階では空調や音楽などのさりげない手段で覚醒を促し、危険な強い眠気に至った場合は強めの警告を発するなど、ドライバーの状態に応じた最適なサポートが可能となる。

今後は、実車環境への適用に向けたさらなる開発と、弱い眠気段階で快適にドライバーの状態を維持するためのアクチュエーションを絡めた技術への展開が期待される。

参考文献

- [1] “令和元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等について,” 警察庁交通局, 令和2年2月13日.
- [2] “Federal Automated Vehicle Policy,” National Highway Traffic Safety Administration, <https://www.transportation.gov/AV/federal-automated-vehicles-policy-september-2016>, 参照 Apr. 20, 2021.
- [3] 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, pp. 243-250, 2001.
- [4] 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.
- [5] 中野泰彦, “心拍センサを用いた大型トラック運転中の覚醒度評価,” 自動車技術開論文集, vol. 26, no.3, pp. 679-685, 2015.
- [6] 式井慎一 他, “眠気検知・予測技術に基づくドライバーモニタシステム,” パナソニック技報, vol. 64, no. 2, pp. 69-74, 2018.
- [7] M. Sunagawa et al., “Comprehensive Drowsiness Level Detection Model Combining Multimodal Information,” IEEE Sensors Journal, vol. 20, no. 7, pp. 3709-3717, 2020.
- [8] 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
- [9] S. Hachisuka et al., “Drowsiness detection using facial expression features,” SAE Tech. Paper 2010-01-0466, 2010.
- [10] Y. Ivanenko et al., “Human Postural Control,” Front. Neurosci., vol. 12, p. 171, Mar. 2018.
- [11] M. Thody et al., “Reclined sitting postures: their effect on human performance of a vigilance task,” in Contemporary Ergonomics, E. J. Lovesay, CRC Press: Taylor & Francis Group, London, 1993, pp. 33-39.

執筆者紹介



砂川 未佳 Mika Sunagawa
インダストリアルソリューションズ社
技術本部
Engineering Div., Industrial Solutions Company



式井 慎一 Shin-ichi Shikii
インダストリアルソリューションズ社
技術本部
Engineering Div., Industrial Solutions Company



仲井 渉 Wataru Nakai
オートモーティブ社 開発本部
R&D Div., Automotive Company



望月 誠 Makoto Mochizuki
オートモーティブ社 開発本部
R&D Div., Automotive Company
博士（工学）



吉岡 元貴 Mototaka Yoshioka
インダストリアルソリューションズ社
技術本部
Engineering Div., Industrial Solutions Company
博士（工学）



北島 洋樹 Hiroki Kitajima
公益財団法人 大原記念労働科学研究部
The Ohara Memorial Institute for Science of Labour
博士（工学）