

実車走行環境下における自動運転時の ドライバ状態（覚醒度）検知に関する研究

Changes in Drivers' Levels of Wakefulness During Automatic Driving in an Actual Driving Environment

佐藤 健治* ¹ Kenji SATO	吉田 傑* ² Suguru YOSHIDA	石田 肇* ² Hajime ISHIDA	平田 豊* ³ Yutaka HIRATA
恵本 序珠* ⁴ Joshua EMOTO	大前 学* ⁵ Manabu OMAE	安部 原也* ⁶ Genya ABE	内田 信行* ⁷ Nobuyuki UCHIDA

Abstract

We investigated changes in the level of wakefulness of drivers, while driving in self-driving vehicles (Society of Automotive Engineers Level 3), measured biosignals, regarded as reflecting wakefulness, and considered response measures. The subjects were 15 men who rode a test course in a self-driving vehicle for approximately 40 minutes. Their levels of wakefulness declined, and in around 60% of the subjects, the level of wakefulness, assessed by facial expression, was correlated with PERCLOS score and the number of eyelid closures. Driver drowsiness was also detectable by the vestibulo-ocular reflex before drivers became aware of it themselves. These results indicated that acquiring data on drivers' eyeballs and eyelids may enable the assessment of decreased wakefulness and the onset of drowsiness.

1. まえがき

近年、自動運転の実用化に向けた技術開発が盛んに行われており、産官学が一体となった実証実験等が進められている。自動運転時には、ドライバは手動運転時のような運転操作を行わないケースがあることから、そのことに起因したドライバの覚醒度への影響が懸念される。例えば、ドライビングシミュレータ（以下、「DS」という）実験において、自動運転中にドライバの覚醒度が低下する可能性が示されている¹⁾。

自動運転中の覚醒度の低下が問題となる場面の一つに、自動運転から手動運転への引継ぎ要求（Take-Over Request:以下、「TOR」という）が

生じる場面が挙げられる。完全自動化が実用化されない限り、TORに対してドライバは適切に手動運転に引き継ぐことを求められる。ここで、覚醒度が著しく低下しているようなことがあれば、認知、判断、操作の誤りが生じる可能性がある。したがって、TOR時におけるドライバの安全を確保するためには、システムが、自動運転中のドライバの覚醒度を把握しておくことが重要であると考えられる。

ドライバの覚醒度の低下は、手動運転においても問題視されており、これまで運転時の覚醒度を測定するための指標が検討されてきた。特に、PERCLOS（Percent of Eyelid Closure）や瞬目などの瞬目連情報、非拘束で計測することが可能であることから注目されている。PERCLOSおよび瞬目はその時々々のリアルタイムの覚醒度を反映した指標である。

PERCLOSとは単位時間あたりの閉眼時間割合のことで、覚醒度の低下に伴って値の増加を示す。

*1 一般財団法人日本自動車研究所 安全研究部
*2 一般社団法人日本自動車工業会 交通事故分析分科会
*3 中部大学 工学部ロボット理工学科 博士(工学)
*4 中部大学 工学部ロボット理工学科
*5 慶應義塾大学 大学院政策・メディア研究科 博士(工学)
*6 一般財団法人日本自動車研究所 安全研究部 Ph.D
*7 一般財団法人日本自動車研究所 安全研究部 博士(工学)
*本速報はJSAE著作権規則に基づくJSAE20185139の転載である

NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) はPERCLOSと他の覚醒度指標との関連を調査し、覚醒度の低下とPERCLOSとの間に高い相関が見られたことを報告している²⁾。一方、瞬目について田中³⁾は、ある程度高い覚醒水準を維持している場合には、覚醒水準の低下は瞬目率を増加させ、覚醒水準が明らかに低下している状況下において瞬目率は低くなると報告している。つまり、明瞭な覚醒状態から眠気を感じ始めた場合には、瞬目数は増加するが、一旦、覚醒度が低下した後に更に眠気が強くなった場合には、瞬目数は減少する。

他にも覚醒度を反映する指標として、眼球関連情報の一つである前庭動眼反射 (Vestibulo Ocular Reflex : 以下、「VOR」という) が挙げられる。VORとは、頭部運動時にそれとほぼ同じ速さで眼球を反転させ、網膜上の外界像のブレを抑制する不随意的眼球運動である。これは、瞬目やPERCLOSとは異なり、眠気を自覚する前に、眠気予兆として捉えることが出来る指標である。西山⁴⁾はDSでの手動運転実験において、このVORを用いた指標により、眠気の予兆を検知できたと報告している。

これらの先行研究から、瞼や眼球に関連した指標を用いることで、ドライバの覚醒度を把握することが可能であると考えられる。今後、当該技術を簡便に自動運転車両に搭載することができ、極めて高い計測精度を担保することができれば、システムが自動運転中のドライバの覚醒度を把握し、ドライバの状態を考慮した制御を行うことができると期待される。

しかし、これらの覚醒度指標について、自動運転時を対象にした研究は未だ散見される程度である。例えば、DSでの実験において、手動運転時に比べ自動運転時にPERCLOSが有意に高くなることは報告されている⁵⁾が、時間経過に伴う覚醒度の推移や自動運転時の覚醒度を評価し得る指標の検討は十分には行われていない。さらに、実車での自動運転中の覚醒度を対象に検討された研究はほぼなく、実車環境下においても覚醒度を測定できるかについて検討する必要がある。また、VORについても、実車走行時の眠気予兆の検討はされておらず、その有用性について検討する必要がある。

そこで本研究では、実車での自動運転走行時の覚醒度の推移を調査することを目的とした。また、覚醒度の測定にあたって、従来、手動運転時を対象に覚醒度指標として検討されてきたPERCLOSおよび瞬目数が当該環境下での覚醒度を反映するか否かについて調査するとともに、VORによる眠気予兆検知が可能であるかについても調査する。

2. 実験方法

2.1 実験参加者

実験参加者は日常的に車を運転している男性15名 (35.5 ± 9.5 歳) であった。乗り物酔いが生じた1名については実験を中止し、分析対象から除外した。実験実施前に書面と口頭にて、実験内容や実験手順、注意事項などを説明した上で、任意に参加同意書への署名を求めた。本実験内容は、一般財団法人日本自動車研究所 (以下、「JARI」という) の研究倫理審査委員会による承認を得た上で実施した。

2.2 実験装置

実験には、市販のミニバンを改造した実験車両を用いた。実験車両では、自動走行制御システムが、ハンドル角や速度等の車両状態量をCAN (Controller Area Network) 経由で受信し、目標速度や目標ハンドル角を実現するよう、車両ECU (Electronic Control Unit) に車両センサ (ペダルストロークセンサ、トルクセンサ) の疑似信号を与え、車両の速度制御、操舵制御を行った。

自動走行制御システムは、予め絶対位置情報で記述された走行パス情報と、後述する自車位置推定により得られた現在の車両の位置・向きとの相対位置の関係から、走行パスに追従するための操舵角を計算し、目標ハンドル角を決定した。自車位置の推定については、速度、ヨーレート、RTK-GNSS (Real Time Kinematic-Global Navigation Satellite System) の測位情報を用いた自車位置推定と、速度、ヨーレート、LiDAR (Light Detection And Ranging) による測域情報と二次元反射強度地図のスキュンマッチングを用いた自車位置推定⁶⁾の二重系の自車位置推定を行った。尚、各手法単体の自車位置推定を用いた車両制御により、実験コースを走行できることを確認した。



Fig. 1 Experimental vehicle

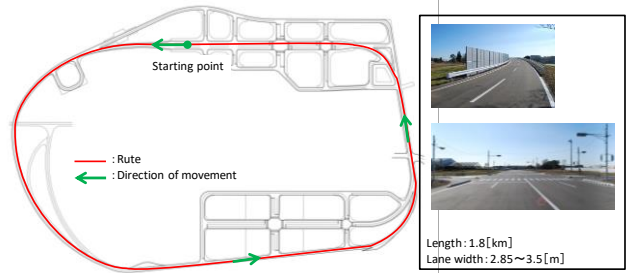


Fig. 2 Experimental course

実験における安全性を確保するために、実験車両に対して次の三つの安全対策を施した。一つ目は、自動走行制御システムの作動中、ドライバーがブレーキペダルを操作するといかなる状況下でも自動走行制御システムが停止し、手動運転が可能になるものとした。二つ目は、非常ボタンを操作した場合には、自動走行制御システムの電源が遮断され、車両センサ（ペダルストロークセンサ、トルクセンサ）とECUが直結状態となり、手動運転が可能になるものとした。三つ目は、実験者の着座位置である助手席側後部座席に緊急用補助ブレーキを設置することによって、自動走行制御システムの起動状態に関わらず、実験者が車両のブレーキを作動させることを可能とした。

2.3 自動運転システム

本実験において使用した自動運転システムは、SAEのレベル3⁶⁾相当とした。すなわち、システムが全ての運転タスクを実行し、ドライバーは手や足を離れた状態で走行した。ドライバーには道路環境に対する常時監視を求めなかった。ただし、副次課題は覚醒度の推移に影響する可能性があるため、本研究では実施しなかった。

2.4 実験条件

本研究では、実車での自動運転走行時における覚醒度の推移および覚醒度指標を検討するため、自動運転条件を設定した。

自動運転走行は、Fig. 2に示したJARI所有のV2X・多目的市街路の周回路（1周約1.8 km）で実施し、周回路を左回りに走行した。走行時間は約40分で、自動運転システムの目標速度は30 km/hとした。周囲に他の交通参加者はおらず、単調な走行環境であった。路側帯が狭い区間においては、安全上の配慮として車線中央を跨いで走行した。

2.5 計測指標及び分析方法

本研究では、覚醒度の指標として、以下の4項目を測定、分析した。

(1) 眠気の主観評価

ドライバーの主観的眠気を測定するために、KSS（カロリンスカ眠気尺度）⁷⁾を用いた。走行中、每周同じ地点でその時の眠気の状態を同乗した実験者が質問した。ドライバーはカーナビの位置に表示されたFig. 3の尺度を必要に応じて見ることができ、口頭でその時の眠気に当てはまる数字を回答した。



Fig. 3 Presentation method of KSS

(2) 顔画像

評定者がドライバーの顔表情から覚醒度を評価するために、ドライバーの前方に小型カメラ（画素数640×480、フレームレート30 fps）を設置して、データ計測を行った。

覚醒度の評価には北島ら⁸⁾の眠気表情値を用いて、実験終了後にオフラインで10秒ごとに評定した。評定は事前にトレーニングを受けた評定者1名が[1: 全く眠くなさそう, 2: やや眠そう, 3: 眠そう, 4: かなり眠そう, 5: 非常に眠そう]の5段階等間隔尺度にしたがって評価した。

得られた眠気表情値は、ドライバの覚醒度の時系列変化を検討するための指標とするとともに、他の覚醒度指標との関連を調査する際の基準指標として用いた。

(3) 瞼関連情報

ドライバの覚醒度を評価する指標として、瞼関連情報を計測した。計測には、眼球運動計測装置（EyeSeeTec社製 EyeSeeCam）を用いた（Fig. 4）。眼球運動計測装置を参加者の頭部に装着し、瞳孔径を計測した。太陽光等によるノイズが、全走行を通して見られた3名のデータは分析から除外した。また、分析対象データについても、ノイズが見られた区間は、視察判定により手動で非解析区間とし、分析から除外した。測定された瞳孔径の値がエラーになったタイミングを瞬目と判定し、10秒ごとに前1分間の瞬目数を算出した。また、瞳孔径のエラーの持続時間を閉眼時間とし、1分間当たりの閉眼時間割合をPERCLOSとして算出した。PERCLOSについても瞬目数と同様、前1分間のデータを対象に、10秒ごとにPERCLOSを算出した。



Fig. 4 Eye movement tracking device

(4) VOR

ドライバの眠気予兆を検知する指標として、VORを計測した。瞼関連情報と同様に、眼球運動計測装置を参加者の頭部に装着して計測を行った。機材トラブルにより、頭部運動データが計測できなかった5名を分析から除外した。さらに、太陽光等のノイズにより眼球運動が計測できなかった3名も分析から除外した。また、走行開始直後から眠気の自覚を報告した1名は眠気予兆の分析から除外し、分析対象は5名であった。尚、直射日光や路面反射光による瞳孔抽出精度が低下した区間、短時間で眼球が高速で動くサッカーボールおよび瞬目が発生した区間、ミラーや計器等の近方を見

ていた区間については、分析から除外した。これらを除いたデータを対象に、頭部動揺時の眼球運動の補償度合いを示すVORゲインと、VORのばらつきを示すVORエラーを算出した。覚醒状態である練習走行時のデータから、各参加者におけるVORゲインおよびVORエラーの閾値を設定した。VORゲインが閾値以下、あるいはVORエラーが閾値以上になった状態が30秒間継続した時点で、起点時を眠気予兆として検知した。眠気予兆が見られた場合、眠気予兆検知から眠気を自覚するまでの経過時間を算出した。眠気の自覚には、KSSによる主観的眠気の値を用いた。KSS 6以上が報告された時点と眠気自覚と、眠気予兆検知からの経過時間を算出した。眠気予兆検知の取得例をFig. 5に示した。実験開始1010秒後から、VORゲインが閾値を下回った状態が30秒以上持続し、眠気予兆が検知された。その920秒後にKSSが7となり眠気を自覚した。

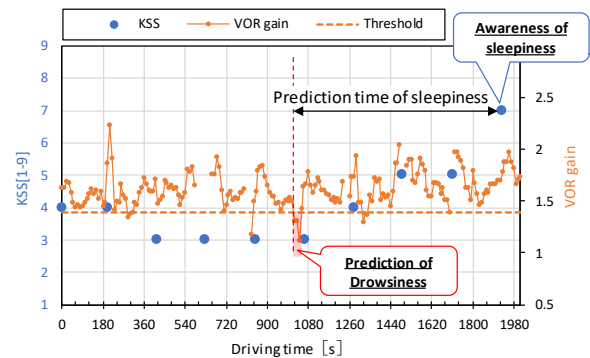


Fig. 5 Examples of detection result (Sub.14)

2.6 実験手順

本実験は、参加者への教示、眼球運動計測装置の装着、練習走行、本番走行の順に行った。教示では、測定指標および計測方法、自動運転システムの操作方法等について説明した。

実験の目的については、「実車走行時の自動運転中におけるドライバ状態を調べることを目的としています。」と伝え、自動運転の走行方法については「特定の交通条件では、全て自動運転システムが走行を操作し、操作不能と判断した時は、事前報知と一定の猶予時間をもって手動運転へ移ることができます。自動運転中は、常に周囲を監視する必要はありませんので、リラックスして運転することができます。」と教示した。教示後、実験参

加への同意が得られた参加者に、眼球運動計測装置の取り付けを行った。

その後、実験車両への慣れと自動運転システムの操作方法を十分理解することを目的に練習走行を実施した。練習走行では、手動運転で運転した後、センターコンソールに設置された自動運転スイッチを、参加者に操作してもらい、自動運転を開始した。そのまま、自動運転で本番と同じルートを走行し、自動運転による車両挙動を経験してもらった。その後、ドライバがブレーキペダルを踏むことで自動運転を解除して手動運転に引き継ぎ、練習走行を終了した。

本番走行は、実験者の合図でドライバが自動運転スイッチを操作することで開始した。走行中、実験者は助手席側後部座席に座り、眠気の主観評価聴取時のみ、口頭で回答を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 自動運転時における覚醒度の推移

自動運転中の眠気表情値について、それぞれの値に対する人数構成率を3分ごとに算出した (Fig. 6)。

その結果、走行開始時には全員が1と評定されたが、走行開始9分後には、半数程度が2以上と評定された。走行開始21分後以降には、2以上と評定された参加者の割合は8割程度を占めた。さらに、走行開始33分後以降には、4、5と判定された割合が4割程度を占めていた。これらの結果から、走行開始から10分程度経過した頃には、明瞭な覚醒度を保っているドライバは半数程度となり、走行開始から30分程度経過した頃には、4割程度のドライバはあくびを頻繁にしたり、うたた寝が見られる状態であったと言える。

このことから、常時監視義務のない自動運転環境下において、ドライバの覚醒度は時間経過に伴って低下すると考えられる。この結果について、本実験の走行速度は最高30 km/hであり、低速域での走行であったことと、他の交通参加者が存在しない状況であったために、覚醒度の低下が見られた可能性が考えられる。しかしながら、手動運転中であっても覚醒度の低下が見られることを考慮すると、ドライバの運転操作を必要としない自動運転時においては、走行環境に関わらず覚醒度の低下が引き起こされる可能性は十分に考えられ

る。

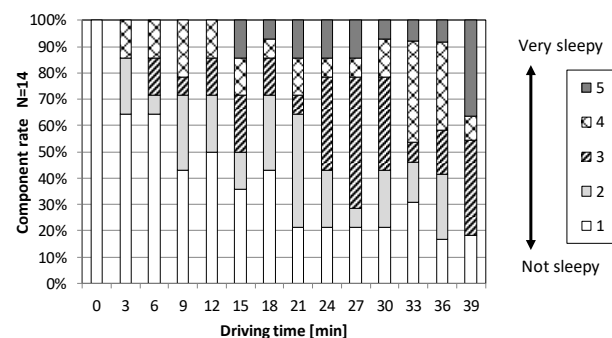


Fig. 6 Driving time and arousal level

3.2 自動運転時の覚醒度検知指標の検討

ここでは、PERCLOSおよび瞬目数と覚醒度低下との関係を調査するために、顔表情による眠気表情値を覚醒度の基準指標として、参加者ごとにPERCLOSおよび瞬目数との相関係数を求めた。Fig. 7に、眠気表情値とPERCLOSとの間に有意な相関が見られた事例を示した ($r=0.74, p<0.05$)。眠気表情値が高く覚醒度の低下が見られた場合に、PERCLOSが高くなっていた。先行研究においても、PERCLOSは覚醒度低下に応じて値が高くなることが報告されており¹²⁾、本実験もこれを支持する結果であった。Fig. 8に、眠気表情値と瞬目数との間に有意な相関が見られた事例を示した ($r=0.70, p<0.05$)。眠気表情値が高く覚醒度の低下が見られた場合に、瞬目数が増加していた。瞬目数の増加は、覚醒度を維持している状態から、覚醒度が低下する際に見られる³⁾。したがって、当該参加者においても、覚醒度低下初期の状態が瞬目数に反映されたと考えられる。

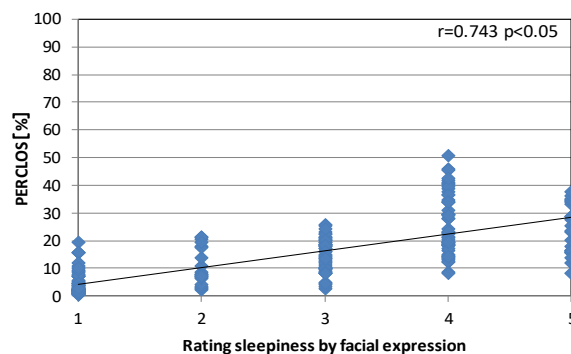


Fig. 7 Examples of drowsiness level and PERCLOS(Sub.3)

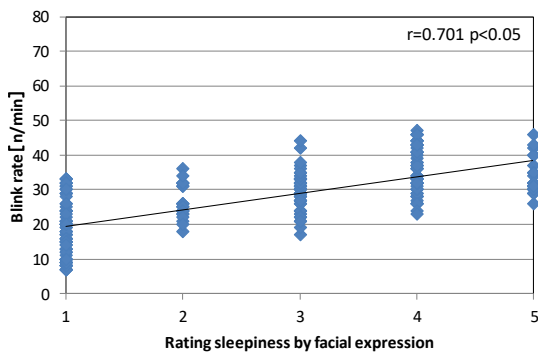


Fig. 8 Examples of drowsiness level and Blink rate(Sub.3)

さらにTable 1には、各参加者における、眠気表情値とPERCLOSおよび瞬目数との相関係数を示した。尚、 $r=0.2$ 以上、 $p<0.05$ だった結果に色付けを施した。その結果、PERCLOSについては11名中7名、つまり6割程度の参加者において、眠気表情値との間に有意な正の相関が見られた。

一方、瞬目数は11名中5名で、眠気表情値との間に有意な正の相関が見られ、2名で有意な負の相関が見られた。瞬目数は覚醒を維持している状態から、覚醒度が低下する覚醒低下初期には増加し、低覚醒状態から覚醒度がさらに低下した場合には減少する。すなわち、本実験において正の相関および負の相関が見られたことから、瞬目数を測定することで、覚醒低下初期の変動と、低覚醒状態での更なる覚醒度の低下の両方を評価することができると考えられる。

これらの結果をふまえると、実車走行環境下における自動運転中の覚醒度の低下を、PERCLOSおよび瞬目数により測定できる可能性が示された。

ただし、有意な相関が見られないケースや、有意ではあるものの相関が弱いようなケースも散見された。したがって、PERCLOSや瞬目数による覚醒度指標をTOR場面などの現実場面で活用するためには、各指標において覚醒度を評価する際の精度を向上させるための検討を行う必要がある。

Table 1 Correlation coefficient between drowsiness rating and biometric index

Sub.	PERCLOS	Blink rate
1	NR	NR
2	NR	NR
3	0.743	0.701
4	NR	NR
5	0.182	0.044
6	0.698	-0.038
7	0.828	0.701
8	0.512	-0.636
9	0.566	0.272
10	NR	NR
11	0.125	0.272
12	-0.029	-0.378
13	0.371	0.272
14	0.141	0.128
15	0.339	0.056

3.3 自動運転時の眠気予兆検知の検討

ここでは、自動運転時における覚醒度の低下を、事前に検知できるか否かについて、VORを用いた検討を行った。その結果、5名で眠気予兆が検知され、5名ともその後に眠気の自覚を報告した (Fig. 9)。眠気予兆を検知してから、眠気を自覚するまでの経過時間は、最も長い場合で15分20秒、最も短い場合でも2分40秒であった。

先行研究⁴⁾では、眠気予兆検知後、平均1分52秒程度経過した時点で、眠気の自覚が見られた。眠気予兆検知から眠気自覚までの経過時間は、本研究の方が長かったが、これは実験環境の違いが大きく影響していると考えられる。先行研究では、DSでの手動運転を行っていたが、覚醒度の低下を誘発するために、車線および路肩映像以外の前方風景は変化しない単調なシナリオであった。

一方、本実験は屋外で実施しており、周回路で単調ではあるものの周囲の風景の変化や太陽光等の光による刺激にドライバは常に晒されていた。また、路面振動や車両挙動にも変化があったことから、先行研究と比べてドライバへの刺激強度が高く、眠気の自覚までに時間を要したと考えられる。つまり、走行環境の単調さ等が、眠気予兆検知から眠気を自覚するまでの時間に影響することが示されたと言える。

したがって、眠気を自覚するどれくらい前に眠気予兆を検知できるかについては、様々な環境下で検討する等、今後更なる知見の蓄積が必要であ

ると考える。また、本研究では、分析対象となった5名すべてで眠気予兆が検知された。このことから、ノイズの影響なくVORを計測することが出来た場合、高い精度で眠気の予兆を検知することができると考えられる。

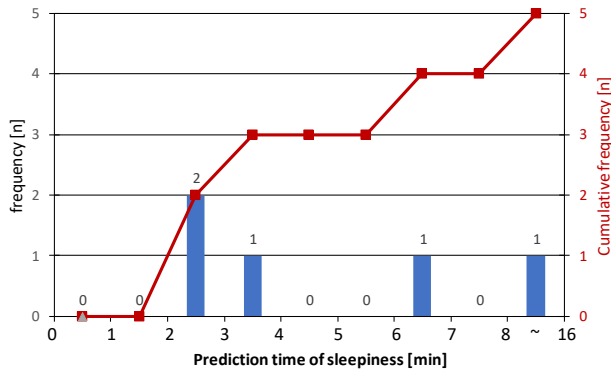


Fig. 9 Prediction result of drowsiness

4. まとめ

本研究では、実車での自動運転走行時の覚醒度の推移を調査するとともに、PERCLOS、瞬目数およびVORが、当該環境下での覚醒度指標となり得るかについて調査することを目的とし実験を行った。その結果、以下の結果が得られた。

(1) 覚醒度を表わす眠気表情値とPERCLOSとの間に正の相関が見られた。すなわち、覚醒度低下に応じて、PERCLOSが増加した。

(2) 覚醒度を表わす眠気表情値と瞬目数との間に正および負の相関が見られた。すなわち、覚醒度低下に応じて、瞬目数が増加または減少した。

(3) VORを取得できた場合には、高い割合でドライバの眠気の自覚を事前に検知できる可能性が示された。本実験環境下では、眠気予兆を検知してから、2分40秒～15分20秒後に眠気の自覚を報告した。

以上のことから、PERCLOS、瞬目数およびVORは、実車での自動運転時の覚醒度指標となり得ることが示された。また、PERCLOSおよび瞬目数において、覚醒度との間に相関が見られないケースや、相関が弱いケースも確認された。この

ことから、これらの指標を用いて自動運転システムがドライバの覚醒度を把握し、TOR時等のシステム制御に活用するためには、覚醒度を精度高く評価できるよう、検討を重ねる必要があると考えられる。

本研究は、一般社団法人日本自動車工業会・交通事故分析分科会からの委託研究として、一般財団法人日本自動車研究所が2016年度に実施した内容の一部をまとめたものである。

参考文献

- 1) A. H. Jamason et al. : Behavioural changes in drivers experiencing highly-automated vehicle control in varying traffic conditions, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 30, pp.116-125 (2013)
- 2) D. F. Dinges et al. : U. S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Final Report, DOT HS 808 762(1998)
- 3) 田中裕：覚醒水準と瞬目活動，心理学研究，Vol.70，No.1，pp.1-8 (1999)
- 4) 西山潤平ほか：前庭動眼反射による眠気予兆検出，生体医工学，Vol. 48，No.1，pp.1-10(2010)
- 5) 大前学ほか：反射強度グリッドマップを活用した自動車の自動運転システム，第13回ITSシンポジウム2015講演論文集(2015)
- 6) SAE : Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, J3016-201609(2016)
- 7) K. Kaida et al. : Validation of the Karolinska sleepiness scale against performance and EEG variables, Clin Neurophysiol, Vol.117, No.7, pp.1574-81(2006)
- 8) 北島洋樹ほか：自動車運転時の眠気の予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予測に有効な指標について，日本機械学会論文集 C, Vol.63, No.613, pp.3059-3066(1997)