

ドライビングシミュレータ作業中の目の赤外線画像の変化について

早見 武人† 松永 勝也†† 志堂 寺 和 則††† 松木 裕 二†††

†九州大学デジタルメディシン・イニシアティブ

††九州産業大学情報科学部

†††九州大学大学院システム情報科学研究院

生体計測によって自動的に自動車運転中の運転者の覚醒水準を推定することは、居眠り運転による交通事故を防止する情報処理の応用技術として期待されている。そこで本研究では自動車運転中の目の赤外線画像を連続撮影することにより、覚醒水準の低下との関連を調べた。瞳孔と眼瞼の影からなる領域は時間経過に伴い激しく変化する場合が見られたが、これは眼瞼と眼球の運動の複合状態を捉える覚醒水準の指標になると考えられる。

Various Infrared Eye Images while Driving Simulator Task

TAKEHITO HAYAMI†, KATSUYA MATSUNAGA††, KAZUNORI SHIDOJI††† and YUJI MATSUKI†††

† Digital Medicine Initiative, Kyushu University

†† Faculty of Information Sciences, Kyushu Sangyo University

††† Faculty of Information Sciences and Electrical Engineering, Kyushu University

Automatic estimation of the level of wakefulness of drivers is expected as an important application of information processing technology to prevent traffic accidents caused by driver's nap. In this research the infrared images of drivers' eyes were analyzed to find the sign of the fall of the level of wakefulness using driving simulator. As the change of the shape of the region of combination of the pupil with the shadow of the eyelid observed frequently according to time passage, this region seemed to be a possible indicator of wakefulness as a reflection of the compound motion of the eyelid and the eyeball.

1. はじめに

情報処理技術による自動車運転者の覚醒水準の低下の検出は、安全な交通システムを形成する要素技術として期待されている。ヒトの覚醒水準の低下を反映する生理指標としては目の動き以外にも脳波や皮膚電位等が考えられるが、自動車の運転が主に視覚を用いる見張り課題であることから視覚の感覚器としての目の状態は課題の成否に直接関わっていると考えられる。また、目の動きは光画像で非接触計測できる点で実用向きであるとも考えられる。

目の動きから得られる指標の中でも、眼瞼の1分間あたりの開閉回数で表される瞬目率は計測が容易で古くから着目されてきた指標である。瞬目率は交通量が多い、すなわち疲労し

やすい道路で低下するとされているが[1]深夜の運転に関しては低下する[2]とも増加する[3]とも言われている。また、運転時間の経過に伴い瞬目率[2]あるいは長い瞬目の回数の増加[4]も指摘されている。したがって瞬目率を単純に自動車運転者に警報を与えるための指標とすることは難しいといえる。

このような中で、PERCLOS (PERcent CLOSure) と呼ばれる指標が新たにに取り上げられるようになった。PERCLOSは瞳孔が80%以上眼瞼によって隠された時間の一定時間内における割合を百分率で表した値であって[5]、おおよそ閉暗係数[6, 7]と同義である。閉暗係数と眠気との関係も以前から指摘されているが[3]、Dingesらは運転中に単純反応課題を与えたときの成績を同時に測定したPERCLOS、瞬目率、

脳波、頭部運動と比較し、PERCLOSが多くの被験者に共通して課題の成績に近い変化を示す居眠り検出に有効な指標であることを示した。しかしPERCLOSも研究中の指標であり、覚醒水準の低下を確実に捉えるためにはさらに多くの検証と検討が必要である。そこで本研究においては、目の赤外線画像の変化を計測する実験を行い、覚醒水準を推定する方法について検討を行った。

2. 実験

2.1 装置

直径19 mmの赤外線CCDカメラ（東芝製IK-41MR）、鏡、照明用の赤外発光ダイオードを支持装置に取り付け、さらにその支持装置を帽子に取り付けたヘッドギアを被験者に着用させることで眼球映像を撮影した(図1)。映像信号はデジタルビデオレコーダ（ソニー製DCR-TRV900 NTSC）を用いてテープに録画した(図2)。テープは実験終了後フレームグラバ（Imagination社製 PXC200）経由でPCに取り込み、再生して画像処理を行った。

眼球の画像はカメラが出力するNTSC信号（毎秒60フィールド）から偶数フィールドのみを取り出して縦240画素、横320画素、256階調にデジタル化した。計算機では、画像を2値化したのち画像中のすべての接続領域を計算し、その

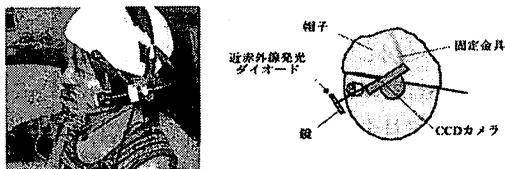


図1 眼球映像撮影装置。

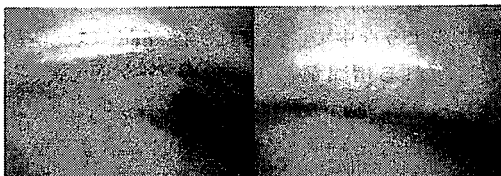


図2 運転作業中の眼球画像。左：開眼時、右：80%閉眼時。

中で最も広い接続領域を検出した。この領域は通常開眼時には瞳孔に一致する。眼球周辺はやや丸みを帯びているため画像の周辺部は暗くなりやすく、接続領域が画像の縁を含み誤検出が生じる場合がある。そこで縦120画素、横160画素の窓を瞳孔の移動範囲に一致するように設け、その範囲外の接続領域を除外することによって誤検出を防止した。

2.2 手続き

被験者には眼球映像取得用のヘッドギアを着用した状態でドライビングシミュレータ[8]を運転させた(図3)。シミュレータ内の道路は常に見通しが良く信号のない直線道路とした。室内は夜間の運転を想定して薄暗くした。シミュレータシステムには実際の自動車に取り付けられているものと同じハンドルを備えたが、自動車の走行方向は道路に沿って常に直線に保ち、ハンドルを回転させても操舵できない状態にした。アクセルペダルとブレーキペダルのみを有効とし、被験者にはペダルを操作して前方の自動車（先行車）を追従するように指示した。先行車は加速と減速をランダムなタイミングで繰り返し、減速時には尾灯を点灯させた。この課題は単調で大変退屈なものであった。Drowsy条件として昼食後約1時間を、またWakeful条件として昼食直前もしくは夕食直前を選んで実験を行った。20代の男性3名、女性1名を被験者とした。

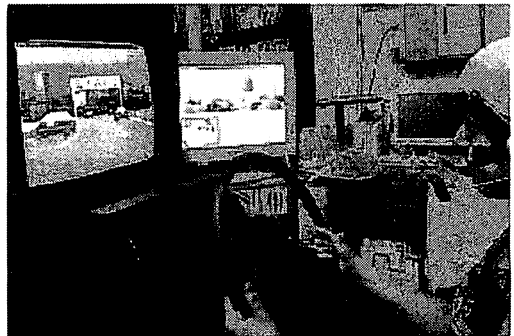


図3 ドライビングシミュレータ。

3. 結果

3.1 反応時間

両条件間においては被験者へのアンケートにより覚醒水準に差があることを確認したが、客観的な指標を得るため先行車が尾灯を点灯してから被験者がブレーキペダルを踏下するまでの時間（ブレーキ反応時間）を記録した。その結果を図4に示す。4名ともWakeful条件に比べてDrowsy条件のほうがブレーキ反応時間の標準偏差の値が大きかった。これは自動車運転課題においては覚醒水準が低下すると反応時間のばらつきの増加が見られる[9]というこれまでの研究成果に一致していた。

3.2 瞬目率

録画したビデオを1分区切りで再生し、瞳孔が80%以上隠れる鋭い閉眼の回数を記録して瞬目率とした(図5)。被験者MAはWakeful条件での瞬目率が他の被験者に比べて高い水準で安定しており、Drowsy条件よりも値が大きかった。一方被験者YMはDrowsy条件で瞬目率が高かった。両条件下において2分周期での瞬目率の増加と減少の反復が観察されたがDrowsy条件の12分以降ではこの反復が消滅し、緩徐眼球運動に移行した。また被験者SNはWakeful条件では閉眼が浅く、今回用いた閉眼の定義に基づく

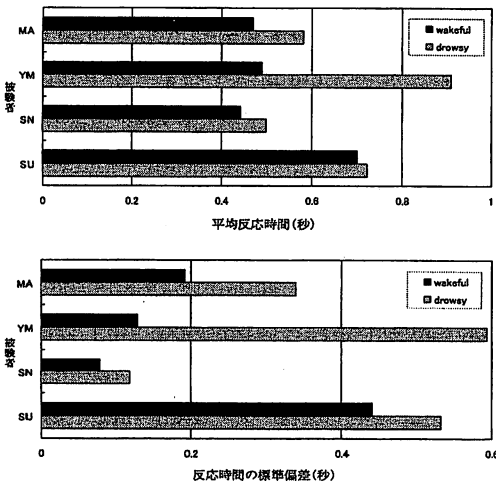


図4 ブレーキ反応時間の計測結果。

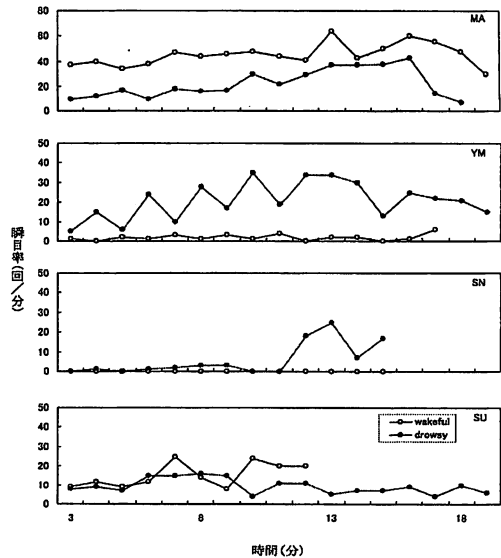


図5 瞬目率の経時変化。瞬目率の経時変化。横軸は実験開始からの時間(秒)、縦軸は1分間あたりの瞬目の回数を表す。

測定時間中の瞬目は0回であった。Drowsy条件では瞬目が深くなり、瞬目率が増加した。被験者SUでは両条件での瞬目率はほぼ同じであった。(Wakeful条件の11分以降はカメラ位置ずれにより無効となっている)

3.3 閉眼率

ここでは、最大接続領域の縦幅（画像の垂直軸に平行な方向に関する領域の長さの最大値）の1分間の平均に対して20%未満であるときを閉眼状態、それ以上であるときを開眼状態としたときの閉眼状態の割合を閉眼率とした。図6は閉眼率の経時変化を被験者別に示したものである。被験者MAはWakeful条件とDrowsy条件で違いが見られなかった。被験者YMはWakeful条件では1以下で安定しているがDrowsy条件では不安定で、また2分間の平均を取ると常にWakeful条件に比べて高い値を示した。被験者SNはWakeful条件では閉眼が記録されなかったので常に値は0で、Drowsy条件では12分経過後

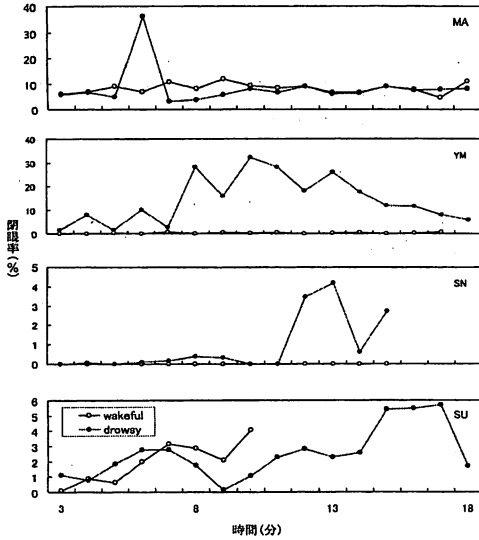


図6 閉眼率の経時変化. 横軸は実験開始からの時間(分), 縦軸は閉眼率を表す.



図7 結合領域の中心. 左: 開眼時は瞳孔の中心に一致する. 右: 上眼瞼が閉じると下方に移動する.

に値の急激な増加が見られた. 被験者SUは全体的に, 時間の経過に伴って値が増加する傾向が見られ, Drowsy条件の15分経過後にはWakeful条件の値に比べやや高い値を示した.

3.4 瞳孔・眼瞼影結合領域の変化

ここまでの結果を見てみると, 瞬目率や閉眼率による両条件間の判別は被験者YMとSNの結果には適用できるが被験者MAとSUの結果には適用できないといえる. そこで両条件を判別できる画像処理の可能性を探るため, 開眼時以外の接続領域についても検討することにした. これまで述べてきた開眼時の最大接続領域が瞳孔を表しているのに対し, 半閉眼時の接続領域まで含めると一般に最大接続領域は眼瞼の開

閉や下垂, 眼球の回転によって移動, 変形する瞳孔と眼瞼影の結合領域(以下結合領域)を検出しているといえる. したがって眼瞼と眼球の運動に表れる相互作用や全体的な変化を反映する可能性があると考えられた.

結合領域の中心(図7)が1フレームの間に垂直方向に移動した量について経時変化を調べたところ図8のようになった. 眼瞼が十分に開いているとき結合領域は瞳孔に一致し, 中心の移動量は眼球の回転速度を表している. そこで縦軸には結合領域の中心の移動量を眼球の回転に換算した値を取っている. また紙面に垂直な軸はフレームの枚数を1枚/30秒として時間に換算した値, すなわちそれぞれの速度での移動時間を表している. 4名ともWakeful条件では時間経過に対して安定した分布を示しているが, Drowsy条件では不安定で, 被験者MAと被験者YMでは断続的に移動の観測数の速度領域全体にわたる減少が見られ, また被験者SNと被験者SUでは断続的に低速な移動の減少が見られた.

4. 考察

結合領域の中心の移動速度は瞬目率や閉眼率とは異なる傾向を示し, 瞬目率や閉眼率には反映されない覚醒水準の低下を反映している可能性がある.

上眼瞼が定常的にやや下垂するか, あるいはやや眼球が上転して瞳孔の上部に少しかかる状態になると, 上眼瞼の影が瞳孔に連結して面積が急激に増加し, 結合領域の中心位置は瞬間的に上方へ移動する. 再度上眼瞼や眼球が元の位置に戻ると面積は急激に減少し領域の中心位置は瞬間的に下方へ移動する. すなわち, 目をはっきり見開いた状態とやや薄目加減の状態の繰り返しが結合領域の面積や中心位置の不安定な変化として検知される. 上眼瞼が定常的に瞳孔の半分にかかる程度まで下垂すると, 上眼瞼の影は消失するので結合領域には瞳孔だけが含まれるようになり, 上部は上眼瞼に遮られるので面積は小さく安定した値になる. こ

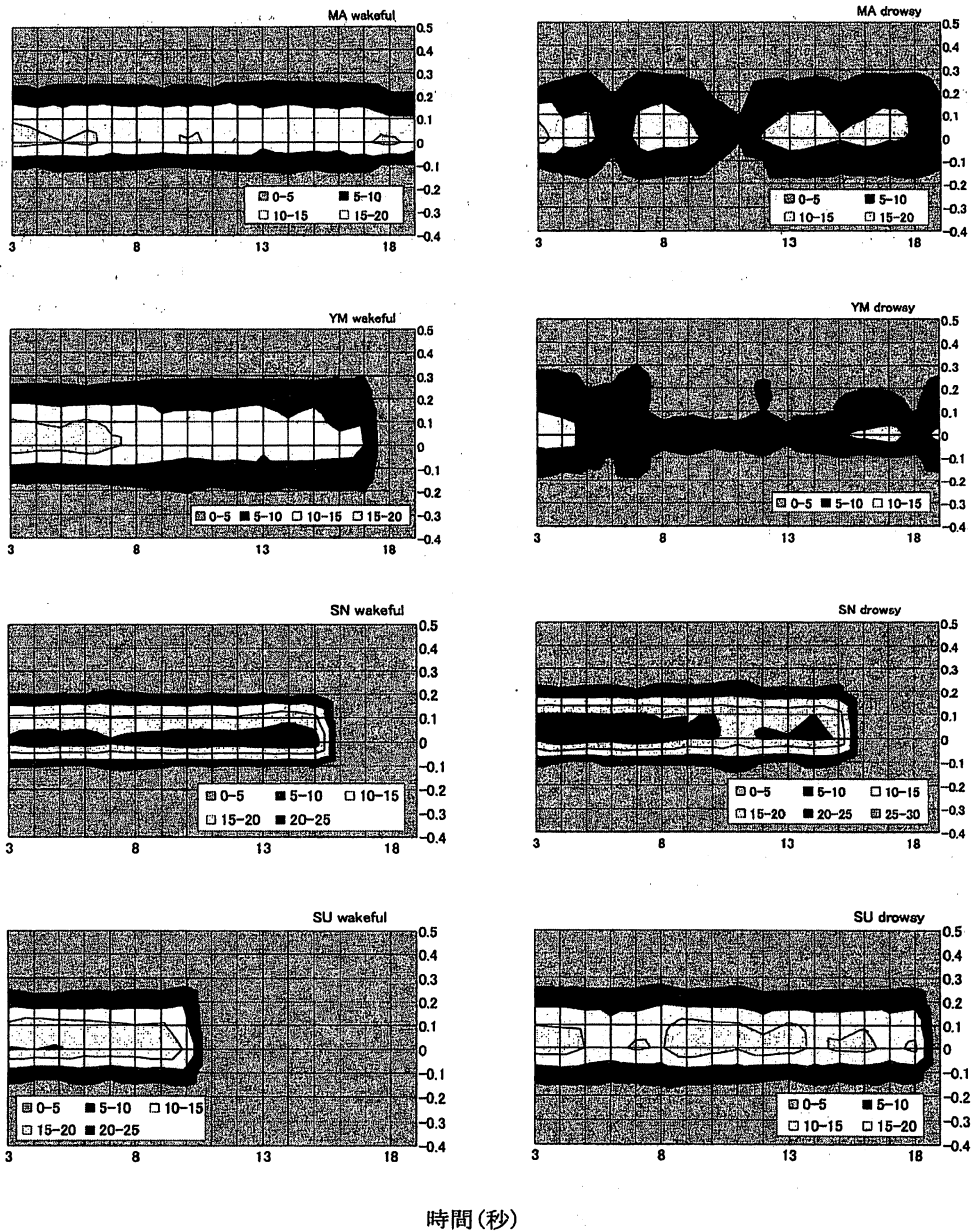


図8 瞳孔・眼瞼影結合領域の中心移動速度の分布の経時変化。横軸は実験開始からの時間(分), 縦軸はフレームあたりの垂直方向の移動速度(度/秒), 紙面に垂直な軸は度数(フレーム数)を表す。

の状態では結合領域の中心は主に瞬目によって上下するようになる。また、結合領域の移動には眼球の垂直方向の回転[10]も影響する。

被験者MAとYMのDrowsy条件では結合領域の中心移動速度の分布は不安定で全体的に山がなだらかに、すなわち低速になっている。結合領域の中心移動速度は眠気によって上眼瞼が下垂で安定したり、前庭動眼反射の鈍化によって眼球回転が減少したりすることで低下すると考えられる。しかし一方では瞬目の増加のほか、前方への集中力の低下によって車間距離が不安定になれば、注視対象である前方の車は見かけ上、上下に頻繁に移動することになり垂直方向の眼球運動の増加も発生し、結合領域の中心移動速度の変化の要因になっていると考えられる。

5. まとめ

瞬目率、閉眼率、結合領域の変化等について、ドライビングシミュレータを運転したときの覚醒水準を表す指標としての有効性を比較した。よりよい指標は被験者によって異なっていたが、瞳孔と眼瞼影の結合領域の中心の移動速度は瞬目率や閉眼率とは異なる変化を示し、覚醒水準との関連も示唆された。

参考文献

- [1] Drew, G. C. "Variations in reflex blink-rate during visual-motor tasks", *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 3, 73-88, 1951.
- [2] Summala, H., Hakkanen, H., Mikkola, T., & Sinkkonen, J. "Task effects on fatigue symptoms in overnight driving", *Ergonomics*, 42(6), 798-806, 1999.
- [3] 末永一男・後藤賢二・山下良禧 "自動車運転中の意識レベルと閉暗係数", *久留米医学会雑誌*, 31(6), 575-581, 1968.
- [4] Hakkanen, H., Summala, H., Partinen, M., Tiihonen, M., & Silvo, J. "Blink duration as an indicator of driver sleepiness in professional bus drivers", *Sleep*, 22(6), 798-802, 1999.
- [5] Dinges, D. F., Mallis, M. M., Maislin G., & Powell, H. W. "Evaluation of techniques for ocular measurement as an index of fatigue and as the basis for alertness management", *National Highway Traffic Safety Administration Final Report*, DOT HS 808 762, 1998.
- [6] Lawson, R. W. "Blinking: its role in physical measurements", *Nature*, 161(4083), 154-157, 1948.
- [7] Lawson, R. W. "Photographic evaluation of blackout indices", *Nature*, 162(4118), 531-532, 1948.
- [8] Matsuki, Y., Matsunaga, K., & Shidoji, K. "New driving simulator system for discerning suitable headway", *Proceedings of International Conference on Traffic and Transport Psychology 2000*.
- [9] 松永勝也 "交通事故の発生原因についての一つの考察", *九州心理学会第46回大会発表論文集*, 42, 1985.
- [10] Miles, W. R. "Horizontal eye movements at the onset of sleep", *Psychological Review*, 36, 122-141, 1929.