

技術論文

眼球運動を指標とした注意・覚醒度状態の検知技術

和久井 秀樹
Hideki Wakui

概要

眼球運動には注意・覚醒度の状態が良く現れる。近年における映像・画像処理技術の進歩により、眼球運動を非接触かつ非拘束で測定することも現実的となってきた。こうした知見や技術を活用することで、自動車走行中のドライバの注意・覚醒度の状態をリアルタイムに把握することが可能になるものと考えられる。

1. はじめに

交通事故は様々な要因により引き起こされる。その代表的な要因のひとつが、ドライバの注意・覚醒度の低下である。今後、自動運転車が市場に投入されることになれば、こうしたドライバ状態に起因する事故は減少するものと考えられる。しかしながら、自動運転車であってもドライバに運転権限が委譲される場面は必ずある。その際には、事前にドライバ状態を把握しておき、安全かつ迅速に権限移譲を行うための準備を整える必要がある。このような背景から、ドライバの注意・覚醒度の状態をリアルタイムに検知する技術の開発を進めている。

注意・覚醒度の指標として注目したのは眼球運動である。最近では、映像・画像処理技術の進歩が著しく、眼球運動と注意・覚醒度との関係性を詳細に評価することが可能となってきた(図1:ドライビングシミュレータ実験)。本稿では、そうして明らかとなった各種眼球運動(サッカド運動、前庭動眼反射、輻輳性眼球運動)と注意・覚醒度との関係性について概要を紹介する。

2. 覚醒度の基準としての瞳孔サイズ

眼球運動と覚醒度の関係を評価するためには、覚醒度の基準となる指標が必要である。その基準として瞳孔

サイズを用いた。瞳孔は自律神経系の支配を受けており、主に交感神経支配の瞳孔散大筋(散瞳筋)と副交感神経支配の瞳孔括約筋(縮瞳筋)によってそのサイズが調節される。瞳孔サイズの変化は、環境光の変化に対応して生じることが一般に良く知られており(対光反応)、また注視対象までの距離変化に対する応答としても生じることが確かめられている(近見反応)¹⁾。それに加え、覚醒・睡眠の調節に密接に関わるとされる脳内青斑核²⁾のニューロン活動と相関の高い変化を示すことがサルを用いた実験で明らかとなっている³⁾。図2は、ドライビングシミュレータ(DS)において走行映像を見ながら単純

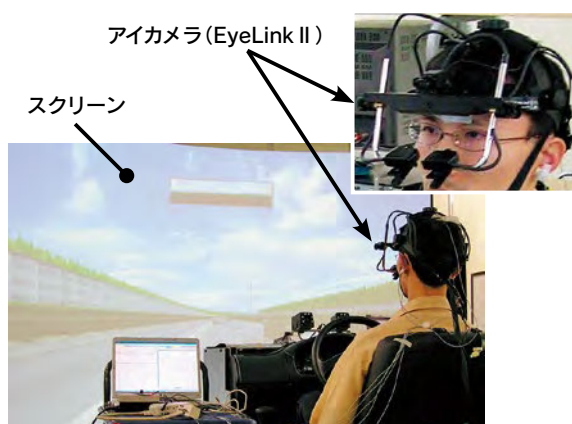


図1 ドライビングシミュレータ実験

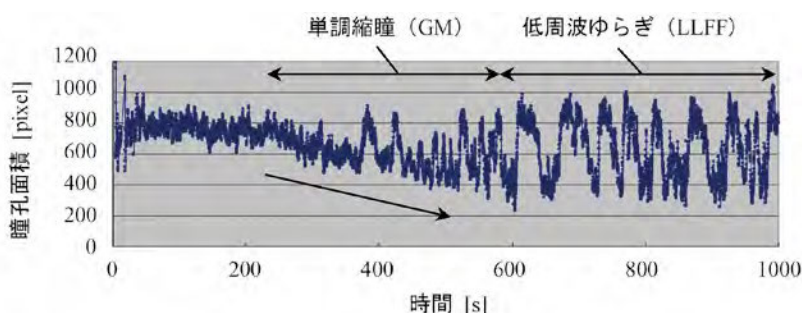


図2 単純反応実験における瞳孔面積の時間変化

反応実験を行ったときの瞳孔面積の時間変化の事例である。瞳孔面積は、アイカメラで測定した画素数として示されている。眠気を自覚しているときには、瞳孔サイズは低周波ゆらぎ (large low frequency fluctuation: LLFF) を呈する⁴⁾⁵⁾。LLFFとは、覚醒低下による縮瞳とそれに対する葛藤によって生じる散瞳が数十秒周期で繰り返される現象と考えられている⁴⁾。また、覚醒状態から眠気の自覚に至る間の覚醒低下時には、LLFFに先行して単調な縮瞳を生じることが確かめられている (gradual miosis : GM)⁴⁾。これらの報告から、DS実験など、環境光と視対象までの距離が統制された条件下では、瞳孔サイズは覚醒度の基準になりうるものと考えられる。

3. 注意・覚醒度状態と各種眼球運動の関係性

3.1 サッカー運動

サッカー運動とは、視野の周辺に出現または存在する対象物を網膜中心窩で捕らえるための眼球運動である。これは随意的または不随意的にも誘発され、一般には左右眼が協調し、同時かつ同方向へ急速に移動する特徴を示す。図3は、サッカー運動およびその一階微分によって得られるサッカー運動の速度波形の一例である。覚醒時には、サッカー運動の最高速度 (図3 peak velocity : PV) が振幅とともに増加する。例えば振幅が5degのサッカーであれば約250deg/s、振幅が20degのサッカーであれば約650deg/sになる⁶⁾。ただし、この振幅とPVの関係性には大きな個人差がある。また、あるサッカーと次のサッカーの間の時

間 (図3 inter-saccadic interval : ISI) には、中心窩で捕らえた対象物を視認するための眼球停留が存在する。その時間として、少なくとも150~300msが必要であるといわれている⁷⁾。

眠気を自覚したときには、水平サッカー運動のPVとISIに瞳孔の低周波ゆらぎ (LLFF) と同期した変化が観察される⁸⁾。LLFFの発生時には、図4に示すDS実験の結果のように、瞳孔面積の減少 (すなわち覚醒度の低下) に伴い、PVは低下、ISIは短縮する傾向を示す。瞳孔面積の減少が進行すると、振幅の小さな (<2deg) 水平サッカー運動が短い時間間隔で生じる現象が観察されるようになり、PVは40deg/s未満まで低下、ISIは

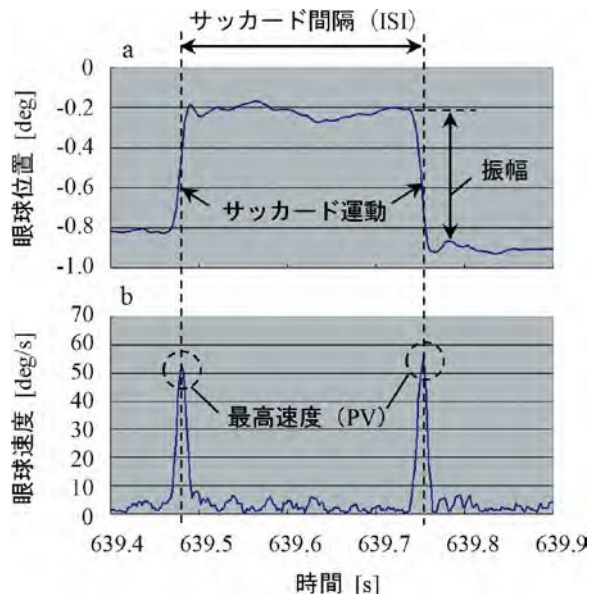


図3 サッカー運動(a)およびその一階微分によって得られる速度波形の絶対値(b) (和久井ほか 2013⁸⁾より許可を得て転載)

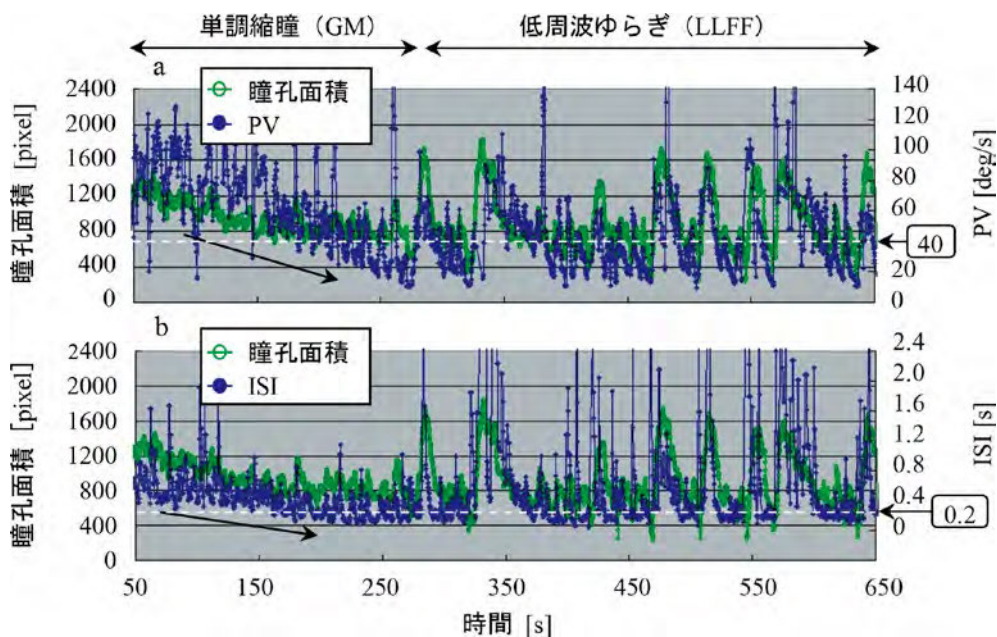


図4 単純反応実験における瞳孔面積とPVの関係(a)および瞳孔面積とISIの関係(b) (和久井ほか 2013⁸⁾より許可を得て改変、転載)

0.2s未満まで短縮する⁸⁾。こうした現象は、瞳孔面積が最小値付近まで減少してからしばらく観察され、やがてサッカード運動は消失する。その消失タイミングと前後して、眼球が主に水平方向に緩徐に移動を続ける緩徐運動が発生する(slow eye movement : SEM)。何らかの要因で覚醒度が増して瞳孔面積が増加すれば緩徐運動は消失し、再びサッカード運動による視線移動が行われる⁸⁾。

水平サッカード運動の変化は、眠気が自覚されない程度の覚醒低下時にも観察される。図4に示すように、水平サッカード運動のPVは、覚醒低下を反映する瞳孔の単調縮瞳(GM)と同調して低下、ISIは短縮することが確かめられている⁸⁾。(和久井ほか 2014⁹⁾より改変、転載)

3.2 前庭動眼反射

頭部に揺れを生じる場面においては、前庭動眼反射(Vestibulo-Ocular Reflex : VOR)が誘発される。前庭動眼反射は、前庭器官により検出される加速度刺激によって不随意に生じる眼球運動であり、視野のブレを防ぐために、頭部運動とほぼ同じ速さで逆方向に眼球が回転することを特徴とする。覚醒時のヒトでは、眼球回転速度/頭部回転速度で定義されるVORゲインは水平・垂

直性VORともに0.8程度になることが示されている¹⁰⁾。また、垂直性VORについては、DS条件下で評価された例があり、覚醒時のVORゲインがほぼ1となることが見出されている¹¹⁾。このことから、VORは注視点や視野のブレを防ぐのに十分な性能を持つものと考えられる。

眠気を自覚すると、VORのゲインとバラツキ(眼球速度を頭部速度の一次式で近似した際の残差標準偏差)に変化が生じる。図5には、鉛直方向に $\pm 5 \sim 30 \text{ deg/s}$ の周期的頭部運動が生じる環境下でDS走行を行ったときのVORのゲイン(G_{VOR})とバラツキ(SD_{res})の時間変化の事例を示す。ここで、 $\pm 5 \sim 30 \text{ deg/s}$ の周期的頭部運動とは、走行する自動車内での振動環境を模擬したものとなっている。この実験では、眠気自覚後に、被験者の75%において、実験開始時からのVORゲインの減少率が25%以上となり、94%の被験者では、実験開始時からの残差標準偏差の増加率が25%以上となった。これらの変化は、統計的にも有意であった¹¹⁾。

一方、図5に示すように、各被験者のそれぞれ8分以前、6分以前の眠気自覚前においても、既にVORゲインは低下、バラツキは増加傾向を示し始めている。この実験では、眠気を自覚した全ての被験者において、これらの変化が眠気を自覚するよりも前に出現することが示さ

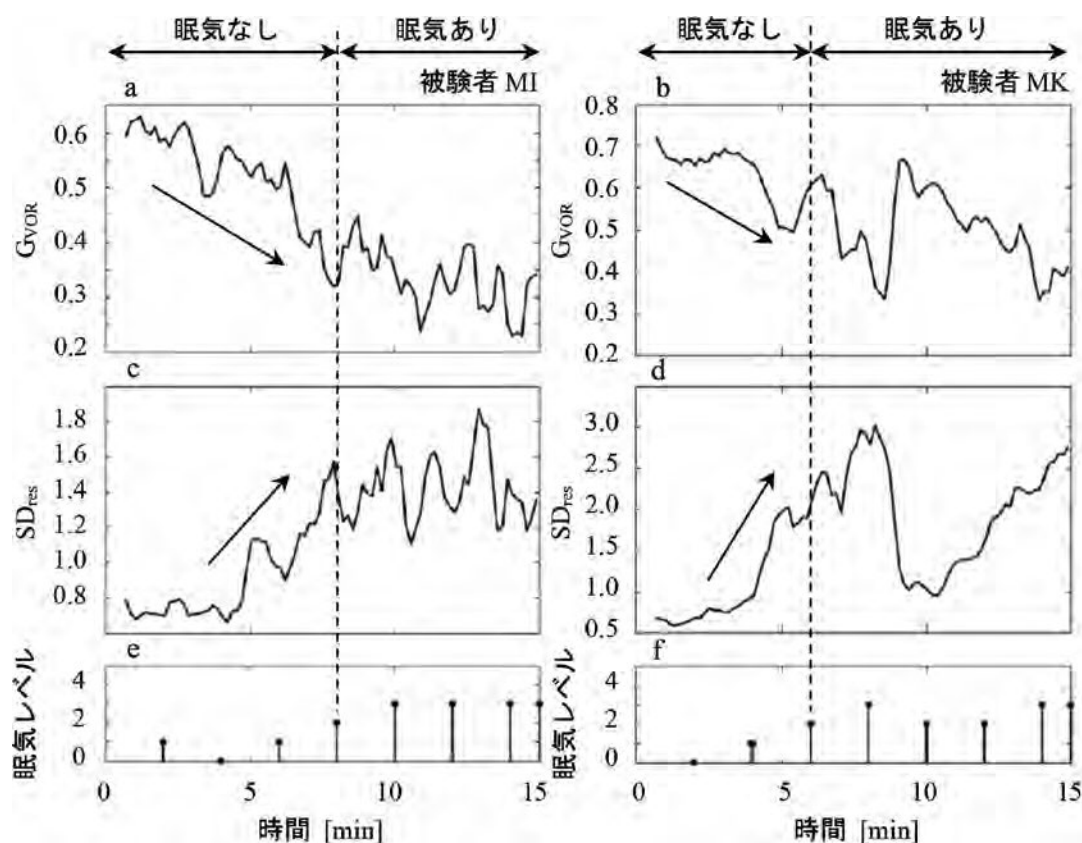


図5 単調なドライビングシミュレーション中のVORのゲインとバラツキの時間変化
(主観的眠気レベルの時間変化(e),(f)において、Level 2以上が眠気自覚有を示す)
(西山ほか 2010¹¹⁾より許可を得て転載)

れている¹¹⁾。こうした結果から、VORは眠気を自覚する前の覚醒度の低下を反映するものと考えられる。(和久井ほか 2014⁹⁾より改変、転載)

3.3 輻輳性眼球運動

輻輳性眼球運動とは、注視点距離の変化に応じ、左右の視軸間の角度を変化させる眼球運動である。その機能は、注視点を左右両眼の網膜中心窩で捉えて融像させることにある。一般に、注視点が近づけば左右の視軸間の角度を増加するための輻輳運動が生じ、注視点が離れば左右の視軸を平行に近づけるための開散運動が生じる。また、輻輳性眼球運動と瞳孔サイズの間には近見反応の関係があり、覚醒時においては輻輳運動に付随して瞳孔は縮瞳する¹⁾。

眠気の自覚時には、こうした輻輳角と注視点距離あるいは瞳孔サイズとの関係性に変化を生じることが明らかとなっている¹²⁾。図6は、ドライビングシミュレータ(DS)において、走行映像を見ながら単純反応実験を行ったときの瞳孔面積と輻輳角の時間変化を重ねて示したものである。輻輳角は0degを正位(両眼の視線が平行になる状態)とし、輻輳方向をプラス、開散方向をマイナスとしている。眠気が自覚され、瞳孔の低周波ゆらぎ(LLFF)が生じたときには、視対象(DSのスクリーン)ま

での距離が一定である条件下でも、輻輳角が瞳孔面積変化にはほぼ同期してゆらぎを生じる。このとき、LLFF中の瞳孔面積減少に対し、輻輳角は近見反応とは逆に開散する(図6 (b) 開散運動)。さらに、左右の視線はこのとき平行以上にまで開く(輻輳角が負となる)特徴を示す。また、瞳孔面積が極小値付近まで減少したときには、輻輳角は短い周期で変動することも見出されている(図6 (b) 輻輳変動)。このような短い周期での輻輳角の変動(fluctuation of vergence angle : FVA)は、視線移動のためのサッカード運動が消失し、眼球緩徐運動(SEM)が発生すると同時にまたはやや遅れて生じることが確かめられている¹²⁾。なお、SEMとFVAが同時発生している時には、目が開いていても周囲が見えていないか、または二重像や調節の異常を自覚していることが報告されている¹²⁾。このことから、SEMとFVAの同時発生時には、覚醒度が顕著に低下しているものと考えられる。

輻輳性眼球運動には、眠気が自覚されない程度の覚醒度低下も反映される¹²⁾。DS実験では、瞳孔の単調縮瞳(GM)が生じたときに、これと同調して輻輳角が適正值から開散方向に徐々にズレていくことが示されている。また、視覚的注意の意識付けと輻輳角の関係を評価した実験では、注視時に両眼の視線が固視点の方向を向

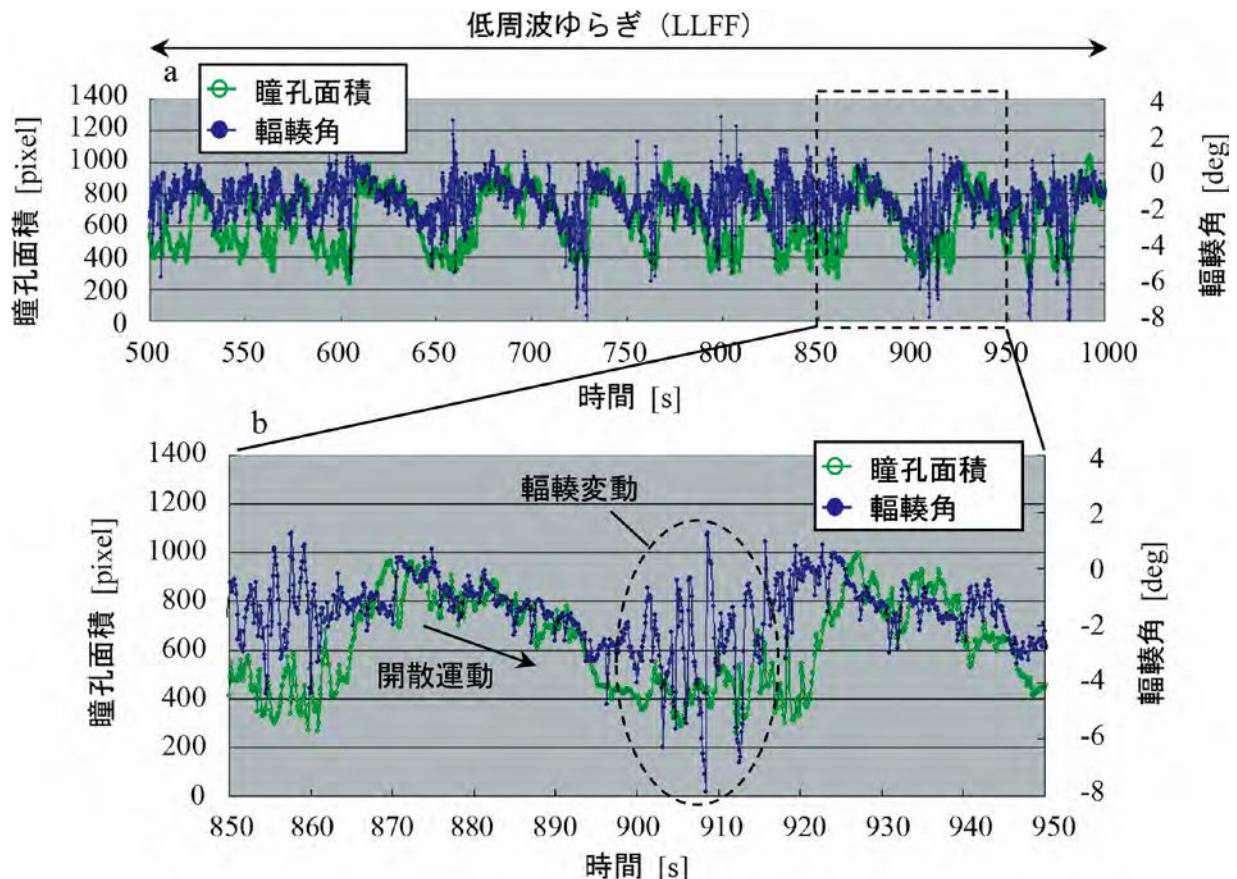


図6 単純反応実験における瞳孔面積と輻輳角の関係
(和久井ほか 2011¹²⁾より許可を得て転載)

くのに対し、リラックス時には片眼の視線が固視点を外れ、左右の視線が平行以上に開くことが確かめられている¹²⁾。しかしながら、左右の視線が全く異なる方向を向いた状態であっても、覚醒状態と同様、見え方の異常は自覚されない¹²⁾。片眼からの視覚像に注意を向けることによって、二重視を知覚しないものと推測される。(和久井ほか 2014⁹⁾より改変、転載)

4. おわりに

本稿では、ヒトの注意・覚醒度状態と各種眼球運動(サッカード運動、前庭動眼反射、輻輳性眼球運動)との関係性について概要を紹介した。ここで取り上げた知見は、いずれもヒトの注意・覚醒度状態が眼球運動に良く反映されることを示している。今回は主にDS実験で得られた知見を紹介したが、視野制限のほとんどないアイカメラを用いた実車実験により、実車環境での再現性評価も行っている¹³⁾¹⁴⁾。これらの評価では、DSとは異なり、奥行き情報を有する環境下でも、先に述べた輻輳性眼球運動に関する知見が再現されている¹³⁾¹⁴⁾。最近では、映像・画像処理技術の進歩が著しく、自動車内における非侵襲・非接触での眼球運動計測が現実的となってきた。今後は、このような技術の進歩を背景に、実験室で見出された目に関わる多くの知見が実用場面でも活用され、交通事故の低減や、安全かつ迅速な運転権限の移譲に貢献できるようになるものと期待される。

参考文献

- 1) 鵜飼一彦: 瞳孔・視覚情報処理ハンドブック, pp. 25-32, 朝倉書店(2007)
- 2) 北浜邦夫: 脳と睡眠, pp.45-48, 朝倉書店(2009)
- 3) Aston-Jones G, Cohen J : An integrative theory of locus coeruleus – norepinephrine function : adaptive gain and optimal performance・Annu. Rev. Neurosci, 28, pp.403-450 (2005)
- 4) 西山潤平, 谷田公二, 楠見昌司, 平田豊: 瞳孔ゆらぎを指標とした覚醒度状態評価・生体医工学, 46(2), pp.212-217 (2008)
- 5) Lowenstein O, Feinberg R, Loewenfeld IE : Pupillary movements during acute and chronic fatigue・Invest Ophthalmol Vis Sci, 2(2), pp.138-157 (1963)
- 6) Bahill AT, Brockenbrough A, Troost BT : Variability and development of a normative data base for saccadic eye movements・Investigative Ophthalmology and Visual Sciences, 28(1), pp.116-125 (1981)
- 7) 山上精次: サッカードと追跡眼球運動の初期発達について・基礎心理学研究, 7(2), pp.71-83 (1988)
- 8) 和久井秀樹, 平田豊: サッカード運動を指標とした覚醒低下検知・生体医工学, 51(6), pp.328-341 (2013)
- 9) 和久井秀樹, 平田豊: 眼球・瞳孔運動に現れる覚醒状態とその神経機構・日本神経回路学会誌, 21(1), pp.20-31 (2014)
- 10) Paige GD : Senescence of human visual-vestibular interactions. Smooth pursuit, optokinetic, and vestibular control of eye movements with aging・Exp Brain Res, 98(2), pp.355-372 (1994)
- 11) 西山潤平, 木下伸一, 平田豊: 前庭動眼反射による眠気予兆検出・生体医工学, 48(1), pp.1-10 (2010)
- 12) 和久井秀樹, 平田豊: 輻輳角を指標とした漫然状態検知・生

体医工学, 49(5), pp.693-702 (2011)

13) 和久井秀樹, 平田豊: 輻輳角を指標とした漫然状態検知技術の実用性評価・自動車技術会学術講演会前刷集, 95(12), pp.13-16 (2012)

14) 和久井秀樹, 平田豊: 輻輳角を指標とした漫然状態検知技術の実用性評価(第2報)・自動車技術会学術講演会前刷集, 89(13), pp.15-18 (2013)

筆者



和久井 秀樹

先進技術開発部 開発G
生体の計測と評価に従事