

Random Forest によるマイクロサッケードが不要な眼球指標からの 覚醒度合い判定手法の開発

高島 聡[†] 堀江和正[‡] 阿部 高志^{§||} 北川博之[§]

[†] 筑波大学大学院 理工情報生命学術院 システム情報工学研究群 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

[‡] 筑波大学計算科学研究センター 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

[§] 筑波大学国際統合睡眠医科学研究機構 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

^{||} 宇宙航空研究開発機構 宇宙医学生物学研究グループ 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

E-mail: [†] s.takashima@kde.cs.tsukuba.ac.jp, [‡] horie@cs.tsukuba.ac.jp,

[§] abe.takashi.gp@u.tsukuba.ac.jp, kitagawa@cs.tsukuba.ac.jp

あらまし 本研究では、交通事故等の要因になる「覚醒度の低下やその度合い」を眼球指標から推定する手法を提案する。これまでに提案されている覚醒度の計測手法は、一般的なカメラでは計測が困難な「マイクロサッケード」という眼球情報を用いており、一般への普及は困難だった。本研究では、比較的安価な計測機器でも取得できる眼球指標から覚醒度を直接推定することで、一般に広く普及可能な手法を目指す。マイクロサッケードの代わりとして、サッケード相対速度やサッケード持続時間などを採用し、結果としてマイクロサッケードを用いない場合と同等の精度で覚醒度を推定できることを確認した。

キーワード 覚醒度, 眠気, 疲労, 眼球運動, ランダムフォレスト

1. 序論

覚醒度とはどの程度目がはっきり醒めているかという生理的な喚起状態を表す度合いを意味する[1]。睡眠不足や断眠による覚醒度の低下は交通事故といった重大な事故につながりうることから、注意が必要となる。また、慢性的な睡眠不足により、本来は覚醒度が低下しているにもかかわらず、自身では覚醒度が低下していないと錯覚する、といったように客観的な覚醒度の低下・変化を主観的にとらえることは難しい。これら主観・客観の乖離を踏まえると、客観的な覚醒度を監視・管理し、運転者や作業者への注意喚起を行うシステムが必要と考えられる。

一般に、覚醒度合いを客観的に測定する方法として、精神運動ヴィジランス課題（PVT：Psychomotor Vigilance Test）（図1, 2）がある[2,3,4]。本検査では、被験者に提示される視覚刺激に対してなるべく早く手元のボタンを押すように指示される。視覚刺激からボタン押下までの時間（反応速度）をもとに覚醒度を評価することで、主観に頼らない覚醒度合い計測を実現している。しかしながら PVT では、被験者はディスプレイを見続けなければならない、運転中や機械作業中などに本検査を実施することは難しい。重大事故を避けるという目的を踏まえると、PVT そのものよりも、作業中に測定可能な他の指標から PVT の検査結果（反応速度）を推定する手法が望ましいだろう。

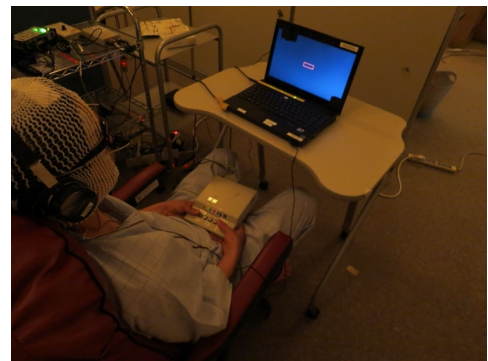


図 1 PVT 検査の様子[5]

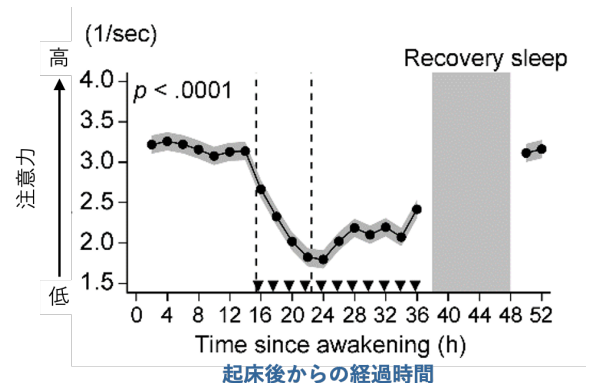


図 2 PVT 検査と断眠時間の関係[5,6]

PVT との関連や、リアルタイム測定可能といった観点から、本研究では「眼球指標」に着目した。眼球指標は瞼の開き具合や瞬き、目の動きなど、目に関する動きから得られる情報のことを指し、一部を除き、非接触なデバイスで容易に計測できる。眼球指標から PVT の成績を推定する手法は、既に Abe ら [6] により提案されている (PVT-E)。PVT-E では、覚醒度の低下をなるべく早期の段階で検出できる眼球指標を、PVT 検査結果を三段階に分けたときに有意差が見られるかどうかで特定し、有効と思われる眼球指標から覚醒度を、ベイジアンを用いて推定している。本手法の問題点としては、入力としてマイクロサッケード [7] を採用していることが挙げられる。マイクロサッケードは非常に細かい眼球的動きであり、計測に高価なウェアラブルデバイスを必要とする。このことが実用・普及の大きな課題となっている。

また、眼球指標を一切使わない手法としては、睡眠 2 プロセスモデル (後述) もあるが、本手法は断眠を伴う PVT 検査を通じて個人の睡眠特性を把握する必要がある、こちらもあまり実用的とは言えなかった。

以上を踏まえ本研究では、マイクロサッケードを用いることなく、PVT の反応速度を直接推定するモデルの開発を目的とする。本研究では、非線形な回帰モデルとして優れた成績を示している Random Forest [8] に着目した (以下 RF)。RF は複数の入力の相互作用を考慮できるだけでなく、入力特徴量の有効性 (重要度) を簡単に数値化することも可能である。そこで、多種多様な眼球指標 (瞬目回数や目の動きの速さなど) を集計した上で RF に入力し、マイクロサッケードに代わる有用な眼球指標の探索と、探索した眼球指標を用いた PVT 反応速度推定モデルの開発と精度検証を行う。

2. マイクロサッケード

サッケードは、眼球の小刻みで高速な動きのことをいう。サッケードの中でもより細かい動きのものをマイクロサッケードと呼び、眼球の振幅が 1 度未満のものと定義される [7]。マイクロサッケードは固視状態において発生する動きであり、覚醒度と相関があるとされる。なお、マイクロサッケードは非常に細かい目の動きであるため、測定に高価なデバイスが必要である。例として Abe ら [6] はマイクロサッケード取得のためにアイトラッカー (EMR-9, 株式会社ナックイメーグテクノロジー) を使用しており、サンプリングレートが 240.21Hz と、非常に機敏な動きが測定できるデバイスとなっている。

2.1. PVT-E (Abe et al. 2020)

PVT は運転時や機械作業中といった場面においては、作業を中断しないで計測することは困難である。また、

作業中は刺激が多く、覚醒度が頻繁に変化しやすい。そのため、リアルタイムで PVT の成績を推定することが重要となる。

この課題を解決するために Abe らは、16 人の被験者に対して、38 時間の断眠実験中に PVT と眼球指標を 2 時間ごとに同時測定を行い、測定された PVT の成績を 3 段階に分類し、それぞれのカテゴリの出現確率を、PERCLOS や瞬き持続時間、マイクロサッケード比といった、複数の眼球指標からベイズをもとに推定するというアルゴリズムを開発した。本アルゴリズムでは我々の再現実験において 3 値分類で 73% の精度で PVT 成績の推定ができることが確認できた。しかしながら、覚醒度を 3 つのカテゴリに大別しており覚醒度合いの詳細さが低い、マイクロサッケードを用いており高価なデバイスが必要であるという、実用性に欠ける課題が残った。

2.2. 睡眠の二過程モデル (two process model)

本モデルは、眠気の調整が 1 日の睡眠リズム (サーカディアンリズム) と、身体状態の維持機構 (ホメオスタシス) の兼ね合いで表されるというものである [9]。

本数理モデルについて、以下簡潔に示す [10]。まず、ホメオスタシス $S(t)$ は時間 t に対し

$$\frac{dS(t)}{dt} = \begin{cases} \frac{U - S(t)}{\tau_w} & \text{wakefulness} \\ \frac{S(t) - L}{\tau_s} & \text{sleep} \end{cases}$$

と表される。 $wakefulness$ は起床時、 $sleep$ は睡眠時を意味する。ここで、 U は上側漸近、 L は下側漸近、 τ_w は起床時の関数での時定数、 τ_s は睡眠時の関数での時定数を表す。

続いて、サーカディアンリズム $C(t)$ は時間 t に対し

$$C(t) = \sum_{i=1}^5 a_i \sin \left\{ i \frac{2\pi}{\tau} (t + \phi) \right\}$$

と表される。 a_i は振幅を表し、値が決まっている。 τ は周期 (通常は 24 時間)、 ϕ は概日位相を表す。

以上、 $S(t)$ と $C(t)$ から、パフォーマンスレベル $P(t)$ は、時間 t に対して

$$P(t) = S(t) + \kappa \times C(t)$$

と表すことができる。 κ はサーカディアンプロセスの影響度合いを表す定数である。

睡眠リズムや維持機構の働きには個人差があるため、本来は個人から覚醒度合いのデータを取得すること

で最適なモデルを構築すべきである．しかし実用上は困難であるため，**general** なモデルが用いられる．そのため，個人の覚醒度を推定するには精度が低い場合がある．

3. 提案手法

本研究では RF を用いた PVT 反応速度推定モデルを提案する．まず，有効であると考えられる特徴量を探索するために，一定時間で平均や分散，発生回数などに集約したマイクロサッケードを含まない眼球指標 55 次元を RF へ入力する．このモデルから得られる特徴量の重要度が 0.01 以上の眼球指標を抜き出して，これらを入力とする推定モデルを新たに構築する．比較としてマイクロサッケードありの特徴量を含む眼球指標 92 次元を RF の入力として，同様に眼球指標を抜き出して推定モデルを構築する．なお本提案手法では PVT-E と同様に，一定時間の眼球指標に対して 1 つの PVT 反応速度を割り当てる手法を開発した．

4. 実験

4.1. データセットと実験環境

本研究では，宇宙航空研究開発機構からご提供いただいた，38 時間の断眠を伴う PVT 検査中に計測された眼球指標と，PVT 検査結果を用いて評価実験を行った．被験者は健康な成人男性 16 名であり（20 歳から 49 歳），環境光の強さや食事など，厳正に管理された実験環境下のもとで行われた．被験者らは 2 時間毎に 20 分間 PVT 検査を行い，眼球指標を同時測定した．なお本データセットは Abe ら[6]で用いられたものと同様のデータである．本実験では，20 分間の PVT 検査を，1，2，4，5，10，20 分にそれぞれ分けて（デフォルト 20 分），その単位時間ごとに眼球指標を計算した．また正解データは，それぞれの単位時間の PVT 判定区間内の反応速度の中央値とした．なお，推定モデルの開発には Python3.7.6，scikit-learn を用いた．

4.2. 評価指標

本実験では評価指標として，実測値と推定値との級内相関係数（ICC）と二乗平均平方根誤差（RMSE）を採用した．

4.3. 比較手法

5.1 におけるデータセットを用いて，15 名分のデータで学習，残りの 1 人のデータでテストを行う 16 分割交差検証を実施した．マイクロサッケードありとなしのモデル比較では 1，2，4，5，10，20 分の単位時間ごとにそれぞれ行い，二過程モデルと提案手法の比較は 20 分でのみ実施した．なお，二過程モデルは断眠時のみの PVT 検査結果を用いて構築したため，比較も RF で断眠時を推定したデータのみで行った．眼球指標の重要度については，16 名分のモデルで出力されるそれぞれの重要度の中央値が 0.01 以上であるものを採

用することとした．

4.4. 実験結果

本節では，マイクロサッケードあり・なしのモデルでそれぞれ選択された眼球指標と精度比較，二過程モデルと提案手法との精度比較について実験結果を示す．

まず，マイクロサッケードあり・なしでのモデルについての精度比較結果を図 3，4 に示す．マイクロサッケードあり・なしについて，ウィルコクソンの符号付き順位検定を実施したところ，単位時間 1 分での ICC に有意差が見られた（ $p < 0.05$ ）が，マイクロサッケードなしの方が優位な結果となっていた．また，その他では有意差が見られなかった．そのため，マイクロサッケードを用いなくても，マイクロサッケードを用いた場合と同等の精度で PVT 反応速度を推定できると言える．ここで，マイクロサッケードあり・なしについて，重要度が 0.01 以上であった眼球指標を表 1，2 に示す．表 1,2 より，マイクロサッケードを含む眼球指標は **Peak to deceleration per acceleration to peak duration** であり，この眼球指標の代わりとして選択された眼球指標は **Peak to end duration per saccade duration**, **saccade duration**, **Peak velocity per amplitude** の 3 つであった．

最後に，二過程モデルと提案手法（マイクロサッケードなし）との比較結果を図 5，6 に示す．こちらについても 2 つの手法間でウィルコクソンの符号付き順位検定を実施したところ，RMSE と ICC とともに有意差が見られた（RMSE : $p < 0.01$, ICC : $p < 0.05$ ）．したがって，本提案手法が二過程モデルよりも個人の PVT 反応速度を精度良く推定できていると言える．

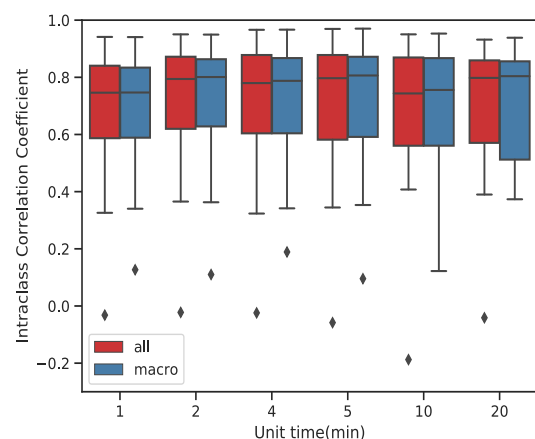


図 3 ICC（マイクロサッケード有・無）

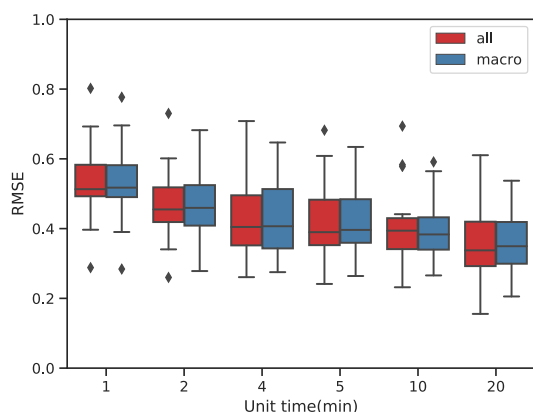


図 4 RMSE (マイクロサッケード有・無)

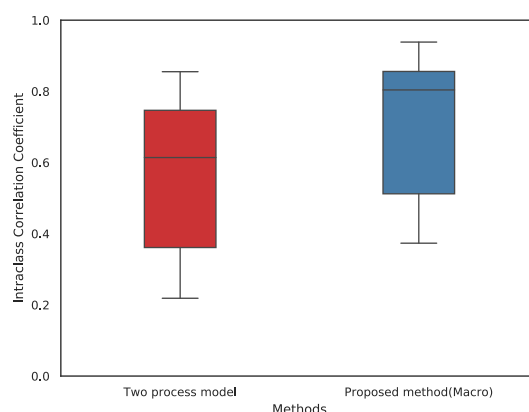


図 5 二過程モデルとの比較 (ICC)

表 1 特徴量 (マイクロサッケードあり)

特徴量 (マイクロサッケードあり)
PERCLOS(<15)
PERCLOS(<30)
PERCLOS(<25)
PERCLOS(<20)
PERCLOS(<10)
Percent of blink (-)
Percent of blink (+)
Amplitude(deg) (No microsaccades)
PERCLOS Right(%)
PERCLOS Both(%)
Number of blinks
Time after previous blink
Peak to deceleration duration / acceleration to peak duration

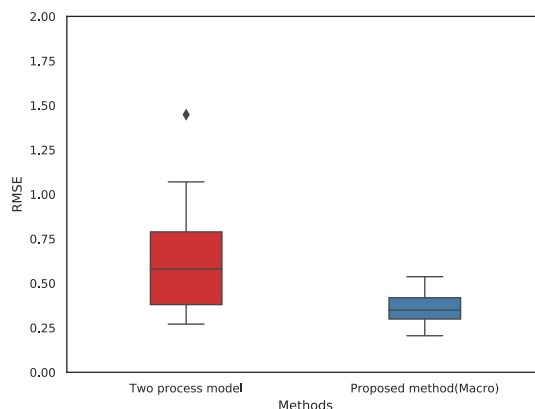


図 6 二過程モデルとの比較 (RMSE)

表 2 特徴量 (マイクロサッケードなし)

特徴量 (マイクロサッケードなし)
PERCLOS(<15)
PERCLOS(<30)
PERCLOS(<25)
PERCLOS(<20)
PERCLOS(<10)
Amplitude(deg) (No microsaccades)
Percent of blink (-)
Percent of blink (+)
Time after previous blink
PERCLOS Right(%)
PERCLOS Both(%)
Number of blinks
Peak to end duration / saccade duration (No microsaccades)
PV per amplitude (No microsaccades)
Saccade duraion (No microsaccades)

5. 考察

まず表 1, 2 より, PERCLOS や瞬きに関する眼球指標が複数選択されていることから, これらは非常に有効な特徴量であると考えられる. 特に PERCLOS については高い値重要度を示した. ここで表 1 より, マイクロサッケードを含む眼球指標として選択されたものは Peak to deceleration per acceleration to peak duration (以下眼球指標 P とする) であった. 眼球指標 P は眼球の動きが止まるときの加速度がどの程度であるか (遅くなっているのか) を意味する. これは覚醒度が低下しているほど, 小さい値を示す. 表 2 より, 眼球指標 P に対してマイクロサッケードを用いない眼球指標として, Peak to end duration per saccade duration, saccade duration, Peak velocity per amplitude が選択された. これら 3 つの眼球指標と眼球指標 P との相関係数を調査したところ, 非常に高い相関が見られた (0.83, 0.81, 0.76). これら合計 4 つの眼球指標は目の動きの速さに関連する指標となっている. 仮説ではあるが,

覚醒度が低下することで素早く目を動かすことが難しくなり、この情報が、これら4つの眼球指標に現れているのではないかと考える。以上より、マイクロサッケードなしのモデルでは眼球指標Pの代わりとして3つの眼球指標が選ばれたと考えられる。

6. まとめと今後の展望

本研究では、マイクロサッケードを用いないPVT反応速度推定モデルを提案した。結果として、マイクロサッケードがなくてもマイクロサッケードを使用した場合と同程度の精度で推定できることが示された。また、generalな睡眠二過程モデルよりも高い精度で、PVTの反応速度を推定することができた。今後の展望としては主に2つある。1つ目はより短い時間単位での精度向上である。時間単位が短くにつれ、精度が低下してしまった(RMSE)。これは短い時間単位でデータを集約することによって、欠損値・外れ値の影響が大きくなってしまったためであると考えられる。短い時間単位においても精度良く推定するための特徴量探索やモデル選択などが必要になる。2つ目は将来的な覚醒度推移の予測である。現在では、ある時点における眼球指標からその時点における覚醒度合いを判定している。将来の覚醒度を推定することができれば、より早期の覚醒度低下検出が可能になり、実用上優れていると考えられる。そこで、本研究で提案した推定モデルに加え、睡眠二過程モデルを組み合わせることで、ある時点における眼球指標から、将来的な覚醒度推移を求められないかと考えている。

謝 辞

本研究は、宇宙航空研究開発機構・有人宇宙ミッション本部事業関連研究・運営費交付金「眼球関連情報を用いたヴィジランス評価法の開発」、科学研究費補助金・挑戦的研究(萌芽)(17K19639)「覚醒度のゆらぎの発生機序解明に向けた研究」及びAMED ムーンショット型研究開発事業(JP21zf0127005)の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- [1] 阿部 高志, 睡眠装置の現状と展望. 睡眠医療, Vol. 9, No. 1, pp. 55 - 61, 2015.
- [2] M. Basner and F.D. Dinges, "Maximizing Sensitivity of the Psychomotor Vigilance Test(PVT) to Sleep Loss, Sleep", Sleep, Vol. 34, No. 5, pp. 581 -591, 2011.
- [3] J. Lim and F.D. Dinges, "Sleep Deprivation and Vigilant attention", Ann N Y Acad Sci, Vol. 1129, pp. 305 - 322 2008.
- [4] N. Goel, M. Basner and F.D.Dinges, "Phenotyping of neurobehavioral vulnerability to circadian phase during sleep loss", Methods Enzymol, No. 552, pp. 285 - 308 2015.
- [5] 阿部高志, 眼球運動や眼瞼運動を統合したヴィジランス低下の状態推定法, 生理心理学会, 2020.
- [6] T. Abe, K. Mishima, S. Kitamura, et al., "Tracking intermediate performance of vigilant attention using multiple eye metrics", Sleep, Vol. 43, No. 3, pp. 1 - 17 2020.
- [7] S. Martinez-Conde, J. Otero-Millan, and S.L. Macknik, "The impact of microsaccades on vision: towards a unified theory of saccadic function", Nat Rev Neurosci, Vol. 14, No. 2, pp.83 - 96 2013.
- [8] L. Breiman, "Random Forests", Machine Learning, Vol. 45, No. 1, pp. 5 -32 2001.
- [9] A.A. Borbély, "A two process model of sleep regulation", Hum Neurobiol, Vol. 1, No. 3, pp. 195 - 204 1982.
- [10] P. Raidev, D. Thorsley, S. Rajaraman, et al., "A unified mathematical model to quantify performance impairment for both chronic sleep restriction and total sleep deprivation", Journal of theoretical biology, Vol. 331, pp. 66 - 77, 2013.