

生理指標計測による知的作業時の一時休息状態の検出

國政 秀太郎*¹ 宮城 和音*¹ 下田 宏*¹ 石井 裕剛*¹

Detection of Temporary Rest State while Performing Mental Works by Measuring Physiological Indices

Shutaro Kunimasa*¹ Kazune Miyagi*¹ Hiroshi Shimoda*¹ Hirotake Ishii*¹

Abstract – Several studies aimed at evaluating intellectual productivity and specially designed tasks were given. However, the result may not be reflected the actual intellectual productivity because the designed tasks are different from office works. Meanwhile, there are two mental states (work and temporary rest state) in office workers which are changing alternatively during mental work. If the mental states of the workers can be detected, the productivity can be measured more accurately. In this study, the authors aimed at developing a detection method of temporary rest state while performing mental works by measuring physiological indices such as EEG, ECG, and EMG of extraocular muscles and orbicularis oculi muscle. From these measured indices, the authors extracted 6 features which were alpha and beta brain waves, low and high frequency waves of heart rate, and the intervals of eye blink and saccade eye movement. They were used to detect a temporary rest state by using Mahalanobis Discrimination Analysis. As a result of the subject experiment, it was found that the detection accuracy was 80.2%. This result shows the possibility to use the physiological indices as one of the mental state detection methods.

Keywords : intellectual productivity, physiological psychology, EEG, ECG, eye blink

1. はじめに

近年、研究機関やオフィスなど様々な場で行われる作業は知的作業が中心となり、その価値は我々の社会で高まっている。したがって、経済的および社会的利益は知的作業の効率や正確さなどの知的生産性が向上すると共に増大していくと言える。知的生産性向上を目指すためにはその評価方法の確立が急務であり、既往研究が数多く行われてきた^[1-7]。しかし、それらの研究で採用されているタスクは実験用に設計されたものであり実際のオフィスワークとは異なっているため、オフィスの知的生産性が適切に評価されているとはいえない。

一方で知的作業執務者には、2つの認知状態(作業状態および一時休息状態)の存在が示唆されている^[8]。特に一時休息状態は作業を一時中断している状態であるため、知的生産性低下の要因となる。

ここで、知的生産性評価のための一時休息状態検出が可能で、かつ実際のオフィスワークを実施中に利用可能な手法として本研究では生理指標計測を検討した。生理指標は覚醒、集中、緊張およびストレスなどの認知状態を反映する指標であり、生理指標計測による人間の認知状態検出を目指す研究がこれまで数多く行わ

れている^[9-13]。したがって、これらは生理指標を用いた一時休息状態検出の実現可能性を示唆している。

本研究は、従来では実現困難であった実際のオフィスワーク環境下での知的生産性評価を可能とするため、知的作業執務者の一時休息状態を生理指標計測によって検出する手法を提案する。採用した生理指標は心電(ECG)、脳波(EEG)、左目の眼輪筋及び外眼筋のEMG(以降EMGと記した)の3種である。この検出手法が確立すれば、実験用タスクを用いることなく作業執務者の生理指標計測によって知的生産性評価ができ、実際のオフィス現場等での評価が可能になると期待される。

2. 関連研究

2.1 知的生産性研究

知的生産性とは、研究者によりその定義は様々であり^[1]、村上は知的作業の効率が知的生産性であると示唆している^[2]。また同様に、知的作業の定義も様々であるが、村上らの知的活動の階層モデル^[3]によると、知的作業は(1)知覚認知や判断・操作などの「情報処理」と、(2)知識情報の記憶や計算などの「知識処理」、(3)最後に価値創造やイノベーション、閃きなどの「知識創造」の3階層に分けられるとされ、オフィスワークなどの知的作業は「情報処理」や「知識処理」を扱うものが多いと言われている。

現在の高度情報化が進んだ社会において、人間が行

*1: 京都大学大学院 エネルギー科学研究科

*1: Graduate School of Energy Science, Kyoto University

う作業の多くが知的作業であり、知的生産性の重要度は高まっている。したがって、知的生産性向上を目指した環境設計などの取り組みが行われるべきであるが、その評価手法の確立はなされていない。特に、その定量評価は困難であり、近年の知的生産性研究はこの問題に焦点が当てられている。Wargockiら^[6]は、汚染物質や換気量などの空気質とテキストタイピング等の作業成績との関係を明らかにしている。また、知的生産性評価のためのタスク開発も様々な研究で行われており、DavidらはPAB^[7]と呼ばれる、脳の高次機能を評価するタスクを開発している。同様に下田らは^[4]タスクセットCPTOP、岩川らはCPTOP2^[5]を開発しており、知的生産性の定量評価ツールの確立を目指している。これらの開発されたタスクセットを用いることで、知的生産性向上を目指したワークスペース設計が期待される。しかし、評価実験のために用いられた多くのタスクは作業記録を簡便的にかつ正確に取得するために用いられているため、日々のオフィス現場などで行われているようなタスクとは作業内容が異なる。したがって、それらから得られる作業成績や作業記録も同様に異なる。これまでの研究ではタスクの作業記録から知的生産性を評価しているため、オフィスワークと異なる作業記録を出力するタスクを用いた実験を実際のオフィス環境で行う場合、得られた結果がそのオフィスの知的生産性を正確に表しているとは言い難い。オフィス等の知的生産性を評価する場合、その現場で行われるオフィスワークを用いることが望ましい。しかし、オフィスワークの多くは作業内容も作業記録も異なるため、評価手法が複雑になる恐れがある。たとえば文書作成や会議などの場合、作業処理時間のような定量的な記録だけでなく、文書や会議内容などの定量化が困難な記録も扱う必要があるため、知的生産性の評価が非常に困難である。

一方、Cardら^[14]は人間の認知特性を記憶および処理という2つのシステムに分類することで、人間情報処理モデルを提案している。このモデルにより、作業執務者の情報処理速度を理論的に導出できるため、宮城ら^[8]はこの理論値をパラメータ設定に用いた知的生産性変動シミュレータを開発し、さらに執務者の作業・一時休息モデルを提案している。宮城らのモデルによると、執務者は常に作業を行っているのではなく、2つの認知状態(作業状態および一時休息状態)を交互に遷移させながら作業を遂行しており、全作業時間におけるこれら2状態の割合によって知的生産性評価が可能であるとしている。しかし宮城らの研究では、認知状態はタスクの作業記録が取れる場合に限り検出が可能であるが、そうでない場合は検出不可能であることが問題となっている。そのため、実際のオフィス

環境下で行われる作業の記録が取得不可能である場合は、そのオフィスワークを用いた知的生産性評価が実施できない。従来の知的生産性研究は作業記録からの評価が多く^[1-7]、先述の問題が解決されていない。

本研究ではこの問題を解決するため、作業記録から知的生産性を評価するのではなく、執務者自身の認知状態を生理指標によって検出する手法を提案する。この手法により既往研究では困難であった、作業記録の取得不可能な作業を用いた執務者の認知状態検出が可能となるため、実際のオフィス現場で行われている作業の記録が取得不可能であっても、そのオフィスワークを用いた知的生産性評価が実施できると期待される。

2.2 生理指標計測

生理指標や表情、行動、声など、計測可能な人の様々な反応から、人間の心理を認識する研究は心理生理学の分野で多く行われており、特に多様な感情を知覚・認知するアフェクティブインタフェースの実現に大きく貢献している。PicardはこれをAffective Computingと提唱し、この分野の研究についての有用性、批判、展望を述べている^[11]。また、Parasuramanは、脳神経学から見た人の心理や知的作業のパフォーマンス評価を行う研究、Neuroergonomics^[12]を提唱し、人間の脳および他の神経系に注目した心理の検出を目指している^[13]。一方、Brain Computer Interfaceの分野においては脳活動を計測し、車椅子やロボットの制御などのインタフェースに利用する研究がなされており^[15]、近年では、脳が複数の作業を並列処理する状態を検出し、作業を補助するデバイスも開発されている^[16]。以上のような研究に加え、今後は更なる生理指標計測デバイスの発展が心理生理学の研究を大きく前進させると期待される。しかし、実際の知的作業環境を想定した研究は現在においても多いとは言い難い。特に知的作業時、常に変動し続けている人の認知状態の検出を行う研究は非常に少ない。一方でこれらの研究は、生理指標計測が認知状態検出における有効な手法の1つであることを示唆しており、また計測対象がタスクログではなく作業執務者自身の生理的反応であることから、生理指標を用いることでタスクログ取得が困難なオフィスワークが知的生産性評価に使用できる可能性がある。

本研究では、従来の生理指標研究では行われていなかった、実際の知的作業環境やオフィス環境下にある執務者の認知状態の検出手法を提案する。

3. 提案手法

3.1 生理指標を用いた一時休息状態の検出

提案手法で使用する生理指標は、その指標から抽出される特徴量が(1)執務者の作業遂行に並列してリア

ルタイムで非侵襲計測が可能であること、(2) 執務者の作業状態および一時休息状態の違いを反映し得ることが必要である。(1)を満たす指標は血圧、皮膚電気活動、心拍、脳波、筋電位などが挙げられる。更に、(2)に関して作業状態では執務者に精神的な緊張や交感神経の亢奮が見られ、一時休息状態では安静や副交感神経の亢奮が見られると考えられるため、交感・副交感神経を反映する血圧や、心拍変動^[18-20]、緊張や安静を反映する瞬目やサッケード運動^[21-23]、脳波の α 波、 β 波といった基礎律動^[24]は本手法に適切であると思われる。また、心拍や脳波、筋電位は電極装着での計測が可能であるのに対し血圧は困難であるため、本研究では計測機材を可能な限り少なくするために血圧を計測対象外とした。以上から、ECG、EEG、EMGの3指標を用いた。

しかし、作業状態および一時休息状態での生理指標の特徴は解明されていないため、本研究ではまず作業記録が取得可能なタスクを用いて事前に各2状態を検出した上で、生理指標をこの2状態検出に用いることができるか検討した。生理指標を用いた本手法によって状態検出が実現した場合、タスクの作業記録が取得可能・不可能によらず、生理指標が計測可能でさえあれば知的生産性評価が行えるため、様々なオフィスワークを用いた評価が可能になると期待される。

3.2 特徴量抽出

ECG

ECGから被験者の心拍時に生じるR波を検出し、その波形の間隔であるR-R間隔(秒)を算出した。後述の周波数解析を行うために等時間間隔ではないR-R間隔データを、3次のスプライン補間にてサンプリング周波数10Hzでデータ補間を行った。その後、心拍変動の低周波成分(0.04-0.15Hz)および高周波成分(0.15-0.4Hz)のパワーを導出した。前者はLF(Low Frequency)と呼ばれ、副交感神経の興奮を反映し、後者はHF(High Frequency)と呼ばれ副交感神経および交感神経の興奮を反映するとされている^[18]。各周波数成分を導出する際の手法として、Gabor Wavelet変換を採用した。これは時間周波数解析でよく用いられ^[19,20]、非常に短い時間窓を用いた特徴量抽出を可能とするため、時間分解能が高い。本研究では執務者の常に変動する状態(作業状態・一時休息状態)を検出するため、時間分解能は高い方が望ましい。Gabor Wavelet変換は以下の数式の通りである。

$$WT(b, a) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{t^2}{2} - i2\pi t} \quad (2)$$

ここで、 t は時間、 $f(t)$ は入力信号、 $1/a$ および b は変換後に出力されるスペクトル時系列データの周波数、時間にそれぞれ対応している。また、 $\psi(t)$ はGabor関数である。

EMG

瞬目時は眼輪筋が緊張し、サッケード運動時には外眼筋が緊張する。こめかみに負極、眉上に正極の電極を装着した場合、EMG波形には大小2種類のピークが検出されるが、ピークの大きい波形は主に眼輪筋の緊張を表し、小さい波形は外眼筋の緊張を表すと考えられるため、前者を瞬目時に発生するピーク、後者をサッケード運動時に発生するピークとした。本研究では、2波形を分類するため検出されたEMGピーク波形の電圧の平均値を閾値に設定した。この閾値を超えるピーク波形の時間間隔を瞬目の時間間隔、下回る波形の間隔をサッケード運動の時間間隔として計算した。これらの特徴量は人間の hoch 認知プロセスや心理状態を反映するものとして、多くの生理心理学の研究で用いられている^[21-23]。

EEG

取得したEEG信号からフーリエ変換を用いて、 α 波(8-13Hz)、 β 波(13-30Hz)の各周波数成分パワーの絶対値を導出し、これらを特徴量とした。EEGデータを用いて人間の認知状態を検出する研究の1例として、Chai^[24]らは複数の精神負荷作業時の認知状態検出を行っており、EEGデータによる状態検出が可能であることを示唆している。

3.3 検出手法とその評価手法

検出の時間分解能を可能な限り高めるため、抽出の時間間隔は短い方が望ましいが、一般に時間分解能と抽出精度はトレードオフの関係であり、生理指標の特性を検討した上で時間分解能を決定する必要がある。特にECGにおける心拍検出は他の生理指標に比べ長い時間を必要とする。人間の心拍は一般に新生児から成人になるにつれて拍数が減少していき、健全な成人は安静時1分間で53から95回の拍動が起こるとされている^[17]。したがって、心拍を検出するためには1秒前後の時間を必要とする。心拍の間隔を計算できなければ3.2節の心拍変動を導出することができないため、本研究では抽出の時間間隔を2秒に設定した。

抽出後は、特徴量を認知タスクの作業記録に基づいて、作業状態時のデータ群と一時休息状態時のデータ群に分別した。次に、これら2群間のマハラノビス距

離を導出し、判別確率を導出した。マハラノビス距離は多変量解析によく用いられ、ユークリッド距離を分散で標準化することで各々異なったオーダや分散をもつ多変量の相関を考慮したものである^[25]。本研究でも複数の生理指標から特徴量を抽出し、それらを変量として解析するためマハラノビス距離を導入した。マハラノビス距離 D^2 は以下のように定義される。

$$D_{12}^2 = (n + h - 2) \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p w_{ij}^{-1} F(i, j) \quad (3)$$

$$F(i, j) = (\overline{X_{i1}} - \overline{X_{i2}})(\overline{X_{j1}} - \overline{X_{j2}}) \quad (4)$$

ここで、 n , h は作業状態および一時休息状態下の1特徴量あたりのデータサンプル数である。 p は特徴量数であり、本研究では $p = 6$ である。 $\overline{X_{i1}}$, $\overline{X_{i2}}$ は作業状態および一時休息状態の i 番目の特徴量の平均値、 w_{ij}^{-1} は群内共分散行列の逆行列の要素である。次に、これらの特徴量が多変量正規分布であるなら、判別分析による誤検出率 (e) は、

$$e = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{D/2}^{\infty} \exp(-\frac{u^2}{2}) du \quad (5)$$

のように定義される。ここで、 $1 - e$ は判別確率である。この確率はマハラノビス距離 D が大きくなるに従い高くなる。逆にデータ群が完全に重なり $D = 0$ となる場合、式5から誤検出率 e は最大となりその値は0.5となる。したがって、判別確率の最小値は50%である。本研究では、作業状態および一時休息状態の判別確率を以上のように導出し、本提案手法が認知状態検出に有効であるか評価した。

4. 本手法の評価実験

4.1 実験の目的

先述の複数の認知タスク実施時における作業執務者の生理指標から特徴量を抽出し、それらの特徴量から一時休息状態の判別確率を導出することで、本手法の妥当性を評価することを目的とした。また、タスクの種類による生理指標や状態検出精度への影響を検討するため、1桁加算、3桁暗算加算、伝票分類、テキストタイピング、ブロック組み立ての計5種類のタスクを用意した。

4.2 被験者および実験環境

被験者は26名の健常者で、全員が男性であった。年齢は19から25歳、PCの操作に十分慣れており母国語は日本語である。実験前には生理指標計測についてインフォームドコンセントおよび同意書を取った。実験環境については、室温は $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度は $50 \pm 5\%$ 、照度は680lx、騒音は50dBA以下に調整した。生理指標計測には株式会社デジテック研究所 Polymate AP216

を使用した。電極には入力インピーダンスが $300\text{G}\ \Omega$ のアクティブ電極を使用し、測定時には部屋の湿度を $50 \pm 5\%$ に保ちつつ装着部位をアルコール消毒および皮膚除去を行い、電極と皮膚間インピーダンスが $5\text{ k}\ \Omega$ 以下になるよう調整した。ECG, EEG, EMGの時定数をそれぞれ3.0sec, 0.3sec, 0.02secに設定し、ローパスフィルタのカットオフ周波数をそれぞれ100Hz, 100Hz, 500Hzに設定した。また、電源周波数のノイズ除去のため、ノッチフィルタの周波数を一律60Hzに設定した。計測中の被験者に設置した電極の位置を、図1に記した。

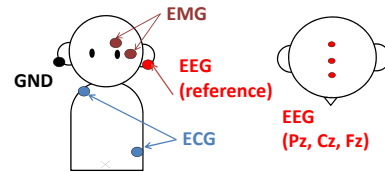


図1 電極の装着位置
Fig.1 Positions of electrodes.

EEG計測に用いる電極は国際10-20法に基づいたPz, Cz, Fz位置に装着し、ベース電極を左耳朶にとった。ECG計測においては被験者の右首筋と左脇腹、EMG計測では左こめかみと左眉上にそれぞれ電極を装着した。

4.3 使用タスク

本実験で使用したタスクはオフィスワークにおける知的生産性評価のための仮想タスクであり、特にブロック組立および伝票分類はタスクセットCPTOP2^[5]に使用されているものである。3.1節で先述した通り、生理指標による状態検出の前にはあらかじめ状態を特定しておくため、使用するタスクは全て作業記録が取得可能である。

伝票分類

伝票分類タスクは図2のような紙伝票および図3に示すiPad上に表示された分類表を用いて遂行するタスクである。紙伝票には金額、日付、会社名が記載されており、被験者は各項目について分類を行った。iPad上の分類表は垂直方向に配置された3つの表から構成され、上から日付の「上旬(1-10日)」、「中旬(11日-20日)」、「下旬(21-30日)」に対応している。さらに、各表の列は左から金額について「5,000円以下」、「5,001-50,000円」、「50,001円以上」に対応した3項目から構成され、行は上から会社の業種について「百貨店・小売店」、「飲食店・喫茶店」、「運送業・郵便」に対応した3項目から構成されている。解答手順例は図4に示す通りであり、被験者は紙伝票を見た後に分類表内の対応するボタンをタップし、その後

生理指標計測による知的作業時の一時休息状態の検出

次の紙伝票を見て同様の作業を行った。タスク計測時は、1問に要した解答時間および入力された解答を記録し、タスク終了後、使用された紙伝票から正誤判定を行うことで解答の正否を記録した。

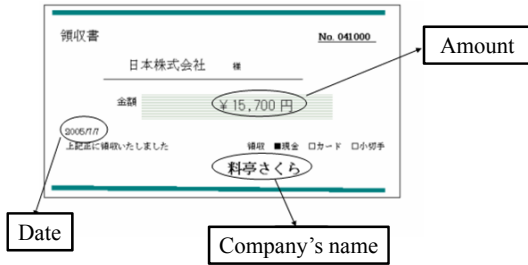


図2 伝票の一例

Fig. 2 An example of receipts in classification task.

上旬(1~10日)	5,000円以下	5,001~50,000円	50,001円以上
百貨店・小売店	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
飲食店・喫茶店	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
運送業・郵便	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
中旬(11~20日)	5,000円以下	5,001~50,000円	50,001円以上
百貨店・小売店	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
飲食店・喫茶店	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
運送業・郵便	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
下旬(21~30日)	5,000円以下	5,001~50,000円	50,001円以上
百貨店・小売店	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
飲食店・喫茶店	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
運送業・郵便	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

図3 ipad 分類表

Fig. 3 The classification table on iPad display.

1 桁加算

被験者はPC画面上に2つ表示された1桁の自然数を足し合わせ、解の1の位をキーボードを用いて入力した。計測時、1問に要した解答時間および解答の正否を記録した。

3 桁加算

PC画面上に3桁の数字が表示され、数字を覚えた後にEnterキーを押す。次に別に3桁の数字が表示され、被験者はその数と最初に覚えた数を足し合わせ、解を入力する。計測時、1問に要した解答時間および解答の正否を記録した。

テキストタイピング

被験者はPC画面上に表示された日本語の文章を

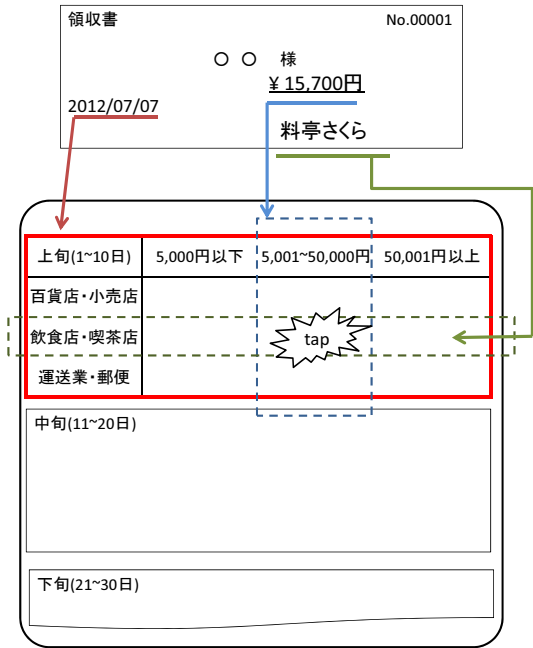


図4 伝票分類の解答例

Fig. 4 An example of classification task.

PCキーボードを用いてタイプした。表示する文章には良く知られた日本のことわざを採用した。そのため、母国語の違いによるタスクの難易度変化を回避するために、被験者は日本語を母国語とする者に限定した。このタスクでは、入力文字および入力時間を計測した。

ブロック組み立て

図5に記すように、被験者は画面上に並べられた様々な形のブロックを任意の場所に置くことでブロックを組み立てた。最後に組み立てたブロック群に対して任意の名称を付けた。計測中は1問の解答時間、ブロックの配置位置、および入力された名称を記録した。

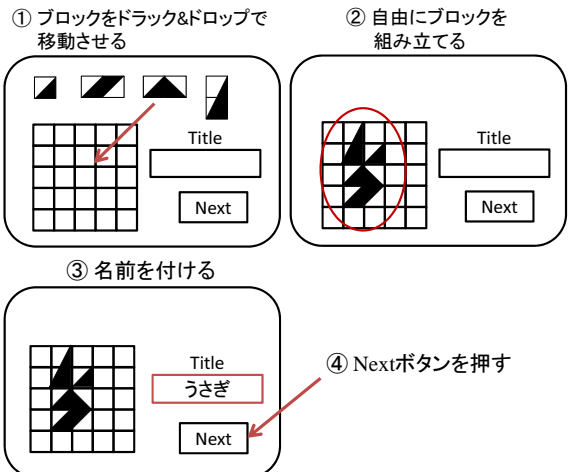


図5 ブロック組み立て

Fig. 5 Block assembling task.

4.4 実験条件

本実験では、被験者の作業状態および一時休息状態を明確に特定するために、以下の3つの実験条件を設けた。

タスク条件

この条件下では、被験者は知的能力を必要とする認知タスクを行った。この時に計測される生理指標を、被験者が作業状態にある時に得られる生理指標とした。

コントロール条件

認知活動と無関係である指や腕の動きは認知活動と同様に生理指標へ影響を及ぼしており、タスク条件で計測された生理指標が被験者の身体的な活動のみを反映し、認知状態を反映していないという可能性を否定できない。これを否定するために、コントロール条件下で被験者には認知タスクと同等の腕や指の動きを模した知的能力を必要としない、PC キーボードやマウス操作のみのタスクを行わせた。この条件下では被験者は知的能力を使用していないため、計測される生理指標は一時休息状態下にある被験者から得られる生理指標とした。

レスト条件

この条件では、被験者は作業を中断し安静にした。レスト条件下で得られる生理指標は、被験者が一時休息状態にある時に得られる生理指標とした。

4.5 計測パターン

各実験条件の呈示順について、被験者の意識的な条件切り替えを認めるか否かで計測パターンを以下の2つ設けた。

自動切り替え計測

被験者の認知状態を統制し、各条件下で計測される生理指標のデータをそれぞれの条件のデータ群に正確に分別することを目的とした計測パターンである。図6に示すように30秒ごとに自動的に画面を切り替えることで条件を変えていき、画面に従い被験者にタスクを行わせ、この一連の流れを5回繰り返した。

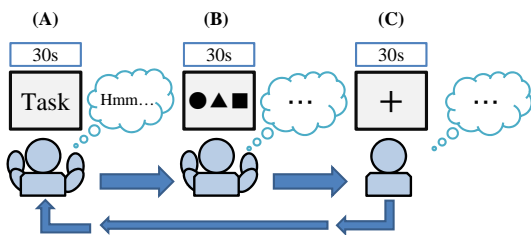


図6 ASMのタスク遂行シーケンス
Fig.6 The sequence of task in automatic switching measurement.

図の各画面の(A)はタスク条件時の画面であり、画面にはタスクが呈示された。(B)はコントロール条件時の画面であり、丸や四角などのタスクとは無関係な図形を呈示することでタスク条件と区別した。(C)はレスト条件時の画面であり、黒の注視点を表示した。

本研究ではこれを自動切り替え計測 (Automatic Switching Measurement) と呼び、以下ASMと記した。

任意切り替え計測

意識的な切り替えを認め、被験者の任意のタイミングで条件切り替えを行わせることで、自発的な認知状態遷移を促すことを目的とした計測パターンである。被験者には、各3条件を任意のタイミングおよび順番で切り替えるよう教示を与えた。また、ASMのように画面の切り替えは行われず、常にタスクが画面に呈示された。

本研究ではこれを任意切り替え計測 (Free Switching Measurement) と呼び、以下FSMと記した。

4.6 実験プロトコル

被験者一人当たりの実験時間は約2時間であった。実験の流れは図7の左側に示す通りである。

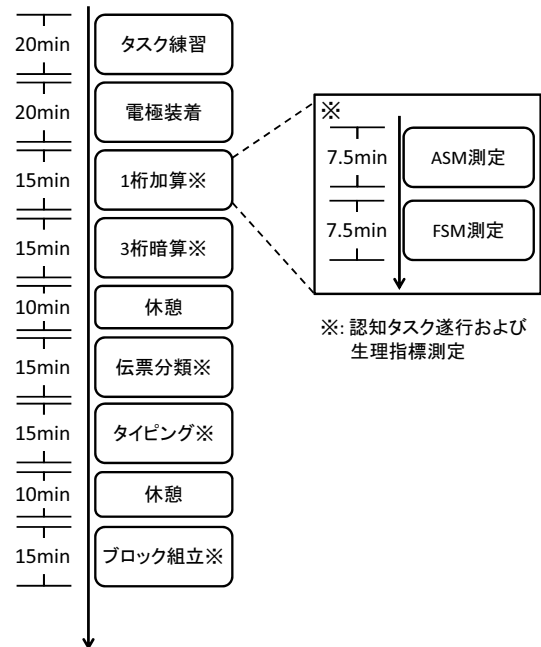


図7 実験シーケンス
Fig.7 Sequence of this experiment.

また、図7の右側に示したように、各タスク実施時においてASMとFSM、それぞれのパターンで7.5分ずつの計15分計測を行った。

生理指標計測による知的作業時の一時休息状態の検出

表 1 ASM 時の生理特徴量と認知状態との相関比

Table 1 Correlation ratio between each physiological feature and cognitive state in ASM

ASM	LF	HF	α 波	β 波	瞬目間隔	サッケード運動間隔
1 桁加算	0.249**	0.097**	0.025	0.089**	0.346**	0.045**
3 桁加算	0.133**	0.006	0.053**	0.040**	0.400**	0.145**
ブロック組立	0.074**	0.096**	0.067**	0.018	0.108**	0.200**
伝票分類	0.005	0.106**	0.071**	0.119**	0.189**	0.288**
タイピング	0.214**	0.055**	0.014	0.072**	0.053**	0.037*

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

表 2 FSM 時の生理特徴量と認知状態との相関比

Table 2 Correlation ratio between each physiological feature and cognitive state in FSM

FSM	LF	HF	α 波	β 波	瞬目間隔	サッケード運動間隔
1 桁加算	0.175**	0.111**	0.001	0.042**	0.247**	0.052**
3 桁加算	0.227**	0.064**	0.035*	0.064**	0.432**	0.217**
ブロック組立	0.083**	0.029**	0.047**	0.033*	0.181**	0.028
伝票分類	0.185**	0.042**	0.063**	0.160**	0.271**	0.363**
タイピング	0.320**	0.157**	0.010	0.062**	0.038*	0.034*

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

5. 結果

PC 上の計測デバイスの不具合による生理データの一部欠損が 3 名の被験者に見られ、また R 波減高の疑いが 2 名の被験者に見られたため、これらの被験者のデータは破棄した。また、残り 21 名の計測において、PC 機材のトラブルによりブロック組立とテキストタイピングが 1 例ずつ記録されていなかったため、これらのデータも破棄した。したがって解析対象のデータは 1 桁加算と 3 桁加算および伝票分類では被験者 21 名分、ブロック組立とテキストタイピングでは 20 名分のデータとなった。実験後の EEG データを検証したところ、Fz および Cz 位置の EEG 波形は瞬目やサッケード運動由来の EOG がアーチファクトとして混入していたため、これらの位置の EEG データを破棄し、Pz 位置の EEG データを使用した。

有効データの ECG, EEG, EMG からそれぞれ抽出した 6 種の生理指標特徴量と作業状態及び一時休息状態の 2 状態との相関比について各タスク及び各計測パターンで計算した結果を表 1, 表 2 に記した。前者は ASM 時、後者は FSM 時の結果である。それぞれの相関比に対する有意差検定には F 検定を用いた。1 桁加算, 3 桁加算および伝票分類での F 値について分子の自由度は 1, 分母の自由度は 4723 であり、ブロック組み立て及びテキストタイピングについて分子の自由度は 1, 分母の自由度は 4498 であった。

ASM と FSM における本手法の判別確率を表 3 に記した。2 つの実験および全タスクにおける判別確率の平均値は 80.2% であった。

表 3 各認知タスクにおける ASM および FSM での判別確率

Table 3 Correct discrimination probabilities in ASM and FSM

タスク	n	判別確率			
		ASM		FSM	
		平均 (%)	SD	平均 (%)	SD
1 桁加算	21	85.4	10.7	83.4	10.1
3 桁加算	21	83.4	9.0	82.6	9.5
ブロック組立	20	75.5	5.4	78.3	10.3
タイピング	20	71.0**	6.1	81.1	8.0
伝票分類	21	78.5	7.6	79.3	7.7

** : ASM < FSM ($p < 0.01$)

上表より、テキストタイピング時のみ ASM での本手法の判別確率は FSM に比べて有意に低いことがなかった ($p < 0.01$)。

6. 考察

表 1 や表 2 について各々の生理特徴量と認知状態との間に、一部の場合を除き ASM, FSM 共に有意な相関比が多くタスクで認められた。

各生理特徴量と 2 つの認知状態との相関比は最大でも 0.432 であり中位程度の相関の強さであるため、各々の特徴量と認知状態との間に強い相関があるとは言いがたいが、本研究で用いたこれら 6 種類の生理特徴量が作業状態及び一時休息状態の判別に有効である可能性は示唆できたと思われる。

表 3 から、テキストタイピング時でのみ ASM での判別確率は FSM と比べ有意に低かったが、テキストタイピングでは必要とされるメンタルワークロードの低さ、および被験者がタスク条件下にある時間の長さが原因であると考えられる。テキストタイピング時で

は、被験者は画面に提示された文章をキーボードを用いて入力するだけでよく、それ以上の高次な認知活動(文章組み立て、文章校正など)が要求されなかったため、本研究で用いたテキストタイピングは他のタスクに比べ、メンタルワークロードが低かったと思われる。この場合、タスク条件下での被験者の生理的反応は緩やか、または小さくなると考えられる。以上から、テキストタイピングにおいては十分な生理的反応を捉えるまでに、他のタスクより長いタスク条件の時間が必要である。ASMの場合、各条件は30秒おきに自動的に切り替えられており、テキストタイピングでは十分なタスク条件の時間を確保できていなかった可能性がある。それに対してFSMでは、被験者の任意のタイミングで条件を切り替えられたため、タスク条件の時間は被験者およびタスクによって異なっていた。ここで、テキストタイピングの作業記録から解答時間を調べた結果、20名中19名がタスク条件を30秒以上、平均で59.0秒維持していることが分かった。したがって、状態検出に十分な生理的反応を捉えるには60秒前後が必要だと考えられる。タスク条件-コントロール・レスト条件間での有意な生理指標データの違いが計測されない場合、その判別確率も低下するため、以上に述べたメンタルワークの低さおよびタスク条件時間の違いから、テキストタイピングにおいてASM時の判別確率がFSM時に比べて低くなったと推測される。

これまでの生理指標計測を用いた研究は、ASMのように一定時間で条件を切り替えながら計測を行っているものが多いが、本研究のようにメンタルワークロードや作業時間が異なる複数のタスクを扱う場合は、十分なタスク時間を設けるか被験者に任意のタイミングで条件を切り替えさせる実験を行わせた方が、精度のより高い状態検出が行えると考えられる。

実験結果から、本手法の平均判別確率は80.2%であった。この値は、最高値である100%に近い数値ではないが、最低値である50%に比べ30.2%高いことから、本手法の改良の余地はあるものの知的作業時の一時休息状態の検出が生理指標計測によって可能であることは示唆された。

また本研究で用いたタスク群は、作業記録を取得し、かつ本手法の判別確率を評価するために設計されたものであるため、依然として実際のオフィスワークを反映しているとは言い難い。今後は、本研究で用いたタスクとは異なるタスクや実際のオフィスワークを用いた評価を目指す。

今回採用した生理指標はEEGおよびECG, EMGであったが、他の生理指標も検討する余地がある。特に、皮膚電気活動(Electrodermal Activity; EDA)^[26, 27]や脳血流量(Cerebral Blood Flow; CBF)^[16]なども認

知状態を反映する指標とされている。したがって、さらに精度の高い認知状態検出にはこれらの生理指標も検討する必要がある。

7. 結論

知的作業執務者には2つの認知状態(作業状態および一時休息状態)が存在しており、知的作業時はこれらの状態を切り替えていると言われている^[8]。本研究では、生理指標計測を行うことで得たデータからこれらの状態を検出する手法を提案した。この手法が可能となれば、実験用に設計されたタスクを利用せずに状態検出が行えるため、実際のオフィスワーク等の作業を行わせた場合の知的生産性評価が可能となる。

被験者実験の結果、平均判別確率は約80.2%であり、生理指標計測により知的作業時の認知状態検出が可能であることが示唆された。さらに、生理指標を用いた状態検出による知的生産性の定量評価が期待される。しかし、本手法の評価の際に用いたタスクは依然として実際のオフィスワークを反映しているとは言えず、今後はオフィスワークの検討も行うことでオフィス環境での知的生産性評価を目指す。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 23360257 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 川瀬貴晴: 知的生産性研究の現状と課題 (II ワークプレイスプロダクティビティ評価の実践, < 特集 > 執務空間の知的生産性・ワークプレイスプロダクティビティ); 建築雑誌, Vol. 122, No. 1564, pp. 12-13 (2007).
- [2] 村上周三: 知的生産性研究の展望; 空気調和・衛生工学, Vol. 8, No.1, pp. 3-8 (2007).
- [3] 村上周三: 建築空間と知的活動の階層モデル; 2012.3.15 知的生産性委員会, 資料 No.5 (2012).
- [4] 下田宏, 服部瑤子, 富田和宏, 河内美佐, 石井裕剛, 大林史明, 寺野真明, 吉川榮和: オフィスワークの生産性改善のための環境制御法の研究-プロダクティビティ評価法 CPTOP の開発-; ヒューマンインタフェースシンポジウム 2006, Vol.1, No.1321, pp.145-150 (2006).
- [5] 岩川幹生, 近辞佑樹, 榎本健治, 宮城和音, 下田宏, 石井裕剛, 寺野真明: 知的生産性改善評価のための新パフォーマンステストの開発; ヒューマンインタフェースシンポジウム 2008, pp. 273-280 (2008).
- [6] Wargocki, P., Wyon, D.P., Fanger, P.O.: Productivity is Affected by the AirQuality in Offices; Healthy Building 2000, pp. 635-640 (2000).
- [7] Thorne, D.R., Genser, S.G., Sing, H.C., Hegge, F.W.: The Walter Reed performance assessment battery; Neurobehavioral Toxicology & Teratology, Vol 7, No. 4, pp. 415-418 (1985).
- [8] Miyagi, K., Kawano, S., Ishii, H., Shimoda, H.: Improvement and Evaluation of Intellectual Productivity Model Based on Work State Transition; The 2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics pp.1491-1496 (2012)

- [9] 宮城和音, 近藤佑樹, 榎本健治, 石井裕剛, 下田宏, 岩川幹生, 寺野真明: パフォーマンステストによる知的生産性改善評価時の NIRS を用いた脳活動計測; 電子情報通信学会技術研究報告. HIP, ヒューマン情報処理, Vol. 108, No. 27, pp. 149-154 (2008).
- [10] Hosseini, S., Khalilzadeh, M.: Emotional Stress Recognition System Using EEG and Psychophysiological Signals: Using New Labelling Process of EEG Signals in Emotional Stress State; Proceedings of the IEEE, The International Conference on Biomedical Engineering and Computer Science, pp. 90-95 (2010).
- [11] Picard, R.: Affective Computer Challenges; International Journal of Human-Computer Studies, Vol. 59, No. 1-2, pp. 55-64 (2003).
- [12] Parasuraman, R., Rizzo, M.: Neuroergonomics: The brain at work; New York, NY: Oxford University Press.
- [13] Parasuraman, R.: Neuroergonomics: Brain, Cognition, and Performance at Work; Current Directions in Psychological Science June 2011, Vol. 20, No. 3, pp. 181-186 (2011).
- [14] Card, S.K., Moran, T.P., Newell, A.: The Psychology of Human-Computer Interaction, Erlbaum Associates (1983).
- [15] Gerven, M., Farquhar, J., Schaefer, R., Vlek, R., Geuze, J., Nijholt, A., Ramsey, N., Haselager, P., Vuurpijl, L., Gielen, S., Desain, P.: The brain-computer interface cycle; Journal of Neural Engineering, Vol. 6, No. 4, pp.1-10 (2009).
- [16] Solovey, E., Schermerhorn, P., Scheutz, M., Sassaroli, A., Fantini, S., J.K.Jacob, R.: Brainput: Enhancing Interactive Systems with Streaming fNIRS Brain Input; CHI 2012, pp.2193-2202 (2012).
- [17] Bjerregaard, P.: Mean 24 hour heart rate, minimal heart rate and pauses in healthy subjects 40-79 years of age; European Heart Journal, Vol. 4, No.1, pp. 44-51 (1983).
- [18] Camm, A., Malik, M., Bigger, J., Breithardt, G., Cerutti, S., Cohen, R., Coumel, P., Fallen, E., Kennedy, H.L., Kleiger, R.E., Lombardi, F., Malliani, A., Moss, A.J., Rottman, J.N., Schmidt, G., Schwartz, P.J., Singer, D.: Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use; Circulation, Vol. 93, No. 5, pp. 1043-1065 (1996).
- [19] 大見直史, 森本陽子, 横山清子, 水野康文, 高田和之: ウェーブレット変換による長距離運転時の心拍変動解析; 電子情報通信学会技術研究報告. MBE, ME とバイオサイバネティクス, Vol. 99, No. 493, pp. 9-14 (1999).
- [20] 水野康文, 横山清子, 森本陽子, 茂吉雅典, 高田和之: 心拍変動時系列データへのウェーブレット解析の適用; 電子情報通信学会技術研究報告. MBE, ME とバイオサイバネティクス, Vol. 97, No. 622, pp. 47-52 (1998).
- [21] Forgarty, C., Stern, J.: Eye movements and blinks: their relationship to higher cognitive process; International Journal of Psychophysiology, Vol. 8, No. 1, pp. 35-42 (1989).
- [22] Ichikawa, N., Ohira, H.: Eyeblink activity as an index of cognitive processing: temporal distribution of eyeblinks as an indicator of expectancy in semantic priming; Perceptual and Motor Skills, Vol. 98, No. 1, pp. 131-140 (2004).
- [23] Fukuda, K., Stern, J., Brown, T., Russo, M.: Cognition, Blinks, Eye-Movements, and Pupillary Movements During Performance of a Running Memory Task; Aviation, Space, and Environmental Medicine, Vol. 76, No. 7, C75-C85 (2005).
- [24] Chai, R., Ho Ling, S., Hunter, G., Nguyen, H.: Mental Task Classifications using Prefrontal Cortex Electroencephalograph Signals; 34th Annual International Conference of the IEEE EMBS, pp. 1831-1834 (2012).
- [25] 圓川隆夫: 多変量のデータ解析; 朝倉書店, 第3章 (1999).
- [26] Bursteinm, K., Fenz, W., Bergeron, J., Epstein, S.: A comparison of skin potential and skin resistance responses as measures of emotional responsivity; Psychophysiology, Vol. 2, No. 1, pp. 12-24 (1965).
- [27] 梅沢章男, 黒原彰: バイオフィードバック指標としての皮膚コンダクタンス変化と皮膚電位活動の比較; 日本バイオフィードバック学会, Vol. 21, pp. 26-36, (1994).

(2013年7月31日受付, 11月27日再受付)

著者紹介

國政 秀太郎 (学生会員)



2012年京都大学工学部電気電子工学科卒業。現在、京都大学大学院エネルギー科学研究科修士課程在籍中。生理心理学、アフェクティブインタフェースに興味を持つ。ヒューマンインタフェース学会学生会員。

宮城 和音 (学生会員)



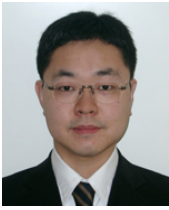
2010年京都大学大学院エネルギー科学研究科修士課程修了。現在、同研究科博士後期課程在籍中。知的生産性の研究に従事。2011年当学会学術奨励賞受賞。ヒューマンインタフェース学会学生会員。

下田 宏 (正会員)



1989年京都大学大学院工学研究科電気工学第二専攻修士課程修了。京都大学博士(工学)。1989~1996年(株)島津製作所にMRIの開発に従事。1996年京都大学大学院エネルギー科学研究科助手, 1999年同助教授, 2012年同教授。2002~2003年ノルウェーエネルギー技術研究所客員研究員。マンマシンシステム, 知的生産性, 生理指標計測, e-Learning等の研究に従事。ヒューマンインタフェース学会理事, 日本原子力学会関西支部幹事, 計測自動制御学会等の会員。

石井 裕剛 (正会員)



2000年京都大学大学院エネルギー科学研究科博士後期課程修了。現在、同大学院エネルギー科学研究科助教。主に複合現実感の研究に従事。2004年から1年間、ノルウェー王国エネルギー技術研究所客員研究員。2007年当学会学術奨励賞受賞、2012年当学会論文賞受賞。IEEE、日本バーチャルリアリティ学会、電子情報通信学会、日本保全学会等の会員。