

ユーザの瞬目累積数および頭部移動量を用いた 疲労検出手法の提案

三井 健史¹ 濱川 礼¹

概要: 本論文では、作業中の瞬目累積数および頭部移動量をセンシングし、その時系列変化からユーザの疲労を検出する手法を提案・実装し、その評価結果を示す。近年、知的作業における生産性の向上を目的としたシステムが数多く開発されてきている。しかし、そういったシステムを評価する際、作業成績のみに注目することが多く、心理的側面や身体的側面、特に疲労に重点を置いたシステムは少ない。長時間労働による過労死も取り沙汰される中、いかに心理的な健康を保ちつつ生産性を維持するかが課題となっている。また、従来の疲労度の評価において、唾液量の変化から疲労度を推定する手法や光の明滅速度から疲労度を推定するフリッカーテストや主観テストなど、いずれも作業を中断することなく容易に評価することは困難であった。本論文では、作業中の累積瞬目数・頭部の傾き・加速度データを JINS MEME を用いてセンシングし、その時系列変化から作業の中断無くユーザの疲労を検出する手法を提案・実装し、その評価結果を示す。前日に十分に睡眠をとり、健康状態も良好と回答した被験者に対しコンピュータ作業を行なってもらい、提案手法による疲労検出とユーザ体感疲労タイミングとの関係性を評価した結果、約 8 割の被験者で良好な結果が得られた。このような手法を用いてユーザの疲労検出を自動化することで、生産性の低い長時間会議での休憩タイミングの提示を行うアンビエントインテリジェンスシステムの開発や作業へのストレスチェックの自動化などへの応用が可能になると考える。

Detecting Fatigue by Eyeblinks and Head Moves

TAKEFUMI MITSUI¹ REI HAMAKAWA¹

1. はじめに

近年、オフィスワーカーの知的作業における生産性の向上を目的とした研究やシステムが数多く開発されてきている。小林ら [1] はユーザの顔を Web カメラで撮影し、顔中心座標位置の x 軸・ y 軸・ z 軸の変化量をそれぞれ集計し、その移動特徴から集中度推定を行う研究を提案している。濱口ら [2] の研究では、作業者の机背面部に設置した振動センサから、筆記作業時の卓上振動音をアンビエントにセンシングし、筆記作業時と思考時にリアルタイムに分類する手法を提案している。さらに作業者の状態から生産性向上を目的としたシステムとして、我々はコンピュータ作業者のキーボード打鍵情報・姿勢・視線情報からユーザの集中状態を推定し、環境音再生やコーヒーやメントール

のアロマオイルを噴霧することで作業環境を最適化するアンビエントインテリジェンスシステムの開発を行なってきた [4][5][6]。

しかし、そういったシステムを評価する際、例えばキーボード打鍵回数といった作業成績のみに注目することが多く、心理的側面や身体的側面、特に疲労に重点を置いたシステムは少ない。厚生労働省によれば日本の労働者 8000 万人の内、4800 万人が疲労を自覚し、疲労が半年以上続いている労働者は 3000 万人にも上る。そのうち 240 万人は休職・離職しており、最悪の場合過労死にまで追い込まれている。また、コンピュータ作業者の 34.6% が精神的なストレス・疲労を感じているという統計もある [7]。大手広告代理店で起きた過労自殺の問題も取り沙汰される中 [8] [9]、いかに心理的な健康を保ちつつ生産性を維持するかが重要な問題となっている。

¹ 中京大学 情報科学研究科

そこで本論文では、作業中の瞬目累積数および頭部移動量をリアルタイムにセンシングし、その時系列変化からユーザの疲労を検出する手法を提案・実装し、その評価結果を示す。

2. 疲労測定手法

疲労は、急性疲労、亜急性疲労、慢性疲労の3段階のレベルが存在する [10]。1段階目の急性疲労は短距離走後といった短時間で蓄積される疲労であり、2段階目の亜急性疲労は1～2時間での作業後に感じるような疲労である。3段階目の慢性疲労は急性疲労や亜急性疲労から十分回復されず蓄積された疲労である。

本論文ではオフィス作業中の心理的な健康を保つことを目的としているため、疲労が蓄積する前の亜急性疲労を研究対象とし、その疲労を測定する既存手法を幾つか述べる。

2.1 血液・尿・唾液からの疲労検出手法

血液・尿・唾液から疲労度を推定する手法では、それに含まれるコルチゾール濃度を測定することで生体のストレス反応を測定する手法である [11]。

しかし、血液の採取は医療行為のため制限があり、尿による検査もリアルタイムでのストレス検出は難しい。また、唾液ではコルチゾール濃度が血液に比べ著しく低下する他、コルチゾールが口腔内で分解されてしまうため、正確に測定するのは困難である。

2.2 フリックカーテストからの疲労検出手法

光の明滅が高速であるとき、人はそれを知覚することが出来ない。高速に明滅する光の点滅周期を徐々に下げていき、光の明滅を知覚することができる周期がどの程度かを計測するテストをフリッカーテストと呼ぶ。疲労が蓄積しているほど知覚能力は低下し、光の明滅速度の弁別周波数帯域が低くなる傾向にあることが分かっている [12]。

しかし、フリッカーテストは本来の作業を中断し行う必要があるため、リアルタイムに疲労を検出することは困難である。

2.3 NASA-TLX 検査による主観的評価手法

NASA-TLX (National Aeronautics and Space Administration Task Load Index) 検査 [13] [14] は NASA で開発されたメンタルワークロード (作業負荷) 評価尺度であり、“知的・知覚的要求 (mental demand)”, “身体的要求 (physical demand)”, “タイムプレッシャー (temporal demand)”, “作業成績 (own performance)”, “努力 (effort)”, “フラストレーション (frustration)” の6つの尺度から構成される。作業後に被験者は6つの尺度それぞれに目盛りのない直線上に印をつける。その位置から0～100のスコアをその尺度の素点とし、6つの素点に小さい方から

1～6の順位づけを行い、その順位を重み付け係数とする。この重み付け総和を重み付け係数の合計で割った値が最終的な作業負荷のスコアとなる。このスコアが高いと作業負荷は被験者にとって高いと感じていることを示す指標となる。

このNASA-TLX検査は作業自体が作業者に与えるストレスを数値をして算出出来るが、作業の疲労そのものをスコアリングするものではない。また、各設問に回答する形で検査するため、フリッカーテスト同様に本来の作業を中断し行う必要があり、リアルタイム処理には向かない。

2.4 瞬目回数からの疲労検出手法

眼の構造において水晶体を調整し対象物体とのピントを無意識下で調整する筋肉のことを毛様体筋と言う。ある一点やある一定距離の対象を見続ける行動、特にコンピュータ作業ではこの毛様体筋が凝り固まり、眼精疲労の症状などの原因となる [15]。瞬目回数は個人毎や作業毎にかなりのばらつきがあるが、毎分平均20～40回程度の瞬目が行われ、疲労時にはその瞬目回数の増減が確認できる。瞬目のカウントは作業者の作業を中断することなく行うことができ、且つ作業者への負荷も低い。

東川らの研究では [16]、作業中の累積瞬目数変化から疲労検出を行う手法の提案を行っている。この研究では「ある時刻 t [秒] までの実際の累積瞬目数」と「ある時刻 t まで一定の度合いで上昇していくと仮定した場合の累積瞬目数」の差を作業者の自己申告による疲労タイミングとの関係性について考察している。実際の瞬目のカウントは目視にて行い、手法はリアルタイム処理でない形で提案されているものの、瞬目情報は疲労を感じるタイミングの検出に利用できる可能性があることが示されている。また、瞬目回数を観測することが直接的に眼精疲労の検出・予防にもつながる為、本研究ではこの瞬目回数をを用いた疲労検出を試みる。

先述の研究 [16] を参考に予備実験として、前日に十分睡眠を取り、健康状態も良好と回答した学生10名に対し普段の研究作業 (プログラミング、レポート作成、論文閲覧等) を行なってもらい、作業開始から疲労を感じるまでの瞬目回数の時系列変化と主観評価による疲労申告タイミングのログを行なった。また、疲労の申告には自作スマートフォンアプリ上のボタンを「疲労を感じた」タイミングで押下することでログを行なった。

瞬目回数の時系列変化と疲労申告タイミングをプロットした2例を示す (図1, 図2)。

作業員 A は疲労申告タイミングの少し前から瞬目回数に大きな変動が見られる。しかし、作業員 B は疲労申告タイミングにかかわらず瞬目回数の変化は見られなかった。他8名の作業員に置いては多少のばらつきはあるもののおおよそ作業員 A 同様に疲労申告タイミングの少し前から

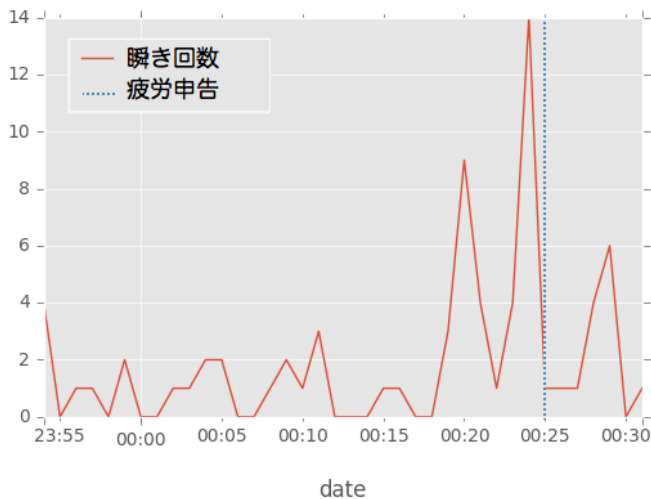


図 1 作業員 A の作業時の瞬目回数

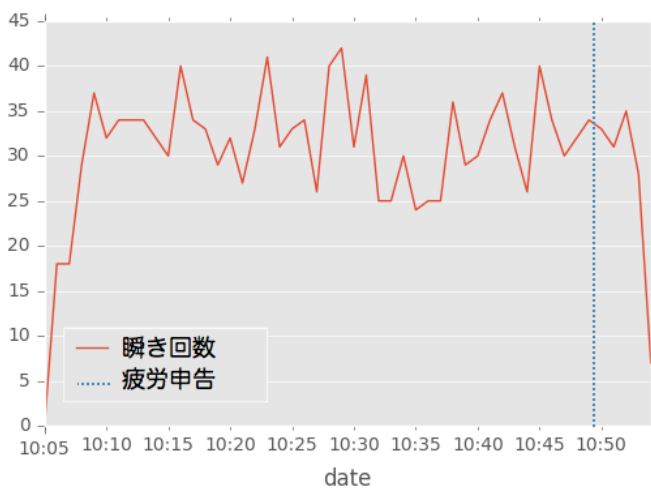


図 2 作業員 B の作業時の瞬目回数

瞬目回数に大きな変動が見られた。事前実験の結果、作業員 A, B の様に瞬目回数の変化が疲労申告タイミング前後で起こる作業員と起こらない作業員が混在していることが判明した。また、全作業員に対し前述の NASA-TLX 検査を行なったところ、作業員 B の作業負荷が他の作業員よりも高いスコアであったことが判明した。この事から精神的負荷のかかる作業やドライアイといった眼に不具合がある場合、瞬目データに時系列的な変化が起こらない場合があるという知見が得られた。

さらに、実験中の作業員の様子を録画したデータの精査や、実験後行なったアンケートにより、疲労を感じるタイミング前後には首をマッサージしたり、座席の背もたれにより掛かるといった特定の行動を取る回数が増えることも同様に判明した。よってそういった特定の行動をセンシング・認識することができれば、疲労の検出に有用な指標となりえると考えた。

2.4.1 瞬目、及び行動センシング手法

瞬目取得方法は主に顔画像を画像処理することで取得する手法と、眼電位測定によって目の周辺筋肉の動きをセンシングする手法とがある。顔動画像から画像処理を行い瞬目回数を取得する方法では、作業員の顔画像を Web カメラ等を用いて取得する必要がある。また、作業員の行動のセンシングには加速度センサーや傾きセンサーを作業員の身体に設置する方法や瞬目同様 Web カメラから取得した動画像に対し、画像処理を用いて首をマッサージしたり、座席の背もたれにより掛かるといった特定の行動を認識することが可能である。しかし本研究はシステムをオフィス作業員を対象としているため、カメラ画像はセキュリティ上問題となる場合がある。

よって本研究では瞬目には眼電位測定を、行動のセンシングには加速度センサーや傾きセンサーによる計測を用いることとした。また、眼電位測定並びに加速度センサーや傾きセンサーには JINS 社が発売している JINS MEME (図 3) [17] を用いる。



図 3 JINS MEME [17]

JINS MEME とは 3 点式眼電位センサーや加速度センサー、傾きセンサーにより瞬目や目の動きや頭の動きをセンシングが可能なメガネ型デバイスである。JINS MEME に搭載された三点式眼電位センサーは、鼻パッドと眉間部分から検出される眼球の電位差によって、眼球運動に伴う目の周りの電位差を検出するデバイスであり、以下のようなデータを取得できる。

- まばたきの強さ
- 頭部ロール角・ピッチ角・ヨー角の 3 軸成分
- 頭部の動作加速度の 3 軸成分
- 装着状態エラー

また JINS MEME はメガネ型デバイスということで、データセンシング時の心的負荷は非常に低く疲労検出処理に影響はないと考えた。

3. 提案手法

本論文では瞬目データと頭部の変位量の時系列変化から疲労を検出する方法を述べる。

作業者が疲労を感じるタイミングを、瞬目回数の変化や首をマッサージ、座席の背もたれにより掛かるなど、前フレームでは発生していないような何らかの変化が起こったタイミングと捉える。何らかの変化が起こったタイミングを変化点とし、その変化点を検出するために、加重移動平均 (Weighted Moving Average; WMA) モデル (後述) を用いて単位時間あたりの瞬目回数 / 顔の加速度 x, y, z 軸成分 / 顔の傾き頭部ロール角・ピッチ角・ヨー角の 3 軸成分の計 7 項目のデータ変動を予測し、その予測した値と実測値とを比較し、大きく値が変動したタイミングを変化点とし出力する。

3.1 データ前処理

JINS MEME からデータをサンプリングレート 20Hz で取得する。前述の通り瞬目回数 / 顔の加速度 x, y, z 軸成分 / 顔の傾き頭部ロール角・ピッチ角・ヨー角の 3 軸成分の 7 項目そして、そのタイミングでの装着エラー情報を取得する。装着エラー情報では正常に眼電位が計測出来ているかを確認するための項目で、装着エラーが発生時していた場合のデータは前処理段階で削除する。

また、各軸データを取得段階で正規化する。

3.1.1 瞬目回数変換処理

瞬目回数の取得には JINS MEME より取得できる“まばたきの強さ”のデータ項目を元に取得する。まばたきの強さを取得すると瞬目が発生したタイミングのフレームのみに 0 以外の値が挿入されて取得される (表 1)。

| フレーム番号 | 日時 | まばたきの強さ |
|--------|---------------------|---------|
| ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 1000 | 2016/12/15 22:43:06 | 0 |
| 1001 | 2016/12/15 22:43:06 | 0 |
| 1002 | 2016/12/15 22:43:06 | 170 |
| 1003 | 2016/12/15 22:43:06 | 0 |
| 1004 | 2016/12/15 22:43:06 | 0 |
| 1005 | 2016/12/15 22:43:06 | 0 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ |

表 1 まばたきの強さ取得フレーム例

表 1 中のフレーム番号 1002 のタイミングでは“まばたきの強さ”が 170 として取得され、その他のタイミングでは 0 が取得されている。このフレームのタイミングで瞬目が行われている為、このようなフレームを作業者の瞬目としてカウントアップする。

3.2 WMA モデルの構築

瞬目数や頭の動きは作業者によって大きく異なる。よって動きの予測には作業者自身の過去データから予測モデルを構築する必要がある。そこで、逐次更新することが可能なオンラインアルゴリズムである WMA モデルを用いるこ

ととした。

WMA モデルは直近の数個の値に対し異なる重み付けを行い平均値を算出するものであり、フレーム t での値を x_t とする時、直近 n フレームのデータをモデル対象とすると

$$x_{t+1} = \frac{n x_t + (n-1) x_{t-1} + \dots + 2 x_{t-n+2} + x_{t-n+1}}{n + (n-1) + (n-2) + \dots + 2 + 1} \quad (1)$$

今回は直近のフレームが最大の重みとなりそれ以前のデータには線形に重みを一定数減らしていく線形加重平均モデルを用いた。式 (1) の形式で次フレームの値の予測を行うことが出来る。またフレームが進むごとに最も古いデータをモデル対象から外し新しいフレームのデータをモデルに取り入れていく処理を逐次行う。この WMA モデルを瞬目回数 / 顔の加速度 x, y, z 軸成分 / 顔の傾き頭部ロール角・ピッチ角・ヨー角の 3 軸成分それぞれで構築し次フレームの値の予測を行う。

3.3 変化点検出

事前実験の結果より、先ほど構築した WMA モデルから推定した予測値の値に対して実測値が倍以上の値として観測されたフレームを変化点として出力する。

つまり、式 (2) で示す予測値 x_p に対する実測値 x_a であったとき、 $\frac{x_a}{x_p}$ の値である変化量 score が 2 以上になったタイミングを変化点として出力する。

$$score = \frac{x_a}{x_p} \quad (2)$$

本論文では単位フレームを 1 分とし、直近 30 フレーム (30 分) のデータを用いてモデルを構築する。図 4 に示すグラフは実際のデータに対し予測を行い変化量をプロットしたものと、作業者の自己申告による疲労フレームとを示したものである。モデル構築のため先頭 30 フレームは変化量がプロットされていない。上記グラフ中の変化量が増大するフレーム (赤丸印) の直後に疲労申告フレームが来ていることがわかる。

4. 評価

上記提案手法の評価を行った。被験者は裸眼若しくはコンタクトレンズで矯正された視力を持ち、普段からコンピュータ作業を行っている 10 ~ 20 名の大学生 11 名である。前日にアルコール及びコーヒー等を摂取せず十分な睡眠をとり、健康状態も良好と回答した被験者に対しコンピュータ作業 (プログラミング, レポート作成, 論文閲覧等) を平均 118.74 分 (1 時間 58 分), 合計 1306.39 分 (21 時間 46 分) 間行なってもらい、その間の変化点検出タイミングと作業者の自己申告による疲労タイミングとの関係性について調査を行なった。また事前実験同様、疲労の申告には自作スマートフォンアプリ上のボタンを「疲労を感じた」タイミングで押下することでロギングを行なった。

変化点検出タイミングと作業者の自己申告による疲労タ

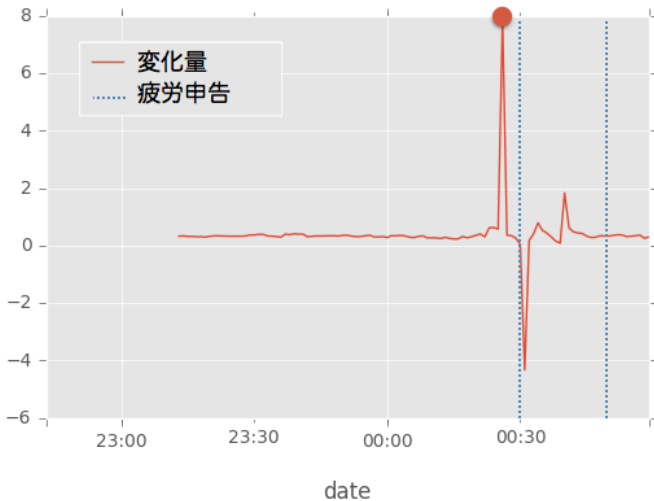


図 4 時系列での変化量の推移と疲労申告フレーム

タイミングとの関係性を表 2 に示す。また集計に際し、時系列的に連続して変化点が検出された場合は合計で 1 回としてカウントを行なった。

調査の結果、システムは変化点を計 48 回検出し、その内 83.3% の精度でシステムが作業者の疲労を検出したタイミングの ± 10 分以内に被験者が疲労を申告した。また、49.9% の精度でシステムが検出したタイミング後の 10 分以内に被験者が疲労を申告があった。

| 誤差 (分) | -10m | -5m | +5m | +10m | other |
|---------|------|------|------|------|-------|
| 検出カウント数 | 10 | 14 | 14 | 2 | 8 |
| % | 20.8 | 29.1 | 29.1 | 4.1 | 16.7 |

表 2 検出タイミングと疲労申告タイミングの関係性

また、事前実験にて瞬目回数の変化のみでは疲労を検出することが出来なかった作業員 B の時系列での変化量と瞬目回数に変化があった作業員 A の時系列での変化量をそれぞれ 図 5・図 6 に示す。

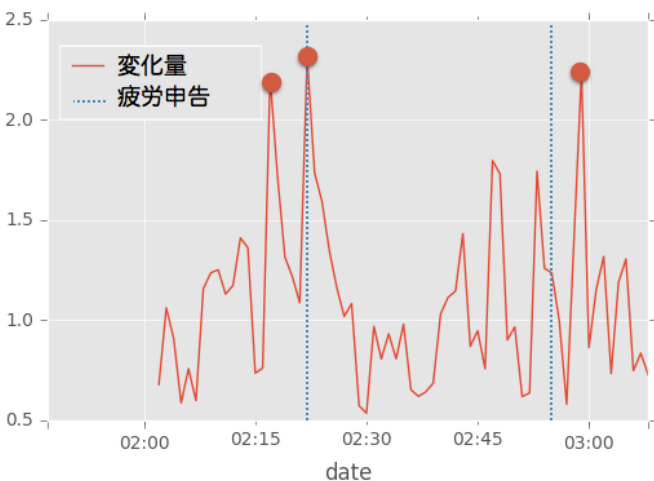


図 5 作業員 B の時系列変化量と疲労申告タイミング

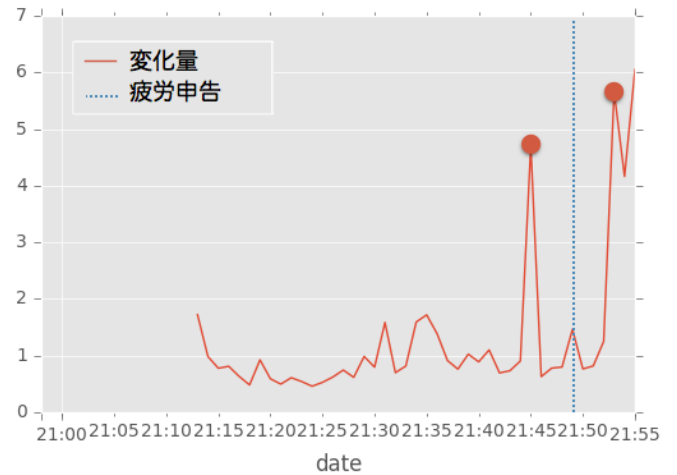


図 6 作業員 A の時系列変化量と疲労申告タイミング

今回の評価実験では事前の実験同様 時系列での瞬目回数の変動は無かったが、提案手法では疲労検出タイミングと疲労申告タイミングとの相関が多くの場合見られた。

また、本手法で検出されたタイミングと疲労申告タイミングとが一致しなかった例を図 7 に示す。

この例では、疲労申告タイミング 20 分以上前のタイミングで変化点が検出されてしまっている。この間の作業員の動作に関して調査したところ、別の作業者とともに紙レポートとコンピュータ画面とを比較し修正する作業を行っていたことがわかった。このように顔を上下左右に向ける動作が誤検出に繋がったものと考えられる。

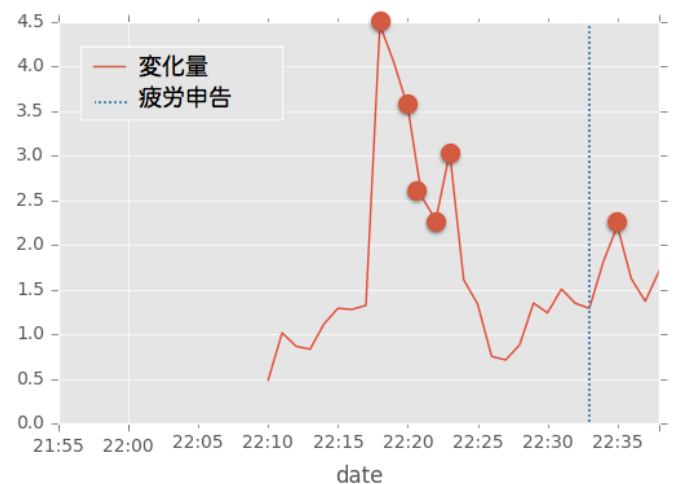


図 7 作業員 C の時系列変化量と疲労申告タイミング

5. まとめ・展望

本論文では、作業中の瞬目累積数および頭部移動量をセンシングし、その時系列変化からユーザの疲労を検出する手法を提案・実装し、その評価結果を示した。

厚生労働省のコンピュータ作業における労働衛生管理の

ためのガイドラインを見ると、1 時間に 1 ～ 2 回程度の小休止を設けること、1 時間ごとに 10 ～ 15 分程度の休憩を取ることが定められている。しかしこれは、作業内容や個人差などにより一定ではないといえる。その為、提案手法を用いてユーザの疲労検出を自動化し、休憩タイミング提案を行うことで、作業内容ごと・個人ごとに休憩タイミングを最適化できると考える。

また、人間の行動状態やその空間をセンシング・解析・推定し、個々の状況に応じて環境を変化させたり、情報提示を行うことで人間の活動を支援する試みを総称してアンビエントインテリジェンス (Ambient intelligence) [18] と呼ぶ。複数人の作業者が絡んだグループワークにおける、疲労のマネジメントシステムとして応用することで、生産性の低い長時間会議での休憩タイミングの提示を行うようなアンビエントインテリジェンスシステムを構築することが可能となる。

また、50 人以上の事業所で作業員へストレスチェックを行うことが 2015 年 12 月から義務化されたことで、本来は人の手を介して行う必要があるストレスチェックテストといったような問診・聞き取り調査も本手法を導入することでそういった煩雑な作業の補助ツールとして機能させることも可能であると考えられる。

参考文献

- [1] 小林竜司, 中田豊久: “頭部の動きに着目した非接触型の集中度測定方法の開発”: 第 75 回全国大会講演論文集 2013(1), pp.469 - 470 (2013)
- [2] Nana Hamaguchi, Keiko Yamamoto, Daisuke Iwai, Kosuke Sato: “Subjective Difficulty Estimation for Interactive Learning by Sensing Vibration Sound on Desk Panel”: Lecture Notes in Computer Science, Springer 6439 pp.138 - 147 (2010)
- [3] Diane J. Cook, Juan C. Augusto, Vikramaditya R. Jakkula: “Ambient intelligence: Technologies, applications, and opportunities”: Pervasive and Mobile Computing 5(4), pp.277 - 298 (2009)
- [4] 三井健史, 大橋省吾, 小林拳人, 志津野之也, 濱川礼: “個々のユーザの集中度に応じた室内環境を演出するシステム～ヴァーチャル・スタバ～”: 第 77 回全国大会講演論文集 2015(1), pp.653 - 655 (2015)
- [5] 三井 健史, 濱川 礼: “～ヴァーチャル・スタバ～ 作業状態に応じた室内環境演出システムの開発と評価”: マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2015) シンポジウム, pp.1424 - 1435 (2015)
- [6] 三井 健史, 濱川 礼: “入力モード推定に基づく作業環境音最適化アンビエントインテリジェンスシステム”: インタラクション 2016
- [7] 厚生労働省: “平成 24 年 労働者健康状況調査” 入手先 (<http://www.mhlw.go.jp/toukei/list/h24-46-50.html>) (参照 2016-12-16).
- [8] “平成 28 年版過労死等防止対策白書 (本文)”: 入手先 (<http://www.mhlw.go.jp/wp/hakusyo/karoushi/16/>) (参照 2016-12-16).
- [9] “第 1 節 過労死等の防止のための対策に関する大綱の策定の経緯”: 入手先 (<http://www.mhlw.go.jp/wp/hakusyo/karoushi> /16/dl/16-3-1.pdf) (参照 2016-12-16).
- [10] 大島正光: “疲労の研究 第二版” 同文書院
- [11] 鳥羽 美奈子, 恵木 正史, 櫻井 隆雄, 森 靖英: “オフィスワーカーを対象とした, PC 操作ログ特徴量からの生産性とストレスの関係評価手法の提案”: 研究報告グループウェアとネットワークサービス (GN) 2010-GN-76(4), 1-8, (2010)
- [12] 小林 正之, 小久保 敦史, 降旗 建治: “感覚特性による疲労・回復チェックシステムの開発”: 電子情報通信学会技術研究報告. EA, 応用音響 104(379), pp. 13 - 18, (2004)
- [13] Sandra G. Hart, Lowell E. Staveland: “Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research”: Human Mental Workload, North-Holland, pp.139 - 183, (1988)
- [14] 芳賀 繁, 水上 直樹: “日本語版 NASA-TLX によるメンタルワークロード測定各種室内実験課題の困難度に対するワークロード得点の感度”: 人間工学 Vol. 32 No. 2 pp. 71-79 (1996)
- [15] 島崎潤: “神経眼科 20”, (2003)
- [16] 東川 知生, 山本 景子, 倉本 到, 辻野 嘉宏: “デスクワーク時における瞬目に基づく疲労蓄積の検出と適切な休憩タイミングの提示”: 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , pp. 1 - 6, (2012)
- [17] JINS : ES — PRODUCTS — JINS MEME 入手先 (<https://jins-meme.com/ja/products/es/>) (参照 2016-12-16).
- [18] Diane J. Cook, Juan C. Augusto, Vikramaditya R. Jakkula: “Ambient intelligence: Technologies, applications, and opportunities”: Pervasive and Mobile Computing 5(4), pp.277 - 298 (2009)