

脳波によるヒューマンエラーの予兆となる注意力の低下の検知 Detecting Decreased Attention as Symptom of Human Errors by Brain Wave

稲田 脩二[†] 早川 孝之[‡] 黄 宏軒[§] 原田 史子[§] 島川 博光[§]

Shuji Inada Takayuki Hayakawa Hung-Hsuan HUANG Fumiko Harada Hiromitsu Shimakawa

1. はじめに

機械による作業の自動化がされていない作業現場では、作業員による事故や品質不良などの問題が発生している。事故が発生すると作業員の負傷や、命を落とす場合がある。また、製品の品質不良が発生すると顧客の信頼の喪失や作業工程の後戻りなどの損害を被る。こうした事故や品質不良を引き起こす要因としてヒューマンエラーが挙げられる。ヒューマンエラーとは、作業員が行おうとする行動から不本意に逸れてしまうことであり、システムから要求された作業結果からの逸脱 [1] と定義されている。作業現場でのヒューマンエラーは疲労や慢心による作業員の注意力の低下が原因である。そのため早期に作業員の注意力の低下を検知し、警告や休憩を促すことでヒューマンエラーを未然に防ぐ必要がある。

本論文では、作業員の脳波を取得することで作業員の注意力を評価する手法を提案する。本手法では、作業員の頭部に脳波センサを装着することで、作業中の脳波の周波数成分を取得する。作業員の脳波の周波数成分と、事前に教師データとして取得した注意力が適切に働いている状態の脳波の周波数成分を比較して、教師データの特徴と一致するか分析することで作業員の注意力の低下を検知する。注意力には複数の情報の中から特定の情報のみに注意する選択的注意と、複数の情報に同時に注意する分割的注意がある。本手法では、選択的注意と分割的注意のふたつの場合で、教師データから注意力が適切に働いている状態が判定するための閾値を設定する。脳波の周波数成分が設定した閾値に適合するか確認することで教師データとの比較を行う。

2. ヒューマンエラーと注意力

2.1 ヒューマンエラーと注意力の関係

作業員の適切な判断や思考が欠落することは、疲労や慢心によって作業中の注意力が低下することで起こるとされる。注意とは課題を行うのに必要だと判断した情報に対して反応することや注目することである。注意力が低下して起こるヒューマンエラーとして、車の運転において意識や注意力の低下による判断の遅れである内在的前方不注意 [2] などがある。

注意が適切に働いている状態は二段階あり、第一の段階は、作業員が意識して注意力を働かせている状態である。このとき、作業員の脳は活発に活動していると考えられる。第二の段階は、作業に必要な情報に注目、もしくは反応していて、かつ、それ以外の情報には注目も反応もしない状態である。この状態は自動的処理 [3] と呼ばれる。自動的処理状態においては脳の活動は必要最小限に抑えられると考えられる。よって自動的処理状態に入ることにより、作業員は安定して作業を続けられる。

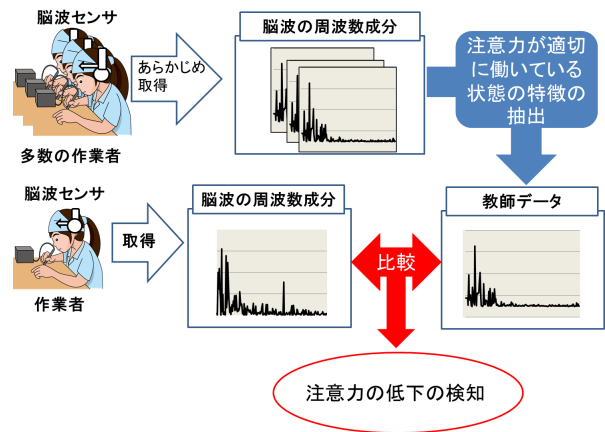


図 1: 手法概要図

しかし、作業を長く続けると疲労や慢心によって自動的処理状態が崩れ、エラーを起こすと考えられる。このような作業員の状態の移行を計測し判定できれば、作業員の注意力の低下を検知でき、警告や休憩を促すことで、事故や品質不良を未然に防ぐことができる。

2.2 既存研究

疲労や慢心などの作業員の状態が原因となるヒューマンエラーを防ぐために、現在は作業員の動きを測定することで作業員の状態を確認する研究がある。

文献 [4] は加速度センサで作業員の動きを測定し、正常時の動作と比較することで疲労の検知を行う。しかしこの手法では繰り返し同じ動作を行う作業にしか適用していない。

文献 [5] は加速度センサを椅子に取り付けて椅子の動きが大きくなると集中度が低下したと判断する研究が進められている。しかし、この手法は椅子に座る作業にしか適用できない。

これらの研究の問題点としては限られた作業にしか適用できないことが挙げられる。この問題を解決する為に、作業動作に関係なく作業員の状態を確認する方法を考える必要がある。

3. 脳波センサを用いた作業中の注意力の評価

3.1 脳波を用いた作業員の状態移行の推定

注意力とは意識を働かせる力であり、意識を働かせていることは脳が高い活動状態にあることを意味する。脳波の周波数成分から意識水準や脳の活動状態がわかる [1] ので、作業員の脳波を取得し、周波数成分を分析することで、作業員の注意力を評価できる。手法の概要図を図 1 に示す。

作業員は作業を続けることで疲労や慢心によって注意力が低下すると考えられる。選択的注意、分割的注意のふたつの場合で、あらかじめ実験によって作業員の脳波の周波数成分を取得しておき、これらの周波数成分から、

[†]立命館大学大学院 情報理工学研究科

[‡]三菱電機株式会社

[§]立命館大学 情報理工学部



図 2: チェリーの実験内容

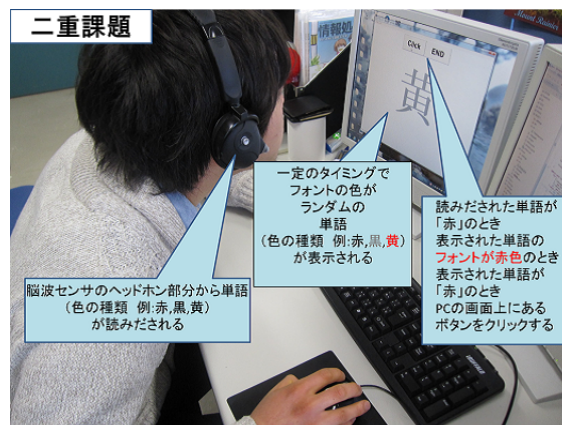


図 3: 二重課題内容

注意力が適切に働いている状態の特徴を抽出して教師データとする。

教師データと、あらたに特定の作業員から取得された脳波の周波数成分を比較することで、作業員の注意力が適切に働いている状態か評価する。教師データの特徴と一致しなくなったときに作業員の注意力が低下したと判断する。注意力の低下を検知できれば、警告もしくは休憩を促すことにより、ヒューマンエラーを未然に防げる。

3.2 取得される脳波

脳波は周波数帯域ごとに分類されており、主に低周波数帯域から順に δ 波、 θ 波、 α 波、 β 波の 4 つに分類される [6]。また β 波の高周波数帯を γ 波と呼ぶ場合がある。これらの周波数成分から意識水準や脳の活動状態を判断でき、 δ 波の成分が多いと脳が熟睡状態、 θ 波の場合はまどろみ状態、 α 波の場合は安静状態、 β 波の場合は興奮状態であるとされる [1]。

本手法では脳波センサによって取得できる δ 波、 θ 波、低 α 波、高 α 波、低 β 波、高 β 波、低 γ 波、高 γ 波といったさらに細かく分類された周波数帯のパワースペクトル値を取得し、分析することで作業員の注意力を評価する。

3.3 教師データの取得

本手法では事前に選択的注意と分割的注意でそれぞれ注意力が適切に働いている状態の脳波の特徴を同定する必要がある。本実験では、選択的注意が必要な課題と、分割的注意が必要な課題中の脳波を取得して、それぞれの可能な限りミスが発生しない脳波の特徴を確認し、注意力が適切に働いている状態の脳波の特徴とする。

作業員として 20~30 代の男女を考え、選択的注意を必要とする課題では 30 名、分割的注意を必要とする課題では 35 名を対象として脳波の周波数成分を取得した。被験者は頭部に脳波センサを装着し、選択的注意を必要とするチェリーの実験と分割的注意を必要とする二重課題を行い、課題中の脳波を取得した。

チェリーの実験は両耳分離聴とも呼ばれており、両耳で異なるメッセージを流し片方だけを追唱させる課題である。チェリーの実験の内容を図 2 に示す。これは選択的注意の例であるカクテルパーティ効果 [7] をおこす課題である。

本実験では 3 分間、チェリーの実験を行い、脳波を取得した。聞き取るべきメッセージを聞き取れているか判

断するためにメッセージ内の特定の単語が聞き取れた際にボタンを押させる、反応すべき単語に対してボタンを押せていたかどうかの成績を被験者の選択的注意の度合いとする。この成績が良い時間帯は選択的注意が適切に働いている状態にあったとして、脳波の周波数成分を分析し、この状態の脳波の特徴とする。

二重課題は異なった課題を同時に行う課題であり、本実験では視覚への刺激と聴覚への刺激に対して同時に適切に反応させる。二重課題の内容を図 3 に示す。

本実験では約 3 分間、二重課題を行い、脳波を取得した。反応すべき刺激に対してボタンが押されているかの成績を被験者の分割的注意の度合いとする。この成績が良い時間帯は分割的注意が適切に働いている状態にあったとして、このときの脳波の周波数成分の特徴を同定する。

3.4 作業員の脳波の周波数成分の特徴

選択的注意を必要とするチェリーの実験において、実験の開始から 2 秒後にひとつめの反応すべきキーワードが作業員に聞こえてくるように設定した。この刺激に対して反応できた作業員は 30 名中 17 名と半数ほどしかいなかった。これは、実験の開始直後なのでまだ注意が高くないためであると考えられるので、ひとつめのキーワードに関してはミスを数えないものとする。

ひとつめのキーワードに対するミスを無視したうえで、ふたつの課題中に注意力の遷移によって脳波に現れたとされる特徴を図 4 に示す。

これらの脳波の共通の特徴のひとつめとして、低 α 波が高い値を示した後に低 α 波や低 β 波が低い値を示すという特徴が現れ、チェリーの実験では被験者 30 人のうち 12 人、二重課題では 35 人中 13 人の脳波に現れた。そして、この特徴が現れたあと、低 α 波や低 β 波が低い値が示している間は、これら 25 人でミスをした作業員はいなかった。この特徴を、本論文ではピーク後低安定特性と呼ぶことにする。

ふたつめの特徴として、ピーク後低安定特性が現れた後に低 α 波や低 β 波の値が上昇するとミスが発生しやすいという特徴が現れた。この特徴はピーク後低安定特性が現れた被験者の中でチェリーの実験では 7 人に現れ、4 人が特徴が現れた後にミスをし、二重課題では 3 人に現れ、3 人全員が特徴が現れた後にミスをした。

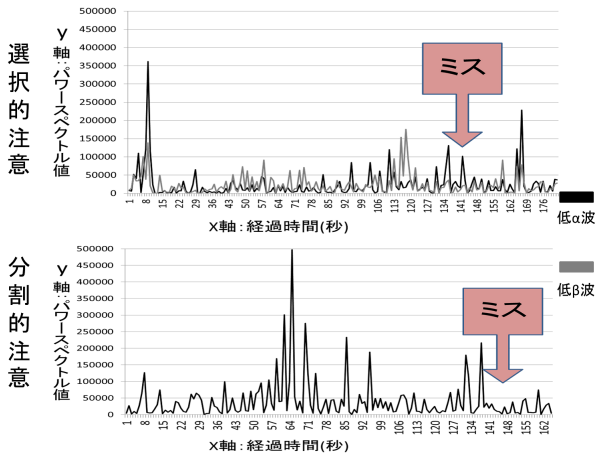


図4: 課題中に特徴として現れた脳波

3.5 自動的処理との関連

選択的注意と分割的注意とで注意力が適切に働いている状態を判定する脳波の特徴に多少の差はあったが大きな違いは見られなかった。

低 α が上昇後、低 α 波や低 β 波の周波数成分が低い値を示し続けたことは、作業者が自動的処理状態になったからだと考えられる。自動的処理が行われることで、脳の活動が必要最小限に抑えられ、周波数成分が低い値を指し示すようになったと考えられる。また、自動的処理を行う前段階である、作業者が意識的に注意力を働かせている状態が、低 α の上昇として現れたと考えられる。作業者が自動的処理状態になったとされる後に低 α 波や低 β 波が上昇するとミスが起こるのは自動的処理中に不必要な意識の働きが発生することで自動的処理状態ではなくなったからであり、それが作業における注意力低下であると考えられる。

上記の考察から、本実験の結果において、脳波にピーク後低安定特性が現れた被験者は、注意力が適切に働いたと考えられる。

4. 脳波特性の定量化

4.1 TimeTubeによる閾値設定

作業者の注意力を評価するにあたり、事前に抽出したピーク後低安定特性を定量化する必要がある。そこで、脳波の周波数成分の時間的推移を調べるため、本研究ではTimeTube[8]を用いた。

n 個のデータ項目の値が周期的、あるいは非周期的に収集される監視対象の状態は、 n 次元の超平面上の点として表される。これにより、時間経過による監視対象の状態遷移は、時間軸を加えた $(n+1)$ 次元の超空間内の軌跡として捉えられる。

監視対象が満たすべきものは条件に関連付けられた時間セグメントの並びとする。各期間に対し、時間セグメントの長さに加えて、 n 個のデータ項目の値に対する不等式が指定される。この条件は n 次元の超平面上の領域に相当する。図5に示されるように、 $(n+1)$ 次元の超空間では、時間方向に時間セグメントの長さだけ平行移動してできるチューブ状の部分空間を得ることができる。このチューブ状の部分空間に監視対象の状態遷移の軌跡が含まれると仮定する。それは監視対象が指定された時

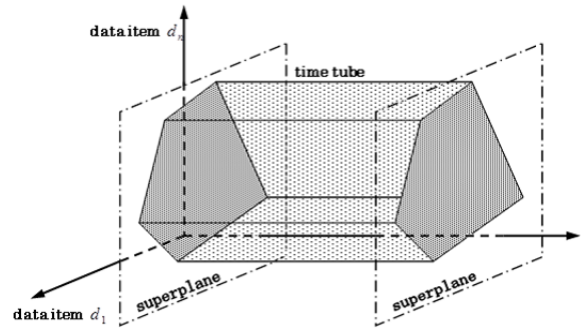


図5: TimeTube

間セグメントで条件を満たすことを意味し、この部分空間をTimeTubeと呼ぶ。

n 個のデータ項目 d_1 から d_n が与えられ、 $d_j, d_{j+1}, \dots, d_{j+k-1}$ の k のデータ項目についての不等式でTimeTubeである T_m が表される。

TimeTubeである T_1 から T_i までが時間順に並んできた時間推移を考えた際、間的推移の発生を検知するために、監視対象から得られた時系列データは、TimeTubeの中で指定された条件を満たすかどうかをチェックされる。本手法ではこのTimeTubeを用いて作業中の注意力が適切に働いている状態を定量化し、閾値を作成することで、作業者の注意力を評価する。

4.2 TimeTubeの作成

TimeTubeを用いたピーク後低安定特性の定量化評価において、まず、低 α 波の値が高い値を示すことを検知する閾値 P を設定する必要がある。

低 α 波の値が高くなったことを判定する閾値 P の設定方法は、一度低 α 波が上昇し、その後、脳波が低い値で安定していると目視で判断された作業員から脳波が低い値で安定しているときにミスをした作業員を取り出し、目視で低 α 波の値がピークの時間帯を抽出する。作業員 i について、この時間帯の波形データのうち最大値を M_i として、 $\max_i(M_i)$ を算出する。算出した $\max_i(M_i)$ よりも高い低 α 波が現れたあと、目視で脳波が低い値で安定していると判断され、ミスが発生しない作業員から、低 α 波の値が高い値を示している時間帯を目視で抽出する。作業員 j について、この時間帯の波形データのうち最大値 N_j として、 $\min_j(N_j)$ を算出し、一度、低 α 波の値が高くなったことを判断するうえでの閾値 P とする。

次に、自動的処理が行われ、脳波が低安定状態にあるか判定するTimeTubeを作成する必要があるため、TimeTubeの下限は0として、上限 h と長さ l を設定する。

TimeTubeの上限 h の設定は、上記の低 α 波の値が高くなったことを判断する閾値 P に適合し、脳波が低い値で安定している期間があり、脳波が低い値から乱れたあとにミスをしたと目視で判断された被験者を取り出し、目視で脳波が乱れたとされる時間帯を抽出する。作業員 i について、この時間帯の波形データのうち最大値 M_i として、 $\min_i(M_i)$ を算出する。算出した $\min_i(M_i)$ よりも低い値で安定し、ミスが発生しない時間帯がある被験者から、脳波が低い値で安定している時間帯を目視で抽出する。作業員 j について、この時間帯の波形データのうち最大値を N_j として、 $\max_j(N_j)$ を算出し、脳

波が低安定状態か判定する TimeTube の上限 h とする。

TimeTube の長さ l については、低 α 波の値が高くなったことを判断する閾値 P によって低 α 波が高い値を示したと判断されたあと、TimeTube の上限 h より低い値で脳波が安定していると目視で判断された作業員を取り出す。作業員 i について、TimeTube の上限 h より低い値を示し始めた時間から、TimeTube の上限 h を超えてしまった時間までの長さ L_i として、 $\min_i(L_i)$ を算出し、脳波が低安定状態か判定する TimeTube の長さ l とする。

上記の閾値の設定手法により選択的注意と分割的注意のそれぞれにおける P , l , h の値を P_s , l_s , h_s , P_d , l_d , h_d とする。選択的注意において、低 α 波の値が $P_s = 307864$ 以上まで上昇後、 $l_s = 36$ 秒以上、低 α 波と低 β 波の値が $h_s = 164185$ 以下の値を示し続けている間、分割的注意においては、低 α 波の値が $P_d = 425507$ 以上まで上昇後、 $l_d = 26$ 秒以上、低 α 波の値が $h_d = 183087$ 以下の値を示し続けている間、注意力が適切に働き、自動的処理状態であると判定する閾値を設定した。

4.3 閾値による作業員の作業の評価

本手法により、設定した閾値が作業員の注意力を評価できているかを確認する。確認方法は、実験全体の正答率、作業員の脳波が閾値に適合し、自動的処理状態であると判定された時間帯の正答率、作業員の脳波が閾値に適合しなくなり、注意力が適切に働いていないと判定された時間帯の正答率を比較することで行う。

正答率

実験中にどのくらい反応すべき刺激に対して反応できているかを表す指標。注意力が適切に働き、ミスが少ない場合、この値は大きくなる。

$$\text{正答率} = \frac{\text{全作業員の試験中での正解反応数}}{\text{全作業員の試験中での反応すべき刺激数}}$$

作業員の脳波が、作成した TimeTube に適合する時間帯、すなわち、自動的処理状態であるとされる時間帯の正答率が、実験全体の正答率よりも上回り、作業員の脳波が TimeTube から逸脱したあとの時間帯の正答率が、実験全体の正答率よりも下回っていけば、実験中の作業員の状態を評価できていると考えられる。

チェリーの試験における実験全体の正答率と閾値に適合する時間帯の正答率、閾値に適合しなくなった時間帯の正答率を表 1 に示す。

実験の結果、本手法で実験中に選択的注意が適切に働いていると判定された時間帯の正答率が 1.000 と、実験全体の正答率を上回り、選択的注意が適切に働いていないと判定された時間帯の正答率が 0.600 と、実験全体の正答率より大きく下回る結果となった。この結果から、今回のチェリーの試験においては脳波によって作業員の注意力を評価できると考えられる。

次に、二重課題における実験全体の正答率と閾値に適合する時間帯の正答率、閾値に適合しなくなった時間帯の正答率を表 2 に示す。

表 1: チェリーの試験での閾値による成績差

	刺激数	反応数	正答率
実験全体	240	213	0.888
閾値に適合する時間帯	38	38	1.000
閾値に適合しなくなった時間帯	15	9	0.600

表 2: 二重課題での閾値による成績差

	刺激数	反応数	正答率
実験全体	665	638	0.959
閾値に適合する時間帯	115	113	0.983
閾値に適合しなくなった時間帯	51	47	0.922

実験の結果、本手法で二重課題において分割的注意が適切に働いていると判定された時間帯の正答率が 0.983 と、微増ではあるが実験全体の正答率を上回り、分割的注意が適切に働いていないと判定された時間帯の正答率が 0.922 と、微減ではあるが実験全体の正答率より下回る結果となった。この結果から、今回の二重課題においても脳波によって作業員の注意力を評価できると考えられる。

5. おわりに

本論文では、作業員のヒューマンエラーを防止するために、作業員の脳波を取得することで注意力を評価する手法を提案した。本手法では、作業員の頭部に脳波センサを装着し、作業員の脳波の周波数成分を取得する。作業員の脳波の周波数成分が、事前に教師データとして取得した注意力が適切に働いている状態の脳波の周波数成分の特徴と一致するか閾値を用いて比較することで、作業員の注意力を評価する。

今後は、今回の手法で用いた閾値が、他の作業においても作業員の注意力を評価できるものかを検証していく。

参考文献

- [1] 橋本邦衛: "安全人間工学", 中央労働災害防止協会, 2004
- [2] 田久保宣晃: "交通事故データによる運転者のヒューマンエラーと心的負荷の一考察", 国際交通安全学会誌 vol.30, No3, pp299-308, 2005
- [3] 心的資源の配分と集中, <http://homepage1.nifty.com/kamegaya/classroom/ninchi04.htm>, 2012年12月参照
- [4] 林利毅, 原田史子, 島川博光: "ヒューマンエラー防止のための非作業動作検出", 情報科学技術フォーラム講演論文集, vol10, 2011
- [5] 大久保雅史, 藤村安耶: "加速度センサーを利用した集中度合い推定システムの提案", インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ論文集, vol16, 2008.
- [6] 中村隆治, 藤井英二郎: "生垣とブロック塀をみたときの脳波特性の比較", 造園雑誌, vol.55, No5, pp139-144, 1992
- [7] 赤木正人: "カクテルパーティー効果とそのモデル化", 電子情報通信学会誌, vol.78, No5, pp.450-453, 1995
- [8] Hiromitsu Shimakawa, Hiroyuki Yamahara, Yuseke Imayama, Masato Ushijima, Shinsuke Asuma, "Pattern Refinement with Model Data Fusion to Predict Exchange Rate Movement", Design and Application of Hybrid Intelligent System, IOS, pp.662-671, 2003