

簡易脳波測定によるリアルタイムな思考状態導出手法

林 剛史* 福井 健太郎* 宮田 章裕* 重野 寛* 岡田 謙一*

本稿では、簡易脳波測定によるリアルタイムな思考状態導出手法を提案する。簡易脳波計を用いて脳波情報より思考状態を推定する際には、ノイズや脳波の個人差を考慮しなければならないため、リアルタイム処理が困難である。また、思考を時間幅のあるプロセスと捉えて過去の思考の影響を考慮している手法が従来にはみられなかった。そこで、本提案ではノイズを除去し、個人差を考慮し、時間幅を考慮することにより簡易脳波計よりリアルタイムに思考状態を MS-Level という独自の指標で数値化する手法を提案する。そして、提案概念を検証するために MS-Level を導出するプロトタイプシステムを用いた評価実験ではノイズの除去が確実に行われていること、時間幅を考慮して思考状態を有効に提示できることを確認した。

A Technique for Estimating Mental States in Real-Time from the EEG

Takefumi HAYASHI* Kentaro FUKUI* Akihiro MIYATA*
Hiroshi SHIGENO* Kenichi OKADA*

In this paper, we propose a technique for estimating mental states in real-time from the EEG (electroencephalogram). When we estimate mental states from brain wave information by using an EEG in real-time, it is necessary to consider the noise and the individual variability of the brain wave. Also, there seemed to be no studies to consider thinking as time-width process which is affected by the past thoughts. To address these issues, we propose a method to quantify the mental state as the MS-Level (Mental State Level) in real-time by eliminating the noise, considering of the individual variability and treating the thinking as the process with the time width. We ran experiments to evaluate our proposition using a prototype system, and concluded that the noise have been removed surely and to present the mental state effectively using past EEG data.

1 はじめに

近年、脳波を用いて日常的な場面で人の思考状態を推定する研究が増えてきている。この場合、脳波を手軽に計測することができ、比較的自由に動くことのできる簡易脳波計で測定するのが適している。しかし、簡易脳波計で得られる情報は限られており、体を動かすことにより簡単にノイズが混入してしまう。また、脳波の個人差についても考慮しなければならないため、簡易脳波計で得られたデータをリアルタイムに処理することが困難である。人の思考は時間的に離散しているものでなく連続しているものであると考えることができるので、思考を時間幅のあるプロセスとして捉えなければならない。従来の手法では思考状態を推定する際にこれらの点を考慮しきれておらず、リアルタイムに簡易脳波計より思

考状態を推定するのが難しいという現状がある。

そこで本研究では、思考を時間幅を持って捉える、ノイズを除去する、脳波の個人差を考慮することにより、簡易脳波計を用いてリアルタイムに思考状態を導出する手法を提案する。本手法では「思考状態」を「MS-Level」として独自の指標で定義し、リアルタイムな思考状態の数値化を実現している。その際、過去の思考の影響を考慮して過去の脳波データを使用している。また、この提案を実現し簡易脳波計より得られたデータから思考状態を MS-Level として導出するプロトタイプシステムを作成した。

以降 2 章では脳波を利用した思考状態の推定について述べる。3 章で簡易脳波測定によるリアルタイムな思考状態導出手法を提案し、4 章でプロトタイプシステムの実装について述べる。5 章では予備実験、6、7 章では提案概念を評価するための実験について述べ、最後に 8 章で本研究の結論と今後の展望について述べる。

* 慶應義塾大学 理工学部 情報工学科
Department of Instrumentation(Information), Faculty of
Science and Technology, Keio University

2 脳波を利用した思考状態の推定

2.1 脳波情報の利用

脳は思考を行い感情を生み出しているところであり、脳の活動具合を知ることにより人の思考状態を推定することができると考えられる。思考状態のひとつの指標として日常的な場面で用いるとさまざまなメリットが生じる。例えば、会議中の参加者の思考状態を推定することにより、参加者の本心を反映することができる。社会的立場などの面から、必ずしも本心が相手に伝わらないほうがよいということもあるが、思考状態を反映させることで会議に対する参加意欲や集中度を知ることができ、話題の転換、発言者の指名など今まで以上にスムーズに会議をすすめることができると考えられる。このように自分または相手の思考状態を知ること、より直感的にさまざまな状況を把握することが可能であると思われる。

脳の活動状態を調査する方法にはさまざまな方法があるが、その中でも脳波は比較的手軽に計測することができる。脳波とは、脳の活動に伴って頭皮上に生じる電位の事であり、脳の活動状態やさまざまな刺激に関連して電位変化を示す。脳波はその周波数帯域から、眼球運動などにより発生するノイズ (0 - 1 Hz), δ 波 (1 - 4 Hz), θ 波 (4 - 8 Hz), α 波 (8 - 12 Hz), β 波 (13 - 30 Hz) などの成分に分類することができる。中でも前頭部で顕著に観測される β 波は、思考を要する作業を行う時に強く出現し、思考を要しない作業時にはあまり出現しないという特徴がある [1][2]。

2.2 脳波を利用して思考状態を推定する研究

β 波と思考の関連を利用して、脳波情報より人間の感情解析を行う感性スペクトル解析法が提案されている [3]。この手法では頭部のさまざまな部位から得た脳波情報と各感情を対応付け、特定のパターンを抽出して感情解析を行っている。

近年では、計測中も自由に動くことのできる簡易脳波計を用いて日常的な場面で人の思考状態を推定する試みも多く行われている [4][5][6]。この研究例として、脳波情報から導出した参加者の思考の状態を互いにウェアできるコミュニケーションシステムを構築する研究がある [4]。また、ウェアラブル機器で映像を記録する際に同時に脳波情報を記録し、この脳波情報を利用して映像を編集する研究 [5] や、複数人からなる撮影グループで撮影した映像素材を自

動編集する際に、撮影者の脳波情報をキーの1つとして利用している研究もある [6]。

3 簡易脳波測定によるリアルタイムな思考状態導出手法の提案

2.2 節で述べたように、近年では簡易脳波計を用いて日常的な場面で脳波情報より思考状態を推定する研究が増えてきている。簡易脳波計は装着しても身体を自由に動かすことができるが、このことによりデータにノイズが混入しやすくなってしまう。また、脳波の強度に存在する個人差についても考慮しなければならない。このようにノイズの混入や個人差が生じるといった問題のため、簡易脳波計から得られる脳波情報をリアルタイムに処理するのは困難である。さらに、人の思考を時間的に離散したものでなく、連続したプロセスであると捉えると、思考状態を推定するには過去の思考の影響を考慮しなければならない。

しかし、従来の手法はこれらの点を考慮しきれておらず、簡易脳波計からの限られた情報よりリアルタイムに思考状態を推定する手法として用いるのは困難である。

そこで、我々はノイズの除去、個人差の考慮、時間幅をもって思考を捉えることにより簡易脳波測定によるリアルタイムな思考状態導出手法を提案する。

一般的な簡易脳波計では前頭部しか計測することはできないが、前頭部で検出することのできる β 波は思考を要する作業を行うときに強く出現するという報告があるので [2]、思考を表す指標としてふさわしいと言える。よって、本手法では簡易脳波計で測定した脳波情報に基づいて思考状態を導出する。

3.1 MS-Level (Mental State Level)

本手法では、人が「どの程度思考しているか」という思考状態をあらわす指標として MS-Level (Mental State Level) を定義し、思考状態を数値化した。MS-Level 導出の手順は以下の通りである。

1. 計測された脳波を周波数分解し、ノイズなどの問題で使用できない周波数帯域のデータを除去する。また、使用する帯域においても筋電位などに由来する瞬間的で非常に大きなノイズを除去する。
2. 思考状態を的確に表す周波数帯域のデータを平均し、1 サンプルの脳波データと定義する。

3. 脳波の個人差を考慮し、脳波データの強度の範囲を自動検出する。
4. 各瞬間において最新 N サンプルの脳波データに重み関数をかけて加算し、その値をその瞬間の MS-Level と定義する。

3.2 ノイズの除去

まず、筋電やまばたきなどのノイズが非常に多い低周波数帯 (0-4 Hz) と、脳波自体が微弱な高周波数帯 (40-60 Hz) が除去される。使用する帯域に関しても、筋電などで瞬間的に非常に大きなノイズが入るという性質を考慮し、周波数分解された脳波の各周波数帯でノイズと考えられる強度を実験的に測定し、閾値を設けることによってノイズの除去を実現する。

3.3 1 サンプルの脳波データ

ノイズの除去を施した後のデータの中から、思考状態を的確に表している $f_{low}Hz \sim f_{high}Hz$ のデータを抽出し、この区間の周波数帯のデータを平均して 1 サンプルの脳波データとする。

ここで、思考状態を的確に表す周波数帯について考慮したのは、一般に β 波とよばれる周波数帯が広く、思考を要する作業でも若干その内容により使われる周波数帯が異なることを確認しており、簡易脳波計で得られた脳波情報より思考状態を推定する際に β 波とよばれる周波数帯全て (13-40 Hz) を用いるのが適していない可能性があると考えたからである。そこで我々は、思考を要するタスクを被験者に課すことにより、思考状態を的確に表すことのできる周波数帯 $f_{low}Hz \sim f_{high}Hz$ を実験的に計測し、導出した。この詳細については 5 章で述べる。

3.4 個人差への対応

本手法では脳波強度の個人差を考慮し、脳波データの最低値と最高値を人ごとに定義し、この範囲を自動的に検出することにより相対的に思考状態を数値化する。ここで、最低値とは「思考していないとき」、最高値とは「思考しているとき」の脳波データのことである。また、最低値と最高値を常に監視し、これらの値をリアルタイムに変化させている。

3.5 時間幅の考慮

最高値と最低値を設けて相対的に思考状態を数値化する際に、本手法では過去の N サンプルの脳波データを用いる。これは、思考というものが短期的なものだけでなく時間幅のあるプロセスであると考えたからで、時間幅を考慮することにより長期的な思考

の変化具合を捉えることができる。また、取り除ききれなかった瞬間的なノイズの影響を減らすという意味もある。

そして過去の N サンプルを等価に扱うのではなく、新しいサンプルほど重みが大きくなるように重み関数を掛け、これをその瞬間の MS-Level と定義する。MS-Level の導出方法は以下の通りである。

$$MS\text{-Level}(x) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (N-i) Power(x-i)}{\sum_{i=0}^{N-1} (N-i) (Power_{max} - Power_{min})}$$

この際、各パラメータは以下のものを表している。

- N : 使用する最新脳波サンプル数
- x : 脳波データのサンプル ID
- $Power(x)$: ID が x の脳波データの強度
- $Power_{max}$: 脳波データのサンプル ID が x の時の脳波データの最高値
- $Power_{min}$: 脳波データのサンプル ID が x の時の脳波データの最低値
- $MS\text{-Level}(x)$: 脳波データのサンプル ID が x の時の MS-Level

なお、用いる過去サンプル数 N の値は、「驚き」や「閃き」といった秒単位での思考状態の変化を知りたい場合は小さく、逆に長時間の思考状態の変化を知りたいような場合には大きくしてより過去の影響を考慮する必要がある。このように N の値は思考の変化をどのくらいの粒度で捉えるかに依存している値であるので、計測者の作業内容によって考慮しなければならない値である。

4 プロトタイプシステムの実装

4.1 脳波データの取得

我々は、簡易脳波計から得た脳波情報より思考状態を MS-Level としてリアルタイムに導出するプロトタイプシステムを作成した。

本システムでは脳波を計測する際に、IBVA Technology 社のヘッドバンド型簡易脳波計 IBVA を利用した。この装置はヘッドバンドを頭部に装着するだけで前頭部の脳波を計測することができ、脳波計から PC へ無線でデータ転送を行うため、計測者は自由に動き回ることができる。

PC では脳波計から得たデータに 128 ポイントで高速フーリエ変換することにより、約 0.87 sec / sample という速度でデータを記録している。

4.2 MS-Level の導出

本システムでは、3.1節で説明した手順に基づき、以下のような手順でMS-Levelを導出する。

1. 実際の計測に先立って、まず計測者に故意に筋電位などのノイズを生成させ、各周波数帯でのノイズの強度の閾値を設定する。これにより、1サンプルの脳波データを数値として取得できるようになる。
2. 次に、計測者の脳波データの最高値・最低値を計測するため思考を要するタスク・思考を要しないタスクを課す。脳波データの最高値・最低値が求まることにより思考状態をMS-Levelとして数値化することが可能となる。
3. 実際の計測を開始する。

このように、本システムでは計測者はノイズの生成、最高値・最低値の計測というキャリブレーションタスクを行ってから実際の計測を開始する。

4.3 プロトタイプシステムインターフェース

簡易脳波計から得られた脳波を解析し思考状態をMS-Levelとして数値化するためのプロトタイプシステムのインターフェースを図1に示す。本システムでは計測中の脳波の波形やMS-Levelの値をリアルタイムに表示することができる。

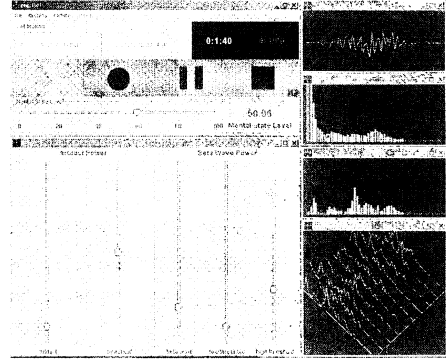


図 1: MS-Level 導出システムインターフェース

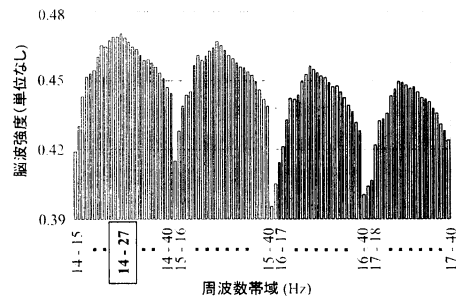


図 2: 論理思考時の各周波数帯の脳波強度 (予備実験, 60 人の平均)

5 予備実験：使用する周波数帯域の決定

5.1 実験内容

この実験の目的は MS-Level を導出する際に使用する脳波の周波数帯域 $f_{low} \sim f_{high} Hz$ を決定することである。

被験者 60 名 (19 - 25 歳の学生) に対して「思考を要するタスク」として「論理思考」、「思考を要しないタスク」として「リラックス」の各タスクを課した。タスクの時間はどちらも約 4 分間であり、各タスク中の脳波を測定し、解析した。

なお、「論理思考」を思考を要するタスクとして選んだのはこの実験に先立って行われたさまざまなタスク中の脳波計測の実験の結果を考慮しているものである。

5.2 実験結果

「リラックス」時の各周波数帯の脳波強度を調査したところ、14 Hz 以下は強度が大きくなっていった。これは、リラックス時に α 波があらわれるという報

告と一致している。本手法では「脳波強度が大きいほど思考が活発である」と判定しているので「リラックス」時に強度が大きくなる帯域を使用するのが適切ではないと判断し、14 Hz 以上の帯域から「論理思考」時の脳波強度が最大となる帯域を調査した。図 1 より、「論理思考」時の脳波強度が最大となる帯域は $f_{low} = 14 Hz \sim f_{high} = 27 Hz$ であり、この帯域が思考を的確に表す周波数帯であると決定した。

6 実験 1：ノイズ除去の確認

6.1 実験内容

本実験の目的は、提案したノイズ除去の方法でノイズが除去できるかを確認することである。

1名の被験者 (23 歳の学生) に脳波計を装着し、ノイズ生成の実験後に 2 分間机上の作業をしてもらった。作業中にノイズが混入するような動作を被験者

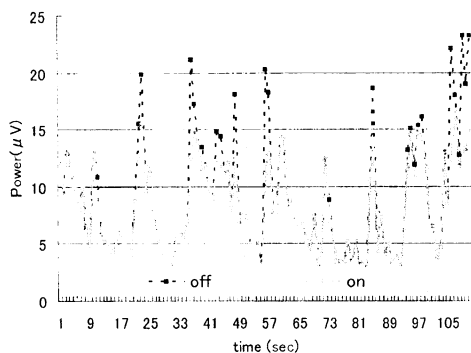


図 3: 実験中の脳波強度の推移 (実験 1)

が行ったらその時間と動作の内容について記録した。実験中の脳波強度をノイズ除去を施す、施さないで解析・比較し、ノイズ除去できているかを調査した。

6.2 実験結果と考察

図 3 は実験中の被験者の 14 - 27 Hz を平均した脳波強度の推移を示したものであり、図中の破線はノイズ除去を施さない場合、実線はノイズ除去を施した場合を示している。また、表 1 は実験中に被験者が行った動作の一覧である。

図 3 でノイズ除去を施すことにより著しく強度の強いデータがなくなっていることがわかる。さらに、その強度が強くなっている時間が表 1 の被験者が動作をした時間とほぼ重なっていることより、ノイズと思われる動作をしたときの強度が確実に除去できていると言える。よって、提案したノイズ除去手法が有効である事を確認する事ができた。

7 実験 2 : 時間幅を考慮することの有効性の評価

7.1 実験内容

本実験の目的は、提案概念である時間幅を考慮して思考状態を提示することの有効性を評価する事である。

被験者 20 名 (21 - 24 歳の学生) に対して本システムを用いて相手の思考状態を観察しながら会話してもらうタスクを課した。詳細は以下の通りである。

- 簡易脳波計を装着し、2 人ずつ向き合って会話してもらう。この際、相手との間に仕切りを設

表 1: 実験中の被験者の行動

時間 (秒)	動作
20	首をうごかす
35	伸びをする
45	頭をおさえる
60	強く瞬きをする
81	伸びをする
94	首・体を動かす
102	強く瞬きをする
110	体を大きく左右に動かす

けたので、被験者は直接相手の顔を見ることはできない。

- 相手の思考状態をあらわすメタファを見ながら会話してもらう。被験者の思考状態は脳波から MS-Level として導出し、そのメタファに反映される。思考状態の変化に応じてメタファは 10 段階に変化をする。
- 相手の思考状態が活発になっていたら自分の話に興味がある、逆に相手がリラックスしていたら自分の話に興味がないと被験者には考えてもらうようにした。
- 会話してもらう内容はあらかじめ用意したものであり、2 人で意見を 1 つに導出してもらうものである。

以上の内容で実験を行い、被験者には相手の思考状態をあらわすメタファの様子について観察してもらった。また、時間幅を考慮せず MS-Level を導出し、メタファに反映させるという条件においても会話してもらい、時間幅を考慮するときと比較してもらった。

なお、本実験で MS-Level 導出に使用した過去サンプル数は $N = 7$ であり、これは、会話時の思考状態の変化をあらわすサンプル数として妥当なものを選ぶという少数数での実験の結果に基づくものである。

7.2 実験結果と考察

表 7.2 に示すのは、会話後に相手の思考状態をあらわすメタファについて被験者に対して行ったアンケートの結果である。

- 相手の思考状態をよくあらわしていた
時間幅を考慮した時のほうが評価が高かった。これは、時間幅を考慮することにより的確に会話時の思考状態をあらわすことができたためであると考えられる。

表 2: 実験 2 のアンケート結果

	評価の平均値 (低: 1 - 高: 6)	
	時間幅あり	時間幅なし
相手の思考状態をよくあらわしていた	3.6	3.1
相手の思考状態の変化がほげしかった	2.1	5.0
自分の話に興味があるかわかりにくい	2.7	4.8

● 相手の思考状態の変化が激しかった

時間幅を考慮しない方が評価が高かった。これは、時間幅を考慮しないことにより短期的な思考の変化を捉え、「驚き」や「ひらめき」などの要素が入ってきてしまい、思考状態の変化が激しくなったためと考えられる。

● 自分の話に興味があるかわかりにくい

時間幅を考慮しない方が評価が高かった。これは、時間幅を考慮しないことで短期的な思考の変化を捉えたため、相手の思考状態の変化が激しくなり、自分の話に対して興味を示したかどうか判断することができなくなってしまったためと考えられる。

これらの結果より、時間幅を考慮しないと思考状態が大きく変化してしまい、会話している際の相手の思考状態を的確に反映することができないということが言え、時間幅を考慮してコミュニケーション中に相手の思考状態を提示する有効性が確認された。

しかし、「相手の思考状態を的確にあらわすか」についての評価は時間幅を考慮する、考慮しないで大きな差は見られなかった。人の思考状態というものはその人自身が一番よく理解しているものであり、相手の思考状態を評価することが被験者には困難であったためと考えられ、この点については今後の検討課題であると言える。

8 結論

本稿では、簡易脳波測定によるリアルタイムな思考状態導出手法を提案した。簡易脳波計を用いて脳波情報より思考状態を推定する際には、ノイズや脳波の個人差を考慮しなければならないため、リアルタイム処理が難しかった。また、思考を時間幅のあるプロセスと捉えて過去の思考の影響を考慮している手法が従来にはみられなかった。

そこで我々はノイズを除去し、個人差を考慮し、過去の脳波情報を利用して思考を時間幅をもって捉えることにより、簡易脳波計で得られた脳波情報から

リアルタイムに思考状態を MS-Level として数値化した。思考状態を推定する際の使用周波数帯域は実験より 14 - 27 Hz に決定したが、60 人の計測結果という点で信頼性の高い値であると言える。

MS-Level を導出するプロトタイプシステムを利用した実験ではノイズの除去手法の有効性が確認され、また、時間幅を考慮して思考状態を提示することが有用であることが確認された。

実験ではコミュニケーションの場で相手の思考状態を提示したが、本システムは簡易脳波計を用いており、この他にも日常の様々な場面への応用が期待できる。例えば会議において自分の意見に対する反応よりスムーズに話題を転換できるようになる。また、教育の場に導入すれば演説者の発言に対する聴衆の直感的な反応を得ることができるようになり、自己フィードバックシステムとして使用すれば自分の集中度を知りながら作業をすすめることができる。

このように本システムは様々な可能性を秘めているので、今後は、リアルタイム性という点についてのさらなる検証のため、具体的な場面を想定したアプリケーションを作成し、実験を重ねていくべきであると考えられる。

参考文献

- [1] 加藤象次郎, 大久保堯夫: 初学者のための生体機能の測り方, 日本出版サービス (1999).
- [2] Giannitrapani, D.: The Role of 13-Hz Activity in Mentation, *The EEG of Mental Activities*, pp. 149-152 (1988).
- [3] 武者利光: 「こころ」を測る, 日経サイエンス 1996 年 4 月号, pp. 20-29 (1996).
- [4] K. Fukui, A. M. and Okada, K.: Implementation of Avatar Mediated Communication Environment with Thinking Awareness, pp. 116-120 (2004).
- [5] 相澤清晴, 石島健一郎, 椎名誠: ウェアラブル映像の構造化と要約: 個人の主観を考慮した要約生成の試み, 電子情報通信学会論文誌, No. 6, pp. 807-815 (2003).
- [6] 中村亮太, 市村哲, 岡田謙一, 松下温: 撮影グループの生体反応を相互利用した映像コンテンツ作成, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DI-COMO 2004) シンポジウム, pp. 373-376 (2004).