

# BCI2000 に基づく Brain-Computer Interface システムの構築

## Brain-Computer Interface System Construction based on BCI2000

滋野佑一\* , 酒井元気\*\* , 魏大名\*

Yuichi Shigeno\*, Motoki Sakai\*\*, Daming Wei\*

\*会津大学大学院コンピュータ理工学研究科, \*\*福島大学大学院共生システム理工学研究科

\*Graduate School of Computer Science and Engineering, University of Aizu

\*Graduate School of Symbolic System Science and Technology, Fukushima University

キーワード : BCI2000<sup>1)</sup>, ブレインコンピュータインターフェース (Brain-Computer Interface), 脳波 (EEG),  $\mu$  波 (Mu rhythm), システム構築 (System construction)

連絡先 : 〒 965-8580 福島県会津若松市一箕町鶴賀 会津大学大学院コンピュータ理工学研究科  
生体情報学講座 滋野佑一, Tel: (0242)-37-2666, Fax: (0242)-37-2728, E-mail: m5131107@u-aizu.ac.jp

### 1. はじめに

全身麻痺等の理由により体の自由が利かない人々にとって、歩き回ったり、人とコミュニケーションをとったり、私たちが普段使っている機器を同様に利用することは困難である。この状況を改善するアプローチの1つとして、Brain-Computer Interface(BCI)に関する研究・開発が盛んに行われており、ユーザの脳波を測定、解析することで、キーボード、車椅子、ロボットアーム等の操作を可能にするなど、様々な成果が発表されている。

Fig. 1 で示されるように、BCIシステムは一般的に脳波の取得、信号処理、ユーザへの出力で構成されている。その中で、ユーザの頭皮上に置かれた電極から脳波が取得され、何かしらの信号処理が施され、最終的に出力機器を制御する信号に変換される。従来は、基本的にこれら全ての機能を自分で構築しなければならず、

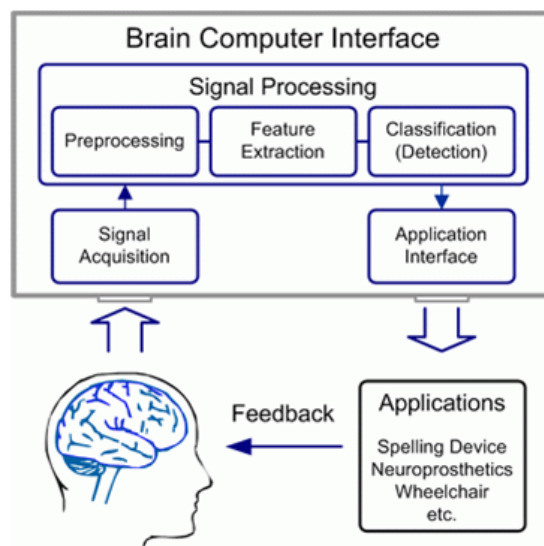


Fig. 1 BCIシステム概要

多大な時間と労力が必要であった。

近年、このBCIシステムの構築で注目されているのが、BCI2000プロジェクトである。BCI2000はニューヨーク州 Wadsworth Center が中心となって行われているBCIの研究・開発プロジェクト

トのことであり、その中で開発された汎用 BCI 構築のためのソフトウェアプラットフォームである。これまでの BCI 研究では、ある方式で測定・記録され、あるアルゴリズムで制御命令に変換されたある脳波は、極少数のユーザのためのある機器を制御することができる、ということを実証しているものがほとんどであり、これらの研究で使用された BCI システムは、継続的な進歩を続けていく上で必要な「柔軟性」を欠いている。これらの問題点を解決するために、BCI2000 プロジェクトは立ち上げられた。

BCI2000 では、多様な実験プロトコルに沿った BCI システムを構築することが比較的容易であり、システム構築のための時間と労力を削減することも期待される。

この BCI2000 を用いて、BCI システムの構築を行う。

BCI システムに利用される脳波として、P300、SSVEP、 $\mu$  波などがある。P300、SSVEP に関しては被験者への刺激提示が必要であり、それによりシステムを操作する仕組みになっているため、対応する刺激提示を待たなければならない。一方で、 $\mu$  波はこのような刺激提示を必要とせず、自分のタイミングで対応するタスクを実行することができるという特徴がある。今回はこの中で、 $\mu$  波を利用する。

$\mu$  波は何もしていない状態で定常的に 8 ~ 12 Hz の周波数成分として現れ、反対側の手足の運動によって抑制される脳波のことである。即ち、右手を動かすと左半球から記録される  $\mu$  波が減衰し、左手を動かすと右半球から記録される  $\mu$  波が減衰する。この現象は、Event Related Desynchronization(ERD) と呼ばれる。そして、 $\mu$  波の ERD は実際に手足を動かす代わりに、その動きをイメージするだけで発生するため、ユーザはこれを利用してシステムを操作する。このように、 $\mu$  波は四肢運動に関連して変動するため、車椅子の移動や左右二者択一の質問に対して、ユーザにとって直感的に操作しやすいシス

テムを構築することができる。

ただ、この  $\mu$  波には次のような特性も存在する。まず、四肢運動のイメージによる  $\mu$  波の自発的なコントロールには一般的に長期間のトレーニングが必要ということである。また、 $\mu$  波の ERD の出やすさには個人差がある。一般的には中心溝付近 (C3、C4、Cz) の帯域 (8 ~ 12 Hz) で観察することができるが、人によって頭部の電極位置と周波数帯域共にばらつきがあり、中にはトレーニング後も十分な効果が見られない人も存在する。これらの理由から、被験者が  $\mu$  波を利用した BCI を扱う場合、事前にトレーニングを行うことが多い。

そこで、 $\mu$  波を利用した BCI を扱う場合、必ずと言っていいほど行われるトレーニングのプロトコルを例に、BCI2000 による BCI システムの構築を行う。

## 2. 手法

### 2.1 BCI2000 システム概要

#### 2.1.1 基本モデル

BCI2000 はあらゆる BCI システムを構築できるようにすることを念頭において設計されている。Fig. 2 は、その BCI2000 の基本的なモデル構造を示している。BCI2000 には、BCI システムに必要な基本的な機能 (脳波の取得、信号処理、ユーザへの出力など) が用意されており、それらはお互いに通信しあう 4 つのモジュールとして実装されている。

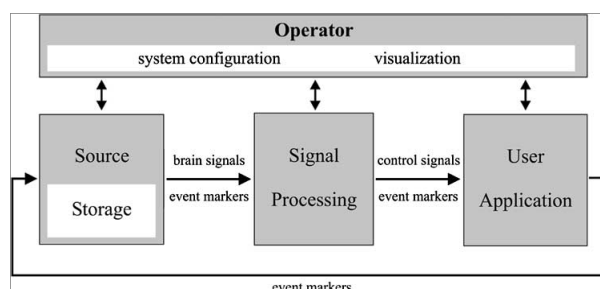


Fig. 2 BCI2000 基本モデル

## Source Module

- データの取得と保存

## Signal Processing Module

- 信号処理

## User Application Module

- 被験者用インターフェース

## Operator Module

- 実験者用インターフェース

モジュールはTCP/IPを基にした、ネットワークプロトコルを通して情報通信を行っている。従って、それぞれのモジュールが別々のプログラミング言語で書かれていても問題はなく、またネットワークに接続された様々な機器上で動かすことができる。

### 2.1.2 互換性と独立性

BCI2000はその互換性と依存性を最小化するために、あらゆるBCIに対して適用可能な原則を基にオブジェクト指向のソフトウェア設計が行われ、これらの原則が実装されている。モジュール間の通信は実験で必要とされる信号や変数などの全ての情報を送ることができる包括的なプロトコルを使用する。従って、モジュール内で変更がなされてもプロトコルを変更する必要はない。1つのモジュールからまた別のモジュールへと通される情報は、モジュール間の依存性を最小化するために標準化されている。BCIシステムに必要な機能は、それぞれ論理的にその機能が属すであろうモジュールの内部で実装されている。例えば、各処理のサイクルはデータのサンプルブロックを取得することで開始されるため、Source ModuleはBCI2000のシステム時計としても働く。同様に、フィードバック制御はアプリケーションごとに様々であるため、それはUser Application Moduleで実装さ

れる。

このような原則がモジュール間の相互依存性を更に減少させている。

### 2.1.3 拡張性

4つのモジュールとそれらの通信プロトコルには、信号のチャンネル数やサンプリングレート、システムパラメータやイベントマーカースの数、信号処理の計算量、実験のタイミング、出力機器を制御する信号数などにおいて、制限が設けられていない。従って、これらの要因は全て使用するハードウェアの容量により制限される。

### 2.1.4 リアルタイム性能

あらゆるBCIシステムは、将来的に高いサンプリングレートで多くのチャンネルから脳波を取得し、処理しなければならない。そして、ミリ秒単位の極短い時間内において、時間のばらつきを最小限に抑えたままで最適な出力を返さなければならない。これらの条件を満たすために、OSの反応時間、ハードウェアドライブ、または他の障害からの影響を最小化するようにBCI2000は設計されている。

### 2.1.5 オフライン解析のサポートと簡易化

BCI2000はオンライン実験で収集されたデータの包括的オフライン解析をサポートしている。データの保存形式は、デジタル化した脳波データの他に運用プロトコルを定義するパラメータや、ユーザへのフィードバック、機器制御、アーチファクト検知などの実験中に発生した全てのイベントの記録を保持している。

### 2.1.6 実用性

最後に、BCI2000は多様なBCI方式を提供している。それらは、ソフトウェアの専門知識を持たない研究者であっても、比較的簡単に扱う

ことができる。また、BCI2000 は容易に入手可能で比較的安価なハードウェア構成でも動作する。実行ファイル及びそれらのソースコードとそのリストが管理され、WEB 上にオンラインヘルプも提供されている。

## 2.2 モジュール

### 2.2.1 Source Module

Source Module はデータ取得とデータ保存コンポーネントで成り立っている。データ取得コンポーネントでは、関連するシステム変数に従ってハードウェアから脳波を取得し、その脳波に標本化と量子化の処理を施す。データ保存コンポーネントでは、関連するシステム変数に従って取得された脳波サンプルをデータファイル内に保存する。ファイル形式は ASCII 形式のヘッダ、それに続いてバイナリ形式の脳波サンプルとイベントマーカの値で構成されている。ファイル形式はあらゆる数のチャンネル、システムパラメータ、イベントマーカを格納することができる。

また、これらのデータは Signal Processing Module へと渡される。

### 2.2.2 Signal Processing Module

Signal Processing Module は脳波信号を、出力機器を制御する信号に変換する。この変換には 2 つの段階がある。特徴の抽出と特徴の翻訳である。抽出段階では、Source Module から受け取ったデジタル信号は、信号の特徴を抽出する手続きに従う。翻訳段階では、翻訳アルゴリズムがこれらの信号の特徴を User Application Module に対して渡される制御信号に変換する。信号処理における 2 つの段階それぞれが直列接続の信号演算子で構成されている。そして、その各々が入力信号を出力信号へと変換する。個々の信号演算子（空間フィルタ、時間フィルタ、線形分類器など）はお互いに独立して存在してい

るので、他の部分に対する影響なしに、結合や入れ替えをすることができる。

### 2.2.3 User Application Module

User Application Module は Signal Processing Module からの制御信号を受け取り、アプリケーションを動かすためにそれらを使用する。現在ある多くの BCI では、ユーザアプリケーションはコンピュータスクリーン上に視覚的に表示され、文字、ターゲット、アイコンなどの選択で構成されている。ユーザに対するフィードバックは聴覚や触覚に関するものでもよい。選択肢は様々な形式で提示される。ある BCI では、選択肢に対して対応するターゲットの方向に動くカーソルを表示する。また、手の開閉運動を提供する人工器官や整形器具に対して、BCI での制御を模索している研究も存在する。これらのアプリケーションそれぞれが BCI2000 を用いて実現されている。

### 2.2.4 Operator Module

Operator Module はシステムパラメータを設定することで、実験プロトコルを定義する。どのようにして、これらの定義がなされたかということシステムモデルは詳述しない。それらは自動化されたアルゴリズムと実験者から来るものである。更に、実験者は他のモジュールから Operator Module に対して送られてきたテキストメッセージや信号グラフなどの情報を、その情報がどのような性質のものなのかということ調べることなく表示することができる。これは実験の詳細に関わりなく、同じ Operator Module を使うことで実験者が実験を管理し、オンラインイベント（処理されていない脳波の表示など）についてのリアルタイム情報を受け取れることを可能にする。

## 2.3 システム変数

BCI2000は3種類のシステム変数を併せ持つ。それはパラメータ、イベントマーカー、信号である。システムパラメータはデータファイルを通して変化しない変数である。反対に、イベントマーカーは実験の間に発生し、あるデータサンプルから次のデータサンプルまでに変化するイベントを記録する。データファイル内に全てのイベントマーカーを内包することはセッションの完全再構築と包括的なデータ解析を可能にする。それぞれのモジュールはこれらのイベントマーカーへのアクセスを持ち、それらを監視したり、修正したりすることができる。最後に、システム信号とは各モジュールによって受け取り、修正されるユーザの脳波データである。それぞれのモジュールはOperator Moduleに対して、数字、ベクトル、行列、文字列という様々なデータ型から成る多様なシステムパラメータやイベントマーカーを作るように要請することができる。例えば、Source Moduleは信号のサンプリングレートを定義するパラメータを要請する。このパラメータはオンライン実験における定義されたある期間中一定であり、他の全てのモジュールに対して有効である。同様に、Signal Processing Moduleは筋肉の動きによって発生するアーチファクトに印をつけるイベントマーカーを要請する。

## 3. $\mu$ 波トレーニングのBCI構築

BCI構築に利用するシステムの構成は次のようになっている。

電極、生体アンプ (NEC BIO TOP 6R12-4)  
DAQボード (National Instruments PCI-6031E)  
PC (Microsoft Windows XP)  
MATLAB R2007a (The MathWorks)  
BCI2000 ver2.1

$\mu$ 波トレーニング用のBCIシステムを構築するために、次のBCI2000モジュールを起動

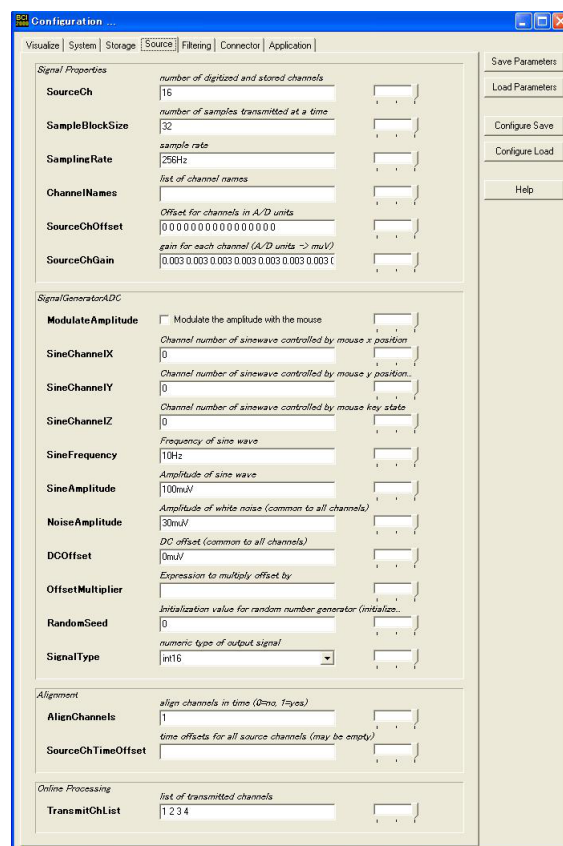


Fig. 3 BCI2000 Operator Module

する。下記モジュールは、上から Source Module、Signal Processing Module、User Application Module、Operator Moduleの順に並んでいる。

@初期セッション

NISource.exe

- National Instruments 製 DAQ ボード用  
P3SignalProcessing.exe

- ERP 特徴抽出用の時間平均算出  
StimulusPresentation.exe

- 4種類のタスクの提示

operat.exe

@フィードバックセッション

NISource.exe

- National Instruments 製 DAQ ボード用  
ARSignalProcessing.exe

- 自動化回帰法ベースのスペクトル振幅推定  
CursorTask.exe

- カーソル操作作用

operat.exe

Fig. 3 の Operator Module が提示する各種パラメータ（チャンネル数、チャンネル名、サンプリングレートなど）に、再現したいプロトコルに対応した値をそれぞれ入力する。一般的に利用される構成は、パラメータファイルとして、BCI2000 に最初から同梱されているので、それを利用して問題ない。全てのパラメータの設定が終了したら、その構成を保存し、セッションに突入する。

#### 4. 動画によるフィードバック

BCI2000 は外部アプリケーションとの連携を可能にするために、UDP ソケット通信が実装されたコネクタフィルタを持っている。このソケットを通して、BCI2000 は脳波データや状態変数、制御信号などを外部アプリケーションに渡すことができる。反対に、外部アプリケーションは BCI2000 に対して制御信号を渡すことができる。このテストで使われた、BCI2000 と外部アプリケーションとのインターフェースは、Visual C++ 2008 Express Edition と Windows API を用いて実装されている。

3. の BCI 構築におけるシステムの構成に次のものを加えて、3D 立体視動画によるフィードバックテストを行った。

3D 立体視用ディスプレイ (ZALMAN ZM-M215WGD)

3D 立体視用動画再生プレイヤー (Stereoscopic Player)

このテストの事前に、被験者の四肢運動を複眼カメラで撮影し、標準のカーソルの代わりにその動画を  $\mu$  波のフィードバックとして再生する。Fig. 4 はその 3D 立体視動画の静止画で、Fig. 5 はフィードバックテスト中の実験風景です。

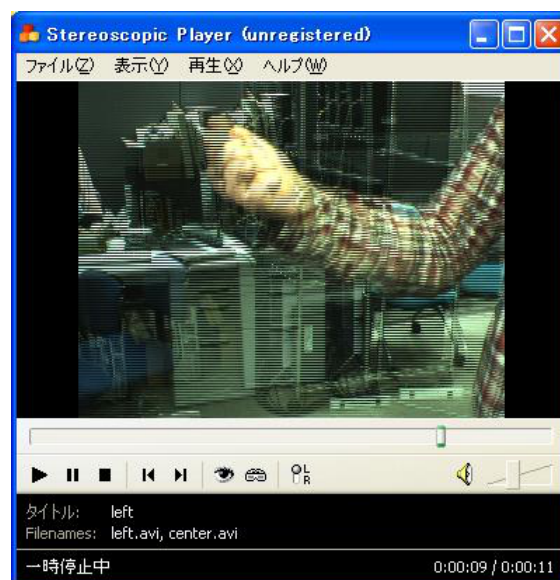


Fig. 4 ステレオ動画プレイヤー

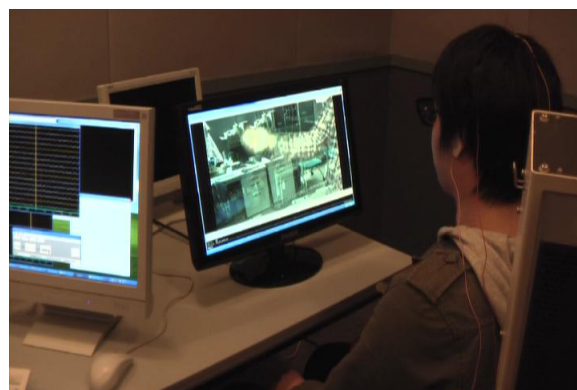


Fig. 5 フィードバックテスト

#### 5. まとめ

BCI2000 ではプロトコルに応じて、実験者が各モジュール (Source Module、Signal Processing Module、User Application Module、Operator Module) を組み合わせればよいので、容易に BCI システムを構築することができる。

従来の研究では、脳波の取得、信号処理、ユーザへの出力という、BCI システムの一連の流れを全てゼロから作らねばならなかったが、BCI2000 は、これまでそのために費やされていた時間や労力を大幅に削減する。その分実験者は、例えば、新規の信号処理手法を実装したり、独自の実験プロトコルを構築したり、ユーザアプリケーションを開発したりなど、自分が特に興味のある

る部分に集中して取り組むことができる。

筆者も BCI2000 を用いて BCI システムを構築し、そのシステムのフィードバック部分を 3D 立体視動画によるものに置換し、テストを行ったが、今後はより有効なフィードバック手法を検討し、実装していく予定である。

## 参考文献

- 1) G. Schalk, D. J. McFarland, T. Hinterberger, N. Birbaumer, J. R. Wolpaw: BCI2000: A General-Purpose Brain-Computer Interface (BCI) System, IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, VOL. 51, NO. 6, (2004)
- 2) G. Pfurtscheller, G. R. Müller-Putz, B. Graimann, R. Scherer, R. Leeb, C. Brunner, C. Keinrath, G. Townsend, M. Naeem, F. Y. Lee, D. Zimmermann, E. Hoffer, A. Schlogl, C. Vidaurre, S. Wriessnegger, C. Neuper: Graz-Brain-Computer Interface: State of Research, Toward Brain-Computer Interfacing, no. 4, 65/84 (2007)
- 3) B. Blankertz, M. Krauledat, K. R. Müller, G. Dornhege, V. Kunzmann, F. Losch, G. Curio: The Berlin Brain-Computer Interface: Machine Learning-Based Detection of User Specific Brain States, Toward Brain-Computer Interfacing, no.5, 85/102 (2007)