

NIRS を用いたカーソルコントロールのための Brain Computer Interface の開発

NIRS-based Brain Computer Interface for cursor control

三野 哲志*¹ 参沢 匡将*² 広林 茂樹*²
Satoshi Sanno Tadanobu Misawa Shigeki Hirobayashi

*¹富山大学大学院理工学教育部知能情報工学専攻
Graduate School of Science and Engineering for Education, University of Toyama

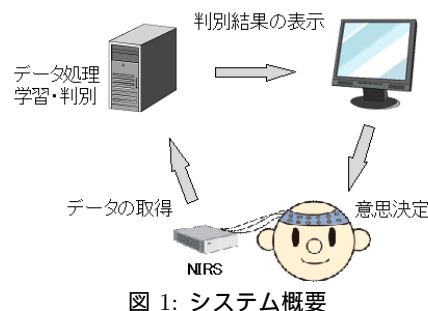
*²富山大学大学院理工学研究部(工学)
Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama

Recently, a study of Brain Computer Interface (BCI) that reflects a user's intention by using brain information as input has been actively researched. BCI is expected to work as a communication support system that helps people who have diseases, such as paralysis, amyotrophic lateral sclerosis (ALS), severe brain damage, and so on. In this study, we measure brain activity in the prefrontal cortex by using near-infrared spectroscopy (NIRS) and develop a BCI system for performing cursor control by the measured brain information. And, we conduct experiments on 21 subjects to examine the possibilities of this system. As a result of the experiments, on the whole, this BCI system does not work well. However, comparing the result of the experiments with that of random trials, we find it possible for this system to perform cursor control.

1. はじめに

近年、脳情報を入力としてユーザの意図を反映する Brain Computer Interface (BCI) の研究が盛んに行われている。BCI は、脳波計 (EEG) や近赤外分光法 (NIRS) などによって計測される脳活動の情報からユーザの意図を検出し、機器を制御するシステムである。このため、BCI は、脊椎損傷などによる全身麻痺患者や、筋萎縮側索硬化症 (ALS) 患者などのためのコミュニケーション支援システムとして期待されている。そのような BCI システムの実装形態のひとつとして、ユーザの意図によってカーソルコントロールを行うための BCI が提案され、多数報告されている [Wolpaw 04, Bradberry 11]。これらの先行研究のシステムの多くは、運動野の脳活動を EEG によって計測し、運動イメージの有無をディスプレイ上のカーソルの動きに反映させるものである。

しかし、運動野の脳活動の利用に関しては、長期間訓練しても精度が低い人や、精神疾患や頭部外傷によって運動野を使用できない人が存在するなどの問題点が指摘されており、いくつかの他のアプローチが提案されている [Citi 08, Trejo 06]。そのようなアプローチのひとつとして、本研究では前頭前野の脳活動に着目した。前頭前野は、脳の中でも認知や情報の選択、意思決定に関して重要な領域と考えられており、前頭前野の脳活動を利用することで、ユーザの心理状態 (集中する、しないなど) を反映させる BCI が開発できると考えられる。そこで、本研究では、前頭前野の脳活動を利用して、心理状態の切り替えによってカーソルコントロールを行うための BCI を試作し、その可能性について検討を行った。心理状態の切り替えによってカーソルコントロールを行うために、本研究では、2通りの心理状態の切り替えを検出し、ユーザの意思決定と心理状態の切り替えを対応させ、ユーザがディスプレイ上のカーソルの移



動方向と移動量の決定を繰り返すことでカーソルの動きを制御するシステムを提案する。

また、EEG による計測には、空間分解能が低いことや、信号強度が小さく電気的なノイズに弱いことなどの問題点が挙げられる。そこで、本研究では NIRS を用いて脳活動の計測を行った。NIRS は EEG と比較して、時間分解能は低いが高空間分解能が高い、電気的なノイズに強い、信号変化が大きく、検出しやすいといった特徴があることから、近年 BCI のための脳活動計測方法として注目されてきている方法である [Power 10]。

2. 提案システム

本研究では、NIRS を用いて被験者の脳活動をリアルタイムに計測し、その情報を利用してカーソルコントロールを行うシステムを作成した。ここでは、作成したシステムや使用した手法、機器について述べる。

2.1 システムの概要

本研究で作成したシステムの概要を図 1 に示す。

- (1) 被験者はディスプレイ上の情報から意思決定を行う。
- (2) NIRS によって前頭前野の脳活動を計測する。
- (3) 信号データに前処理を適用し、学習・判別を行う。
- (4) 結果をディスプレイ上に反映する。

連絡先: 参沢 匡将

富山大学大学院理工学研究部(工学)
〒930-8555 富山県富山市五福 3190
misawa@eng.u-toyama.ac.jp

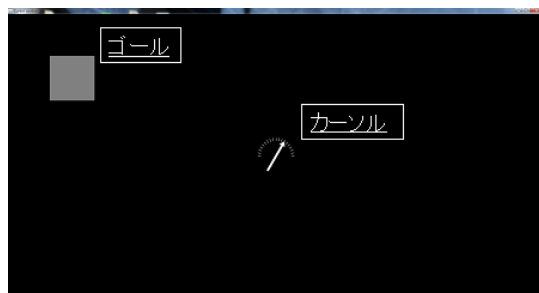


図 2: カーソルコントロール時の画面

上記の流れを繰り返すことで、システムは被験者の意図をディスプレイ上に反映させる。本研究では、前処理として Savitzky-Golay Smoothing Filter[Savitzky 64] を、学習・判別手法として Support vector machine (SVM) を用いた。

2.2 脳活動の計測

本研究では脳活動を計測する機器 (NIRS) として、Spectratech 社製の OEG-16 (16 チャンネル, サンプリング間隔 0.65 秒) を用いた。NIRS は血中のヘモグロビンが近赤外光を吸収することに着目し、生体内へ入射した近赤外光が生体外へ戻ってきた際の光の変化量により、血中のヘモグロビンの濃度変化量を測定する方法である。本研究では、システムの学習・判別には、NIRS で測定される酸素化ヘモグロビン (oxy-Hb) および脱酸素化ヘモグロビン (deoxy-Hb) の濃度変化量のうち、oxy-Hb の濃度変化量のデータのみを用いた。

2.3 インターフェースの設計

作成したシステムのインターフェースについて説明する。作成したシステムでは、ディスプレイ上にカーソルとゴールを配置してカーソルコントロールを行う。ディスプレイの解像度は 1920×1080 ピクセルとし、カーソルのサイズは 120×25 ピクセル、ゴールのサイズは 160×160 ピクセルとした。図 2 にカーソルコントロール時の画面を示す。

本システムでは、被験者の 2 通りの心理状態の切り替えをスイッチの ON・OFF として割り当てる。そして、ON 状態と判別したときに、システムは以下のカーソル状態を切り替え、画面に反映させる。

1. 方向選択状態

方向選択状態は、カーソルが回転し、移動方向が変化する状態である。カーソルの初期角度に対して -90° から 90° の範囲で 10° ずつ回転し、カーソルの向きが変化する。計測機器のサンプリング間隔が 0.65 秒であることから、カーソルは 0.65 秒刻みで回転させた。

被験者は、任意の時点で心理状態を ON 状態にすることでカーソルの移動方向を決定する。決定後に、被験者の脳活動を安定させるための時間として、5 秒間の休息时间 (レスト) を設けた。システムは、レストの間カーソルを停止させた後、カーソル状態を移動状態に切り替える。

2. 移動状態

移動状態は、カーソルが移動する状態である。カーソルの移動方向に対して 0.65 秒刻みに 20 ピクセルずつ移動し、カーソルの位置が変化する。

被験者は、任意の時点で心理状態を ON 状態にすることでカーソルの移動量を決定する。方向選択状態と同様

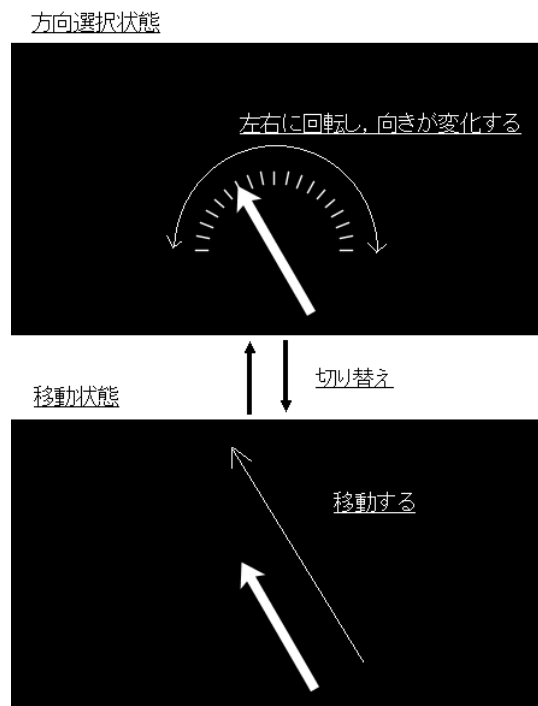


図 3: カーソル状態

に、決定後に 5 秒間のレストを設けた。同様にシステムは、レストの間カーソルを停止させた後、カーソル状態を方向選択状態に切り替える。

このように、被験者はカーソルの移動方向と移動量の決定を繰り返すことで、カーソルコントロールを行う。図 3 に各カーソル状態を示す。カーソル状態の切り替え時にカーソルが停止することから、被験者の心理状態は、カーソルを止めたいと考えている状態 (ON 状態)、考えていない状態 (OFF 状態) の 2 通りとした。

2.4 タスクの概要

本研究では、トレーニングタスク、カーソルコントロールタスク、練習タスクの 3 つのタスクを定義した。以下では、それぞれのタスクの内容について説明する。

2.4.1 トレーニングタスク

トレーニングタスクは、システムの学習・判別のための学習用データを得るためのタスクである。画面中心にカーソルを配置し、2.3 で定めた方向選択状態を利用して、以下の流れを繰り返すことで学習用データを得る。図 4 にタスクの流れを示す。

- (1) 画面中心に “X” を表示し、5 秒間のレストを設ける。
- (2) 方向選択状態の -90° か 90° の位置に三角形のマークを表示し、カーソルは回転を始める。マークの位置は試行ごとに、 -90° の位置、 90° の位置、 -90° の位置、... というように順番に切り替える。
- (3) 被験者は、カーソルがマークの位置まで回転するまでは、心理状態を OFF 状態に、以降は ON 状態にする。
- (4) カーソルはマーク位置から 80° 回転した後、停止する。これは、約 5 秒間分 (データのサンプリング数で 8 点分) の時系列データを学習用データとして得るためである。
- (5) OFF 状態、ON 状態のときの信号の時系列データを学習用データとして得る。

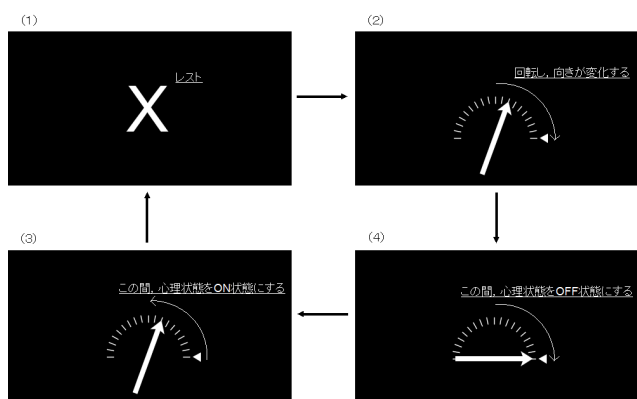


図 4: トレーニングタスクの流れ

2.4.2 カーソルコントロールタスク

カーソルコントロールタスクは、画面中心にカーソルを、四隅のいずれかにゴールをランダムに配置し、カーソルコントロールを行い、カーソルをゴールに到達させることを目的とするタスクである。本研究では、四隅それぞれに対して1回ずつ試行した。なお、1回の試行時間は最大5分とし、5分経過するかゴールに到達するかで終了とした。

2.4.3 練習タスク

練習タスクは、ゴールを配置せずに自由にカーソルコントロールを行うタスクである。画面中心にカーソルを配置し、5分間カーソルコントロールを行うことによって、カーソルコントロールの練習を行う。

3. 実験

ここでは、本研究で行った実験の概要とその結果について述べる。

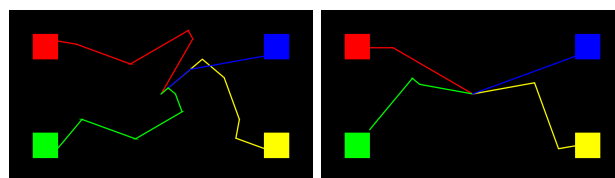
被験者はインフォームドコンセントを得た20~23歳の男女21名(男性16名、女性5名)の健康者とし、ブラインドを閉め、照明を消して暗くした室内で実験を行った。

被験者はそれぞれ、まずSVMの学習用データを得るためにトレーニングタスクを行い、次にカーソルコントロールタスクを行う実験を2回試行した。被験者のうち13名はカーソルコントロールタスクを行う前に、練習タスクを行った。

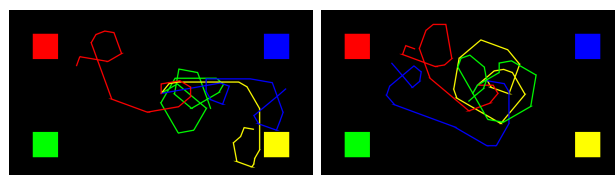
また、本実験では被験者のゴール確率とランダムな試行でのゴール確率の比較を行った。

3.1 実験結果

表1は、各被験者の2回の試行それぞれについて、ゴール数とオフラインでの5-fold Cross Validationによる判別率を示したものである。表1では、練習タスクを行った被験者を赤色で、そうでない被験者を黒色で示している。カーソルコントロールタスクは1回の試行で、四隅のいずれかにゴールを配置してそれぞれに対して1回ずつ、合計4回カーソルコントロールを行うため1回の試行のゴール数は最大4となる。被験者RやSのように1回の試行でカーソルコントロールタスクのすべてのゴールに到達できた被験者が存在したが、練習タスクを行った被験者の平均のゴール数を見ても8回中2.3回と低く、カーソルコントロールを行うのに十分なシステムが開発できたとは言えない結果となった。また、被験者G, I, Oのように判別精度が高いにもかかわらず、タスクの成績が低い被験者が存在した。



(a) 被験者 R のカーソルの軌跡 (b) 被験者 S のカーソルの軌跡



(c) 被験者 A のカーソルの軌跡 (d) 被験者 G のカーソルの軌跡

図 5: 被験者のカーソルの軌跡の例

表 1: 実験結果

被験者	ゴール数			判別率 (%)	
	1 回目	2 回目	合計	1 回目	2 回目
A	0	0	0	59	59
B	0	1	1	59	62
C	0	0	0	61	58
D	0	0	0	61	67
E	0	1	1	66	63
F	0	0	0	63	64
G	0	0	0	74	65
H	1	0	1	58	60
I	0	0	0	69	70
J	2	2	4	73	77
K	2	0	2	61	68
L	2	0	2	62	69
M	0	2	2	59	60
N	2	0	2	68	63
O	2	0	2	62	73
P	1	0	1	59	61
Q	0	1	1	62	62
R	0	4	4	65	74
S	4	4	8	96	94
T	2	0	2	57	66
U	0	0	0	58	62
練習なし平均	0.1	0.3	0.4	63	62
練習あり平均	1.3	1.0	2.3	65	69
全平均	0.9	0.7	1.6	64	67

図5に被験者のカーソルの軌跡の例を示す(a)(b)にうまくカーソルコントロールを行えた例として被験者R, Sの, (c)(d)にうまくカーソルコントロールを行えなかった例として被験者A, Gのカーソルの軌跡を示した。図5では、同色のゴールと軌跡がそれぞれ対応している。図5の(a)(b)の軌跡と比べると(c)(d)の軌跡は、何度かカーソルの移動方向がゴールに向いているが、その度にカーソル状態が切り替わってしまい、ゴールに到達するコースから外れてしまっているように見える。このような傾向は、被験者全体に見られた。

3.2 ゴール確率の比較

表2は、それぞれのゴール位置についての被験者のゴール確率とランダムな試行でのゴール確率を示している。練習タスクを行っていない被験者の平均のゴール確率はランダムでのゴール確率より低く、練習タスクを行った被験者、全被験者の平均のゴール確率はランダムでのゴール確率より高かった。また、練習タスクを行った被験者とそうでない被験者を比べると、前者のゴール確率が高かった。

ランダムでは左側に配置されたゴールにはほとんど到達できず、ゴール確率に偏りが見られた。被験者のゴール確率にも左上に配置されたゴールについて同様の傾向が見られるが、ランダムに比べて偏りが小さいと言える。

表 2: ゴール確率の比較

ゴール位置	ゴール確率 (%)			
	練習なし平均	練習あり平均	全平均	ランダム
左上	0	19	12	6
左下	0	31	19	3
右上	11	31	26	20
右下	0	35	21	19
平均	3	29	20	12

4. 考察

作成したシステムによるカーソルコントロールの可能性について考察する。実験結果から、練習タスクを行った被験者の平均のゴール数を見ても 8 回中 2.3 回と低く、カーソルコントロールを行うのに十分なシステムが開発できたとは言えない結果となった。しかし、ランダムな試行での平均のゴール確率は約 12 % であることから、ランダムな試行で 8 回中 2 回以上ゴールする確率は約 25 %、4 回以上ゴールする確率は約 1 % であり、このことに対して、練習タスクを行った被験者の約 7 割 (13 名中 9 名) が 2 回以上ゴールに到達できたこと、1 回の試行でカーソルコントロールタスクのすべてのゴールに到達できた被験者が 2 名存在したことから作成したシステムによるカーソルコントロールは可能であると考えられる。

また、練習タスクを行った被験者と行っていない被験者を比べると、両者の判別精度には大きな差がないことに反してゴール確率には大きな差が見られたことから、練習によってタスク成績の向上が見込めると考える。

全体にタスク成績が低かったこと、判別精度が高いにもかかわらずタスクの成績が低い被験者が存在したことについて考察する。図 5 の (a) (b) の軌跡と比べると (c) (d) の軌跡は、何度かカーソルの移動方向がゴールに向いているが、その度にカーソル状態が切り替わってしまい、ゴールに到達するコースから外れてしまっているように見え、全体にこのような傾向が見られたため、各被験者の、カーソルがゴールに向いている時と向いていない時のカーソル状態が切り替わるまでの時間を比較した。図 6 に結果を示す。結果から、全体にカーソルがゴールに向いていない時と比べ、向いている時の方がカーソル状態が切り替わるまでの時間が短いという傾向が見られる。よって、カーソルがゴールに向いている時は、カーソル状態が切り替わりやすいと言える。このことから、カーソルがゴールに向いている時に、カーソル状態が切り替わらないように考えてしまうことや、ゴールに向くことによる緊張などの影響によって、システムの誤判別を引き起こしていると考えられる。よって、緊張時の信号を別に学習することなどによってタスク成績を向上できる可能性があると考えられる。

今後の課題として、練習や、学習方法の改善によってタスク成績の向上が見込めることから、トレーニングタスクを練習を兼ねたものに変更することや、緊張時の信号を別に学習することなどによって、これらを考慮したシステム、タスク設計について検討し、タスク成績の向上を図る必要がある。

5. まとめ

本研究では前頭前野の脳活動に着目し、カーソルコントロールを行うための BCI を開発するという目的に対して、NIRS を用いて前頭前野の脳活動を計測して、心理状態の切り替えによってカーソルコントロールを行うための BCI を試作し、その可能性について検討を行った。被験者 21 名に対して実験を行い、結果から、カーソルコントロールを行うのに十分なシス

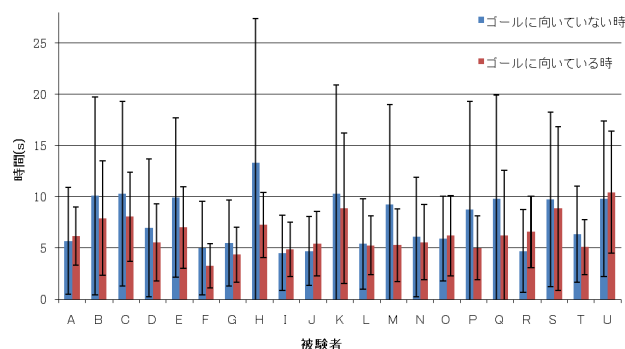


図 6: カーソル状態の切り替わり時間の比較

テムが開発できたとは言えなかったが、ランダムな試行との比較の結果と、1 回の試行ですべてのゴールに到達できた被験者が 2 名存在したことから、作成したシステムによるカーソルコントロールは可能であると考えられる。

練習や、学習方法の改善によってタスク成績の向上が見込めることから、今後は、これらを考慮したシステム、タスク設計について検討し、タスク成績の向上を図る予定である。

参考文献

- [Wolpaw 04] Wolpaw, J.R. and McFarland, D.J.: Control of a two-dimensional movement signal by a noninvasive brain-computer interface in humans, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101 17849–17854 (2004)
- [Bradberry 11] Bradberry, T.J. and Gentili, R.J. and Contreras-Vidal, J.L.: Fast attainment of computer cursor control with noninvasively acquired brain signals, *Journal of Neural Engineering* 8 (2011)
- [Citi 08] Citi, L. and Poli, R. and Cinel, C. and Sepulveda, F.: P300-based BCI mouse with genetically-optimized analogue control, *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on* 16 51–61 (2008)
- [Trejo 06] Trejo, L.J. and Rosipal, R. and Matthews, B.: Brain-computer interfaces for 1-D and 2-D cursor control: designs using volitional control of the EEG spectrum or steady-state visual evoked potentials, *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on* 14 225–229 (2006)
- [Power 10] S. D. Power, T. H. Falk and T. Chau: Classification of prefrontal activity due to mental arithmetic and music imagery using hidden Markov models and frequency domain near-infrared spectroscopy, *Journal of Neural Engineering* 7 (2010)

- [Savitzky 64] A. Savitzky, and M. J. E. Golay: Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures, *Analytical chemistry* 36 (8) 1627–1639 (1964)