

## NIRS を用いた小型ブレイン・コンピュータ・インターフェースの開発

日大生産工 (院) ○柳沢 一機 日大生産工 (院) 浅賀 恭平  
日大生産工 (院) 澤井 英幸 日大生産工 綱島 均

### 1. 緒論

近年、人間の脳活動を神経情報として取り出し、機械に入力することにより機器を制御する BCI (Brain Computer Interface) の研究が盛んに行われている。BCI は、機能的電気刺激 FES (Functional Electrical Stimulation) と組み合わせることで、片マヒ患者などの実際に腕などが動かせない人に対して、脳活動からヒトの意図を読み取り、動かしたい部位に筋刺激を加えるリハビリテーションシステムとして医療分野での活躍が期待されている。

BCI に用いる脳活動の非侵襲的計測法としては、脳波や近赤外分光法 NIRS (Near-InfraRed Spectroscopy) がある。脳波を用いた BCI リハビリテーションシステムとしては、高橋ら<sup>1)</sup>の研究が挙げられる。しかし、脳波による計測は空間分解能が低く、特定の部位に注目した計測を行うことが難しい。また、電気的なノイズに弱いという欠点がある。

NIRS は近赤外光を用いて、酸素化ヘモグロビン (oxy-Hb) と脱酸素化ヘモグロビン (deoxy-Hb) の変化量を測定する装置であり、体動の制限が少なく、被験者に対して自然な状態で実験が行える。脳波と比較して、空間分解能が高く、近赤外光を用いているため、電気的なノイズに強いという特徴がある。

NIRS を用いた BCI の先行研究としては、筋刺激装置で血流増加の伴った筋刺激を与える NIRS-BCI リハビリテーションシステムがある<sup>2)</sup>。このシステムは課題中の oxy-Hb の濃度変化に対応して、上腕二頭筋に経皮的電気刺激装置より電気刺激を加え、肘関節屈折運動を誘発する。しかし、大型のマルチチャンネル NIRS 装置を利用しており、システム全体が大型である。また、脳活動の判定方法が oxy-Hb に単純な閾値を設定した ON/OFF 判定のため、ノイズによる影響などを受けやすく、安定した動作が難しいなどの問題がある。BCI によるリハビリテーションの臨床応用を実現するためには、BCI システムの小型化と精度の高い ON/OFF 判定ができる脳活動の判定方法が必要となる。

本研究では、小型 NIRS-BCI システムを開発し、NIRS を用いて計測した oxy-Hb およびその微分値を指標とした新しい脳活動の判別方法を提案する。さらに、開発した小型 NIRS-BCI システムを用いて、リアルタイムに機器の ON/OFF 操作を行う。

### 2. 小型 NIRS-BCI システム

NIRS は、近赤外光を用いて脳血流の変化を計測することによって、間接的に脳活動を捉える非侵襲的計測法である。神経活動が生じる部位では、局所的に血流が増加し、血中のヘモグロビンの濃度が増加する。近赤外分光法は、生体への透過性が良好な 700~900nm の波長の近赤外光を照射し、その透過光・拡散光から oxy-Hb, deoxy-Hb の濃度変化を計測することが可能である。

図1に示す小型 NIRS-BCI システムでは、小型 NIRS (携帯型近赤外線組織酸素モニタ装置 PocketNIRS, 株式会社ダイナセンス) により計測した信号を Bluetooth により計測用 PC に送信する。さらに計測用 PC のデータを解析用 PC にリアルタイムに転送し、信号処理・脳活動の判定・機器の制御を行う。また、解析用 PC では、被験者の脳の活動状態を視覚刺激として被験者自身に伝えるニューロフィードバックの処理を行う。ディスプレイに脳活動の状態を色として表示し、oxy-Hb が上昇するほど濃い赤色、oxy-Hb が下降するほど濃い青色に変化するように設定した。解析後の oxy-Hb 信号の情報は 0.25s 毎に更新されディスプレイに表示される。色は 65 段階で変化するように設定した。この画像の変化から被験者に自身の脳の活動状態を把握させることができる。

本研究では、脳活動の計測、信号処理、脳活動の判定、機器の操作・ニューロフィードバック画像の作成の一連の流れをリアルタイムに行うことが可能であるか検証するために、ロボットアーム (MR-999, 株式会社イーケイジャパン) の関節部の回転操作が可能な小型 NIRS-BCI システムを開発した。

---

## Development of Portable Brain Computer Interface Using NIRS

Kazuki YANAGISAWA Kyouhei ASAKA, Hideyuki SAWAI and Hitoshi TSUNASHIMA

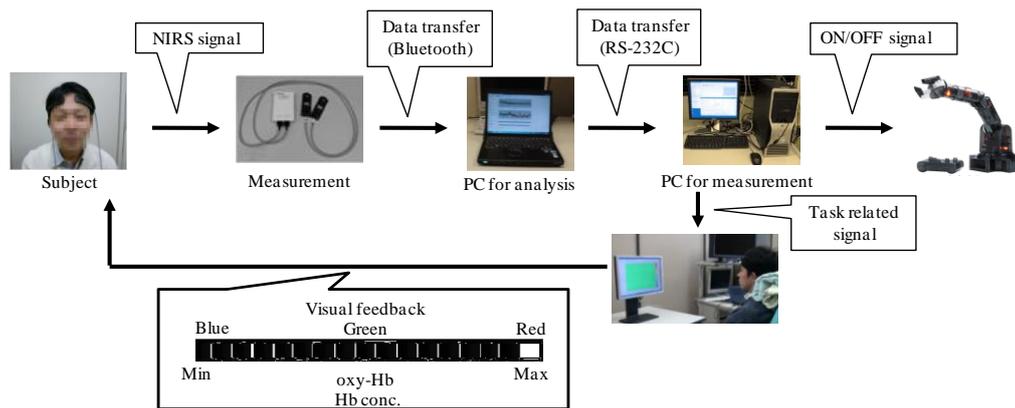


Fig.1 Portable NIRS-BCI system

### 3. 実験方法

開発した小型NIRS-BCIシステムを用いて実験を行った。実験は前レスト15s, タスク30s, 後レスト15sを1試行とし, これを6試行行った。被験者には, タスク時はディスプレイに表示される色が赤色(脳が活動している状態)に変化するように意識を集中させるよう教示した。レスト時は閉眼安静とした。最初の2試行ではロボットアームを動作させずに脳活動の計測のみを行い, そのデータをもとに, その後の4試行では, 脳活動の判定を行い, 被験者にロボットアームの関節部を操作させた。

脳活動の計測は, PocketNIRSを用いた。PocketNIRSによる計測は, 頭髪の影響により計測部位が前頭葉に限定されてしまうことと最大で2チャンネルしか計測できないという問題点がある。しかし, 被験者にとって自然な状態で長期間の脳活動計測することが可能であり, 脳波やマルチチャンネルのNIRS装置と比較して信号のS/Nがよいという特徴があり, 小型NIRS-BCIシステムにおける計測装置としては最適であると考えられる。

また, 先行研究より, ニューロフィードバックによる訓練を行うことで前頭葉の活動のある程度任意にコントロールできる可能性が示されている<sup>3)</sup>。さらに, 訓練によって活動する部位が局在化する可能性も示されており, 前頭葉を2チャンネルしか計測できないPocketNIRSでもニューロフィードバックによる訓練と組み合わせることでこれらの問題を解決できる可能性がある。

### 4. oxy-Hb とその微分値を用いた判定方法

#### 4.1. oxy-Hb と神経活動の関係

NIRSはoxy-Hbとdeoxy-Hbの濃度変化とその2つの値の合計値であるtotal-Hbの信号を計測できる。一般的には, 脳が活動するとき, oxy-Hbが大幅に上昇し, deoxy-Hbが減少する。しかし, 特に

前頭葉における活動では, oxy-Hb, deoxy-Hbのどちらも上昇する場合も報告されている<sup>4)</sup>。このことから, 本研究では, oxy-Hbに注目する。oxy-Hbは局所脳血流rCBF(regional Cerebral Blood Flow)の変化と相関が高いこと<sup>5)</sup>, rCBFの増加は神経活動の増加を反映していること<sup>6)</sup>が報告されており, oxy-Hbがもつとも神経活動を反映していると考えられる。

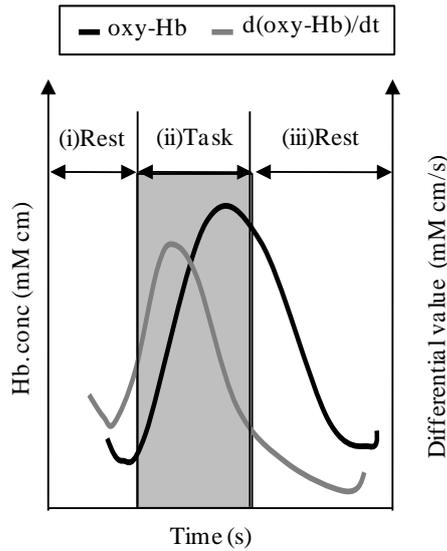
また, oxy-Hbの微分値は課題のワークロードとの相関があること<sup>7)</sup>から, oxy-Hbとその微分値の2つの指標を用いて脳活動の判定を行う。oxy-Hb信号のみの場合, 血流の変化を計測しているため, 反応が現れるまでに, 数秒の遅れがある場合があるが, 微分値にも注目することで, この遅れを改善できる可能性がある。

oxy-Hbとその微分値の課題時の一般的な変動を図2(a)に示す。判定方法として, oxy-Hbを横軸, oxy-Hbの微分値を縦軸にとり, その軌跡の領域から判定する方法を提案する。図2(a)の活動の軌跡を図2(b)に示す。図2(b)の灰色で示した領域通過する場合は脳活動があると考えられる。

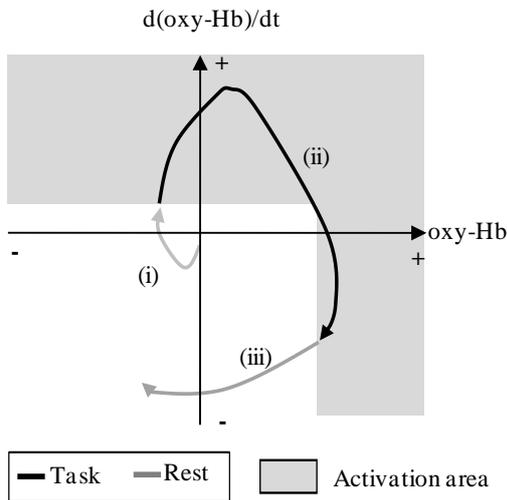
NIRS信号には, 測定装置のノイズ, 呼吸による影響, 血圧変動などの脳活動に無関係な信号も含まれるため, 詳細な脳活動の評価を行うためには, これらの無関係な信号を取り除く必要がある。そこで, 測定したNIRS信号のうちのS/N比のよい, タスクに関連した変動が顕著なチャンネル, ここでは1ch(前頭葉右外側部)を選択し, そこから得たNIRS信号を離散ウェーブレット変換による多重解像度解析<sup>8)</sup>を行い, 信号を分解, 再構成した。

#### 4.2. 軌跡と活動領域の検討

グラッピング課題時の再構成後の信号を用い, oxy-Hbを横軸, oxy-Hbの微分値を縦軸とした軌跡を図3に示す。図2(b)で示した軌跡と同様に, タスク中に図中の灰色の脳活動があると考えられる領域を通過していることがわかる。



(a) Change of oxy-Hb and differential value



(b) Trajectory of oxy-Hb and d(oxy-Hb)/dt

Fig.2 Relations between oxy-Hb and differential value

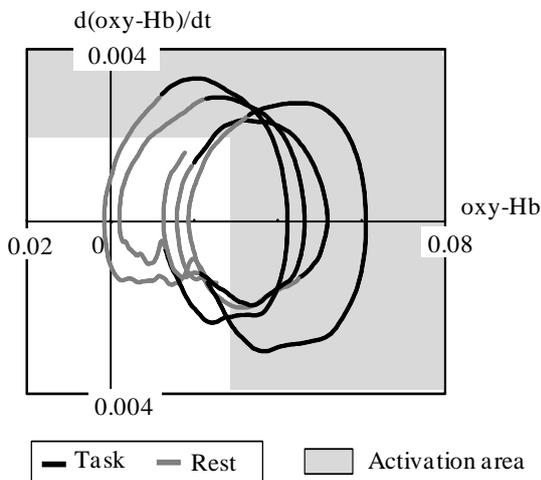


Fig.3 Trajectory of oxy-Hb and differential value

oxy-Hb と  $d(\text{oxy-Hb})/dt$  の微分値が共に上昇する領域 (第 1 象限) は脳活動のある領域と考えられる。

また、oxy-Hb の値が小さい場合においても  $d(\text{oxy-Hb})/dt$  の微分値が大きい場合には、活動があると考えられる。レスト中など活動が低い場合には軌跡は活動の領域として設定した原点周辺で円形を描く傾向がある。その原点付近を通過する信号の軌跡を活動ありと判定しないために、oxy-Hb の微分値に一定の閾値を設定する。一方、活動がある場合にも oxy-Hb の微分値は常に上昇し続けるわけではないため、oxy-Hb の値がある一定値以上をとる場合も活動があると考えられる。また、一定時間 (2.5s) 以上領域内に留まらない場合には、アーチファクトによる影響と考え、活動がないと判定した。

#### 4.3. 判定結果

計測した oxy-Hb 信号の移動平均を求め、閾値処理によって、脳活動を判定した結果を図 4 に示す。閾値は最初の 2 試行での oxy-Hb の最大値の 20% とし、判定は 3 試行目以降を対象にし、oxy-Hb が閾値を越えた場合を ON 判定とした。4 試行ともタスク中に ON 判定が確認できるが、ON・OFF が短時間に切り替わっており、安定した脳活動の判定はできなかった。

次に、提案した判定方法を適用した場合の判定結果を図 5 に示す。4 試行ともタスク時の ON 判定が確認できる。さらに、図 4 に示した oxy-Hb のみに閾値を設定した従来の判定の結果と比較して、4 試行とも安定した脳活動の判定が確認できた。判定結果が出るまでの時間遅れは、従来の単純な閾値処理の結果と変わらず、リアルタイムに判定することができた。

#### 5. 結言

本研究では、小型 NIRS-BCI システムを開発し、NIRS を用いて計測したデータから脳活動を判定する oxy-Hb およびその微分値を指標とした新しい判別方法を提案した。開発した NIRS-BCI システムを用いて、リアルタイムに機器の ON/OFF 操作を行うことが可能か検証した。

oxy-Hb のみに閾値を設定する従来の判定方法を用いた結果、タスク中に ON 判定が見られたが、ON・OFF が短時間に切り替わってしまい、安定した脳活動の判定を行うことは困難であった。

そこで、oxy-Hb の値を横軸、 $d(\text{oxy-Hb})/dt$  の微分値を縦軸にとり、その軌跡の領域から判定する方法を提案した。その結果、提案した判定方法は従来の判定方法と比較して、精度の高く安定した脳活動の判定をリアルタイムに行えることを確認した。この結果から小型 NIRS-BCI システムを用いて、リアルタイムに機器の ON/OFF 操作を行うことが可

能であることを示した。今後は、筋刺激装置と組み合わせることで、小型のNIRS-BCIリハビリテーションシステムの開発を行う。装置を小型化することで、実際の片マヒ患者を対象とした臨床応用を検討していく。

本研究は、平成23年度日本大学学術助成金（総合研究）（近赤外分光法(NIRS)を応用したブレイン・コンピュータ・インターフェースの開発：綱島均）の助成を受けた。

「参考文献」

- 1) 高橋光, 郷古学, 伊藤宏司, 運動想起フィードバック訓練による事象関連脱同期 (ERD) 出現の検証, システム制御情報学会論文誌, Vol.22, No.5, (2009), pp.199-205
- 2) 酒谷薫, 永岡右章, 片山容一, NIRSによるClosed loop brain machine interfaceを応用したリハビリテーションシステムの開発, 日本生体医工学学会誌 生体医工学, Vol.49, Suppl.1, (2011), p.81
- 3) Kyohei, Asaka, Kazuki Yanagisawa, Hithoshi Tsunashima, Neurofeedback Training for Brain Computer Interface Using Near-Infrared Spectroscopy, 26th Symposium on Biological and Physiological Engineering, 3B2-3, (2011)
- 4) M. Toichi, RL. Findling, Y. Kubota, JR. Calabrese, M. Wiznitzer, NK. McNamara, K. Yamamoto, Hemodynamic differences in the activation of the prefrontal cortex: attention vs. higher cognitive processing, *Neuropsychologia*, Vol. 42, No.5, (2004), pp. 698-706.
- 5) K. Sakatani, Y. Murata, N. Fujiwara, T. Hoshino, S. nakamura, T. kano, Y. katayama, Comparison of blood-oxygen-level-dependent functional magnetic resonance imaging and near-infrared spectroscopy recording during functional brain activation in patients with stroke and brain tumors, *Journal of Biomedical Optics*, Vol.12(6), (2007), p. 062110
- 6) Jueptner, M., Willer, C., Dose measurement of regional cerebral blood flow reflects synaptic activity?- implications for PET and fMRI; *neuroimage*, Vol.2, (1995), pp.148-156
- 7) 清水俊行, 南部起可, 機能的近赤外分光法による実車運転時の脳活動の計測, 自動車技術会論文集 Vol.41., No.6, (2010), pp.1263-1268
- 8) H. Tsunashima., K. Yanagisawa, Measurement of Brain Function of Car Driver Using Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS), *Computational Intelligence and Neuroscience*, Vol.2009, (2009)

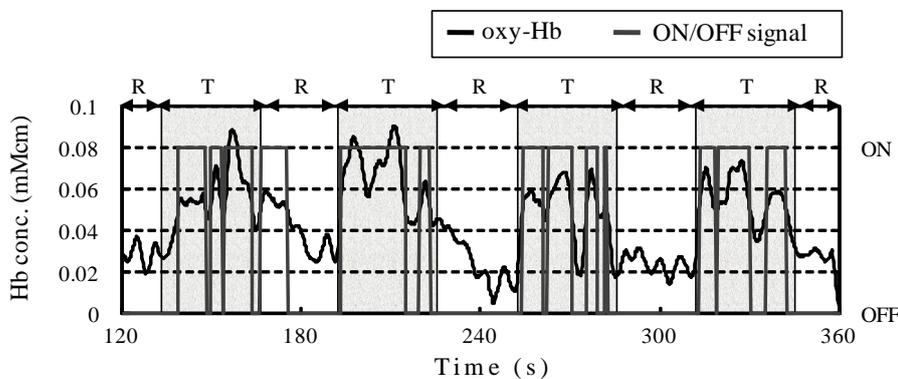


Fig.4 Result of ON/OFF decision using conventional method

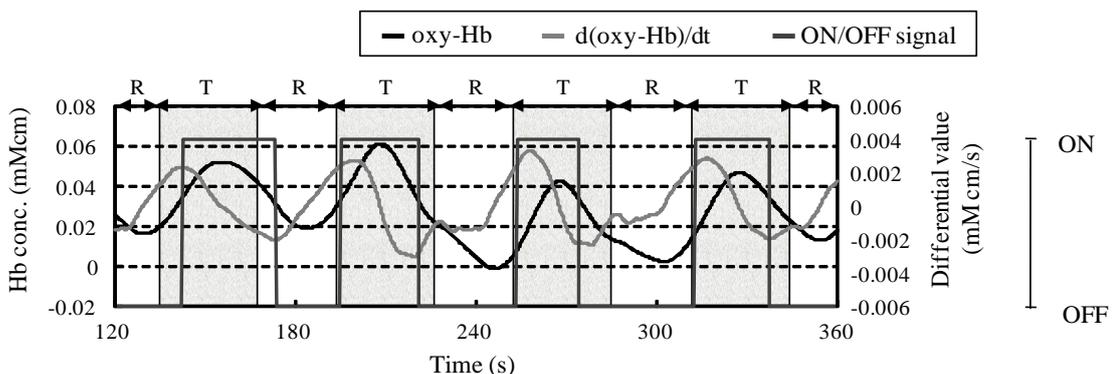


Fig.5 Result of ON/OFF decision using proposed method