

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560286

研究課題名(和文)ポータブルNIRS計測装置を用いた実利用型ブレイン・マシン・インタフェースの構築

研究課題名(英文)Design and Improvement of Brain-Machine Interface Using Portable NIRS Device

研究代表者

伊藤 友孝(Ito, Tomotaka)

静岡大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00283341

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、脳機能計測装置を用いて人の脳活動を計測し、その情報を各種機器の操作やコミュニケーションに用いる「ブレイン・マシン・インタフェース(BMI)」の構築を目的とした。本研究では、ポータブルNIRS計測装置を用いて、脳血流変化から人の思考や感情を識別するための手法を考案し、有効性を確認した。また、日常生活で利用可能なBMIの構築を目指し、使用状況の変化に対応すべく識別精度を向上させるための方法を検討した。さらに、将来の双方向BMIの実現を目指して、外部刺激が脳血流に与える影響についても実験的に検討を行った。今回の研究によりBMIの応用可能性を高める上での重要な指針が得られた。

研究成果の概要(英文)：In recent years, robotics and medical sciences have focused on a new input interface, "the brain-machine interface." If a practical BMI system is realized, it could have pioneering applications in various new fields, e.g., human-robot interaction and supportive care for persons with special needs. Therefore, we aimed to design a practical BMI system using a portable Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) device. In this research, we developed a LVQ-based cerebral state classifier for a portable NIRS device that enabled to classify cerebral blood flow patterns corresponding to several human mental imagery (e.g., mental commands given to a robot) and human emotions. Then, we discussed problems to utilize the NIRS-based BMI system in the daily environment and designed the improved LVQ-based classifier. In addition to that, we experimentally investigated the response of the cerebral blood flow against external visual stimuli.

研究分野：ロボット工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：ブレイン・マシン・インタフェース NIRS 脳情報 ロボット 学習 人間機械系

1. 研究開始当初の背景

現在、我々の身の回りには、ボタンやレバー、マウスなど各種機器を操作するための様々なインタフェースが存在する。これに対し、近年、人の脳活動をセンサで計測してその情報を入力信号として用いるブレイン・マシン・インタフェース(以下、BMI)の技術に注目が集まっている。BMIは人の思考を入力とする直接的かつ直感的なインタフェースとして大きな可能性を秘めており、実用的なBMIが実現できれば、例えば、ALS(筋萎縮性側索硬化症)などの麻痺患者の生活支援や、人とロボット(機械)との直感的コミュニケーションなど、様々な分野に幅広く応用することが可能になる。

本研究は、近赤外線分光法(Near-Infrared Spectroscopy, 以下NIRS)を用いたBMIの実現を目指すものである。脳活動の計測法には、脳波計(EEG)や磁気共鳴画像装置(fMRI)など様々な方法があるが、NIRSは近赤外光を照射し非侵襲で脳の血流変化を計測する方法で、計測プローブが容易に装着でき、拘束も少なく安全に同時多チャンネルの脳活動情報を取得できる利点がある。最近では、ポータブルのNIRS計測装置も登場し、今後の応用が期待されている。しかしながら、現状のBMIは、周囲ノイズや環境の変化、体調の変化などの影響を受けやすく、使用者による個人差も大きい。また、脳機能は解明されていない部分が多く、思考や感情と脳活動との関連も明らかになっていない。そのため、人の脳活動を実験的に調査し、日常生活において高精度に利用できるBMIを開発することが強く望まれている。以上の学術的背景に基づき、「ポータブルNIRS計測装置を用いた実用型ブレイン・マシン・インタフェースの構築」を研究テーマとして設定した。

2. 研究の目的

今回の科学研究費補助金の助成期間では、ポータブルNIRS計測装置を用いて様々な状況下での脳活動を計測し、被験者の思考や感情を識別可能なBMIシステムを構築することを目標とし、日常生活空間でのBMIの効果的な利用を可能にするための技術開発を目指した。具体的な重点課題は以下の3点とした。

(1) ポータブルNIRSに適した思考及び感情の識別法の検討とBMIシステムの構築

医療用の大型NIRS装置は、測定点数も多くサンプリング時間も短いため有利であるが、その大きさゆえに日常型のBMIとしては利用不可能である。そこで、携帯可能な小型のNIRS装置を利用して、人の思考や感情を高度に識別するための手法を構築することを課題として設定した。

(2) 日常生活での使用を考慮したBMIの識別性能の向上法の検討

BMIを日常生活において使用するには、周

囲ノイズや環境変化、使用者の体調の変化、測定プローブの装着位置のばらつき、脳信号の個人差など、様々な影響を排除して、高精度な思考識別システムを構築しなければならない。そこで、識別精度を向上させるための方法の考案と、それに基づく識別システムの改良を行うことにした。

(3) 双方向BMIへの応用を意図した外部刺激に対する脳反応の実験的調査

現在研究されているBMIは、いずれも人から対象機器への一方通行である。もし、対象機器からの外部刺激(視覚的刺激、物理的刺激等)によって脳信号に特定の影響を与えることができれば、人の思考や感情から対象機器へ、そして、対象機器から人へという信号のループを構成でき、BMIにインタラクティブ性を持たせられる可能性がある。そこで、外部刺激に対する脳活動の変化を実験的に調査し、外部刺激を受けた際の脳の状態変化に規則性があるかどうかを識別器で判定する試みを行うことにした。

3. 研究の方法

(1) ポータブルNIRSに適した思考及び感情の識別法の検討とBMIシステムの構築

人の思考や感情の識別を行うため、ポータブルNIRS計測装置としてスペクトラテック社製OEG-16を導入し、まず、BMI実験システムの構築を行った。本研究では、図1のように前頭前野にプローブを装着して、16チャンネルの多点同時血流計測を行うことにした。前頭前野は、主に思考や感情などの高次機能を担う領域とされ、本システムでは、血流量の時間変化を捉えて解析用PCにてリアルタイムに解析することで、使用者の思考や感情の識別を実現する。

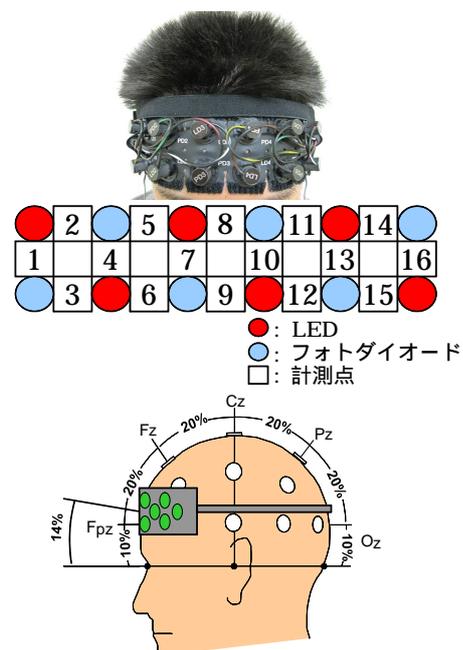


図1 ポータブルNIRS装置を用いた脳計測

システムの構築後、実際に様々な状況で被験者の脳血流の変化を計測し、血流から思考や感情を識別するための方法の検討を行った。検討の結果、構成した思考識別器の概要を図2に示す。思考識別器は、計測した脳血流パターン（時系列データ）からノイズやドリフトを除去し、識別のための特徴量（識別器への入力ベクトル）を算出する前処理部と、事前学習に基づいて思考の識別を行う学習・識別器から構成される。識別に用いる特徴量は、様々な候補を検討し、時間窓内の血流積分値や微分値など、識別率が高くなるものを最終的に選択した。

構築したBMIの性能は、複数名の被験者に対する思考識別実験を実施して評価した。結果については研究成果の項で示す。

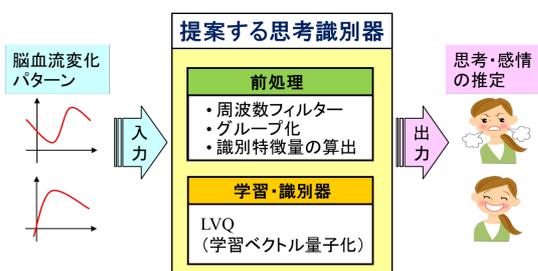


図2 構築した思考識別器の構造

(2) 日常生活での使用を考慮したBMIの識別性能の向上法の検討

前項の研究において構築した思考識別器により、比較的高い識別率が得られることがわかったが、BMIを日常的に使っていく場合には、プローブの付け外しや周囲の温度変化、使用者の体調の変化、使用時の姿勢変化や呼吸の影響など、脳信号の様々な変動要因が存在し、識別率を大きく低下させてしまう。そこで、脳信号の変動要因に対して識別率を低下させないようにする方法を検討した。

呼吸や姿勢変化の影響の除去

脳血流は、呼吸に合わせて大きく変動する。また、測定中の頭部や体幹の姿勢変化も血液の分布を大きく変えるため、それがBMIへの入力の変動となって現れる。これらは、識別率を低下させる大きな要因となるため、その影響を除去する方法を検討した。

まず、被験者の血流を計測する実験を行って、呼吸（息止めや深呼吸）や頭部の姿勢変化がどのように血流に影響するのかを実験的に調査した。その結果、これらの影響は、脳の比較的広い領域に渡って、一斉に同タイミングで現れることがわかった。（例えば、呼吸の場合は、その深さに合わせて全チャンネルが上下変動する）そこで、信号の独立性の仮定を基に観測信号から元の信号源を推定する「独立成分分析」を用い、外乱となっている変動成分（信号源）を特定して除去する手法をとることにした。図3にその原理を示す。そして、実際に思考の識別実験を行っ

て、その有効性を確認した。結果の一部は研究成果の項で示す。

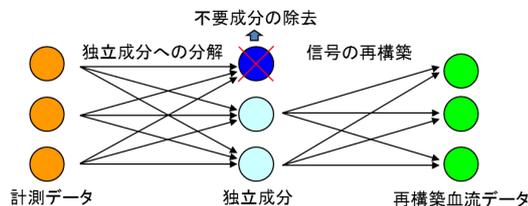


図3 独立成分分析に基づく成分除去

自己増殖型LVQを用いた追加学習と学習則の改良

BMIを日常的に使用するには、日々の環境変動や体調変化、使用者の個人差に対応して、識別器をチューニング（キャリリブレーション）できる機能があることが望ましい。そこで、新たに計測したサンプルデータを用いて、識別器の追加学習を行う機能を検討し、BMIシステムに実装した。また、その際に、脳血流パターンの多様性に対応するために、標準LVQに対して、必要に応じて自動的に内部のニューロンを増殖させるアルゴリズムも追加した。さらに、様々なパターンを学習させる過程で識別器の内部状態を解析し、不要なニューロンを発生させない工夫や、効果的に学習を進ませる工夫を学習アルゴリズムに取り入れた。その有効性は、実際に思考の識別実験を行って確認した。結果と考察は研究成果の項で示す。

レイヤードLVQによる脳血流パターンの多様性への対処

自己増殖型LVQと学習法の改良により識別率が改善されたが、学習用のデータを取得した時期や時間帯とBMIの使用時期や時間帯が大きく異なったり、体調の変化などで学習時の血流変化パターンからの変動が生じたりすると、識別率が大きく低下してしまう問題がある。そこで、そのような血流変化パターンの多様性に対応させるために、その時々で識別用LVQの学習を行い、それらをデータベースとして蓄積しておいて、過去のデータベースを層状に重ねて総合的に判断し、現在の状況に最も適した出力を行う「レイヤードLVQ」を考えた（図4）。層状になったLVQの内部のニューロンを比較して出力を決定するため単純な多数決ではないが、過去の状況を考慮して合理的に出力を決定できる。識別実験の結果と考察は研究成果の項で示す。

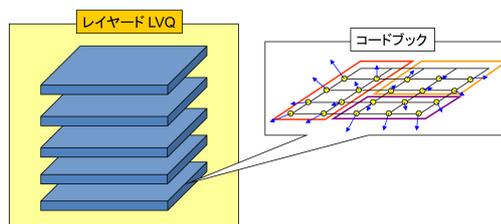


図4 レイヤードLVQの概念図

(3) 双方向 BMI への応用を意図した外部刺激に対する脳反応の実験的調査

現在の BMI は脳から対象機器への一方の情報伝達を念頭に研究が進められているが、対象機器からも脳活動に変化をもたらすことができれば、双方向の新しい BMI としての可能性が見えてくる。そこで、外部刺激に対する脳活動の変化を実験的に調査し、また、外部刺激を受けた際の脳の状態変化に規則性があるかどうかを識別器で判定する試みを行った。今回は刺激条件の規定のしやすさから視覚刺激を題材として選択し、様々な画像を人に呈示した際の、前頭前野の脳血流への影響を実験的に検討した。

実験では、情動研究などに幅広く利用されている国際感情画像(IAPS)を被験者に呈示し、その際の脳血流の変化を解析した。IAPS は様々な種類の画像を含むデータセットで、統計に基づいて快・不快度や覚醒度の数値が各画像に割り振られている。予め被験者への適切な画像呈示条件を検討した後、図5のシーケンスに基づいて休息(黒画面の呈示)と刺激(1セットにつき3種類の画像を8秒ずつ順に呈示)を繰り返しながら、脳血流のデータを計測した。被験者は9名で、呈示画像を変えながら各被験者に対して10セットの呈示実験を実施した。1セットの呈示終了ごとに主観的評価として被験者に快・不快度と覚醒度について用紙に1から9までの数値による自己評定を記入してもらい、脳血流変化との関連性評価の参考とした。

実験で得られた計測データを分析して、各画像に対する脳血流変化の傾向を調査するとともに、本研究で構築した思考識別器を用いて、脳血流変化と快・不快度や覚醒度の自己評定の間の関係を学習させ、これらの間に規則性があるかどうかの確認を行った。もし、規則性があることが見出せれば、外部刺激によって特定の血流変化を引き起こすことができることの一つの証になり得る。結果と考察については研究成果の項で示す。

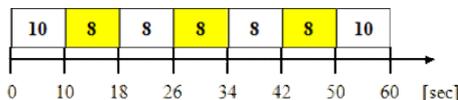


図5 呈示シーケンス (白:レスト 黄:画像)

4. 研究成果

(1) ポータブル NIRS に適した思考及び感情の識別法の検討と BMI システムの構築

構築した思考識別器を用いて、「身体動作イメージ」「ロボット指令イメージ」「感情」の識別実験を行い、基本性能の評価を行った。

「身体動作イメージ」の識別実験

実際に身体を動かすことなく、身体を動かすイメージをただただそれを識別できるか検討するため、右腕動作、左腕動作、両足動作、無動作状態を頭の中でイメージし(図

6), それらを識別する実験を行った。複数名の被験者に対する識別結果は表1のとおりで、リアルタイムに正しく識別できた割合(正答率)や異なる動作と判定してしまった割合(誤反応率)を見ると、提案手法により、高い識別率が得られたことがわかる。遅れと余韻は、血流変化の応答の遅さに起因するもので、生体上避けられない遅れであると考えられるが、誤反応と無反応(イメージをしたにもかかわらず、リラックス状態と判断されたもの)は、BMI の信頼性や使用感に関わるため、極力減らす努力をしなければならない。



図6 身体動作イメージ

表1 身体動作イメージの識別結果

被験者	A	B	C
正答率[%]	79.8	87.0	82.4
誤反応率[%]	2.3	2.7	4.1
遅れ時間率[%]	3.3	1.9	4.0
余韻時間率[%]	1.0	1.0	0.9
無反応[%]	13.7	7.5	8.6

「ロボット指令イメージ」の識別実験

ロボット等の対象物に動作指令を与えるイメージをした際、血流変化からそれを識別できるか検討するため、ロボットに対し、前進、後進、右旋回、左旋回、停止の指令を与えるイメージ(図7)を行い識別した。一般に、識別すべき状態が増えるほど識別は難しくなるが、表2の結果から、5状態の識別問題においても、提案手法により比較的高い識別率を維持できていることがわかる。



図7 ロボット指令イメージ

表2 ロボット指令イメージの識別結果

被験者	A	B	C
正答率[%]	77.5	79.2	77.8
誤反応率[%]	3.0	2.7	3.4
遅れ時間率[%]	5.7	4.2	3.1
余韻時間率[%]	0.5	0.6	1.6
無反応[%]	13.3	13.2	14.0

「感情イメージ」の識別実験

被験者に、自身の経験を思い出しながら、喜び、悲しみ、怒りの感情を想起させ、リラックスも含めて4状態(図8)を識別した。表3の結果から、感情の識別についても十分な可能性を秘めていることが確認された。



図8 感情イメージ

表3 感情イメージの識別結果

被験者	A	B	C
正答率[%]	80.3	79.0	84.1
誤反応率[%]	4.2	3.7	3.2
遅れ時間率[%]	6.0	5.4	6.5
余韻時間率[%]	0.8	0.9	0.3
無反応[%]	8.7	11.0	5.9

(2) 日常生活での使用を考慮した BMI の識別性能の向上法の検討

呼吸や姿勢変化の影響の除去

提案手法による呼吸や姿勢変化の影響の除去が有効かどうか検証実験を行った。表4、5は、息止めをしながら身体動作と感情を想起し、それを識別した結果である。どちらの場合も、提案手法によって影響を除去することで識別性能が向上していることがわかる。

表4 息止めの除去（身体動作イメージ）

	除去なし	除去手法有
正答率[%]	72.8	84.4
誤反応率[%]	8.0	3.0
遅れ余韻等[%]	7.6	5.1
無反応[%]	11.6	7.5

表5 息止めの除去（感情イメージ）

	除去なし	除去手法有
正答率[%]	69.0	84.9
誤反応率[%]	15.0	3.2
遅れ余韻等[%]	5.0	6.5
無反応[%]	11.0	5.4

自己増殖型 LVQ を用いた追加学習と学習則の改良

自己増殖型 LVQ を用いた学習によって想定どおり識別率が向上するかどうか実験的に検証を行った。表6は、標準 LVQ を用いた場合と改良型 LVQ を用いた場合とで識別率の比較をしたものである。正答率に大きな改善が見られるが、学習データが少ない場合に、プローブの位置がずれたり計測時間帯の大きく異なる新規データを識別すると表7のように改善の幅が小さくなってしまいう問題点が残っている。十分な学習データと学習則のさらなる改良が必要であると思われる。

表6 改良型 LVQ の識別率比較（結果1）

	標準 LVQ	改良型 LVQ
正答率[%]	84.5	91.0
誤反応率[%]	2.9	1.1
遅れ余韻等[%]	10.5	6.8
無反応[%]	2.1	1.1
ニューロン数	45	90

表7 改良型 LVQ の識別率比較（結果2）

	標準 LVQ	改良型 LVQ
正答率[%]	77.6	79.6
誤反応率[%]	7.6	8.0
遅れ余韻等[%]	11.9	10.7
無反応[%]	2.9	1.7
ニューロン数	45	90

レイヤード LVQ による脳血流パターンの多様性への対処

レイヤード LVQ の性能を評価するために、プローブの付け外しを行ったり、計測時間帯を変えたりしたデータを多数用意し、a)ある時間帯に計測したデータのみで学習した場合、b)すべてのデータをまとめて学習した場合、c)測定時間帯ごとのまとまりで学習して、レイヤード LVQ として構成した場合の識別率の比較を行った。識別に使ったデータは、学習に使用していない新規データである。表8の結果を見ると、明らかにレイヤード LVQ の識別率が高いことがわかる。

表8 レイヤード LVQ の性能試験

	条件 a)	条件 b)	条件 c)
正答率[%]	69.7	77.6	80.8
誤反応率[%]	11.3	7.6	6.6
遅れ余韻等[%]	11.1	11.9	9.9
無反応[%]	7.9	2.9	2.7

(3) 双方向 BMI への応用を意図した外部刺激に対する脳反応の実験的調査

9名の被験者から得た脳血流変化と被験者の自己評価の結果を比較・分析したところ、全員に共通して、中性で覚醒度が低い画像に対しては脳全体であまり血流変化が起こらない傾向があった。一方、快または不快で覚醒度が高い画像に対しては特徴的な血流変化が現れる場合が多く（図9）、印象の強い画像（外部刺激）により脳血流に影響を及ぼすことが可能であることがわかった。ただし、血流変化には個人差があり、例えば、不快で覚醒度が高い画像に対して特定の部位の脳血流が一時的に上昇する被験者や、快で覚醒度が高い画像に対して全体の脳血流が上昇する者など様々であった。

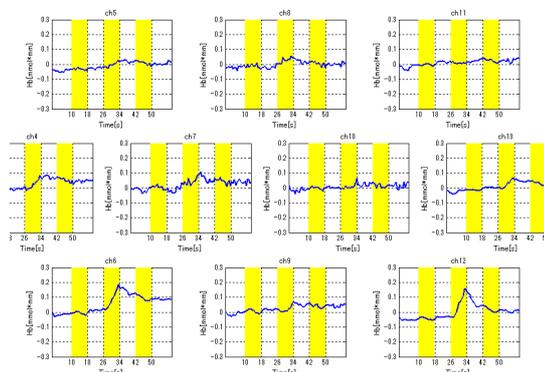


図9 画像セット呈示時の脳血流変化の例（被験者:A 画像内容:快-不快-中性）

外部刺激と脳血流変化の間に関係性があるかどうか確認するため、BMI 用に構築したLVQ 思考識別器を用いて、被験者が各画像に付加した評定値と脳血流データとの間の関係を学習し、規則性の存在を調べることにした。もしこれらの関係を正しく学習できれば、異なる画像であっても快度・覚醒度が近い場合には類似した脳血流変化を引き起こすことを示唆し、その結果を感性評価に用いたり、特定の画像によって故意に血流変化を起こしたりするような応用が期待できる。

今回は、各被験者の脳血流データを識別器への入力とし、出力は、快・不快度については4段階[不快(評定値1~3)、中性(評定値4~6)、快(評定値7~9)、レスティング]、覚醒度については3段階[低覚醒=レスティング(評定値1~3)、中覚醒(評定値4~6)、高覚醒(評定値7~9)]として学習を行った。使用した画像は各被験者10セット(計30枚)で、それらの識別結果から識別率を算出した。表9は、快・不快度と覚醒度について、代表各1名の識別結果と被験者9名全員の平均値をまとめたものである。被験者Aの覚醒度の識別率は83%に達しており誤認も非常に少ない。被験者全体で見ても高い識別率が得られている。覚醒度よりは識別率が劣るが、快・不快度についても高い識別率が得られている。前項のBMIのイメージ想起の実験と異なり、被験者は能動的なイメージ想起は行っておらず、画像刺激を受けて脳がそれを判断し受動的に反応しているだけのため、必然的に血流変化の遅れや余韻が大きくなる。そのため遅れ・余韻率は生体上避けられないとすれば、この識別正答率はとても高い。また、自己評定数値が同じであっても毎回全く同じ感情を抱いているとは限らず、そもそも人間の感情は単純に快・不快では区分しきれない複雑なものであり画像の呈示中にそれ以外の感情や思考を含んでしまっている可能性も十分にある。にもかかわらず、今回のように高い識別率が得られたことは、外部刺激によって特定の反応を脳に引き起こすことができる可能性を示唆していると考えられる。

表9 識別結果

	覚醒度		快不快度	
	被験者A	被験者平均	被験者B	被験者平均
正答率[%]	83.5	78.0	74.2	71.3
誤認率[%]	0.8	2.8	4.5	4.7
遅れ・余韻[%]	3.2	3.5	6.0	5.5

以上、今回の科学研究費での研究成果は、将来のBMIの応用可能性を高める上で重要な指針となり得るものである。

最後に、この研究に対しまして助成を賜りましたことを心より感謝申し上げます。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

T.Ito, S.Ushii, T.Sameshima, Y. Mitsui, S.Ohgi, C.Mizuike, Design of Brain-Machine Interface Using Near-Infrared Spectroscopy, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, 25-6, 2013, pp.1000-1010

〔学会発表〕(計6件)

T.Ito, H.Akiyama, T.Hirano, Brain Machine Interface using Portable Near-InfraRed Spectroscopy:Improvement of Classification Performance based on ICA analysis and Self-proliferating LVQ, IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2013年11月4日, Tokyo

伊藤友孝, 秋山英毅, 平野時久, ポータブルNIRS計測装置を用いたブレインマシンインターフェースの構築-ノードの自動増殖を用いた追加学習の効果-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2013年5月24日, つくば市

T.Ito, T.Hirano, Y.Mitsui, H.Akiyama, S.Ohgi and C.Mizuike, Design of Brain Machine Interface using Portable Near-InfraRed Spectroscopy, IEEE Int. Conf. on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, 2012年11月6日, Nagoya

伊藤友孝, 秋山英毅, 三井嘉弘, 平野時久, ポータブルNIRS計測装置を用いたブレインマシンインターフェースの構築, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2012年5月29日, 浜松市

伊藤友孝, 三井嘉弘, 平野時久, 秋山英毅, 大城昌平, 水池千尋, NIRSを用いたブレインマシンインターフェースの構築, 第17回ロボティクスシンポジウム, 2012年3月14日, 萩市

伊藤友孝, 平野時久, 鮫島孝文, 三井嘉弘, 大城昌平, 水池千尋, NIRSを用いたブレインマシンインターフェースの構築-識別率向上のための学習条件の検討-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2011年5月28日, 岡山市

6. 研究組織

(1)研究代表者

伊藤 友孝 (ITO TOMOTAKA)
静岡大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 00283341

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

大城 昌平 (OHGI SHOHEI)
聖隷クリストファー大学・リハビリテーション学部・教授
研究者番号: 90387506