

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500202

研究課題名(和文)脳科学と情報科学を融合させたBMI構築のための多チャンネル脳波信号処理技術の革新

研究課題名(英文)Innovation of multi-channel EEG signal processing technology for BMI development by fusion of information science and brain science

研究代表者

牧野 昭二(Makino, Shoji)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：60396190

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本プロジェクトでは、人が音の空間性を認識するときの脳活動に着目し、基礎研究を行なうとともに、このような空間性を有する音の聴取時に観察される特徴ある脳活動を利用したブレインマシンインタフェースの開発を行なった。今年度は、空間聴覚刺激に対する事象関連電位の統計的特徴に基づいた電極と潜時の選択手法を提案し、識別率を向上させた。音の出力法の試みでは、スピーカによる実音源と仮想音源でP300反応に個人差があること、視覚刺激より振幅が小さいこと、頭部伝達関数を利用した空間聴覚刺激が後頭部にP300を誘発させることを確認した。

研究成果の概要(英文)：We advanced BMI development in two following frameworks. (1) We proposed a method to select the optimal latency and electrode based on the F-value based on the statistical characteristics of an event-related potential for spatial auditory stimuli. The proposed method demonstrated an 8% improvement of correct classification rate. (2) We verified a combination of real and virtual sound sources by speakers to evoke P300 responses. A large individual difference in P300 appearance was confirmed. To develop an alternate auditory BMI using virtual sound source, we tried a headphone-based auditory BMI using a head impulse response in an open database. A clear P300 was observed in occipital area. With view to develop multimodal BMI, the P300s by the spatial auditory stimuli, visual stimuli and the combination of these modalities were compared. It revealed that the amplitude of P300 for spatial auditory stimuli was less than the other.

研究分野：メディア情報学

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：情報センシング マルチチャンネル信号処理

1. 研究開始当初の背景

ブレインマシンインタフェース(BMI)は、脳からの信号を用いて機械やコンピュータを制御する新しいパラダイムとして近年脚光を浴びており、脳波を用いて車イスを制御するシステムも報告されている。ブレインマシンインタフェース技術は、将来、脊髄などに損傷を負い手や足が不自由になった人々の回復支援やリハビリテーション手段としても注目され、人々のクオリティオブライフ(QoL)向上への貢献が期待されている。

研究分担者の Rutkowski は、理化学研究所において、脳波 EEG 信号を用いて車イスを動かすシステムを実現させるなどの画期的な成果を挙げている。

研究代表者の牧野は、これまで、音響信号処理において世界をリードする研究を行ってきた世界的権威である。多くの受賞[A]、学会活動[B]、特集号の編集委員長、性能評価コンテストの主催、著書、招待論文、招待講演がその証である。

脳波 EEG 信号は非常に微弱である。さらにブレインマシンインタフェースでは、意図や注意に関する信号のみを取り出す必要があり、それ以外の信号はノイズとなる。無意識で意図しないまばたきや筋肉運動により発生するノイズ脳波成分の除去に、研究代表者や研究分担者がこれまで培ってきた音響信号処理(ノイズキャンセラ、雑音除去、マイクロホンアレー、音源抽出、音源強調)の技術とノウハウがたいへん役に立つ。特に、ブラインド音源分離に用いられる独立成分分析技術は、脳波から意味のある信号成分を分離・抽出するための有力な手段である。

[A] IEEE Distinguished Lecturer, IEEE Fellow, 電子情報通信学会 フェロー, 電子情報通信学会 業績賞, ICA Unsupervised Learning Pioneer Award, IEEE MLSP Competition Award, 電気通信普及財団 テレコムシステム技術賞, 日本音響学会 技術開発賞, 電子情報通信学会 論文賞, 日本音響学会 論文賞, その他多数

[B] Awards Board Member of the IEEE SP Society, Conference Board Member of the IEEE SP Society, Award Committee Member of the IEEE James L. Flanagan Speech & Audio Processing Award, Associate Editor of the IEEE Trans. SAP, Associate Editor of the EURASIP JASP, Chair of the Blind Signal Processing TC of the IEEE CAS Society, Member of the Audio and Electroacoustics TC of the IEEE SP Society, Member of the International ICA Steering Committee, Member of the International IWAENC Standing Committee, 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ 副会長, 電子情報通信学会 応用音響研究会 委員長, その他多数

脳波の測定は、EEG センサを頭部に複数個取り付け、マルチチャンネルで時間信号を観測するものであるが、これは空間の複数点にマイクロホンを設置してマルチチャンネルで時間信号を観測するマイクロホンアレーと極めて類似した技術と言える。脳波の信号処理およびそのブレインマシンインタフェースへの応用は始まったばかりであり、将来の発展と学術・社会への貢献が大いに期待できる。一方、音響信号処理には長い歴史があり、多くの技術が確立されている。そのため、両者のコラボレーションはたいへん有意義であり、音響信号処理の専門家と脳波 EEG 信号処理の専門家による interdisciplinary なバックグラウンドを活かせば、技術の革新が可能であるという着想に至った。

2. 研究の目的

脳科学と情報科学を融合させ、脳計測およびその応用課題であるブレインマシンインタフェース(BMI)構築のための革新的なマルチチャンネル脳波信号処理技術を確立する。具体的には、

- (1) まばたきや筋肉運動により発生するノイズ脳波成分の除去、
- (2) 非線形、非定常な脳内伝達特性への対応、
- (3) 頭内深部の意味のある信号の分離、同定、抽出、強調、理解、等の技術を開発する。

3. 研究の方法

研究計画は次の3つのフェーズに分かれる。

(フェーズ) 被験者20名に対して、128チャンネルで、手や足を動かし、筋電と共に、脳波 EEG 信号の測定を行なう。

(フェーズ) 実測データを用いて、脳波 EEG 信号の分離、同定、抽出、強調、理解のための、新手法の検討・提案・検証を行なう。

(フェーズ) ブレインマシンインタフェースシステムに反映させ、脳波 EEG 信号のノイズ低減、目的信号推定精度向上、ブレインマシンインタフェース動作安定化を実現させる。

本研究は、フェーズ およびフェーズ に重点を置き、その進行状況を確認しながらフェーズを進める。

4. 研究成果

今年度は、BMIに最適な空間聴覚刺激の選別を行うために多くの被験者実験を行った。各実験の達成状況及び進捗状況は下記のとおりである。

4.1 音の空間情報を利用したBMIのための聴覚誘発電位の最適判別 [雑誌論文2, 学会発表9]

音の空間情報を利用するBMIアプリケーションではコマンドを音源の方向ごとに割り振るため、アプリケーションの操作を行うためのコマンドが一つ増える度に、音源刺激も

増える。本研究では、8 方向に設置されたスピーカを利用して各方向から呈示される聴覚刺激と音源方向を対応付け、ターゲットとする方向に意識を向ける空間聴覚 BMI (図 1-1) を扱った。識別の際、従来研究では後方のスピーカからの音に対して生じる P300 反応は用いなかったが、本研究では後方のスピーカからの音に対して生じる P300 反応を含めて識別することにより、従来研究と比較して良い結果が得られた (図 1-2)。また、P300 反応の識別において最適な電極と事象関連電位 (Event related potential, ERP) の潜時を識別するためのアプローチとして、脳波の統計的特徴から識別性能を最適化する分散分析に基づいた手法を新たに提案した。提案法では、ターゲット及び非ターゲットの ERP の差異が大きい電極と潜時を選択できた。このように選択した電極を Gaussian Naïve Bayesian Classifier で識別したところ、従来の手法に比べて最大 8% 正答率が改善された。

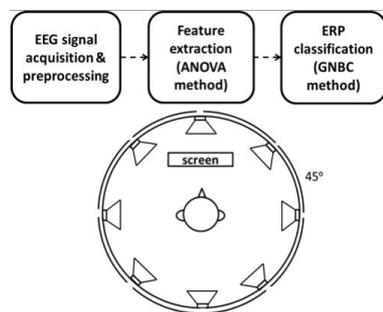


図 1-1. 空間聴覚 BMI モデル

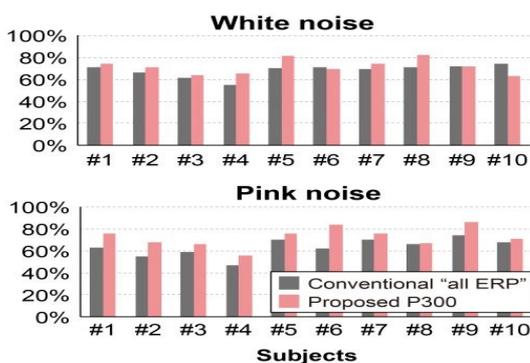


図 1-2. 従来研究と本研究の識別結果の比較

4.2 空間聴覚 BMI による実音源と仮想音源の最適化に関する研究 [学会発表 10]

先行研究では、実音源と同様に仮想音源を刺激として与えた際にも、ERP の波形から P300 反応が観測されることが明らかになった。仮想音源とは、複数のスピーカを使用して実際にスピーカが置かれていない位置から音が聞こえるように生成される音である (図 2-1)。また、人間の脳は、仮想音源を実音源と同等のものとして知覚している可能性がある。

そこで本研究では実際のスピーカ数よりも多くの選択肢、すなわち音源数を持つコマンドを利用できる実音源及び仮想音源を用いた音響システム (Real-and-virtual) を提案した。さらに音響システム全体の定位精度向上を目指すために、仮想音源のみではなく、スピーカの置かれた方向に定位精度の高い実音源を定位させる刺激も用いた。

空間聴覚 BMI において、Real-and-virtual の (1) 音源の定位精度、(2) 脳波の特徴量識別器を用いた識別精度の 2 点を確認するため、従来手法である実音源を用いた音響システム (Real-only) との性能比較を目的とした心理物理実験及び脳波実験を行った。実験の手順は先行研究と概ね同様であるが、同文献において脳反応が音源の種類に依存しない可能性が示唆されていたため、本実験では実音源での定位精度が一番高かった MIDI 音源の楽器音のみを用いた。また特徴量識別器を用いた性能比較では、各手法の実験を 3 回ずつ行い、1 回目の試行で得られた脳波データをトレーニングデータ、2 回目及び 3 回目の脳波データをテストデータとして識別器による識別を行った。

心理物理実験の結果では、仮想音源のみを用いた先行研究に比べ Real-and-virtual の定位精度向上が見られたが、Real-only より方向同定が困難になるという結果が得られた (表 1)。一方脳波実験では、Real-only を識別器で識別した時に比べ、Real-and-virtual の識別正答率が低いという結果が得られた (図 2-2)。これは、実音源と仮想音源によって誘発される P300 反応の波形や潜時に差があったことに起因すると考えられる (図 2-3)。また、Real-and-virtual において、ある被験者では実音源が、別の被験者では仮想音源が誘発する P300 反応が比較的良く識別されるという個人差が生じた。これは、被験者ごとに P300 反応が誘発されやすい音源が異なることを示唆している。

今回の実験では、ベースとなる音源が同一であっても知覚した音が実音源か仮想音源かによって誘発される P300 反応に差が生じる可能性が得られた。得られた ERP の波形から、方向だけでなく、ユーザーが注意を向けていた音源を識別できる可能性が示唆された。これは将来的に、空間聴覚 BMI アプリケーションのコマンド識別率及び情報転送速度の向上に貢献するものである。今後は、実音源と仮想音源に対する脳波を別々に学習させた 2 つの特徴量識別器を用いてオンライン BMI 実験を行う。さらに、より空間聴覚 BMI に適した音響システムの提案として、実音源と仮想音源を同時に提示し、どちらの刺激に注意を向けていたかを ERP から識別するカクテルパーティー効果を利用したシステム開発を

計画している。

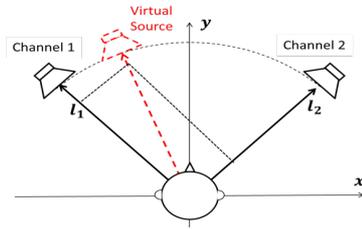


図 2-1. 仮想音源のモデル

表 1. 心理物理実験の正答率

	平均正答率
仮想音源のみ	44.7%
Real-only	90.3%
Real-and-virtual	73.6%

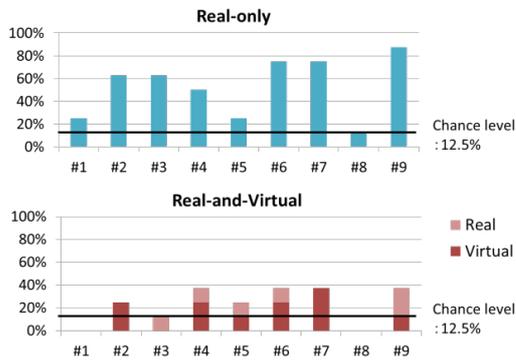


図 2-2. 脳波実験の識別正答率

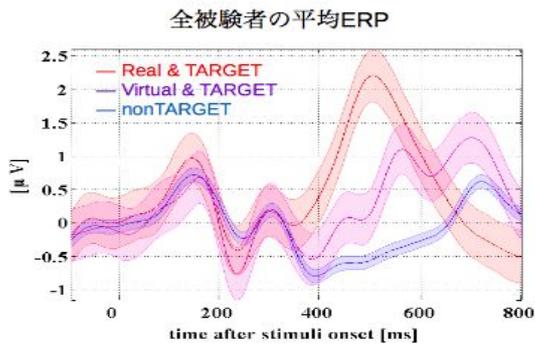


図 2-3. 脳波実験の結果

4.3.1 空間聴覚，視覚，視聴覚の B M I パラダイムによる P 300 反応の比較 [学会発表 15]

空間聴覚 B M I を用いた B M I スペラーとしての最適なシステムの形を検証するために、先行研究の手法を用いて刺激呈示の最適化を行い、被験者を増やして引き続き脳波実験を行った。実験の条件や手順は先行研究と同様に、日本語の 5 母音「あ・い・う・え・お」の文字を使った 3 つの空間聴覚・視覚・視聴覚のパラダイムを比較した。脳波実験の結果、

識別の正答率を図 3-1-1 に示す。視覚・視聴覚パラダイムでは多くの被験者が高い正答率を示したのに対して、空間聴覚パラダイムでは全体的に低い正答率を示した。この実験に参加した被験者 16 人の脳波の平均 (図 3-1-2) を観察すると、正答率の結果に比例するように視覚・視聴覚パラダイムでは P300 反応が明確であるのに対して、空間聴覚パラダイムでは P300 反応は小さい。この結果から、空間聴覚 B M I の正答率が他の条件に比べて劣る原因は P300 反応の表れ方に関係があると考えられる。この結果を踏まえて、P300 反応がより出やすいような音刺激の出力方法の模索を行う。

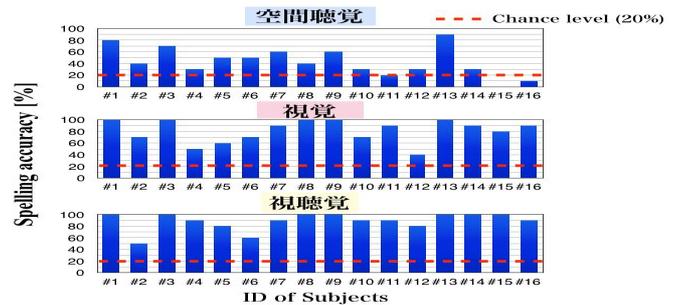


図 3-1-1. 脳波実験の識別結果 (5 母音)

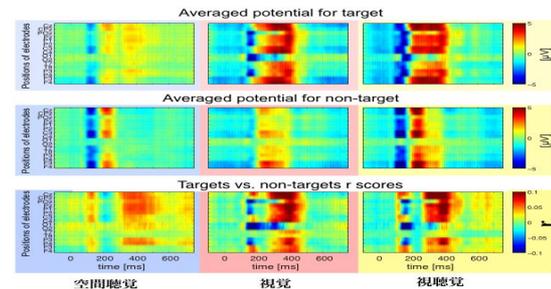


図 3-1-2. 脳波の結果

4.3.2 頭部インパルス応答を用いた仮想的な空間聴覚刺激による聴覚 B M I に関する研究 [学会発表 2]

刺激として用いる仮想音源の定位精度を向上させるために、本研究では頭部伝達関数としても知られる頭部インパルス応答 (HRIR) を用いて方向定位させる空間聴覚刺激を提案した。本手法では、公開データベースから適切な HRIR を選択して用い、ヘッドホンベースの空間再生システムの可能性を検証した。

空間聴覚 B M I において、刺激に対する反応時間と混同率を調査する心理物理実験と、同刺激を用いて P300 反応の有無を検証する脳波実験を行った。実験に使用した刺激は日本語の 5 母音「あ・い・う・え・お」で、各刺激は水平面上に 40° ずつ異なる方向を関連付けて定位させた。

心理物理実験の結果、刺激間での反応時間に有意差は見られず (図 3-2-1)、正答率も 90%

以上となったことから(図 3-2-2), 刺激は脳波実験を行うのに適切な刺激であることを確認できた. 脳波実験の結果, 後頭部において明確な P300 反応がみられることが確認できた(図 3-2-3). これらにより HRIR を用いた音刺激が誘発する脳反応の有用性を確認することができた. 空間聴覚 B M I アプリケーションをより実装しやすくするのに HRIR は有望であると言える.

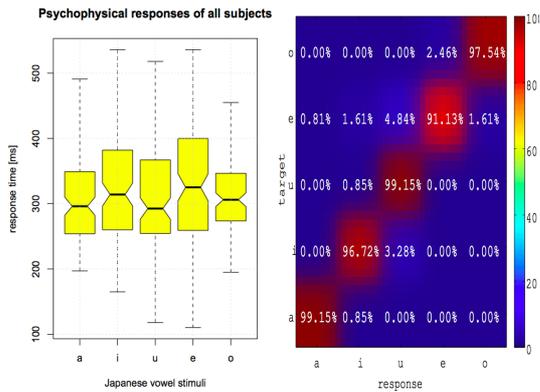


図 3-2-1. 心理物理実験の結果 1
図 3-2-2. 心理物理実験の結果 2

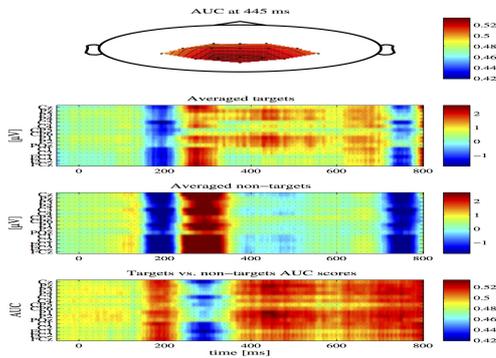


図 3-2-3. 脳波実験の結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 2 件)

T. M. Rutkowski (18 名中 16 番目), “Workshops of the Fifth International Brain-Computer Interface Meeting: Defining the Future”, Taylor & Francis, Brain-Computer Interfaces, 2014, Vol. 1, No. 1, 27-49 (2014 年 3 月) 査読無 DOI:10.1080/2326263X.2013.876724

Z. Cai, S. Makino and T. M. Rutkowski, “Brain Evoked Potential Latencies Optimization for Spatial Auditory Brain”, Springer Cognitive Computation (Special Issue: Advances on Brain Inspired Computing), ISSN: 1866-9956, Volume 5, Number 2, (2013

年 6 月) 査読有

DOI: 10.1007/s12559-013-9228-x

(学会発表)(計 26 件)

D. Aminaka, K. Mori, T. Matsui, S. Makino, and T. M. Rutkowski, “Bone-conduction-based Brain Computer Interface Paradigm- EEG Signal Processing, Feature Extraction and Classification -”, The 9th International Conference on SIGNAL IMAGE TECHNOLOGY & INTERNET BASED SYSTEMS (Kyoto, Japan)(2013 年 12 月 5 日)

C. Nakaizumi, K. Mori, T. Matsui, S. Makino, and T. M. Rutkowski, “Auditory Brain-Computer Interface Paradigm with Head Related Impulse Response-based Spatial Cues”, The 9th International Conference on SIGNAL IMAGE TECHNOLOGY & INTERNET BASED SYSTEMS (Kyoto, Japan)(2013 年 12 月 5 日)

S. Kono, D. Aminaka, S. Makino, and T. M. Rutkowski, “EEG Signal Processing and Classification for the Novel Tactile-Force Brain-Computer Interface Paradigm”, The 9th International Conference on SIGNAL IMAGE TECHNOLOGY & INTERNET BASED SYSTEMS (Kyoto, Japan)(2013 年 12 月 5 日)

T. M. Rutkowski, H. Mori, S. Makino, K. Mori, “Novel spatial tactile and bone-conduction auditory brain computer interface”, The 43rd annual meeting of the Society for Neuroscience (San Diego, California, USA)(2013 年 11 月 9 日)

Y. Lelievre and T. M. Rutkowski, “Novel Virtual Moving Sound-based Spatial Auditory Brain-Computer Interface Paradigm”, The 6th International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering (California, USA) (2013 年 11 月 6 日)

H. Mori, S. Makino, and T. M. Rutkowski, “Multi-command Chest Tactile Brain Computer Interface for Small Vehicle Robot Navigation”, The 2013 International Conference on Brain and Health Informatics (Maebashi, Gunma, Japan)(2013 年 10 月 30 日)

Y. Matsumoto, S. Makino, K. Mori and T. M. Rutkowski, “Classifying P300 Responses to Various Vowel Stimuli for Auditory Brain-Computer Interface”, Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference 2013 (Kaohsiung,

Taiwan)(2013年10月31日)
Y. Lelievre, Y. Washizawa, and T. M. Rutkowski, “Single Trial BCI Classification Accuracy Improvement for the Novel Virtual Sound Movement-based Spatial Auditory Paradigm”, Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference 2013 (Kaohsiung, Taiwan)(2013年10月30日)
Z. Cai, S. Makino, T. M. Rutkowski, “Spatial Auditory BCI with ERP Responses to Front-Back to the Head Stimuli Distinction Support”, Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference 2013 (Kaohsiung, Taiwan)(2013年10月31日)
N. Nishikawa, S. Makino, T. M. Rutkowski, “Spatial Auditory BCI Paradigm based on Real and Virtual Sound Images Generation”, Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference 2013 (Kaohsiung, Taiwan)(2013年10月31日)
M. Chang, S. Makino, T. M. Rutkowski, “Classification Improvement of P300 Response Based Auditory Spatial Brain-Computer Interface Paradigm”, IEEE TENCON 2013 (Xi'an, Shaanxi, China)(2013年10月23日)
T. M. Rutkowski, “BEYOND VISUAL P300 BASED BRAIN-COMPUTER INTERFACING PARADIGMS”, Innovations in Information and Communication Science and Technology (IICST 2013) (Tomsk, Russia) (2013年9月3日)
H. Mori, Y. Matsumoto, S. Makino, Z. R. Struzik, D. Mandic, and T. M. Rutkowski, “Network Based Complexity Analysis in Tactile Brain Computer Interface Task”, The 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (Osaka, Japan)(2013年7月4日)
T. M. Rutkowski, H. Mori, Y. Matsumoto, Z. R. Struzik, S. Makino, D. Mandic, and K. Mori, “Spatial Tactile and Auditory Brain Computer Interface based on Head Position Stimulation”, The 36th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (Kyoto, Japan) (2013年6月21日)
M. Chang, N. Nishikawa, Z. R. Struzik, K. Mori, S. Makino, D. Mandic, T. M. Rutkowski, “Comparison of P300 Responses in Auditory, Visual and

Audiovisual Spatial Speller BCI Paradigms”, The 5th International Brain-Computer Interface Meeting 2013 (California, USA)(2013年6月4日)
H. Mori, Y. Matsumoto, Z. R. Struzik, K. Mori, S. Makino, D. Mandic, T. M. Rutkowski, “Multi-Command Tactile and Auditory Brain Computer Interface based on Head Position Stimulation”, The 5th International Brain-Computer Interface Meeting 2013 (California, USA)(2013年6月4日)
H. Mori, Y. Matsumoto, V. Kryssanov, E. Cooper, H. Ogawa, S. Makino, Z. R. Struzik, and T. M. Rutkowski, “Multi-command Tactile Brain Computer Interface: A Feasibility Study”, The 8th International Workshop on Haptic and Audio Interaction Design (Daejeon, Korea) (2013年4月18日)
T. M. Rutkowski, “Spatial Auditory and Tactile BCI in Application to Vehicular Robot Control”, University of Cincinnati (Cincinnati, OH, USA) (2013年11月14-17日)
T. M. Rutkowski, H. Mori, M. Chang, S. Kono, D. Aminaka and C. Nakaizumi, “Auditory and Tactile Brain Computer Interfaces for Locked-in State Patients and Healthy Users”, 日本・ポーランド科学技術セミナー, (Tokyo, Japan)(2013年10月16日)

6. 研究組織

(1)研究代表者

牧野 昭二 (Makino, Shoji)
筑波大学・システム情報系・教授
研究者番号：60396190

(2)研究分担者

ルトコフスキ トマシュ (Rutkowski, Tomasz)
筑波大学・システム情報系・講師
研究者番号：50415238

宮部 滋樹 (Miyabe, shigeki)
筑波大学・システム情報系・助教
研究者番号：50598745

(3)連携研究者

寺澤 洋子 (Terasawa, Hiroko)
筑波大学・図書館情報メディア系・助教
研究者番号：70579094

山田 武志 (Yamada, Takeshi)
筑波大学・システム情報系・准教授
研究者番号：20312829