

# 脳科学と情報科学を融合させたBCI構築のための多チャンネル脳波信号処理の研究

代表研究者	牧野 昭二	筑波大学	システム情報系	教授
共同研究者	Tomasz Rutkowski	筑波大学	システム情報系	講師
共同研究者	宮部 滋樹	筑波大学	システム情報系	助教

## 1 はじめに

ブレインコンピュータインタフェース(BCI)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。ブレインコンピュータインタフェース技術は、将来の新しい通信の可能性を探る取り組みとしても注目され、人と機械との新しい通信の未来創造への貢献が期待されている。

脳波などの生体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、我々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、音源分離、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、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。また、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。

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、脳波信号処理の専門家と音響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。

本プロジェクトでは、脳科学と情報科学を融合させ、我々がこれまで培ってきた最先端のマルチチャンネル音響信号処理技術を脳波信号に応用し、ブレインマシンインタフェースを構築する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し、それらを脳科学や生命科学に応用することを試みた。また、そのためのマルチチャンネル音響信号処理要素技術の開発も並行して行なった。

## 2 脳神経科学と情報科学の融合—音の空間情報を利用したブレインマシンインタフェース—

ブレインマシンインタフェースは、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いる。平成 23 年度から筑波大学に着任したルトコフスキ講師は、理化学研究所において、脳波信号を用いて車イスを制御する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[1]。

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、人々のクオリティーオブライフ(QoL)向上への貢献が期待されている。

このような目的のため、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。

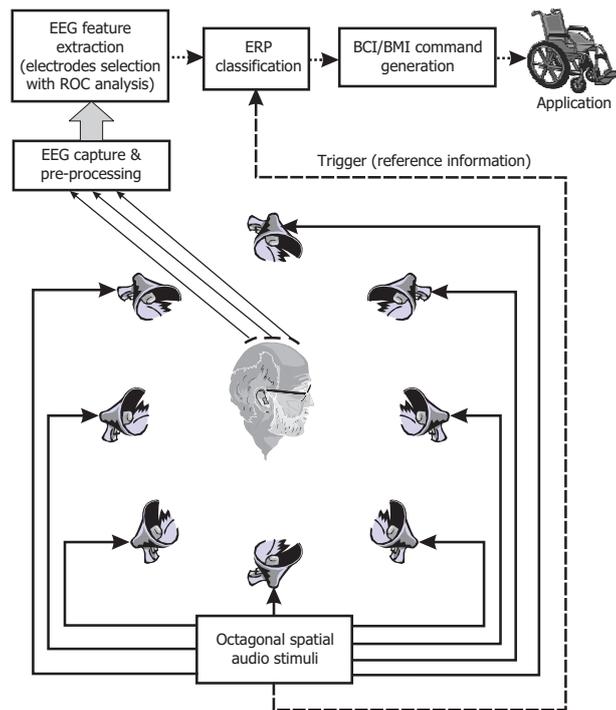


図1 8つのスピーカを用いて空間的に音を提示した場合の反応。予測した方向から音がすると、P300 という期待に関する反応が起こるので、信号処理によってこれを抽出する。抽出された信号は、ブレインマシンインタフェースに応用し、車いすなどを動かすために利用出来る。

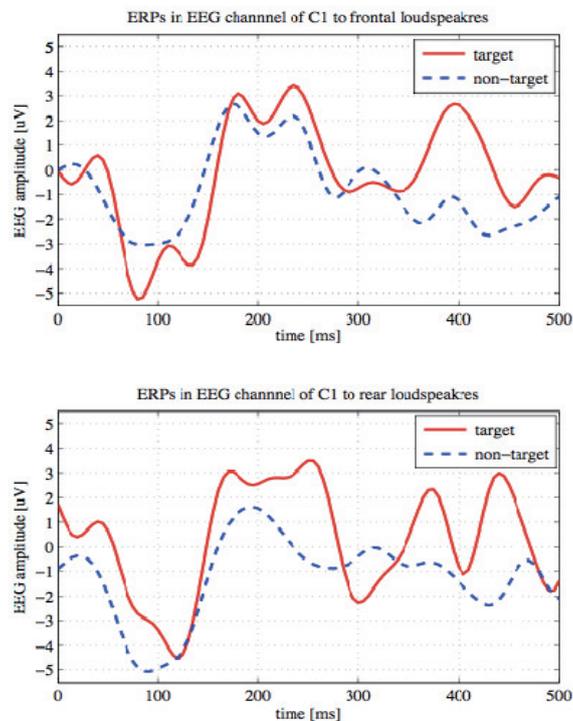


図2 正面から音を提示した場合（上図）と背面から音を提示した場合（下図）の事象誘発電位 P300 の応答。これによって提案法の実現可能性が確認された。

## 2-1 聴覚的空間定位と音源移動による脳活動の研究

人間は、自然な音環境において、複数の音源を同時に含む音を聴く時に、ある方向から来る音と他の方向から来る音に分離して認識することが可能である。このような認知プロセスは「聴覚情景分析」と呼ばれ、視覚における情景分析との類似点も多い。計算論的聴覚情景分析では、このような脳の知覚メカニズムをモデル化し、脳における音処理の理解を目指している。

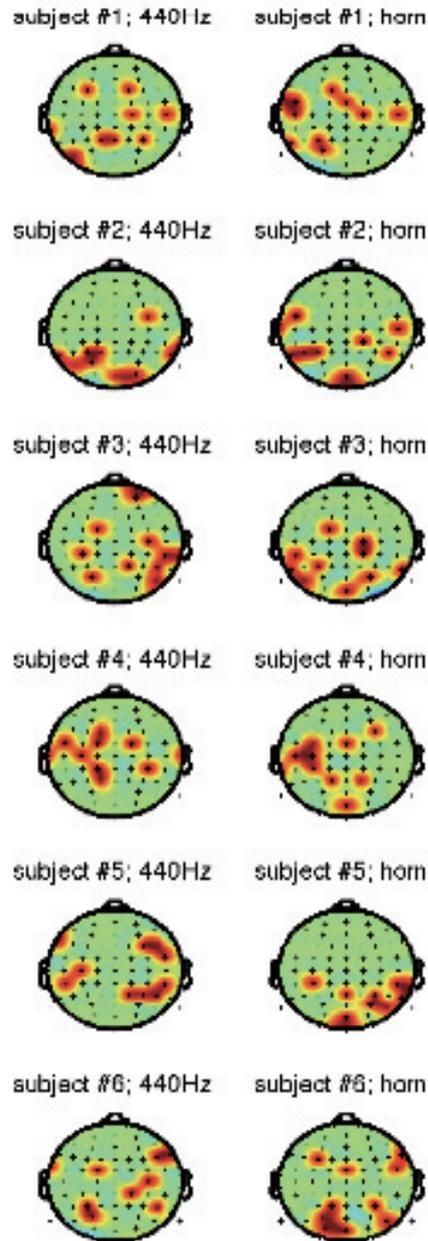
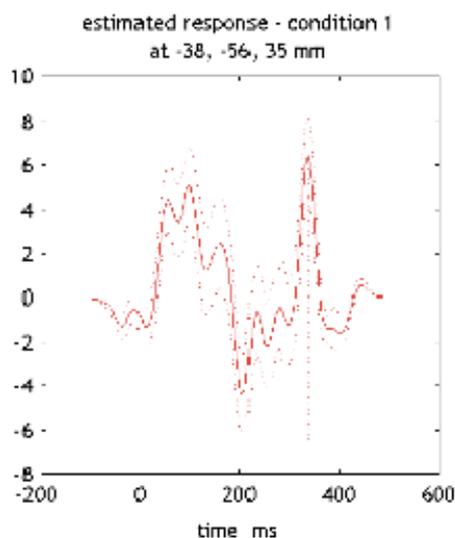


図3 被験者6人。刺激音2種類。脳波を用いて空間刺激に対するP300応答を識別する場合の、時間・空間の活動領域。これによって、ブレインマシンインタフェース応用に向けた脳波チャンネル選択が可能になった。

記憶と学習は、音環境からの刺激を受け取り認知する過程で、トップダウンのプロセスを促すと考えられている。しかし、心理実験によって、記憶や学習に依存せずとも、音を分離して認識する聴覚情景分析が出来ることが示されており、このようなボトムアップのプロセスは、より原始的なプロセスであると考えられている。このような聴覚情景分析の脳機能を理解するためには、感覚刺激がどのように組織化あるいは分化されているのかを明らかにする必要がある。

組織化は様々な神経活動を伴い、聴覚経路の脳活動を観察することで説明される。聴覚システムは、音色の差異から各音源の空間的位置を判別できることがすでに示されており、「どこの」、「何の」といった情報は個別に分離される。ここで、「いつ」、「どこで」といった情報を基にした聴覚システムの働きを時間空間的な分析によって調べる。



PPM at 335 ms (65 percent confidence)  
 512 dipoles  
 Percent variance explained 95.45 (94.99)  
 log-evidence = -2356.5

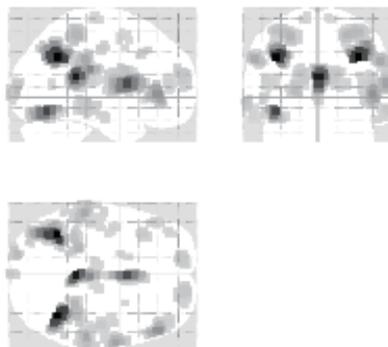


図 4 上：音源の方向に関する誘発電位。ターゲットと非ターゲットに対する誘発電位の差をプロットすると 300ms 付近での反応が一番大きなコントラストを示した。下：刺激提示後 335ms でのターゲットと非ターゲットへの反応の違い。脳の構造モデルによってこの時刻での脳活動の位置が推定できた。

本プロジェクトでは、聴覚上の空間応答特性と時間応答特性を解明するため、健常者を対象にした非侵襲的な脳波測定を行なった。図1に示す環境で脳計測実験を行ない、新たな信号処理手法の開発を並行して行なった。これまでに得られた実験結果を図2：被験者の脳波から推定された事象誘発電位（P300）の時系列平均、図3：頭皮の表面マップ、図4：脳信号源の大きさ、に示す[2]。図2に示すように、音源位置を変化させた場合、P300（刺激の300ms後に現れる正の誘発電位）に変化が現れている。P300は別名「アハ反応」ともよばれ、注意反応の指標であり、被験者が期待した通りの刺激が起こったときに観測される。P300は他の誘発電位に比べて抽出が容易であり個人差も少ないため、これまでのブレインマシンインタフェースに広く利用されて来た。本プロジェクトでは、この反応を利用した新しい聴覚ブレインマシンインタフェースシステムを提案した。

## 2-2 ブレインマシンインタフェース/ブレインコンピュータインタフェース

前節で述べたように、音源位置の変化によって、特徴ある脳活動（P300）が観察される。これを応用すれば、聴覚的空間定位に基づくブレインマシンインタフェースが開発出来る。つまり、音源移動に関連した脳反応を利用した新しい聴覚的ブレインマシンインタフェースの枠組みである。

これまでのブレインマシンインタフェースでは、主に画像による刺激を用い、「アハ反応」と言われるP300の有無を抽出し、それをインタフェースのon/offスイッチとして用いていた。一方、この新しい聴覚的ブレインマシンインタフェースでは、音源移動を刺激として、同様にP300の有無を抽出することで、インタフェースを制御する。これを利用した聴覚的ブレインマシンインタフェースの仕組みとしては、以下のような仕組みが考えられる。例えば、ヘッドフォンを装着し、HRTFと呼ばれる音源定位法によって様々な音源の方向をランダムな順番で提示する。ユーザは、自分の行きたい方向に注意を向けていて、その方向から音がするとP300が生じる。この反応を抽出して、車いすをユーザが望んだ方向へ誘導することが可能になる。

## 3 おわりに

ブレインマシンインタフェースの領域において、空間的な聴覚定位や移動音源刺激の概念はまだ新しく、世界中でもいくつかの先進的な試みを行なっているグループで競争的に開発しているところである。聴覚ブレインマシンインタフェースは、画像によるブレインマシンインタフェースに比べて、物理的な自由度が高く、ユーザへの負荷が少ない（図1の概念図を参照）。特に車いすへの応用では、ディスプレイを凝視して視野を狭めることなく車いすを制御できるため、視覚によるブレインマシンインタフェースよりも聴覚ブレインマシンインタフェースの方が安全性は高い。図2～4に示した実験結果のように、現在のところ、P300の反応が抽出されており、空間的聴覚ブレインマシンインタフェースが有望であることが示されている。今後はこれを利用したインタフェースの開発に取り組んで行く。

本プロジェクトにより開発された新しい信号処理技術と今後開発されるより正確なデータ駆動型の時間周波数領域の信号処理技術を活用し、空間刺激の分布だけでなく、移動音源の効果も取り入れた新しい枠組みを検討して行く。頭部伝達関数を用いた音楽や音の空間的なモデリングを行ない、新しい聴覚ブレインマシンインタフェースの枠組みを作り上げることが、本プロジェクトの主要なターゲットである。本プロジェクトの目標は脳の反応を70%を超える精度で分類することである。

本プロジェクトには、脳波信号処理とブレインマシンインタフェースの研究に関する豊富な実績、および、音響信号処理、統計学習・機械学習に関する抱負な知識の蓄積がある。これらを活かし、マルチメディア情報技術の革新技術を開拓するとともに、それらを脳科学や生命科学に応用して行く。

将来的には、これらの知見を活用し、関連プロジェクトと連携を図りながら、脳波により手や足を動かすブレインマシンインタフェースも構築し、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やリハビリテーションへの応用を図り、ライフ・イノベーションの推進に大きく寄与して行く。

## 【参考文献】

- [1] A. Cichocki, Y. Washizawa, T.M. Rutkowski, H. Bakardjian, A.-H. Phan, S. Choi, H. Lee, Q. Zhao, L. Zhang, and Y. Li, "Noninvasive BCIs: Multiway signal-processing array decompositions," *Computer*, vol. 41, no. 10, pp. 34-42, 2008.
- [2] Z. Cai, H. Terasawa, S. Makino, T. Yamada, and T.M. Rutkowski, "Spatial location and sound timbre as informative cues in auditory BCI/BMI - electrodes position optimization for brain evoked potential enhancement," in *Proc. APSIPA2011, Wed-PM.SS4*, pp. 1-6, Oct. 2011.
- [3] T.M. Rutkowski, Q. Zhao, D.P. Mandic, Z. Cai, A. Cichocki, S. Makino, and A.W. Przybyszewski, "New EEG components separation method: Data driven Huang-Hilbert transform application to auditory BMI paradigm," in *Proc. Neuroscience2011*, Nov. 2011.
- [4] T.M.. Rutkowski, A. Cichocki, and D. P. Mandic, "Spatial auditory paradigms for brain computer/machine interfacing," in *Proc. IWPASH2009*, p. 5, Nov. 2009.
- [5] M. Schreuder, B. Blankertz, and M. Tangermann, "A new auditory multi-class brain-computer interface paradigm: Spatial hearing as an informative cue," *PLoS ONE*, vol. 5, p. e9813, Apr. 2010.
- [6] T.M.. Rutkowski, T. Tanaka, Q. Zhao, and A. Cichocki, "Spatial auditory BCI/BMI paradigm - Multichannel EMD approach to brain responses estimation," in *Proc. APSIPA2010*, pp. 197-202, Dec. 2010.
- [7] J. Lewald, K. A. J. Riederer, T. Lentz, and I. G. Meister, "Processing of sound location in human cortex," *European Journal of Neuroscience*, vol. 27, no. 5, pp. 1261-1270, 2008.
- [8] C. Guger, S. Daban, E. Sellers, C. Holzner, G. Krausz, R. Carabalona, F. Gramatica, and G. Edlinger, "How many people are able to control a P300-based brain-computer interface (BCI?)," *Neuroscience Letters*, vol. 462, no. 1, pp. 94-98, 2009.
- [9] J. Schnupp, I. Nelken, and A. King, *Auditory Neuroscience - Making Sense of Sound*. MIT Press, 2010.
- [10] Wellcome Trust Centre for Neuroimaging, "Statistical parametric mapping - SPM8 package." <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>, 2010.
- [11] S. Theodoridis and K. Koutroumbas, *Pattern Recognition*. Academic Press, fourth ed., 2009.
- [12] T. Fawcett, "An introduction to ROC analysis," *ROC Analysis in Pattern Recognition*. *Pattern Recognition Letters*, vol. 27, no. 8, pp. 861-874, 2006.
- [13] R Development Core Team, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Austria, 2009.
- [14] J. Tuszynski, *caTools: Tools: moving window statistics, GIF, Base64, ROC AUC, etc.*, R package version 1.12, 2011.
- [15] W. N. Venables and B. D. Ripley, *Modern Applied Statistics with S*. New York: Springer, fourth ed., 2002.
- [16] C. Vidaurre, T. H. Sander, and A. Schlögl, "Biosig: The free and open source software library for biomedical signal processing," *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol. 2011, Article ID 935364, 12 pages, 2011.
- [17] J. Wolpaw and E.W. Wolpaw, eds., *Brain-Computer Interfaces: Principles and Practice*. Oxford University Press, 2012.
- [18] R. Srinivasan, "Acquiring brain signals from outside the brain." *Brain-Computer Interfaces - Principles and Practice*, Oxford University Press, Inc, pp.105-122, 2012.
- [19] J.C. Middlebrooks and D.M. Green, "Sound localization by human listeners", *Annual Reviews*, 42:135-59, 1991.
- [20] V. Pulkki, "Virtual sound source positioning using vector base amplitude panning", *Audio Engineering Society*, Inc, July 1992.
- [21] V. Pulkki, "Generic panning tools for MAX/MSP", *Proceedings of International Computer Music Conference*, 2000.

- [22] H. Higashi, T.M.. Rutkowski, Y. Washizawa, A. Cichocki, and T. Tanaka “ EEG auditory steady state responses classification for the novel BMI, ”in Proc. IEEE EMBS2011, pp. 4576-4579, IEEE Press, Aug. 2011.
- [23] T. W. Picton, M. S. John, A. Dimitrijevic, and D. Purcell, “ Human auditory steady-state responses: Respuestas auditivas de estado estable en humanos, ”International Journal of Audiology, vol. 42, no. 4, pp. 177-219, 2003.
- [24] V. Jurcak, D. Tsuzuki, and I. Dan, “ 10/20, 10/10, and 10/5 systems revisited: Their validity as relative head-surface-based positioning systems ”, NeuroImage 34 (2007) 1600-1611, 2007.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Spatial location and sound timbre as informative cues in auditory BCI/BMI - electrodes position optimization for brain evoked potential enhancement	APSIPA2011	2011年10月
New EEG components separation method: Data driven Huang-Hilbert transform application to auditory BMI paradigm	Neuroscience2011	2011年11月