

戦略的国際科学技術協力推進事業（日本－ドイツ研究交流）

1. 研究課題名：「非定常環境におけるロバスト適応 BCI ）」
2. 研究期間：平成 24 年 4 月～平成 27 年 3 月
3. 支援額： 総額 14,230,000 円
4. 主な参加研究者名：

日本側（研究代表者を含め 6 名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	大羽成征	京都大学大学院情報学研究所	講師
研究者	川鍋一晃	国際電気通信基礎技術研究所，脳情報解析研究所	主任研究員
研究者	山下宙人	国際電気通信基礎技術研究所，脳情報解析研究所	主任研究員
研究者	竹之内高志	はこだて未来大学，システム情報科学部	准教授
研究者	平山淳一郎	国際電気通信基礎技術研究所，脳情報解析研究所	研究員
研究者	Henrik Skibbe	京都大学大学院情報学研究所	研究員
研究期間中の全参加研究者数		7名	

相手側（研究代表者を含め 6 名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	Klaus-Robert Müller	Technical University of Berlin	Professor
研究者	Carmen Vidauer	Technical University of Berlin	Postdoctoral researcher
研究者	Wojciech Samek	Technical University of Berlin	Postdoctoral researcher
研究者	Benjamin Blankertz	Technical University of Berlin	Postdoctoral researcher
研究者	Frank Meinert	Technical University of Berlin	Postdoctoral researcher
研究者			
研究期間中の全参加研究者数		5名	

5. 研究・交流の目的

本研究の目的は非侵襲ブレイン・コンピュータ・インターフェイス (BCI) を非定常な環境に適用可能とする「ロバスト BCI」の実現である。ユーザーの意思が作り出す脳内状態を脳波計によって読み取り、これにもとづいて生活上の様々なタスクを行うためには、意思に対応する脳波パターンを機械に学習させる必要がある。しかし、ユーザーの違いや、同一ユーザーであっても時と場合による違い、実験環境自体の変化に応じて、計測される脳波パターンが変化していつてしまうため、その学習も読み取りも一筋縄ではいかないことがわかっている。そこで、これまでに脳波読み取りに関する技術とデータの蓄積がある日本側チームとドイツベルリン工科大チームがそれぞれの強みを持ち寄ることによって、技術的ブレークスルーを目指した。

具体的には日本側は脳内状態変動に対する対策を開発し、ドイツベルリン工科大側は実験環境の変動に対する対策を開発する計画を立てた。本研究で日本とドイツが交流を通じて相互的に取り組むことで、これまでにない優れた安定性を示す BCI 技術によって障害者とのコミュニケーションおよび脳疾患からのリハビリテーションなどの現場での精度と利便性の保証を目指した。

6. 研究・交流の成果

6-1 研究の成果

脳波計に基づくブレイン・コンピューター・インターフェイスは、ユーザーの意思を脳波形によって読み取ることを目的としているが、測定ノイズや環境の非定常性のため生活環境において実用上必要とされる精度を得ることは非常に困難である。たとえば同一タスクを行う場合であっても、脳活動はユーザー間で異なるうえ、同一ユーザーであっても日間・日中変動が存在する。この問題を克服するために必要な技術は、大きく分けて「測定技術」と「解析技術」に分けられる。我々日本側チーム（京都大, ATR, はこだて未来大）とドイツ側チーム（ベルリン工科大）は 3 年間の共同研究において主に「解析技術」の向上を目指した。また解析技術はさらに「脳波の特徴を表す特徴量抽出の方法」と「抽出された特徴量に基づく判別の方法」に分けられる。我々はこの両面において、非定常性に対する頑健性を向上する複数の新技術を開発した。

これらの新技術によって、即座に障害者とのコミュニケーションや脳疾患からのリハビリテーションの現場における利便性向上が得られるわけではないことに注意をいただきたい。実応用にはまだ超えねばならない課題が残る。しかし、日本側・ドイツ側チームの強みを持ち寄ることによって以下のように一定の成果を得ることができた。

ロバストな特徴抽出法の開発では、脳波における非定常性に対処するための方法を複数提案し、これらの性能を確かめた。具体的には、非定常性を罰則項として定常な特徴を得る方法 (stationary CSP) の拡張によってクラス間判別情報を得る特徴量 (Samek et al. EMBC 2012)、試行ごとのバラつきが許容範囲内であれば変動があっても判別性能が保証される特徴量 (max-min CSP) (Kawanabe et al. 2014)、ベータダイバージェンスを用いることで様々なロバスト特徴量を生成する統一的なアプローチ (Samek et al. 2013, 2014a, b) を開発した。またこれらを ATR の実環境実験設備で同一被験者から得られた 83 セッション (15 日間) の左右手運動想像時の EEG データに適用したところ、全セッションを通じてロバストな特徴量が存在し、提案手法が実環境 BMI に向けたロバスト脳情報解読法の構築にも有用であることがわかった。

抽出された特徴量に基づく判別の方法の開発では、マルチタスク学習、アンサンブル学習、転移学習の技術を導入することで性能を向上した。マルチタスク学習とはタスク間で共有されている情報を利用することで、タスク間の非定常性の影響を抑える方法、アンサンブル学習とは学習による判別器を複数集めて適切に組み合わせることでひとつの判別器を構成する方法、転移学習とは被験者間・セッション間の変動を学習する方法のことである。マルチタスク学習とアンサンブル学習の組み合わせ方の工夫によって、計算量を抑えつつ

タスク固有のノイズと個人間のバラつきに頑健な手法を開発した (Takenouchi, 2012; Takenouchi, 2014)。被験者の負荷の少ない安静時脳活動計測のみを使用して、被験者間・セッション間の変動を較正する仕組みをとり入れた転移学習法を提案し、41名の EEG 空間注意課題データベースを用いて従来法を改善することを示した (Morioka et al., 2015)。

脳活動データを直感的に理解するのに役立つ動的接続因子化 (Dynamic Connectivity Factorization; DCF) という手法も開発した。脳の領域間・ネットワーク間の結合は様々な要因によって非定常に変化するが、高次元の情報であるため可視化・把握が困難であった。この手法を用いることで、結合が最も動的に変化している 2 つのネットワークを抽出することができる。これを fMRI および MEG データに適用することで神経科学的に解釈可能な成分のペアが得られた (Hyvärinen et al., 2014)。

6-2 人的交流の成果

・川鍋がドイツ在外研究時代に修士研究の指導をしたことのある Wojciech Samek が本プロジェクトの約半分の期間でドイツチームの主要研究者となったことにより、2 回の短期滞在 (1~2 週間) の研究交流と情報交換をきっかけとして、5 件の雑誌論文・学会論文を日独共同で発表することができた。この共同研究の成果をもとにして、彼は平成 26 年 6 月にベルリン工科大学で博士号を取得した。Wojciech Samek は博士号取得後すぐに数あるフラウンホーファー研究所の中でも最も成功していると言われる HHI (Heinrich-Hertz Institute) の機械学習研究グループのリーダーに抜擢された。これは、彼が本プロジェクトを通じて短期間で数多くの研究成果を発表したことに加えて、アメリカ・日本など EU 以外の国との幅広い人脈や研究交流実績が評価されたと聞いている。彼は研究グループを任されてから半年程度しかたっていないが、すでに 5 本の原著論文を発表し、今後の活躍が期待されている。

・本プロジェクトでは平成 24 年度と平成 26 年度に BCI と機械学習の世界的権威である Klaus-Robert Müller 教授を ATR に招待し、講演していただく機会を設けることができた。講演には ATR のみならず、京大・NAIST・立命館大などの学生や若手研究者が参加するなど大変盛況であった。その後 ATR でもベルリン工科大グループの最先端の研究成果をフォローし、学生の博士・修士研究や現在進行中のプロジェクトの中で生かすという意識が生まれ、関西の計算論的神経科学・機械学習の若手コミュニティーに対して大きな貢献ができた。

7. 本研究交流による主な論文発表・主要学会での発表・特許出願

論文 or 特許	・論文の場合： 著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年、DOI ・特許の場合： 知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、出願番号、出願人、発明者等	特記 事項
	W.Samek, D.Blythe, K.-R.Müller and M.Kawanabe, Robust spatial filtering with beta divergence, <i>Advances in Neural Information Processing</i> , Vol. 26, 2013	
	J. Hirayama, T. Ogawa and A. Hyvärinen. Unifying blind separation and clustering for resting-state EEG/MEG functional connectivity analysis. <i>Neural Computation</i> , 2015 in press.	
	H. Morioka, A. Kanemura, J. Hirayama, M. Shikauchi, T. Ogawa, S. Ikeda, M. Kawanabe, S. Ishii. Learning a common dictionary for subject-transfer decoding with resting calibration. <i>NeuroImage</i> , 111, 167-178, 2015.	
	T. Takenouchi, O. Komori, S. Eguchi. A novel boosting algorithm	

	for multi-task learning based on the Itakura-saito divergence. Bayesian Inference and Maximum Entropy Methods In Science and Engineering (Maxent 2014), 1641, pp. 230–237, 2015. Amboise, France, 2014/09/23	
	M.Kawanabe, W.Samek, K.-R.Müller and C.Vidaurre, Robust spatial filters with a maxmin approach, Neural Computation, Vol.26, No.2, pp.349–377, 2014.	