

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700281

研究課題名(和文) 密パッチ上の確率モデルによる局所構造をとらえたロバストな多次元信号処理

研究課題名(英文) Robust signal processing that captures local structures by probabilistic models on dense patches

研究代表者

兼村 厚範 (KANEMURA, Atsunori)

大阪大学・産業科学研究所・特任研究員(常勤)

研究者番号：50580297

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、密パッチ上の確率モデルを使用する統計推定による新規な多次元信号処理法を提案することである。密パッチとは、ボクセルパッチ(近傍ボクセル集合)を互いに1ボクセルずつ重ねて敷き詰めたものを意味する。各パッチ内の統計量がランダム変動に対してロバストであり、かつ脳画像の局所構造をよく捉えることができるという利点を活用することで、位置ごとに異なる柔軟な正則化を実現できる。密パッチ情報に基づく3次元信号処理法の実現は、BMI工学や神経科学などへの発展可能性を持つ。本研究では、脳信号の処理およびデコーディング応用と、画像信号処理への応用を行った。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to propose new multi-dimensional signal processing methods based on statistical estimation using probabilistic models on dense patches. Dense patches mean a set of voxels (neighboring voxels) that are layered with one-voxel displacement to each other. The statistics in each patch is robust against random variation and can capture local structures of brain-images. These properties contribute elastic regularization that is different from place to place. Three-dimensional signal processing based on dense-patch information has possibility to be applied for brain-machine interface engineering and neuroscience. This study has been involved to brain signal processing, decoding or BMI, and image signal processing.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：統計的信号処理 確率的情報処理 機械学習 統計学 画像処理

## 1. 研究開始当初の背景

MEG (脳磁計) は脳活動により発生した磁場を頭外で計測する。よって、脳に電極を直接置く侵襲的な方法より安全性が高く、臨床医療に限らず神経科学や BMI (ブレイン・マシン・インタフェース) など広い目的に適用可能である。ただし、時間分解能は数 ms 程度と神経細胞活動の時間スケールとはほぼ同じであるものの、数百個のセンサに様々な電流からの磁場が重ね合わさって観測されるため、空間分解能は数 cm 程度と粗い[1]。

脳内の電流分布をより高い空間分解能で知るためには、皮質上に相互距離が数 mm 程度の数千～数万個の電流源を仮定し、その強度を推定することが標準的である。これは、マクスウェル方程式により記述される脳内電流から頭外磁場への順過程を逆転する逆推定問題である。逆問題を高精度で解くには、一般に良い拘束条件 (事前知識, 正則化) が必要とされる。いままで用いられてきた脳活動への拘束には、 $L_2$  ノルム最小化[1] やスパース性制約[2] などがあるが、ほとんどは空間的に滑らかな制約しか行っていない。最近の研究では、各電流に 3 種類の滑らかさ (広がり) を考慮し、その線形結合の係数をスパースに推定するという方法で位置可変の正則化を実現するものがある[3] が、これは電流ごとに高々数個までの広がり選択しかできない。

- [1] Hamalainen et al., *Rev. Mod. Phys.*, 1993.
- [2] Sato et al., *NeuroImage*, 2004.
- [3] Haufe et al., *NeuroImage*, 2011.

## 2. 研究の目的

本研究で提案する密パッチモデルは、電流ごとに柔軟に可変な正則化を与えようという試みであると位置付けられる。すなわち、電流ごとにそれを中心とするボクセルパッチ内の統計量を考慮することで、滑らかさの広さと方向の連続的な制御が可能となる。なお、パッチベースの手法を脳 (構造) 画像に適用したもの[4]もあるが、これは脳活動 (機能的側面) に焦点を当てておらず、また得られた脳画像に逆問題を考えることなく単純に既存の手法を施すだけに留まっている。

- [4] Coupé et al., *IEEE Trans. Med. Imag.*, 2008.

## 3. 研究の方法

密パッチモデルの基本的なアイデアは、脳活動信号のみへの適用に限られたものではなく、一般の多次元信号処理の領域で考えることができる。そこで、画像処理を例に挙げる。

画像モデルの発展の順序は、1) 位置不変モデル (例: Tikhonov 正則化), 2) 画素ごとの

勾配情報を用いる位置可変モデル (例: エッジを検出する線過程 [5]), 3) パッチごとの勾配情報を用いる位置可変モデル (例: 非局所平均[6] やカーネル回帰[7]) ととらえることができる。パッチベースの手法は、各画素についてその周囲の画素まで含めたパッチを考え、そのパッチの統計量を推定することで、局所構造を豊かにとらえることができ、また画素数が多いがゆえにロバストである。このような密パッチ情報に基づく正則化を用いる確率的信号処理により、空間精度に優れた MEG 逆推定法の実現を目指す。

- [5] Geman & Geman, *IEEE Trans. Pattern. Anal. Mach. Intell.*, 1984.
- [6] Buades et al., *Proc. CVPR*, 2005.
- [7] Takeda et al., *IEEE Trans. Image Process.*, 2007.

## 4. 研究成果

階層ベイズ法による fMRI (機能的核磁気共鳴画像) と MEG データを統合した逆推定法の発展として、時間情報を効率的に利用するタイプの手法を開発した。MEG の優れた時間分解能を活かしつつ、粗い空間分解能を補うために、高い空間分解能 (数 mm 程度) を持つ fMRI を利用する。fMRI の統合利用法には、脳活動から fMRI 信号の生成過程を考えるものもあるが、本手法では、脳活動の振幅の分散に関する事前知識として用いる。オンライン学習のフレームワークを適用することで、築時的なフィルタ更新が可能となった。また、時間的に相前後する信号の関係をモデリングすることで、滑らかな推定が可能となった。

BMI のうち、特に非侵襲的に脳活動を計測し、意図をデコーディングするものは、適用範囲が広く、潜在的な利用者数も多い。侵襲的な計測と比べて、非侵襲的な計測は精度で劣る面が否めないため、より高度な推定技法の仕様が望ましい。脳活動計測器のみならず、他の要素も計測する機器を配置された空間を利用して、統合的な信号処理による BMI 実現を方向付けた。また、fMRI と MEG のペアよりも精度で劣るものの、可搬性で大きな優位性を持つ NIRS (近赤外赤外分光法) による脳機能画像と EEG (脳波計) による脳活動計測を階層ベイズ的に統合する信号処理により、より高い精度でのデコーディングが可能であることが示された。

脳活動に限らない信号処理による基本手法の提案の一環として、密パッチを厳密な数学的な定式化のもとに扱うことが出来る辞書表現の枠組みで、離散最適化法を用いてスケラビリティを有する技法の開発を行った。具体的には、画像信号の集合から、「代表的」なサンプルを抜き出すことを目的とし、辞書表現の係数を効率的に計算した。係数の推定は、近接勾配法の適用によりアルゴリズム化され、近接演算はネットワークフローにより実行さ

れた．これにより，従来よりも複雑なパタン  
同士の関係の制約を表現できた．

#### 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6件)

H. Morioka, A. Kanemura, S. Morimoto,  
T. Yoshioka, S. Oba, M. Kawanabe, and  
S. Ishii, “Decoding of spatial  
attention by using cortical currents  
estimated from electroencephalography  
with near-infrared spectroscopy  
prior,” *NeuroImage*, vol. 90,  
pp. 128–139, 2014. 査読あり．

DOI: 10.1016/j.neuroimage.2013.12.035 .

A. Kanemura, Y. Morales, M. Kawanabe,  
H. Morioka, N. Kallakuri, T. Ikeda,  
T. Miyashita, N. Hagita, and S. Ishii,  
“A waypoint-based framework in  
brain-controlled smart home  
environments: Brain interfaces,  
domotics, and robotics integration,”  
*Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent  
Robots and Systems (IROS)*, pp. 865–970,  
2013. 査読あり．

DOI: 10.1109/IROS.2013.6696452.

A. Kanemura, J. Yuan, and Y. Kawahara,  
“Finding structured dictionary  
representation by network-flow  
optimization,” *Proc. Workshop on Data  
Discretization and Segmentation for  
Knowledge Discovery (DDS)*, pp. 9–13,  
2013. 査読あり．

[https://sites.google.com/site/dds13w  
orkshop/list-of-accepted-papers](https://sites.google.com/site/dds13workshop/list-of-accepted-papers)

石堂なつみ, 小川剛史, 森本智志, 兼村  
厚範, 丸山雅紀, 川鍋一晃, 石井信, 猿  
渡洋, 中村哲, 鹿野清宏, “聴覚注意を用  
いたブレインマシンインタフェースに関  
する基礎的検討”, 信学技術報 EA,  
vol. 113, no. 134, pp. 51–56, 2013. 査  
読なし．

[http://www.ieice.org/ken/paper/20130  
718RBFn/](http://www.ieice.org/ken/paper/20130718RBFn/)

M. Fukushima, O. Yamashita, A. Kanemura,  
S. Ishii, M. Kawato, and M. Sato, “A  
state-space modeling approach for  
localization of focal current sources  
from MEG,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*,  
vol. 59, no. 6, pp. 1561–1571, 2012. 査  
読あり．

DOI: 10.1109/TBME.2012.2189713.

前田新一, 兼村厚範, 石井信, “確率シス  
テムの立場からの画像情報処理技術”, シ  
ステム/制御/情報, vol. 55, no. 12,  
pp. 532–538, 2011. 査読なし．

[http://ci.nii.ac.jp/naid/11000879925](http://ci.nii.ac.jp/naid/110008799259)

9

#### [学会発表](計13件)

A. Kanemura, Y. Morales, M. Kawanabe,  
H. Morioka, N. Kallakuri, T. Ikeda,  
T. Miyashita, N. Hagita, and S. Ishii,  
“A waypoint-based framework in  
brain-controlled smart house  
environments: Brain interfaces,  
domotics, and robotics integration,”  
*IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots  
and Systems (IROS)*, MoBT9.4, Tokyo,  
Japan, 2013.11.4.

A. Kanemura, J. Yuan, and Y. Kawahara,  
“Finding structured dictionary  
representation by network-flow  
optimization,” *Workshop on Data  
Discretization and Segmentation for  
Knowledge Discovery (DDS)*, Yokohama,  
2013.10.27.

石堂なつみ, 小川剛史, 森本智志, 兼村  
厚範, 丸山雅紀, 川鍋一晃, 石井信, 猿  
渡洋, 中村哲, 鹿野清宏, “聴覚注意を用  
いたブレインマシンインタフェースに関  
する基礎的検討”, 電子情報通信学会 EA  
研究会, EA2013-42, 札幌, 2013.7.18 .

M. Morioka, A. Kanemura, S. Morimoto,  
T. Yoshioka, M. Kawanabe, and S. Ishii,  
“Decoding of spatial attention from  
cortical currents estimated from EEG  
with NIRS prior,” *Neuro2013*, P1-1-246,  
Kyoto, 2013.6.20.

J. Hirayama, Y. Shikouchi, Y. Nakamura,  
S. Maeda, T. Takenouchi, A. Kanemura,  
M. Kawanabe, and S. Ishii, “Decoding  
hand movements in everyday activities  
from magnetoencephalography,”  
*Neuro2013*, P1-1-242, Kyoto, 2013.6.20.

N. Ishido, S. Morimoto, A. Kanemura,  
M. Maruyama, M. Kawanabe, S. Ishii,  
H. Saruwatari, and K. Shikano, “An  
auditory ERP-based BMI for a universal  
controller in a real environment,”  
*Neuro2013*, P1-2-216, Kyoto, 2013.6.20.

森岡博史, 兼村厚範, 川鍋一晃, 吉岡琢,  
森本智志, 石井信, “NIRSを事前情報とし  
EEGから推定された皮質電流からの空間  
注意のデコーディング”, 脳と心のメカニ  
ズム 冬のワークショップ, W07, 留寿都  
村, 2013.1.9 .

兼村厚範, “統計的画像処理におけるモデ  
リングの方向性について”, 人工知能学会  
基本問題研究会 (FPAI), 横浜,  
2012.11.17.

L. Y. Morales, N. Kallakuri, 兼村厚範,  
宮下敬宏, 篠沢一彦, 萩田紀博,  
“Semi-autonomous wheelchair  
navigation towards brain-controlled  
systems”, 日本ロボット学会学術講演会,  
札幌, 2012.9.18 .

O. Yamashita, M. Fukushima, A. Kanemura,

S. Ishii, M. Kawato, and M. Sato, "A state-space modeling approach for reconstructing the spatially focal and temporally smooth current sources using the spatially inhomogeneous dynamical model," *Int. Conf. Biomagnetism (BIOMAG)*, Tu-126, Paris, France, 2012.8.28.

兼村厚範, "MEG 電流源のオンライン変分ベイズ推定", 基礎物理学研究所研究会 情報統計力学の最前線 情報と揺らぎの制御の物理学を目指して, 京都, 2012.3.23.

M. Fukushima, O. Yamashita, A. Kanemura, S. Ishii, M. Kawato, and M. Sato, "Localizing focal current sources from MEG data based on state-space approach," *Annu. Meet. Jpn. Neurosci. Soc. (Neuroscience)*, P3-q21, Yokohama, Japan, 2011.9.16.

M. Fukushima, O. Yamashita, A. Kanemura, S. Ishii, M. Kawato, and M. Sato, "Localizing focal sources from MEG by efficient inference in a high dimensional state-space model," *Annu. Meet. Organ. Hum. Brain Mapp. (HBM)*, Quebec, Canada, #633, 2011.6.29.

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

兼村 厚範 (KANEMURA, Atsunori)

大阪大学・産業科学研究所・特任研究員(常勤)

研究者番号 : 50580297