

# 重みつきスパース正則化の 拡散光トモグラフィへの適用

画像計測研究会2013年9月6日、核融合科学研究所

#### 下川丈明 (研究員@ATR脳情報解析研究所)





#### (株)国際電気通信基礎技術研究所





京都府 けいはんな学研都市





 ・非侵襲に計測したヒト脳活動データから情報を読み出す (デコーティング:復号化)



- -視覚再構成(2008)
- -指の動きを推定(2011)
- 夢の内容を読み出す(2013)

 ①脳機能計測装置を用いて 神経活動を計測
 ②神経活動データからデ コードして情報を読み取る

#### 主な4つの脳機能計測装置



機能的核磁気共鳴像(fMRI): 血流変化を核磁気共鳴により測定



大型の装置 時間: 秒 空間: mm

**脳磁図(MEG):** 電気活動が引き起こす磁場を測定



近赤外光計測(NIRS): 血流変化<br />
血流変化<br />
を近赤外光により測定



小型の装置 時間: 秒 空間: cm

脳波計(EEG): 電気活動が引き起こす電場を測定



小型の装置 時間: ミリ秒 空間: >cm





・ヒトが見ている画像を、fMRIの視覚野のデータから再構成







・ヒトの指の動きを、脳磁図の運動野のデータから
 再構成







#### ・ヒトの夢の内容を、fMRIのデータから判別

はい. ええと, 人がいました. ええなんか. なんだろう, なんか椅子とベッドの間みたいなと ころに, 僕が<mark>カギ</mark>を隠していて, それをその<mark>誰か</mark>がとったみたいな, そういうシーンでした.



図 1. 実験の概要。EEG を装着して MRI 装置の中で眠っている被験者の脳活動を計測した。夢 見に関連する特徴的な EEG 波形が観測されたタイミングで被験者を起こし、夢内容の報告をさ せた。覚醒前の脳活動パターンから夢に現れる視覚対象を解読し、夢報告の内容と比較した。

### 日常生活における脳科学応用





- ・大型の装置で脳から情報を読み出せることが分かった。
   。小型の装置を使えれば日常生活に持ち込めるのでは。
- 介護ロボットを動かす?リハビリに利用可能?

### NIRSとその利点

- 近赤外分光計測を用いた脳機能計測
   <u>N</u>ear-<u>I</u>nfra<u>R</u>ed <u>Spectroscopy</u>(NIRS)。
- ・メリット・・・小型の装置。安全。低拘束。日常生活での脳計測。



神経活動↑ ◆ Oxy Hb↑, Deoxy Hb↓ ◆ ・ 近赤外光の吸収係数 µ<sub>a</sub>↑ 検出光強度 Φ↓







#### fNIRSの歴史





拡散光トモグラフィとよばれる

### 拡散光トモグラフィ(DOT)

• 頭の外で観測される光強度変化から、

AR

- 頭の内の脳活動を推定する方法。
- DOTは順問題と逆問題から成る。



・我々は逆問題を中心に研究。

### 線形近似での順問題・逆問題





### 近赤外光での3次元トモグラフィは難しい



- ・近赤外光は頭部といった大きい生体は透過しない
   → 深さ方向の特定が困難
- ・近赤外光は直進せず、著しく散乱される
   → ぼやける。低空間解像度。

従来の逆問題解法による再構成



#### Tikhonov正則化

$$\hat{X} = \min_{X} \left[ \left\| \Sigma_{y}^{-1} \left( Y - AX \right) \right\|^{2} + \lambda \left\| X \right\|^{2} \right]$$

observation error penalty

AR

1. 表面にバイアスされている 2. 空間分解能も低い

これを2つの工夫により改善



#### 開発した3次元推定法

### ①重みつきの正則化の適用





#### <u>Tikhonov正則化</u>

$$\hat{X} = \min_{X} \left[ \left\| \Sigma_{y}^{-1} \left( Y - AX \right) \right\|^{2} + \lambda \left\| X \right\|^{2} \right]$$

observation error penalty えく浮いた原因は一様な ペナルティを用いたこと

感度Aは 浅い場所でとても強く 深い場所でとても弱い



1)重みつきの正則化の適用



weighted penalty  

$$D = diag \left( A^T \Sigma_y^{-1} A + \beta I \right)$$

 $\hat{X} = \min_{X} \left\| \sum_{y}^{-1} (Y - AX) \right\|^{2} + \lambda \sum_{i} D_{ii} X$ 

②スパース性の導入

# ・脳機能は局在している →ぼやけた解よりも、局在した解の正確な位置を求めたい

•正則化項を変えれば、解の局在性が変わる

$$\hat{X} = \min_{X} \left[ \left\| \Sigma_{y}^{-1} \left( Y - AX \right) \right\|^{2} + \left( \mathbb{E} \mathbb{H} / \mathbb{E} \mathbb{H} \right) \right]$$

L2正則化(Tikhonov正則化) L1正則化 LO正則化  $\|X\|_2^2$   $\|X\|_1$   $\|X\|_0$ 

ARDを用いた階層ベイズ

 $\|X\|_{p} = \lim_{\varepsilon \to +0} \sum_{i=1}^{N} |x_{i}|^{p+\varepsilon}$ 

AR

②スパース推定







#### <u>感度で規格化した</u> <u>Tikhonov正則化</u>

低分解能 深い方にバイアス

<u>ARD事前分布を</u> <u>用いたベイズ推定法</u>



#### 正しい深さ

Shimokawa, Opt Express, 2012





大脳皮質と似た光学特性 吸収係数μ<sub>a</sub>=0.018mm<sup>-1</sup>, 散乱係数μ<sub>s</sub>'=1.2mm<sup>-1</sup>





#### 底面裏側に 送光・受光ファイバ

#### 深さ方向の推定結果の検証







18mmの計測プローブ間隔で、10mm離れた2吸光体をも識別可能



18mmの計測プローブ間隔で、12.5mm離れた2吸光体をも識別可能

まとめ

![](_page_23_Picture_1.jpeg)

- ・近赤外光(拡散光)を用いて、内部吸光度変化部位を、
   深さ方向を含めた3次元で可視化する逆問題解法を提案した。
- その逆問題解法の特徴は、正則化項に対し以下の2つ
   を組み込んだこと。

①感度に応じた重みの補正、②スパース性の導入

・水槽ファントム実験により有効性を実証した。

![](_page_23_Picture_6.jpeg)

・ヒトを被験者にし、うまくいくかどうかを検証する。

#### 謝辞

![](_page_24_Picture_1.jpeg)

- 共同研究者
  - •小阪 卓史 (奈良先端大, ATR)
  - •山下 宙人 (ATR)
  - 廣江 総雄 (ATR)
  - 網田 孝司 (島津製作所)
  - 井上 芳浩 (島津製作所)
  - ・佐藤 雅昭(ATR)

![](_page_25_Picture_0.jpeg)

![](_page_25_Picture_1.jpeg)

#### ・光沢選択性ニューロンが発見[Nishio, 2012, JNS 32 (2012) 10780]

![](_page_25_Figure_3.jpeg)

Neural representation of gloss (MDS analysis)

![](_page_25_Figure_5.jpeg)

## AR

### 光沢画像の順問題・逆問題

•「形状」•「照明」•「反射特性」

![](_page_26_Picture_3.jpeg)

我々はどのようにして画像から、物体の「形状」・「反射特性」 を求めているのか?

![](_page_27_Picture_0.jpeg)

![](_page_27_Picture_1.jpeg)

![](_page_27_Picture_2.jpeg)

画像データを調和関数に分離 N. Saito, "Data analysis and representation on a general domain using eigenfunctions of Laplacian", Applied and Computational Harmonic Analysis 25 (2008) 68-97.

![](_page_27_Picture_4.jpeg)

物体の反射モデル

![](_page_28_Picture_1.jpeg)

![](_page_28_Figure_2.jpeg)