頭頚部NIROT(近赤外光トモグラフィ): 画像再構成法の現状と課題

星 詳子

浜松医科大学 光尖端医学教育研究センタ フォトニクス医学研究部 生体医用光学

筑波大学計算メディカルサイエンス2021/09/06



近赤外光トモグラフィ

near-infrared tomography: NIROT (拡散光トモグラフィ, diffuse optical tomography: DOT)

1. 画像再構成法の概要 2. ヒト甲状腺画像再構成 3. 課題と展望





画像再構成法の概要



非侵襲的・ベッドサイドなどでの計測が可能









ヒト頸部光伝搬







DOT画像再構成アルゴリズム

1. 順問題

生体組織における光伝播を計算して、計測点で観察される光を見積もる.

2. 逆問題

実測値と計算値との差が最小にすることによって、吸収係数, 散乱係数の 分布を求める.



t=0.2 ns

モデルベース非線形逐次近似画像再構成法



Hoshi & Yamada, JBO 2016

Time-domain measurement



Featured data



光強度

<u>再構成されたµ。画像(シミュレーション)</u>



Gao et al. Appl. Opt. 41: 778-791, 2002

Relative computation time



Modified General Pulsed Spectrum technique

Gao et al. Appl. Opt. 41: 778-791, 2002



頭頸部を対象とするNIROT

内頚動脈狭窄症



甲状腺 • 副甲状腺疾患

脳疾患



濾胞癌: 甲状腺癌の5% 濾胞腺腫との区別は穿刺吸引細胞診でも困難

頸部光伝搬(輻射輸送方程式) 気管壁/気道における屈折率の違いを考慮した場合





Fujii et al. Int J Numer Method Biomed Eng. 2016



- GE Discovery 750 3.0T
- ビーズクッションによる固定





甲状腺の位置確認



照射・検出ファイバの配置



マルチチャンネル時間分解計測システム



計測波形 (DTOF: distribution of time of flight)の例①

■ ファイバ配置図



計測波形 (DTOF)の例②

■ ファイバ配置図



画像再構成の実行条件

- 初期値:吸収係数0.027 mm⁻¹ 換算散乱係数0.95 mm⁻¹(背景と同じ値)
- 屈折率:1.37

■ ハイパーパラメータ: 50

気管ー組織境界グリッド



一様組織グリッド





■ 評価関数 Ψ (Objective function)

$$\Psi(\mu_{a}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_{S}} \sum_{j=1}^{N_{D}} \left\{ y_{i,j} - g_{c_{i,j}}(\mu_{a}, \mu_{s}') \right\}^{2} + \tau \sum_{k=1}^{N_{R}} \left(\mu_{a,k} - \mu_{a0,k} \right)^{2}$$

計測の
重心
か
バイパーパラメータ

i: 照射位置の番号
 N_S: 照射位置の数
 j: 検出位置の番号
 N_D: 検出位置の数

- k: 節点の番号
- *N_R*: 節点の数
- *μ*_{a0}: 吸収係数の初期値

TOAST ++: time-resolved optical absorption and scattering tomography

吸収係数の更新

■ 非線形共役勾配法(nonlinear conjugate gradient 法)

$$\begin{split} \mu_{a,m+1} &= \mu_{a,m} + \alpha_m p_{m+1} \qquad :吸収係数の更新 \\ p_{m+1} &= -\frac{\partial \Psi_m}{\partial \mu_a} + \beta_{m+1} p_m \qquad :吸収の勾配の小さい方向 \\ \beta_{m+1} &= \frac{\nabla \Psi_{m+1}^T (\nabla \Psi_{m+1} - \nabla \Psi_m)}{\|\nabla \Psi_m\|^2} \qquad m: 反復回数 \end{split}$$

 $\alpha_{\rm m}$, a step length along the search direction Find $\alpha_{\rm m}$ that minimizes $\Psi (\mu_{a,m} + \alpha_{\rm m} p_{\rm m})$

再構成画像のスライス位置



吸収係数(836 nm)の分布

■ 気管ー組織境界グリッド



0.00 0.02 0.04 0.06 0.08 吸収係数 (mm⁻¹) ■ 一様組織



組織酸素飽和度画像のスライス位置





組織酸素飽和度 = <u>酸素化ヘモグロビン濃度</u> x 100(%) 酸素化ヘモグロビン濃度+脱酸素化ヘモグロビン濃度 x 100(%)

■ 気管ー組織境界グリッド



甲状腺DOT(吸収係数・組織酸素飽和度分布)



 $\mu_a \,(\mathrm{mm}^{-1})$



 $StO_{2}(\%)$



0.06

0.08

0.02

0.04

0.00



Mimura et al. Appl. Sci. 11:1670, 2021



今後の課題と展望



 気管を通過して組織に戻る光を考慮した光伝搬シミュレーションの確立 順問題モデルの変更:光拡散方程式から輻射輸送方程式へ



- 2. 吸収係数と換算散乱係数の同時再構成
- 3. 深さ方向で感度低下が生じることを補正する正則化項の導入

今後の課題

- 4. 高精度逆解析法
 - ・圧縮センシング(TV正則化項(画像の微分のL₁ノルムの最小化)など
 - ·深層学習



5. DTOFすべてをFeatured data とする

Feng et al. J. Biomed. Opt. 24, 051407, 2018.

チトクロームcオキシダーゼ(cyt. ox.)



https://rikei-jouhou.com/electron-transport-chain/

酸化(---). 還元型(---)チトクローム cオキシダーゼの吸収スペクトル



生物学的酸素濃度指示物質



Hoshi et al. J. Appl. Physiol. 74, 1622-1627, 1993

