G-024

時間領域拡散光トモグラフィ像再生精度検討

- 光吸収係数変化位置及び変化量依存性 -

A Study of Image Reconstruction Accuracy Dependences on Inhomogeneuos Scattering Medium Strunctures for Time-resolved Diffused Optical Tomography

松浦　啓文† 　北野　健太† 　谷藤　忠敏†
Takafumi Matsuura 　Kenta Kitano 　Tadatoshi Tanifuji

1．まえがき

生体血液中の酸化及び還元ヘモグロビンの光吸収係数波長依存性の相異を利用して後方散乱光パルスから実際の生体活動を可視化する時間領域拡散光トモグラフィ(TDOT; Time-resolved Diffused Optical Tomography) 実現可能性が指摘されている(1)。本報告では散乱体の光パルス応答解析には不均一グリッド FDTD(Finite Difference Time Domain) 法(2)、逆問題解析には CG(Conjugate Gradient) 法(3),(4) 及び TN(Truncated Newton)法(5)を適用し光吸収係数推定を行った場合の像解析精度について述べる。

2．光学パラメータ推定法

2.1 不均一グリッドを用いた FDTD 解析(6)

TDOT の光学パラメータ推定を行う際の計算時間短縮と使用メモリ削減のため、図 1 に示すように散乱体を 2^2、4^2 及び 8^2mm^2 の不均一グリッドに離散化した。不均一グリッドを用いることにより逆問題解析におけるパラメータ数を 1/3 程度に減少できる。このため図 1 に示す離散化法は逆問題解析におけるローカルミニマムを避けるために有効であると考えられる。なお本解析法は積分型の光拡散方程式をベースにしているので、格子内で光学パラメータが不均一な場合でも数値解析誤差は原理的に生じず、格子サイズ上限は差分誤差のみで規定される(2)。

2.2 逆問題解析

光学パラメータ推定は以下の自乗残差に規制項(4)を加えた目的関数Φの最小値探索により行う。

$$\Phi=\sum_{s\in M}\sum_{n}\frac{(Y_s^n-U_s^n(\zeta))^2}{2\sigma(s,n)^2}+\frac{\lambda}{p}\sum_{(m,r)\in N}\left|\frac{\zeta_m-\zeta_r}{\sigma_\zeta(m)}\right|^p \tag{1}$$

ここで第 1 項の M は検出位置の集合を示し、Y_s^n 及び $U_s^n(\zeta)$ は時刻 $n\Delta t$、検出位置 s の光パルス振幅実測値及び理論値を示す。またζは光学パラメータ、σ(s,n)はノイズ標準偏差を示し、Y_s^n は理論波形にポアソン乱数を重畳することで生成した。図 1 に示すように、散乱体表面に 24mm 間隔に 3 個の光源、12mm 間隔に 5 個の検出器を配置した。時間ステップ n は 600 とし、Y_s^n はピーク値から 10^{-4} 以上の値を使用した。第 2 項のλは重み係数、σ_ζはスケーリングパラメータ、N は Yee 格子位置集合を示し、m は Yee 格子位置であり r は m と隣り合う全ての位置、p は定数を示す。

光学パラメータ推定は CG(Conjugate Gradient)法(3)と TN(Truncated Newton)法(5)に依った。各 Yee 格子の光学パラメータζによるΦの全微分$\mathbf{g}$を次式で計算する。

†北見工業大学電気電子工学科

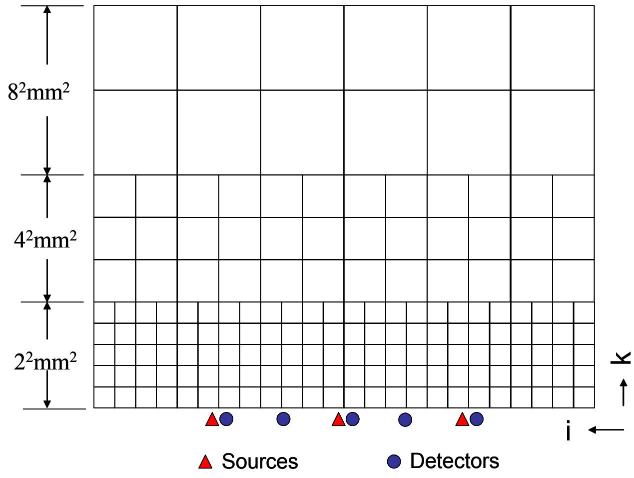

図1　2次元不均一グリッドの構成と光源･検出器配置

$$\mathbf{g}=\frac{d\Phi}{d\zeta}=\frac{\Phi(\zeta+\Delta\zeta/2)-\Phi(\zeta-\Delta\zeta/2)}{\Delta\zeta} \tag{3}$$

CG 法は、$\mathbf{g}_i$ の初期ベクトルを $\mathbf{g}_0$ とし対応する共役ベクトルを $\mathbf{h}_0=\mathbf{g}_0$ に設定する。$\mathbf{h}_0$ の方向に L.M. (Line Minimization)を行いΦの最小点で $\mathbf{g}_1$ を計算しこれと共役なベクトル $\mathbf{h}_1$ 方向に再び L.M.を行う。以下の式に従って $\mathbf{h}_{i+1}$ を計算して、同様の操作を繰り返しΦの最小値を探索する。

$$\mathbf{h}_{i+1}=\mathbf{g}_{i+1}+\gamma_i\mathbf{h}_i \tag{4}$$

$$\gamma_i=(\mathbf{g}_{i+1}-\mathbf{g}_i)\cdot\mathbf{g}_{i+1}/\mathbf{g}_i\cdot\mathbf{g}_i \tag{5}$$

(1)式の規制項のパラメータはλ=0.05、p=1.5、σ_ζ =1.0 とした。

TN 法(4)は、Conjugate Gradient 法により $\mathbf{h}_i$ を計算し、(6)式によりヘシアン $\mathbf{A}\cdot\mathbf{h}_i$ を求め、(7)式で残差ベクトル $\mathbf{r}_{i+1}$ 、(8),(9)式で L.M.方向 $\mathbf{x}_{i+1}$ を計算し、$\mathbf{x}_{i+1}$ の方向に L.M.を行う。Φの極小点で同様の操作を繰り返しΦの最小値を探索する。

$$\mathbf{A}\cdot\mathbf{h}_i=[\mathbf{g}(\mathbf{P}_i+\sigma\mathbf{h}_i)-\mathbf{g}(\mathbf{P}_i)]/\sigma \tag{6}$$

$$\sigma=\sqrt{machine\ precision}/\|\mathbf{h}_i\| \tag{7}$$

$$\mathbf{r}_{i+1}=\mathbf{r}_i-\alpha_i\mathbf{A}\cdot\mathbf{h}_i \tag{8}$$

$$\mathbf{x}_{i+1}=\mathbf{x}_i+\alpha_i\mathbf{h}_i \tag{9}$$

$$\alpha_i=\mathbf{r}_i\cdot\mathbf{r}_i/\mathbf{h}_i\cdot\mathbf{A}\cdot\mathbf{h}_i \tag{10}$$

(1)式の規制項のパラメータはλ=0.11、p=1.1、σ_ζ=1.0 とした。

Conjugate Gradient 法

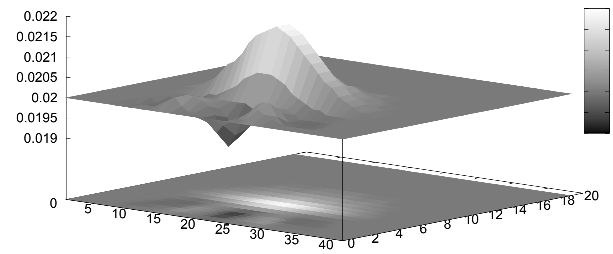

図 2　4mm²Yee 格子(10,6)の光吸収係数が 0.04（mm⁻¹）に変化した時の推定値分布

Truncated Newton 法

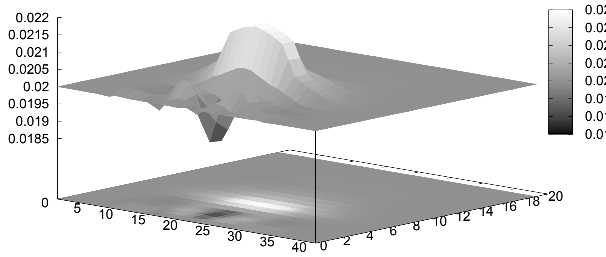

図 3　4mm²Yee 格子(10,6)の光吸収係数が 0.04（mm⁻¹）に変化した時の推定値分布

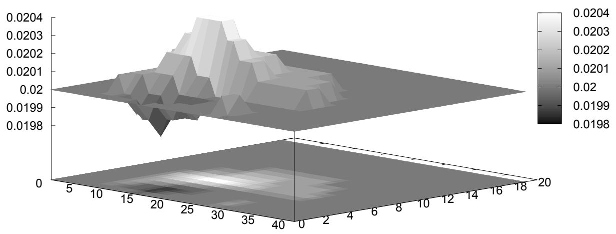

図 4　4mm²Yee 格子(4,6)の光吸収係数が 0.04（mm⁻¹）に変化した時の推定値分布

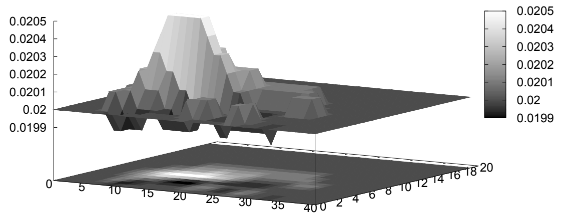

図 5　4mm²Yee 格子(4,6)の光吸収係数が 0.04（mm⁻¹）に変化した時の推定値分布

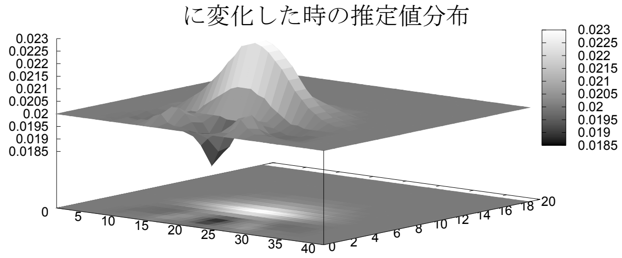

図 6　4mm²Yee 格子(10,6)の光吸収係数が 0.06（mm⁻¹）に変化した時の推定値分布

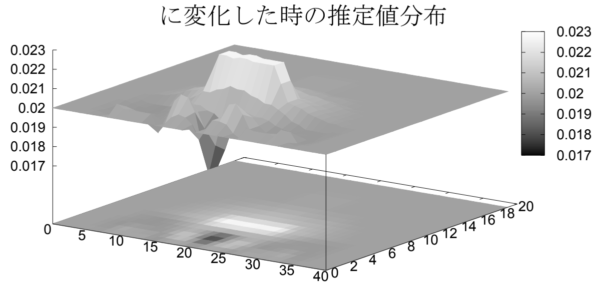

図 7　4mm²Yee 格子(10,6)の光吸収係数が 0.06（mm⁻¹）に変化した時の推定値分布

3. 光学パラメータ推定結果

80×38ｍｍ^{2}の 2 次元光散乱体中の光学パラメータを前節の方法により推定した結果を述べる。以下 Yee 格子の位置を図 1 の(i,k)で示し、4mm^{2}の Yee 格子 1 個のみの光吸収係数が変化した時の 331 個の Yee 格子の光吸収係数を推定した。なお図 1 で背景の光吸収及び散乱係数はそれぞれ 0.02（mm^{-1}）及び 2.0（mm^{-1}）と仮定した。

3.1　光吸収係数変化位置による像再生精度

まず (10,6)の Yee 格子光吸収係数のみが 0.04（mm^{-1}）に変化した時の光吸収係数分布を推定した、推定結果を図 2(CG 法)と図 3(TN 法)に示す。両解析法とも光吸収係数変化位置同定はできるが TN 法はシャープな像再生が可能であると考えられる。次に(4,6)の Yee 格子の光吸収係数を 0.04（mm^{-1}）に変え、先と同じ条件で推定した結果を図 4(CG 法)と図 5(TN 法)に示す。像が拡がり推定値が小さくなった。この場合、CG 法と TN 法による光学パラメータ変化位置同定は現在のところ 4mm^2 グリッドに止まっている。

3.2　像再生精度の光吸収係数変化量依存性

次に、(10,6)の Yee 格子光吸収係数のみが 0.06(mm^{-1}) に変化した時の光吸収係数を推定したときの推定結果を図 6(CG 法)と図 7(TN 法)に示す。前節の 0.04(mm^{-1})に変化した時の結果と比較しても顕著な変化量依存性は見られなかった。

4.まとめと今後の課題

本検討では TDOT 像再生精度の光吸収係数変化位置及び変化量の依存性を検討した。その結果、光散乱体中央部の再生像が周りと比較して良いこと、また顕著な変化量依存性はないことが分かった。

今後の課題は、推定精度向上を図るため推定法のアルゴリズムを検討する。

—参考文献—

(1) F.Gao *et al.,* Appl. Opt. vol.41, no.4, pp.778-791, 2002. (2)T.Tanifuji *et al.,* OPTICAL REVIEW, vol.12, no.6, pp.480-485, 2005. (3) W.H. Press *et al,* Numerical Recipe in C++, Cambridge UK:CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2002, chap.10. (4)A.H.Hielscher *et al.*, IEEE TMI, vol.18, no.3, pp.262-271, 1999. (5) L.C.W.Dixon *et al.*, JOTA, vol.56, no.2, pp.245-255, 1988. (6)T.Tanifuji *et al.*, IEEE TMI, vol.21, no.2, pp.181-184, 2002.