

補正機能を持つ近赤外生体計測手法の研究

Research on reducing artifact for fNIRS

2001015



研究代表者

東京都立産業技術高等専門学校

准教授

福田 恵子

[研究の目的]

近赤外光生体計測（NIRS: near infrared spectroscopy）は、生体組織内での血液中の酸素化・脱酸素化ヘモグロビンの局所的な変化を測定する方法であり、脳の局所的な働きを捉えることができることから、ALS 患者の意思表示手段のインターフェースとして利用されている。さらに、ブレインマシンインターフェースとして機械や装置の遠隔操作に役立つ可能性を持っている。しかしながら、姿勢変化に伴う血液量変化などの外乱の影響を受けるため、測定精度の向上が求められている。そこで、障がい者の機能代行のインターフェースに利用できる高性能な NIRS の手法を確立し、人間と機械の調和を促進することを目的とした補正機能を持つ近赤外生体計測手法に関して検討している。

本研究では、提案する外乱補正手法の生体計測への適用を目指して、3 チャンネルのシステムを試作して生体を模擬したファントムによる実験と計算機シミュレーションを行い、補正係数の導出方法を検証した。以下に研究内容の詳細と成果について述べる。

[研究の内容, 成果]

1. 外乱の補正手法

近赤外生体光計測では波長による吸光特性の違いから物質の酸素化状態を推定する。酸素化、

脱酸素化状態での光の吸収量が等しい点を挟んだ2波長の近赤外光を頭表上に照射して生体内を拡散反射により伝搬した光の強度変化（後方散乱光強度変化）から酸素代謝を調べる。具体的には図1に示すようにA点から光を照射してB点で受光することにより、A-B間の組織血流の変化から酸素代謝を推定する。しかしながら、頭部の比較的浅い領域（表層近傍）には皮膚血流が存在し、生体内を伝搬する光は必ずその領域を通過することから、皮膚血流の変化の及ぼす影響を無視することができない。このように、表層近傍の吸収体領域（血液量の変化領域）の大きさが補正係数の決定に影響を与えることから、表層近傍の血液量の変化領域の体積を推定し、体積に応じた最適な補正を行うことが重要である。そこで、補正手法と補正係数の推定に関して検討する。

まず、2種類の受光を用いた外乱の補正方法を提案する（図1）。補正信号として、（1）光の照射と同一開口部からの受光（以下、同一開口補正: Cancel 1）と、（2）従来の照射・受光点から等距離の位置での受光（以下、等距離点

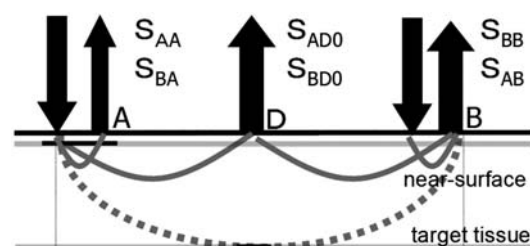


図1 二種類の受光を用いた外乱の補正方法

補正：Cancel 2) を用いる。同一開口補正は、照射及び受光点近傍の表層の影響の検出と補正に適し、等距離点補正は、吸収体の大きさや位置の把握に適する。これらの2種類の補正方法を選択的に利用することで表層付近の吸光度変化を選択的に検出して簡便な補正を行うことができる。

ここで、組織血流変化に相当する深部信号は A-B 間での照射-受光による受光強度変化率 $S_{AB}(r)$, $S_{BA}(r)$ により与えられる。同一開口補正に用いる補正信号は A-A 間及び B-B 間の各開口での照射-受光による受光強度変化率を $S_{AA}(r)$, $S_{BB}(r)$ により与えられる。また、等距離点補正に用いる補正信号は A, B から等距離の位置 D で受光強度変化率を $S_{AD}(r)$, $S_{BD}(r)$ により与えられる。このとき、位置 r における補正後の受光変化率 $S_{correct}(r)$ は次式で示される。

$$S_{correct}(r) = (S_{AB}(r) + S_{BA}(r)) / 2 - \alpha(S_{AA}(r) + S_{BB}(r)) / 2 - \beta(S_{AD}(r) + S_{BD}(r)) / 2 \quad (1)$$

α , β はそれぞれ同一開口補正、等距離点補正における補正係数である。

次に、光の照射と受光を行う光ファイバのプローブの配置法を提案する（図2）。各頂点 A, B, C では各辺の midpoint 近傍の深部信号と同一開口の補正信号を受光する。重心 D では等距離点の補正信号を受光する。等距離点補正の検出

点を重心に配置して共有することで、補正を行わない場合に比べて1つのプローブ数の増加のみで3チャンネルの深部信号と6種類の補正信号を得て、補正機能を備えることができる。また、プローブは現行法の正方形配置と比べてより高密度な配置が可能となり、信号源位置の推定精度を高められる。

2. ファントム実験

図2に示すプローブ配置を実現するために、3チャンネルのシステムを試作し、生体を模擬したファントムによる実験を行った。実験システムの構成を図3に示す。

ファントムには、吸収体として青色染料 (WB-3)、散乱体としてポリスチレン ($1.6 \mu\text{m}$ 径) を混ぜた水溶液 (吸収係数 $\mu_a: 0.01 \text{ mm}^{-1}$, 換算散乱係数 $\mu_s': 0.50 \text{ mm}^{-1}$) を用いた。皮膚血流の変化及び組織血流の変化による局所的な吸光度特性の変化は、半径 5 mm の黒いプラスチックを配置することで模擬した。実験では、正三角形の各頂点から周波数変調した 780 nm

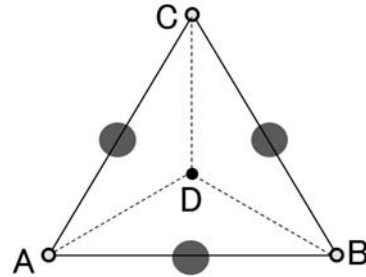


図2 プローブの配置法

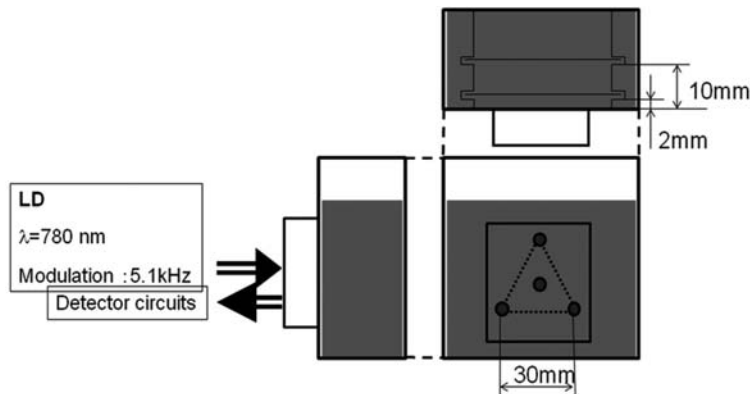


図3 実験方法

のレーザ光をファントムに照射して、頂点 A, B, C, 等距離点 D にて受光し、局所的な吸収体変化の有無による受光強度の変化を測定した。

まず、実験系のプローブ配置の確認実験を行った。等距離点となる重心 D の直下の深さ 2 mm の位置に表層吸収体を配置して D 点より光を照射して各頂点 ABC で受光した。感度 S_{AD} , S_{BD} , $S_{CD}(r)$ はいずれも約 0.1 となり、光ファイバプローブが対称に配置されていることを確認した。

次に、吸収体の変化を示す表層吸収体 [N], 表層+深部吸収体 [N] + [T], 深部吸収体 [T] による受光強度の変化率（感度）を求めて、補正信号の特性を調べた。深部吸収体の位置はいずれも AB 間中点の深さ 10 mm の位置とした。

表層吸収体が頂点 A に存在する場合（図 4）には、深部信号（A から B）の感度が高く、深

部信号が照射点近傍の表層吸収体の影響を高く受けることが確認できる。また、等距離点補正信号（A から D）の感度が高く、同一開口補正信号（A から A）も感度を持つことから 2 種類の補正信号を用いて、照射点近傍に吸収体が存在することを検出できる。

表層吸収体が重心 D に存在する場合（図 5）には深部信号（A から B）における表層吸収体の影響は約 20% 程度である。これは、表層吸収体の位置が深部信号の検出における伝播経路からずれているためである。一方、等距離点補正信号（A から D）の感度は高く、同一開口補正信号の感度はほぼゼロである。従って、二種類の補正信号を併用することで、表層吸収体が照射及び受光プローブの近傍の表層領域には存在しないが、測定に影響を及ぼす位置に存在することを推定できる。

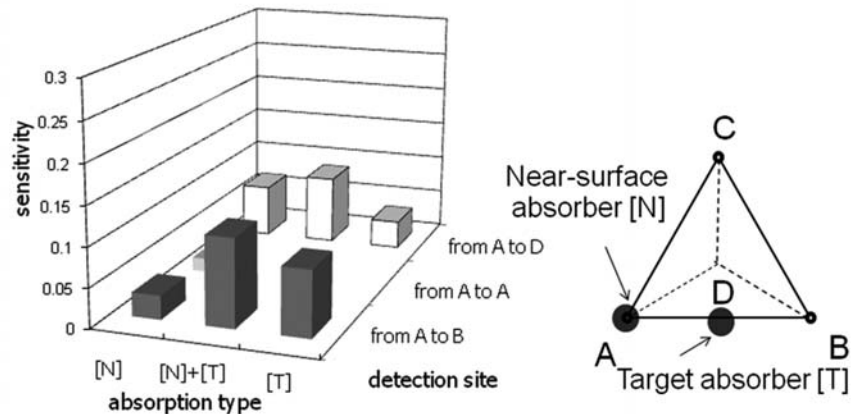


図 4 補正信号の特性：表層吸収体を頂点 A に配置した時

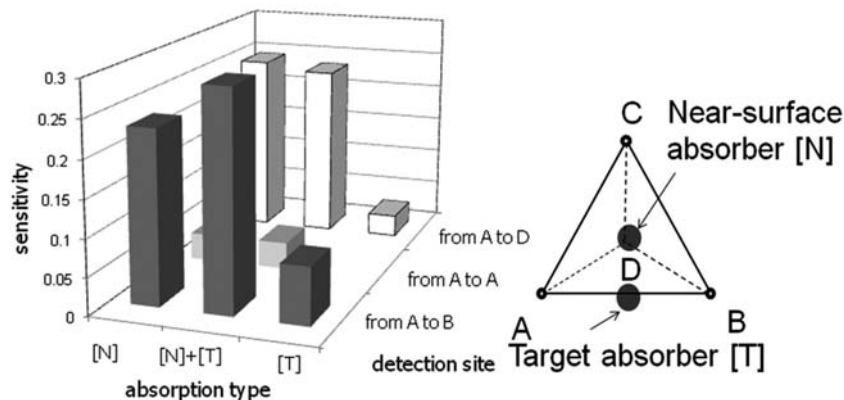


図 5 補正信号の特性：表層吸収体を重心 D に配置した時

3. シミュレーション

2種類の補正信号の有効かつ簡便な活用のために、その第一段階として、表層吸収体の位置により、補正係数 α 、 β のいずれかの補正係数を選択する方法を拡散方程式近似によるシミュレーションにより検討した。等距離点補正において吸収体の変化領域がD点の直下にあると感度が高い点に着目して、(1)式における深部信号の感度と等距離点補正信号の感度の比 $(S_{AD}+S_{BD})/(S_{AB}+S_{BA})$ を指標として選択条件を決める。この値が著しく小さい場合（局所的な変化がA点あるいはB点直下）と大きい場合（局所的な変化がD点直下）には同一開口補正をそれ以外には等距離点補正を適用する。

吸収係数 $\mu_a=0.01\text{ mm}^{-1}$ 、換算散乱係数 $\mu_s'=1.0\text{ mm}^{-1}$ とした。図2のプロープ配置において、正三角形の一辺の長さを30 mm、照射・受光の開口部の半径を3 mmとした。8 mm×8 mm×1 mmの表層吸収体を深さ2 mmに配置してこれをA点(0 mm)から重心のD点方向へ移動した際の感度を調べた(図6)。図の横軸はA-B方向の距離を示し、15 mmの位置が重心D点に相当する。補正を行わない場合、表層吸収体による感度は開口部A点の近傍で高く、開口部から距離が離れるに従い低くなる。開口部近傍では同一開口補正と等距離点補正(Cancel 1, Cancel 2)共に有効であり、重心付近では等距離点補正信号 Cancel 2の感度が高

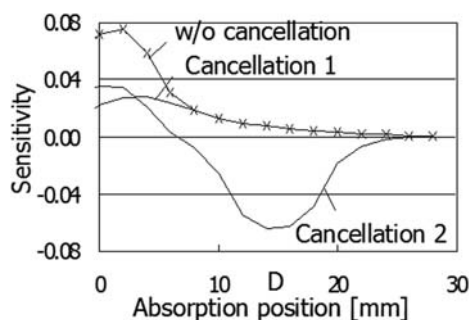


図6 シミュレーション結果

く、過補正の可能性がある。選択条件に従い補正を行った結果、開口部近傍で同一開口補正、5-10 mm 付近では等距離点補正が適用され、全領域において表層吸収体の影響が最も小さくなるように補正が行える。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究では、提案する二種類の補正信号を用いる外乱の補正技術が、外乱となる表層付近の吸収体の位置と大きさの検出に有効であることを明らかにした。小チャネルの測定における簡便な皮膚血流の影響把握と低減に有効な手段と考える。今後、プローブ固定法の改良やシステムの改良を行い、本手法を生体機能計測へ適用して手法の有効性を評価する。

[成果の発表, 論文等]

- [1] 福田恵子, 藤井麻美子: Suppression of near-surface absorption change with cancellation signals for diffuse reflective optical measurement, 生体医工学, 第48巻特別号, 81 (2010)
- [2] 小石和明, 村山貴信, 木村啓史, 富岡伸夫, 福田恵子: 光脳機能計測に向けた皮膚血流変化の低減法の検討, 第29回数理科学講演会講演論文集 C501, 123-124 (2010)
- [3] 福田恵子, 木村啓史, 富岡伸夫: 近赤外分光法における小規模かつ簡便な皮膚血流変化の低減法の検討, 生体医工学シンポジウム講演予稿集, 381 (2010)
- [4] 福田恵子: 光脳機能計測における表層近傍信号の低減手法の効果とプローブ配置に関する検討, Optics and photonics Japan, 608-609 (2010)
- [5] 福田恵子, 小石和明, 村山貴信: 2種の補正信号を用いた近赤外分光法生体機能計測の精度向上に関する検討, 生体医工学, 第48巻特別号, 81 (2011)
- [6] K. Fukuda, K. Koishi, T. Murayama: Simple method of improving sensitivity for diffuse reflective optical tomography: simulation and a phantom study, Proc. of SPIE-OSA Biomedical Optics, SPIE vol. 8088, 80881C1/8 (2011).