

近赤外分光画像の被験者依存性

小田 和磨*・湯浅 昂洋**・鬼追 一雅***

(平成24年10月31日受付)

Dependence on Examinees for Spectral Images

Kazuma ODA, Takahiro YUASA and Kazumasa KIOI

(Received Oct. 31, 2012)

Abstract

The authors have been developing a visualization technique for hemoglobin concentration images. The clearness of the hemoglobin concentration images depends on examinees. Differences on clearness with respect to examinees have been studied.

Key Words: spectroscopy, near-infrared, hemoglobin

1. まえがき

近年、医療・生体計測と言った広い分野で、光を用いた生体計測の処理技術が注目され、研究・開発が盛んである[1]。近赤外線領域(700 nm–2500 nm)のうち特に750 nm–1200 nmの波長域は水と血液中のヘモグロビンによる光の吸収が比較的低いため生体計測が可能である。パルスオキシメータを用いた酸素飽和度測定等が既に実用化されている。これらは非侵襲的に測定することができるので被験者の負担が少なく済む。

しかしながら、従来の測定方法ではプローブ内に挿入された手指に光を照射し、透過光を測定する。測定領域は手指という比較的狭い領域に限定されている。そこで我々は反射光からもヘモグロビン濃度分布が得られることに着目し、狭帯域分光カメラを用いることによって、比較的広範囲にわたる2次元情報として血液色素分布や動態の取得を行う方法を検討している。これまでに、近赤外分光画像からパターン分離法[2]を用いてヘモグロビン分布の情報を得られることを報告している[3]。

本研究では、2台のカメラとコンピュータを用いて異なる2種類の波長で同期した近赤外分光画像を取得し、被験者の様々な部位の酸化ヘモグロビン分布画像の比較検討を

行ったので、その結果を報告する。

2. 研究目的

これまでに、パターン分離法を用いた酸化ヘモグロビン(oxygenated hemoglobin, 以下 oxy-Hb)と還元ヘモグロビン(deoxygenated hemoglobin, 以下 deoxy-Hb)濃度分布画像の取得には成功している。

ところで、oxy-/deoxy-Hb分布画像は被験者によって明瞭さに大きな違いがある。今回、被験者依存性の原因解明を目的として、複数の被験者について、様々な部位のoxy-Hb分布画像を比較検討した。

3. 近赤外分光法の概要

3.1. 分光画像

分光画像とは、可視光や近赤外といった全ての波長の中から狭い範囲の光の波長を取り出し画像にしたものである。狭帯域の光の成分をカメラで被写体を撮影した分光画像から人間の目では感知できない特徴や変化の抽出を行うことができる。

今回は、生体計測に優れている近赤外領域(750 nm–1200 nm)の光源と、近赤外分光画像処理システムを用いて人間の指、手首、手の甲、腕の画像を撮影し、得られた

* 広島工業大学大学院工学系研究科情報システム科学専攻
** 広島工業大学情報学部情報工学科卒業
*** 広島工業大学情報学部情報工学科

分光画像からパターン分離処理を行い、oxy-Hbの分布画像の取得を行う。

3.2. 位置補正処理

カメラ2台から画像を取得する場合、図1のように撮影範囲にずれが生じる。この状態でパターン分離処理を行うと、異なる範囲の分光画像同士を処理するので、正確なHb分布画像が得られない。

そこで、プログラムによって撮影範囲の位置補正を行い、ずれのない画像を取得する。



図1 補正前の位置比較図

3.3. ヘモグロビン吸光特性

近赤外分光法は、近赤外領域におけるヘモグロビンの吸光特性を利用する。ヘモグロビンは赤血球中にあるタンパク質であり、全身に酸素を運ぶ赤血球の働きは、主にヘモグロビンによって行われる。

ヘモグロビンにはoxy-Hbとdeoxy-Hbの2種類がある。体内組織に酸素を供給するとoxy-Hbはdeoxy-Hbとなり肺に戻ってくる。従って一般的に動脈血にはoxy-Hbが多く、静脈血にはdeoxy-Hbが多い。

可視光領域(400 nm-700 nm)の波長ではヘモグロビンやその他の生体組織による吸収が大きく、近赤外線より長い波長域では水による吸収が大きくなるため、光が生体内を殆ど進めなくなる。それに対し、近赤外領域ではそれらによる吸収が少ないため、深い部分まで分光情報を得ることができる。可視域では1 mm進むごとに光の強度はおよそ1/10減衰するのに対し、近赤外域ではその約10倍の距離

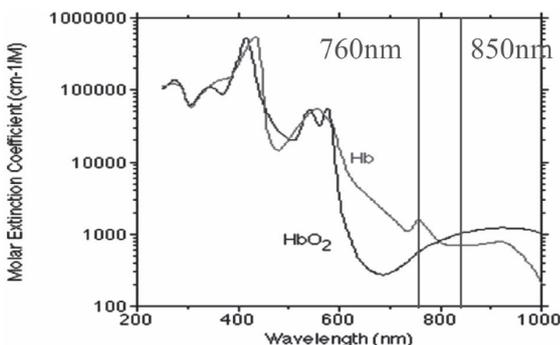


図2 oxy-Hb・deoxy-Hbの吸収スペクトル [4]

を進むことができる。

またoxy-Hbとdeoxy-Hbでは近赤外領域における吸光特性に違いがある。図2にヘモグロビンのモル吸光特性を示す。波長800 nm付近を境にしてoxy-Hbとdeoxy-Hbのモル吸光係数の大きさが逆転する。

この事実を利用して我々は760 nmと850 nmの分光画像からパターン分離処理を行いoxy-Hb分布画像を取得した。

3.4. Lambert-Beer 則

Lambert-Beerの法則は、光の物質による吸収を定式化した法則で、Lambertの法則とBeerの法則を合わせたものである。図3のように光 I が厚さ L の物質を透過する際、その量が半分になったとする。このとき、厚さ L が2倍になった場合には透過する光の量 I は $1/4$ 、厚さ L が3倍になった場合には $1/8$ となり、光の量 I は厚さが増すにつれ指

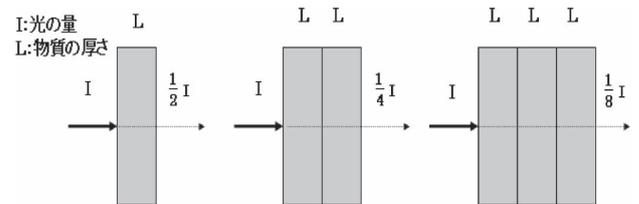


図3 Lambertの法則

数関数的に透過量が下がっていく。

この「等方性物質の光の吸収は光路長に依存する」がLambertの法則である。

物質の濃度に対してもLambertの法則と同じようなことが言える。図4のように光 I が濃度 C の物質を透過する際、その量が半分になったとすると、濃度 C が2倍になると透過する光の量 I は $1/4$ 、濃度 C が3倍になると $1/8$ となり濃度についても濃度が高くなるにつれ光の量 I は指数関数的に透過量が下がっていく。

この「等方性物質の光の吸収は物質の濃度に依存する」

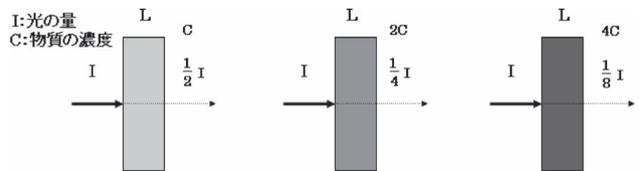


図4 Beerの法則

がBeerの法則である。

この2つの式を合わせたものをLambert-Beerの法則と呼び、物質に入射する光の強度を I_0 、物質中を距離 L 移動した光の強度を I 、吸収係数を α 、モル吸収係数を ϵ 、物質の濃度を C とすると

$$\log_{10} \frac{I}{I_0} = -\epsilon CL \quad (1)$$

が成立する。

3.5. パターン分離法

Lambert-Beer の法則を用いて、複数の分光画像において、対象を構成する物質ごとの吸収係数を用いて濃度パターンを出力する。これにより、分光画像から物質の二次元空間的なパターンを得ることができる。これをパターン分離という。

得られた分光画像を $F(\lambda_i, x, y)$ とする。式 (1) の Lambert-Beer の法則から、物質 n の波長 λ_i での吸収係数を $\epsilon_n(\lambda_i)$ 、物質 n の濃度パターンを $P_n(x, y)$ とすると F は ϵ_n と P_n に対して指数関数的に変化し、式 (2) のように表すことができる。

$$F(\lambda_i, x, y) = I_0 \exp\{-\sum_n \epsilon_n(\lambda_i) P_n(x, y)\} \quad (2)$$

これより

$$\log F(\lambda_i, x, y) = a \sum_n \epsilon_n(\lambda_i) P_n(x, y) \quad (3)$$

式 (3) から、対象となる物質の数以上の異なる波長の分光画像を取り込み、物質の吸収スペクトルの違いを利用して複数波長間で連立方程式を解くことにより、物質の濃度パターンを定量的に導き出す事ができる [9]。

従って、生体内の吸光変化は oxy-Hb と deoxy-Hb の濃度変化によってのみ生じると仮定し、2つの波長 760 nm と 850 nm の分光画像を読み込む。

3.6. 白色板補正

位置補正処理された画像にそのままパターン分離処理を行った場合、フィルタの透過性、レンズの絞り補正、照明光のスペクトル補正等、様々な影響を受けることになり、正確な値を測定することができない。

そこで、白色板の全ての波長域に対して100%の反射率の値を返すという特性を利用し、白色板の部分の輝度の値が最高値になるような係数を導き出し、それを画像全体の画素について乗算することによって、全体の輝度を本来のものへ近づけることができる。

4. 実験装置

従来の実験装置 [2] は、波長可変フィルタと CCD カメラを用いており、波長 λ_1 の画像と波長 λ_2 の画像との間に撮影時刻の差があった。そのため時間平均されたヘモグロビン濃度分布の静止画は取得できたが動画取得は困難であった。今回、ヘモグロビン濃度分布の動画を取得するために、2台のカメラを使用する実験装置を新たに試作し

た。図5に試作装置の構成図を示す。試作装置は下記の機器から構成される。

- ・LED 光源 2台
- ・フィルタ付き CCD カメラ 2台
- ・ファンクションジェネレータ (同期信号供給用)
- ・PC (解析および制御用)

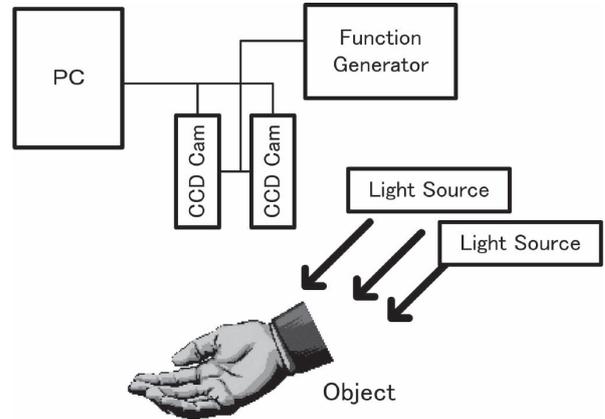


図5 実験装置のブロック図

5. 実験

5.1. 実験手順

被験者5名の指(掌側)、手首、手の甲、腕、腕(30秒間縛った状態)の各部位を撮影した。光源には波長760 nmと850 nmの赤外波長を発生する2台のLED光源を用いた。受光器となる2台のCCDカメラはいずれもImaging Source社製のDMK21BU04モノクロ1/4"30万画素を用いた。各レンズ系にはそれぞれ766±5 nmおよび852±5 nmの通過域をもつバンドパスフィルタを装着して使用した。ヘモグロビン分布画像を取得するためには、波長760 nmの分光画像と波長850 nmの分光画像とが同期されている必要がある。

そこで各波長の分光画像取得用カメラをトリガモードで動作させ、パルスジェネレータから供給される同期信号によって撮影されるようにした。これにより2台のカメラからは、同一時刻に撮影されたVGAサイズ(640×480)の連続撮影分光画像が出力される。

今回の撮影条件では、同期信号として10 Hzの方形波を与え、0.1秒毎の連続撮影分光画像を取得した。以上の撮影条件で、被験者5名の人体の各部位を撮影した。

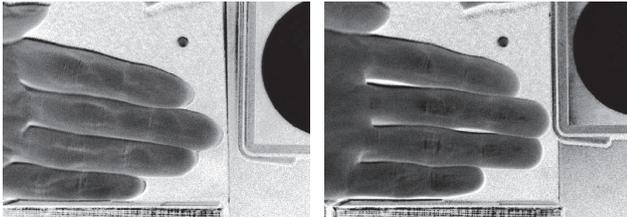
5.2. 撮影部位の比較

各部位の分光画像に、位置補正処理、白色板補正、パターン分離処理を行い、oxy-Hb分布画像を取得した。各部位とは指(掌側)、手首、手の甲、腕である。それぞれの部位のoxy-Hb分布画像に対して、血管が明瞭に確認出来る被験者

Aと、血管が不明瞭な被験者Bの2名の画像を次に示す。今回、血管を確認する判断基準は画像からの目視である。

5.3. 指（掌側）oxy-Hb 分布画像

指全体が黒色を基調としているのに対して、人差し指から小指の各指に数本の比較的明るい部分（白色）が確認できる。この比較的明るい部分（白色）が血管である。ヘモグロビンの吸光特性から血管が白く映し出される。



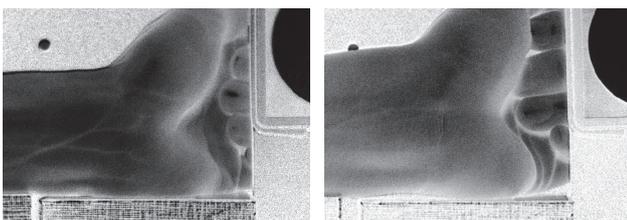
(a) 被験者 A (b) 被験者 B

図6 指（掌側）のoxy-Hb 分布画像

この画像から被験者Aでは血管を明瞭に確認することができた。被験者Bでも人差し指から小指にかけて、数本の比較的見えやすい血管が確認できる。しかし、被験者Bよりも被験者Aの方がより血管を明瞭に確認できた。また、指（掌側）のoxy-Hb 分布画像はどの被験者においても、最も血管を明瞭に確認できた部位であった。

5.4. 手首 oxy-Hb 分布画像

被験者Aでは、比較的見えやすい血管が確認できる。その中でも腕側から通っている血管があり、途中から血管が分岐していることが鮮明に確認できる。



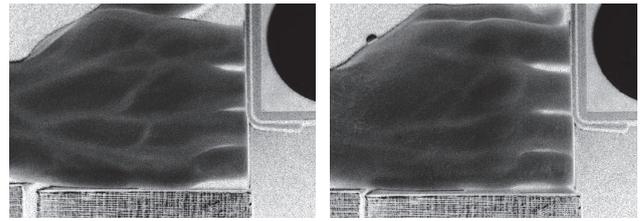
(a) 被験者 A (b) 被験者 B

図7 手首のoxy-Hb 分布画像

一方、被験者Bでは血管が不明瞭である。被験者Aに比べ、被験者Bの画像から血管を正確に判断するのは困難である。手首のoxy-Hb 分布画像は被験者5名のうち、3名は血管を明瞭に確認することができた。

5.5. 手の甲 oxy-Hb 分布画像

被験者Aでは、手の甲の全般にかけて数本の比較的見えやすい血管が確認できる。指（掌側）と手首のoxy-Hb 分布画像に比べ、手の甲では太めの血管が確認できる。



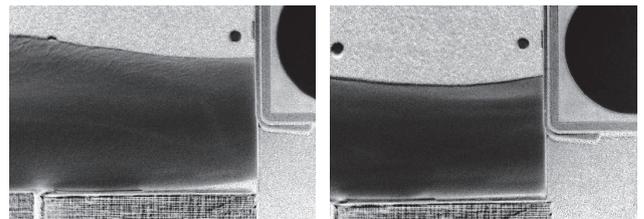
(a) 被験者 A (b) 被験者 B

図8 手の甲のoxy-Hb 分布画像

被験者Aの画像では血管が明瞭であり、鮮明に血管を確認することができた。被験者Bの画像では太めの血管は確認できるが、血管が不明瞭な部分もある。被験者Aに比べ、被験者Bは不明瞭である。手の甲のoxy-Hb 分布画像では、被験者5名のうち、2名は血管を明瞭に確認することができた。

5.6. 腕 oxy-Hb 分布画像

腕のoxy-Hb 分布画像は、安静時のものである。図9の画像を見ると、血管が不明瞭である。



(a) 被験者 A (b) 被験者 B

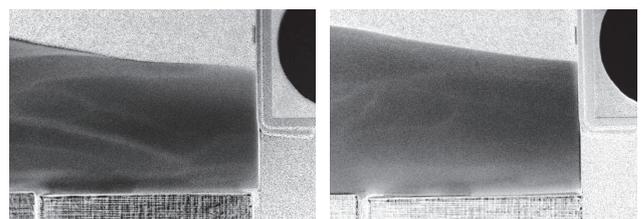
図9 腕のoxy-Hb 分布画像

図9の画像から血管を確認することは困難であった。被験者Bの画像も同様に、血管が映し出されておらず、不明瞭である。腕のoxy-Hb 分布画像では、被験者5名のうち、どの被験者においても血管が不明瞭であった。

次に腕を30秒間縛った状態のoxy-Hb 分布画像を示す。

5.7. 腕（30秒間縛った状態）oxy-Hb 分布画像

一時的に腕の血液の流れを止め、血管を圧迫させることで血管が浮き出る。腕を30秒間縛った状態のoxy-Hb 分布画像は、被験者Aでは血管を明瞭に確認することができた。



(a) 被験者 A (b) 被験者 B

図10 腕（30秒間縛った状態）のoxy-Hb 分布画像

図9の画像よりも明瞭に血管を確認できた。被験者Bの腕(30秒間縛った状態)のoxy-Hb分布画像は、腕を縛った状態であっても血管が浮き出ず、不明瞭であった。腕を30秒間縛った状態のoxy-Hb分布画像では、被験者5名のうち、3名は血管を明瞭に確認することができた。このことから、被験者の違いによる差が非常に大きいことがわかる。また、指(掌側)、手首、手の甲と腕を比べると、皮下脂肪の多さの違いによっても血管の見え方は変わると考えられる。

6. まとめ

近赤外分光画像処理システムによる被験者依存性に関して、比較検討を行った。その結果、最も血管を明瞭に観測することができた部位は、指(掌側)であることがわかった。

その他の部位では、撮影条件が同じであっても、手首の血管が明瞭に確認できた被験者もいれば、腕の血管が明瞭に確認できた被験者もあり、被験者の部位によって血管の見え方が異なった。このことから、被験者による差異が非常に大きい事が確認できた。

被験者や測定部位によらず、画像から血管を明瞭に確認することができれば、運動時Hb濃度分布計測などの応用用途が期待できる。

今後は更に測定の精度を高めなければならない。また、どの測定部位においても血管を明瞭に確認できるよう、体の各部位に最適な測定条件を検討する必要がある。

文 献

[1] Nadeau, G. R., Groner, W.: Innovative Non- or Minimally-Invasive Technologies for Monitoring Health and

Nutritional Status in Mothers and Young Children, *The Journal of Nutrition*, (2010) pp. 1610–1614.

- [2] 垣内優一, 沖本大介, 中野雄史, 藤本 勲:「パターン分離法による血液色素分布の二次元計測」, 平成18年度電気・情報関連学会, p. 576, 岡山, (2006-10)
- [3] 波多野雅俊, 小泉和也, 高宮雄貴, 藤本 勲:「2波長時間同期動画像のパターン分離によるヘモグロビン分布の時間変化計測」, 平成21年度広島工業大学卒業研究論文, (2010-2)
- [4] Prael, S.: Optical Absorption of Hemoglobin, URL: <http://omlc.ogi.edu/spectra/hemoglobin>, Oregon Medical Laser Center (Oct. 2010).
- [5] McMurdy, J. W., Jay, G. D., Suner, S., Crawford, G.: Noninvasive Optical, Electrical, and Acoustic Methods of Total Hemoglobin Determination, *Clinical Chemistry*, Vol. 52, No. 2 (2008) pp. 264–272.
- [6] 三原 淳:「ビームスプリッタを用いた近赤外線分光画像処理システム ~光軸調整による精度向上確認~」, 広島工業大学卒業論文, (2011-2)
- [7] 亀本真寿男, 柏原 陣, 小田和磨, 波多野雅俊, 鬼追一雅:「パターン分離法による運動時Hb濃度分布計測」, 平成24年度電気学会, pp. 1–127, 広島, (2012-3)
- [8] 小田和磨:「経皮的酸素飽和度(SpO₂)画像導出法の研究」, 広島工業大学卒業論文, (2011-2)
- [9] 鬼追一雅, 波多野雅俊, 藤本 勲:「近赤外分光反射動画像を用いたヘモグロビン濃度分布可視化の検討」, 可視化情報学会論文集, Vol. 31, No. 10, pp. 57–61, (2011-10)
- [10] 波多野雅俊:「近赤外狭帯域分光画像処理システムに関する研究」, 広島工業大学修士論文, (2012-2)