

特殊区分放物線補間による分光画像推定

亀本 真寿男*・小田 和磨*・柏原 陣**・鬼追 一雅***

(平成24年10月31日受付)

Spectral Image Estimation with the Special Piecewise Parabolic Interpolation

Masuo KAMEMOTO, Kazuma ODA, Jin KASHIHARA and Kazumasa KIOI

(Received Oct. 31, 2012)

Abstract

The authors applied special piecewise parabolic interpolation (SPPI) to the spectral image estimation for the pattern separation which is based on double eigenvector analysis for orthogonal system. As a result of a measurement, interpolated images were obtained successfully.

Key Words: special piecewise parabolic interpolation, pattern separation processing

1. まえがき

我々の研究室ではこれまでに、QF サンプリング法 [1] の補間方法について理論的検討を行い、理論予測値を与えることに成功している。今回、補間性能の優れた方法として特殊区分放物線補間 (SPPI; Special Piecewise Parabolic Interpolation) を提案し [2], 分光画像推定への適用を検討したので報告する。

分光画像処理においてパターン分離という処理がある。この処理は波長の異なる2種類の画像から、対象物に含まれる2種類の吸光物質の濃度分布画像を抽出する処理である。一つのカメラで画像を取得する場合、それぞれの波長の分光画像を交互に取得するので、欠落画像が生じる。パターン分離を行うためには補間によって欠落画像の推定を行う必要がある。

我々は補間値画像を用いた場合の濃度分布画像と、同期画像を用いた場合の濃度分布画像とを比較し、1台のカメラで交互に時分割取得した両波長の分光画像から2種類の吸光物質の濃度分布画像を導出するための基礎データを得た。これにより現在、2台のカメラを同期させながら取得している2波長の分光画像を1台のカメラで取得できる可能性が示された。

2. 特殊区分放物線補間

2.1. ラグランジュ補間

図1にラグランジュ補間の原理を示す。時刻 $t = t_i, i \in \{0, 1, 2, 3\}$ における測定点 Y_i から、 $t = t_D$ ($0 \leq D \leq 3$) における補間値 $\hat{Y}(t_D)$ を測定する場合を考える。この場合のラグランジュ補間は次の式で与えられる。

$$\hat{Y}(t_D) = \sum_{i=0}^3 \hat{Y}_i \prod_{m=0, m \neq i}^3 \frac{t_D - t_m}{t_i - t_m}, \quad m \neq i \quad (1)$$

サンプリング間隔が等間隔 $t_i = t_0 + iT_d$ でかつ、推定点が中央 $t_D = t_{1.5}$ のとき、

$$\hat{Y}(t_{1.5}) = -\frac{1}{16} \cdot Y_0 + \frac{9}{16} \cdot Y_1 + \frac{9}{16} \cdot Y_2 - \frac{1}{16} \cdot Y_3 \quad (2)$$

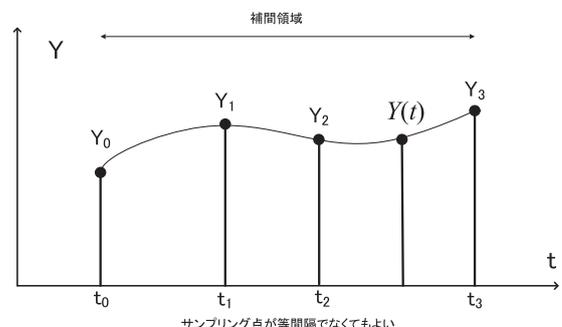


図1 4点ラグランジュ補間

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

となり、これは以下で説明する特殊区分放物線補間の $G = 1/16$ の場合と一致する。

2.2. 区分放物線補間

次に区分放物線補間について考える。図2にその原理を示す。前項と同様に時刻 $t = t_i, i \in \{0, 1, 2, 3\}$ における測定点 Y_i から、 $t_1 \leq t \leq t_2$ における補間値 $\hat{Y}(t_D)$ を測定する場合を考える。ここで t_D は連続値であり、 $1 \leq D \leq 2$ である。変数 D の代わりに $d = D - 1$ を使うと、区分放物線補間は次の式で与えられる。

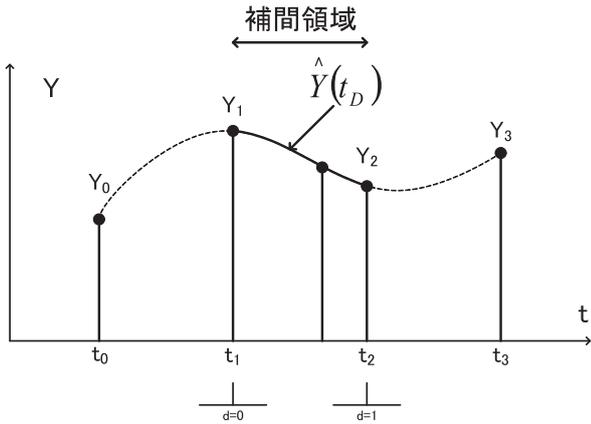


図2 4点の区分放物線補間

$$\hat{Y}(t_{d+1}) = (ad^2 - ad)Y_0 + (-ad^2 + (a-1)d + 1)Y_1 + (-ad^2 + (a+1)d)Y_2 + (ad^2 - ad)Y_3 \quad (3)$$

推定点が中央、すなわち $d = 1/2$ のとき、上記の式 (3) は

$$\hat{Y}(t_{1.5}) = -\frac{1}{4}aY_0 + \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4}a\right)Y_1 + \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4}a\right)Y_2 - \frac{1}{4}Y_3 \quad (4)$$

となる。この式は $a = 4G$ という置き換えで、特殊区分放物線補間そのものになる。

2.3. 特殊区分放物線補間

提案した特殊区分放物線補間は、上記で説明した区分放物線補間およびラグランジュ補間との間に図3のような包含関係がある。

時刻 $t = t_i, i \in \{0, 1, 2, 3\}$ における測定点 Y_i から、 $t = t_{1.5}$

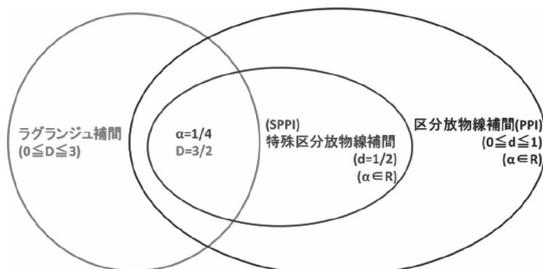


図3 4点補間 ($N = 3$) における分数遅延フィルタの各補間法の包含関係

における補間値 $\hat{Y}(t_D)$ を推定する。特殊区分放物線補間は次の式で与えられる。

$$\hat{Y}(t_{1.5}) = GY_0 + \left(\frac{1}{2} + G\right)Y_1 + \left(\frac{1}{2} + G\right)Y_2 - GY_3 \quad (5)$$

図4に特殊放物線補間の模式図を示す。ここで G の値を変えたときの補間性能を評価し、補間性能の予測を行った。

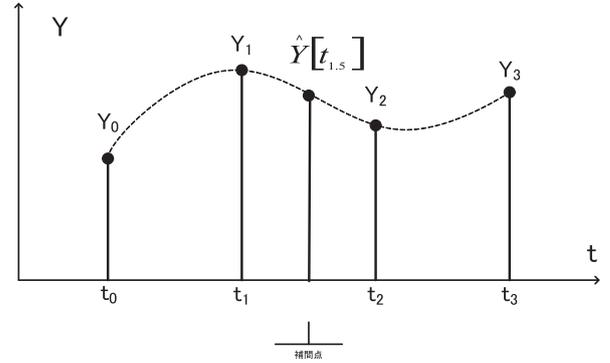


図4 特殊区分放物線補間

その結果、ハードウェアを考慮した推奨値は $G = 1/16 + 1/32 = 3/32 = 0.09375$ となった。これは $d = 0.5$ の区分放物線補間では式 (4) の $a = 3/8 = 0.375$ のことである。特殊区分放物線補間は $G = 1/16$ とした場合に、ラグランジュ補間と一致する。

3. パターン分離法

我々は生体内の内部拡散反射過程に Lambert-Beer 則を適用し、異なる2波長の分光画像から2種類の吸光物質の濃度分布画像を得る方法として二重固有値解析法 [3][4] に基づくパターン分離法を提案した [5]。本研究においては、このパターン分離法を用いるための分光画像の推定に適用した。

以下、パターン分離法の処理過程について説明する。

一般に波長 λ における、ある物質の吸光度は、次に示す Lambert-Beer 則によって与えられる。

$$-\log_{10} \left(\frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \right) = \varepsilon(\lambda)P \quad (6)$$

ここで $I_0(\lambda)$ は入射光強度、 $I(\lambda)$ は透過光強度である。また $\varepsilon(\lambda)$ は波長 λ におけるモル吸光係数 ($M^{-1}cm^{-1}$)、 P は吸光物質の濃度パターンである。内部拡散反射過程においては $I(\lambda)$ は反射光強度である。本研究では、酸化ヘモグロビン (以下 oxy-Hb) と還元ヘモグロビン (以下 deoxy-Hb) の2種類の吸光物質の処理過程を扱った。

いま、波長 λ_1 と λ_2 の2種類の波長の光源を用いてそれぞれの分光反射光強度 $I(\lambda_1)$ と $I(\lambda_2)$ を測定し、それぞれの波長 $\lambda_i (i = 1, 2)$ に対する吸光度を得る。 $\varepsilon_0(\lambda_i)$ を波長 λ_i における oxy-Hb のモル吸光係数、 $\varepsilon_D(\lambda_i)$ を波長 λ_i における deoxy-Hb のモル吸光係数とする。また P_0 と P_D をそれぞれ

れ oxy-Hb と deoxy-Hb の濃度パターンとする。

モル吸光係数 $\epsilon_O(\lambda_i)$ および $\epsilon_D(\lambda_i)$ は既知の値を用いる。 P_O と P_D はそれぞれ oxy-Hb と deoxy-Hb の濃度に比例した値である。カメラによる撮影で得られる輝度 $Y(\lambda_i)$ は反射光強度 $I(\lambda_i)$ に比例した値である。標準白色板は全ての波長領域で反射率 1 であるとすると、その輝度 $Y_S(\lambda_i)$ は入射光強度 $I_0(\lambda_i)$ に比例する。

従って式 (6) における入射光強度と反射光強度の比は $I_0(\lambda_1)/I(\lambda_1) = Y_S(\lambda_1)/Y(\lambda_1)$ および $I_0(\lambda_2)/I(\lambda_2) = Y_S(\lambda_2)/Y(\lambda_2)$ となり、 $i = 1, 2$ の連立方程式を P_O と P_D について解くと

$$\begin{pmatrix} P_O \\ P_D \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} \epsilon_D(\lambda_2) & -\epsilon_D(\lambda_1) \\ -\epsilon_O(\lambda_2) & \epsilon_O(\lambda_1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \log_{10} \frac{Y_S(\lambda_1)}{Y(\lambda_1)} \\ \log_{10} \frac{Y_S(\lambda_2)}{Y(\lambda_2)} \end{pmatrix} \quad (7)$$

ただし $\Delta = \epsilon_O(\lambda_1)\epsilon_D(\lambda_2) - \epsilon_O(\lambda_2)\epsilon_D(\lambda_1)$ となる。式 (7) を画像中の各画素について計算することにより、oxy-Hb と deoxy-Hb の濃度分布画像を得ることができる。この処理をパターン分離処理と呼ぶ。

4. 補間処理による画像推定実験

4.1. 分光画像の欠落画像推定

これまででは 2 台のカメラを用いて、時間 t_1 のときに波長 λ_1 の画像 R_1 と波長 λ_2 の画像 I_1 , t_2 のときに R_2 と I_2 … のように同期画像を取得していた。図 5 は、2 台のカメラで 2 種類の波長 λ_1 と λ_2 の画像を時間同期して分光画像を取得する様子を表した模式図である。取得した分光画像から物質濃度パターン P_O と P_D を導出している。

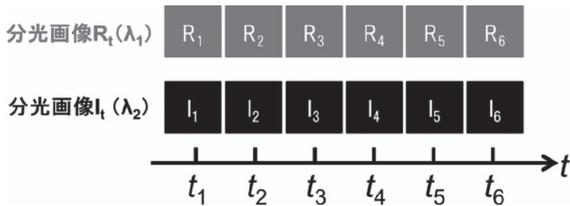


図 5 2 台のカメラで時間同期画像を取得

今回は、補間処理を用いて、1 台のカメラでヘモグロビン (Hb) 濃度分布動画像を取得する方法を検討した。具体的には、直線補間と特殊区分放物線補間を用いて、分光画像の欠落画像推定に適用した。

4.2. 直線補間による欠落画像推定

直線補間を分光画像の欠落画像推定への適用を検討した。図 6 は、1 台のカメラを用いて 2 種類の波長 λ を切り替えながら分光画像を取得する様子の模式図である。 R_1, I_2, R_3 と分光画像 R と I を交互に取得することを前提として検討を行った。

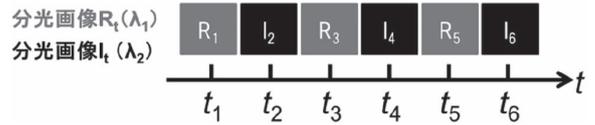


図 6 1 台のカメラで分光画像を取得

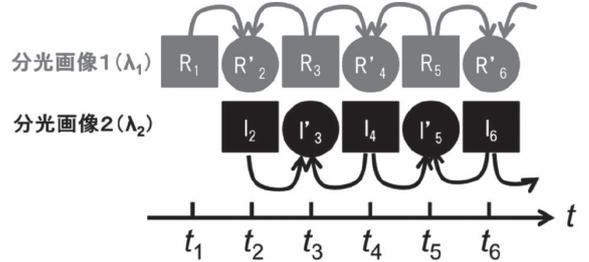


図 7 直線補間による画像推定

図 7 は直線補間による画像推定の様子を模式的に表した図である。四角で示された分光画像がカメラで取得した画像を示している。波長 λ_1 の分光画像は奇数番目の R_1, R_3, R_5, \dots 、波長 λ_2 の分光画像は偶数番目の I_2, I_4, I_6, \dots である。物質濃度パターンを得るためには同時刻の分光画像 1 と分光画像 2 が必要である。分光画像 1 では偶数番目の画像、分光画像 2 では奇数番目の画像を、前後の画像から直線補間処理を行って補間値画像を得ることとする。

4.3. 特殊区分放物線補間による欠落画像推定

次に特殊区分放物線補間を欠落画像推定への適用を検討した。図 8 は、パターン分離処理のため、特殊区分放物線補間による画像推定の様子を模式的に表した図である。

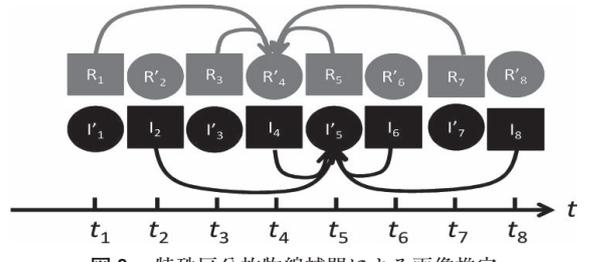


図 8 特殊区分放物線補間による画像推定

分光画像 1 の時刻 t_4 における推定輝度 R'_4 と分光画像 2 の時刻 t_5 における推定輝度 I'_5 を求める様子を模式化した。実験に使用した画像は 2 台のカメラを時間同期させて取得した波長 λ_1 と波長 λ_2 の分光画像である。波長 λ_1 の画像は奇数番目の R_1, R_3, R_5, \dots が原画像、波長 λ_2 の画像は偶数番目の I_2, I_4, I_6, \dots が原画像である。次に前後の画像から補間値画像を生成して欠けた画像を補う。波長 λ_1 では R'_2, R'_4, R'_6, \dots が補間値画像、波長 λ_2 では I'_3, I'_5, I'_7, \dots が補間値画像である。

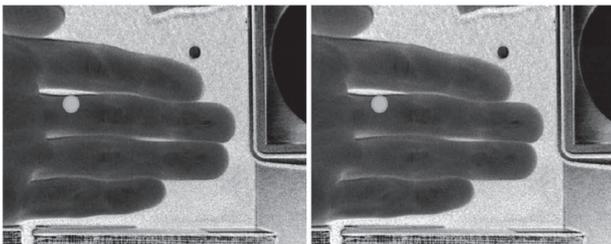
時刻 t_4 における推定輝度 R'_4 に、特殊区分放物線補間を採用し、

$$R_4^* = -G \cdot R_1 + \left(\frac{1}{2} + G\right) \cdot R_3 + \left(\frac{1}{2} + G\right) \cdot R_5 - G \cdot R_7$$

とした。Gはスペクトル解析結果からの推奨値、 $G=0.07$ を使用した。

4.4. 実験の結果と考察

波長 λ_1 の分光画像と波長 λ_2 の分光画像からパターン分離処理を行って oxy-Hb 濃度分布画像と deoxy-Hb 濃度分布画像を得る実験に適用した。時刻 t_2 においては R_2 と I_2 、時刻 t_3 においては R_3 と I_3 、のように各時刻において原画像と補間値画像の2枚から oxy-Hb 濃度分布画像と deoxy-Hb 濃度分布画像を生成した。図9に生成した oxy-Hb 濃度分布画像の例を示す。実験では2台のカメラで全時刻の画像を取得しているので、補間値画像に対応する元画像が存在する。これを期待値として原画像のみ（同期画像）から生成した oxy-Hb 濃度分布と比較した。



同期画像から生成 補間値画像から生成
図9 直線補間により得られた Hb 濃度分布画像

図9が得られた Hb 濃度分布画像である。左の画像が同期画像から生成した oxy-Hb 画像である。右が補間値画像から生成した oxy-Hb 画像である。取得した Hb 濃度分布画像から20点を計測し、誤差を算出した。

図10は oxy-Hb と deoxy-Hb の濃度について、その時間変化を示すグラフである。丸印 (○, ●) が oxy-Hb で、三角印 (△, ▲) が deoxy-Hb である。それぞれ、白抜き

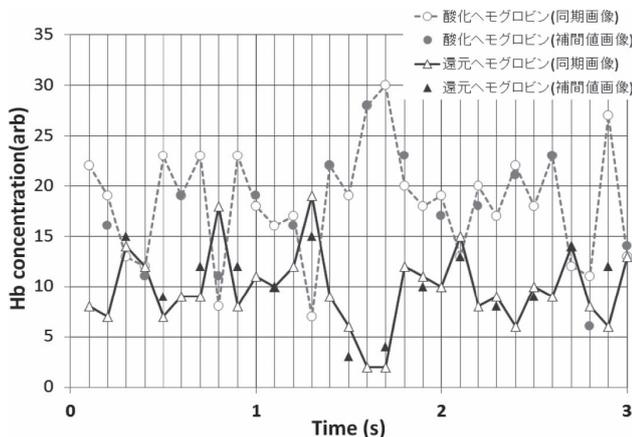


図10 Hb 濃度の時間変化

(○, △) が元の輝度データから導出された Hb 濃度で、塗りつぶし (●, ▲) が直線補間後の輝度データから導出された Hb 濃度である。理想的には、両者が一致するべきである。

図11は Hb 濃度の平均誤差である。oxy-Hb 濃度分布画像の20点を計測し、相対誤差を求めたところ、相対誤差は21.9%であった。直線補間という単純な方法であっても20%程度の誤差であり、適切な補間方法を使用すれば、大きな劣化のない Hb 濃度分布画像が得られる可能性がある。

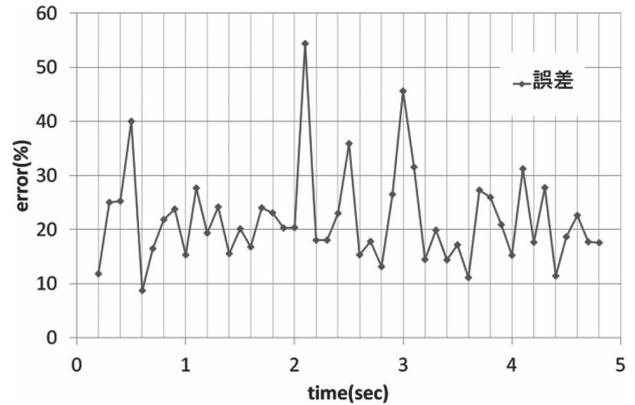
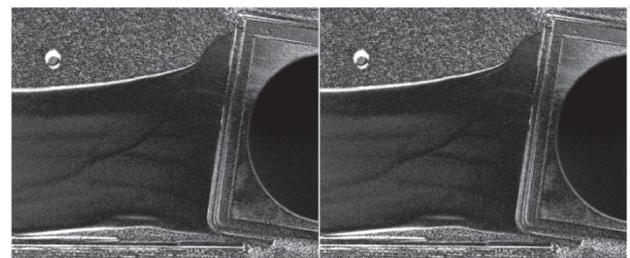


図11 Hb 濃度の平均誤差

波長 λ_1 の画像と波長 λ_2 の画像とからパターン分離処理を行って oxy-Hb 濃度分布画像と deoxy-Hb 濃度分布画像を得る実験に適用した。時刻 t_2 においては R_2 と I_2 、時刻 t_3 においては R_3 と I_3 、のように各時刻において原画像と補間値画像の2枚から oxy-Hb 濃度分布画像と deoxy-Hb 濃度分布画像を生成した。図12に生成した oxy-Hb 濃度分布画像の例を示す。



(a) 原画像から生成 (b) 補間値画像から生成
図12 特殊区分放物線補間による oxy-Hb 画像

直線補間と特殊区分放物線補間による補間画像を生成し、補間画像と期待値画像の輝度比較を行った。図13にその結果を示す。菱形 (◆) と四角 (■) は直線補間の結果を示し、それぞれ 760 nm の分光画像および 850 nm の分光画像における誤差を示す。三角 (▲) と罰点 (×) が特殊区分放物線補間の結果であり、それぞれ 760 nm の分光画像および 850 nm の分光画像における誤差を示す。直線補

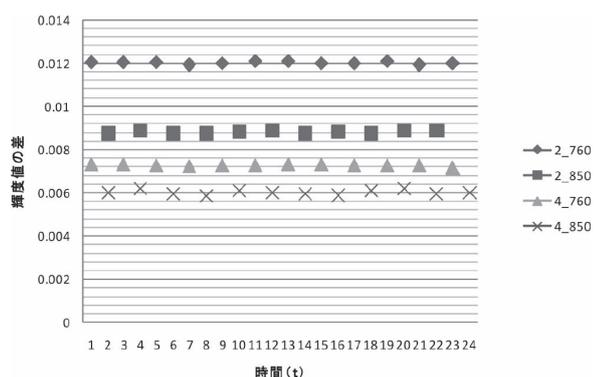


図13 元の画像（期待値）と補間画像の差分

間（◆と■）における輝度の平均偏差は約0.012および約0.009であった。それに対して，特殊区分放物線補間（▲と×）における輝度の平均偏差は約0.007および約0.006であった。特殊区分放物線補間による補間値画像は直線補間に比べて，大きく改善されることが示された。

5. まとめ

直線補間と特殊区分放物線補間をパターン分離処理の欠落画像推定に適用し Hb 画像を生成した。また，同期原画像だけを用いて生成した Hb 画像と比較を行った。補間画像であっても大きく劣化することなく Hb 濃度分布画像が得られる可能性があることを示した。今後は補間方法を最

適化するとともに，1台のカメラによる時分割分光画像の撮影方法を検討しなければならない。

文 献

- [1] 鬼迫一雅，柏原陣，波多野雅俊，“デジタル直交検波器の一構成法”，広島工業大学紀要 研究編，第45巻，pp. 213–217，2011年2月。
- [2] 柏原陣，“特殊区分放物線補間法によるインタポレータの性能改善”，広島工業大学大学院 修士論文，平成24年2月。
- [3] 河田聡編著，科学計測のためのデータ処理入門，CQ出版社（2002）. pp. 187–189.
- [4] K. Sasaki and S. Kawata, “Component pattern separation of unknown-mixture images by double eigenvector analysis,” J. Optical Society of America A, Vol. 7, No. 3 (1990). pp. 513–516.
- [5] 垣内優一，H18年度電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集，Vol. 57（2006）. p. 576.
- [6] S. Prahl, Optical Absorption of Hemoglobin, URL: <http://omlc.ogi.edu/spectra/hemoglobin>, Oregon Medical Laser Center (Oct. 2010).
- [7] 岩元睦夫，河野澄夫，魚住純，近赤外分光法入門，幸書房（1994）. p. 50.