

RGB カメラを用いた脳組織局所酸素飽和度のリアルタイムイメージング

Real-time imaging of regional cerebral tissue oxygen saturation using RGB camera

東京農工大院 BASE¹, 山形大院理工², 山形大医学部脳神経外科³

○西館泉¹, 加賀祐紀¹, 高田知郁¹, 佐藤学², 小久保安昭³

Tokyo Univ. Agri. Tech. BASE¹, Yamagata Univ.², Yamagata Univ. Med.³

°Izumi Nishidate¹, Yuki Kaga¹, Tomofumi Takada¹, Manabu Sato², Yasuaki Kokubo³

E-mail: inishi@cc.tuat.ac.jp

脳梗塞や脳虚血等の脳血管障害の治療では、血管バイパス手術による血流供給の改善を図る場合があり、血管の切開や縫合の際に、一時的な血流遮断を行う必要がある。その間、部分的に脳組織への血流が遮断される。脳は虚血侵襲に対し極めて脆弱であるため、血管バイパス手術中における一時的な血流遮断による脳虚血が脳に及ぼす影響や、脳組織の不可逆変化の予防について多くの研究がなされている。そのため、脳局所の組織酸素飽和度の空間的な情報を非接触かつリアルタイムに監視する機器の開発が望まれている。これまでに我々は、脳表面の RGB 画像から組織中の血行動態や光散乱特性を計測・可視化する方式について提案している[1]。本研究では、手術用顕微鏡に接続可能な小型汎用 RGB カメラから得られるカラー映像の色彩信号を利用した、術中リアルタイム脳組織酸素飽和度イメージングについて実験的検討を行った。

大脳皮質表面をデジタルカラー CCD カメラで撮像する場合、カメラ応答値 R , G , B は酸素化ヘモグロビン濃度 C_{HbO} , 脱酸素化ヘモグロビン濃度 C_{HbR} および等価散乱係数スペクトル $\mu_s(\lambda)$ に依存する。生体の軟組織の等価散乱係数スペクトル $\mu_s(\lambda)$ は波長 λ の増加に対して単調に減衰する分光特性を示すため、 $\mu_s(\lambda) = a\lambda^{-b}$ で表される累乗関数により近似することが可能である。指数 b は組織内の細胞および細胞内小器官の数密度およびサイズ分布を反映する散乱パラメータである[2, 3]。 C_{HbO} と C_{HbR} から換算される吸収係数スペクトル $\mu_a(\lambda)$ と $\mu_s(\lambda)$ を入力パラメータとして、光拡散方程式や光伝搬モンテカルロシミュレーション等の光伝搬モデルにより大脳皮質の分光反射率 $O(\lambda)$ を算出することができる。本研究では C_{HbO} , C_{HbR} , b , a の様々な組み合わせの下で、光伝搬モンテカルロシミュレーションにより大脳皮質の分光反射率 $O(\lambda)$ を算出し、三刺激値 XYZ を算出することで任意の C_{HbO} , C_{HbR} とそれらに対応する X , Y , Z の複数データセットを生成した。これらのデータセットに対して重回帰分析を行なうことで、重回帰式を統計的に求め、重回帰係数をマトリクスの要素として利用する。以上のプロセスを RGB 画像の各画素に適用することで、 C_{HbO} および C_{HbR} の空間分布が画像として得られる。また、総ヘモグロビン濃度 C_{HbT} と酸素飽和度 StO_2 はそれぞれ $C_{HbT} = C_{HbO} + C_{HbR}$, $StO_2 = 100 \times (C_{HbO} / C_{HbT})$ のように算出する[1]。本研究では、MATLAB Simulink を用いて上述のプロセスに基づく StO_2 のリアルタイム表示のシステムを設計し、ラットを用いた動物実験による検証を行った。

実験では、Isoflurane 吸入麻酔下の Wistar ラットを頭部固定装置に固定し、歯科用ドリルを用いて頭蓋骨に開窓し脳表面を露出した。白色 LED 光源による照明下でラットの吸入酸素濃度 (FiO_2) を高酸素状態 (40%) から低酸素状態を経て無酸素状態 (0%) まで 5 分おきに段階的に低下させ、脳表面の RGB 映像を手術用顕微鏡に搭載した RGB カメラにより 30fps で取り込み、 StO_2 のリアルタイム表示と動画ファイルの保存を行った。通常酸素呼吸時 (21%) の StO_2 の値は動脈領域、実質領域、静脈領域では低値の順で高く、いずれの領域の StO_2 の値も FiO_2 の減少に追従するような変化を示し、呼吸停止後では 0% に近づくことを確認した。講演では、開発したシステムを用いてヒト開頭手術中の脳組織表面の StO_2 のリアルタイム表示を行った例についても報告する。

謝辞：本研究の一部は公益財団法人精密測定技術振興財団「精密測定技術向上のための調査・研究事業」および JSPS 科研費 JP20H04513 の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] A. Mustari, *et. al.*, Int. J. Mol. Sci. **19**, 491 (2018).
- [2] J. R. Mourant *et. al.*, Appl. Opt. **36**, 949 (1997).
- [3] X. Wang *et. al.*, J. Biomed. Opt. **10**, 051704 (2005).