

Construction of spectral reflectance database and its application to the evaluation of light absorption in skin tissue

その他（別言語等） のタイトル	分光反射率データベースの構築と皮膚組織における 光吸収の評価への応用
著者	KAUSTAV Das
学位名	博士（工学）
学位の種別	課程博士
報告番号	甲第470号
研究科・専攻	工学専攻
学位授与年月日	2021-03-23
URL	http://doi.org/10.15118/00010395

氏 名 Kaustav Das (カスタフ ダス)

学位論文題目 Construction of spectral reflectance database and its application to the evaluation of light absorption in skin tissue
(分光反射率データベースの構築と皮膚組織における光吸収の評価への応用)

論文審査委員 主査 教授 相津 佳永
教授 花島 直彦
准教授 加野 裕
准教授 湯浅 友典

論文内容の要旨

拡散分光法は可視から近赤外波長領域におけるヒト皮膚の分光反射率を取得する手法として広く使われている。分光反射率のスペクトル形状は皮膚組織における光の吸収と散乱に依存し、特にメラニン、ヘモグロビン等の色素が光吸収に強く影響する。そのため、測定したスペクトルから吸収係数または色素濃度を評価する技術が皮膚科学や化粧品開発分野で大きく期待されている。従来から多変量解析を利用した手法が多く研究されているが、設定モデルが限定的なため未だ実用に至っていない。本論文では、大量のシミュレーションデータから構築した分光反射率データベースを用いて、皮膚組織における吸収の変化を効率的に検出する新規手法に関する研究を行った。

最初に、これまで提案されてきた生体組織における様々な光エネルギーの伝搬理論について概説し、皮膚の分光反射率計測法の現状と本論文の目的、概要を示した。第2章では、ヒト皮膚組織の構造、組織内光伝搬の解析、ならびにモンテカルロ法に基づく生体組織内の光伝搬演算を中心に、本論文で扱う基礎的な原理を述べた。

第3章では、皮膚分光反射率の適切な実測を目指した積分球における最適検出領域について、実験とシミュレーションにより調査を行った。皮膚内部を伝搬し再放出された拡散光の測定においては、特に検出領域径がスペクトル形状に大きく影響する。本章では、皮膚の9層構造モデルによるスペクトル形状と光子フルーエンスによるエネルギー分布の考察から、適切な検出径条件を初めて定量的に明らかにし、ヒト前腕部皮膚に対する実験により、その効果を確認した。この結果は、第5章における実験に反映されている。

第4章では、9層構造皮膚モデルを用いたモンテカルロ法による光伝搬計算において、独自の緩和型グルーピング法を新たに考案した。これより、応用上重要となる吸収係数と散乱係数を変動パラメータとする分光反射率の効率的なデータベース構築法を開発した。また、

構築したデータベースにおいて典型的な 5 種のスペクトル変化形態を見出すとともに、点像分布関数 (PSF) によるスペクトル形態弁別アルゴリズムを提案した。

第 5 章では、第 4 章で明らかにした 5 種のスペクトル変化形態を、寒天母材の人工皮膚モデル (ファントム) による実験で検証した。さらにヒト前腕部を対象とした組織血液量変化実験を実施し、従来から知られる重回帰分析との比較も含め、データベースによるマイニングから同定した結果が、皮膚組織における吸収変化を簡便かつ効果的に検出可能であることを実証した。

最後に第 6 章では、本論文の内容と成果を総括し、まとめとした。

ABSTRACT

Diffuse spectroscopy is widely used as a tool to measure diffuse spectral reflectance curve from human skin in visible to near-infrared wavelength region. The spectral shape of such reflectance curve depends on light absorption and scattering in skin tissue. Particularly, chromophores such as melanin and hemoglobin affects the light absorption, it is much expected to evaluate absorption coefficients or chromophore concentrations from a measured spectrum in the fields of dermatology and cosmetic industry. Many researchers have studied various techniques, including multi-variate analysis, however their mathematical models are yet limited to fewer skin conditions.

This dissertation is aimed at the development of a novel method for evaluation of change in light absorption in skin tissue by using spectral reflectance database which consists of a number of simulated data. Chapter 1 briefly reviews the background of light propagation in biological tissue and introduces the synopsis of the dissertation. Chapter 2 presents the fundamentals of the skin tissue structure and the analysis of light propagation in tissue including Monte Carlo method, and the other basic theories and principles that are integral to this dissertation.

Chapter 3 highlights the effect of a detecting aperture size on spectral reflectance measurements of human skin through numerical simulation and experiments. To find the appropriate size, Monte Carlo simulation of light propagation in the nine-layered skin tissue model was employed for generating spectral reflectance curves and photon fluence maps. Spectrophotometric experiments were also carried out on the human forearm. This study becomes functional for the experiments made in Chapter 5.

Chapters 4 and 5 are assigned to the proposed method of spectral mining from the

spectral reflectance database to evaluate unknown optical parameters in skin. Chapter 4 treats construction of the database which consists of simulated spectra with varying absorption and scattering coefficients. To construct the database efficiently, the moderate grouping method is newly proposed, in which the absorption coefficient and scattering coefficient are preferentially varied. This grouping method resulted in five typical types of spectral change, and leads to a potential spectral classification using the point spread function

In Chapter 5, the five types of spectral change are validated by observing measured spectra from the three-layered agarose-gel phantom. Pressure-cuff occlusion and hot water immersion experiments are carried out on human forearm to confirm the applicability to evaluation of change in absorption coefficients. The results are successfully compared with those obtained by the conventional multiple regression analysis. Finally, use of application-based customized database is newly proposed as a promising way to suppress the ambiguity contained in the original database.

Chapter 6 provides an overall summary of the various results obtained by studies executed in this dissertation.

論文審査結果の要旨

皮膚科の初期診断や化粧品開発時の効能評価は、これまで医師の経験的視診や研究者の感応試験が主流であったが、近年、皮膚のアピランスを光伝搬特性に基づき解析する研究が盛んになり、中でも分光反射率による客観的、定量的計測法が新たに注目されている。特に、皮膚ガンや各種皮膚疾患、精神作用や加齢による皮膚性状変化などを反映する組織内色素異常に関して、安全かつ高品質な定量計測法の要求が高まっている。光を利用した計測法は生体に対して非接触、無侵襲という大きな特長を有し、中でも分光学的手法は色素による光吸収特性や皮膚色を反映することから、実用面からの期待が大きい。しかし現実には、計測した分光反射率から皮膚組織内部に埋もれた腫瘍や色素濃度異常を分離検出することは容易ではなく、現状の解析モデルでは結果の信頼性、手法の客観性や汎用性における課題が多く、広く一般に使える手法の開発が期待されている。

本論文は、こうした問題に対して、皮膚内部色素に由来する光吸収変化を短時間に定量計測可能なデータベース型解析法を新規に提案している。特に、従来の光拡散方程式や多変量解析を用いる手法は多様な皮膚条件への適用や拡張が困難であったが、提案手法はデータベースの自在な拡張により柔軟性、汎用性を備えている点が注目すべき特長である。本論文では、信頼性の高い多層構造皮膚組織モデルを導入し、数値シミュレーションによりデータ

ベースを構築している。まず、その基本となる皮膚の特徴に適した分光反射率計測の検出開口条件を、スペクトルおよび光子フルーエンスの数値シミュレーション、ならびに積分球計測に基づく実験により定量的に明らかにしている。

次に、多層構造皮膚モデルによる数値シミュレーションに、新たな緩和型グルーピング法を導入し、構築と拡張の容易さ、ならびにデータ検索の効率性を兼ね備えた分光反射率データベースを新規に開発している。さらに、構築したデータベースが有するスペクトル変化形態をグルーピングに基づき詳細に考察し、データ検索時に不確定性が存在する特性の分析と新たな弁別アルゴリズムの提案を行っている。

最後に、データベースに基づく生体皮膚の新たな光吸収計測法を新規提案し、ヒト前腕部を対象とした組織血液量変化の計測に適用することで、皮膚組織における光吸収変化を簡便かつ効果的に検出可能であることを実証している。

以上、本研究で得られた成果は、生体組織の生理機能と状態を経皮的に診断支援する装置の開発などに活かされることが期待され、光計測学の応用分野に寄与するところ大であると考えられる。よって、本論文著者は博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。